

Faculté des Sciences Exactes et d'Informatique

Département de Mathématiques et informatique

Filière : Informatique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Pour l'Obtention du Diplôme de Master en Informatique

Option : **Réseaux et Systèmes**

Présenté par :

CHALABI Hadjer

Et

NAOUI Wissam

THÈME :

**L'utilisation de l'approche multicritères pour la sélection des
alternatives de désalinisation des sols.**

Soutenu le : 14/06/2025

Devant le jury composé de :

SEHABA.K	docteur	Université de Mostaganem	Président
LAZEB.A	docteur	Université de Mostaganem	Examineur
LAREDJ.M.A	docteur	Université de Mostaganem	Encadreur

Année Universitaire 2024-2025

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant, pour nous avoir donné la force, la persévérance et la patience nécessaires à L'accomplissement de ce travail.

Nous remercions chaleureusement notre encadrant, **Mr Laredj.Adnane**, pour sa disponibilité, ses conseils avisés et son accompagnement rigoureux tout au long de ce mémoire.

Nos remerciements les plus sincères vont également à notre Co-encadrant, **Mr Mohammedi.Taibi.Sbir**, pour son investissement, sa bienveillance et le soutien précieux qu'il nous a apporté à chaque étape.

Nous remercions l'ensemble des membres du jury, pour leur temps, leur lecture attentive et leurs remarques constructives qui contribueront sans doute à L'amélioration de notre travail.

Nous exprimons également notre reconnaissance à nos **familles**, pour leur soutien moral, leur patience et leur confiance, ainsi qu'à toutes les personnes qui nous ont encouragées et accompagnées de près ou de loin.

Dédicace

À toi, ma douce mère, ton amour a été mon refuge, ta foi en moi une lumière constante. Tes prières silencieuses m'ont portée plus loin que je ne l'aurais cru possible.

À toi, mon père, pour ta patience, ta force discrète et ton regard toujours fier, même quand je doutais.

À ma sœur Nesrine et mon petit frère Hadj Mohamed, vos rires, vos Encouragements et votre affection m'ont accompagnée à chaque étape. Vous êtes mon soutien le plus tendre.

À Wissam, ma binôme, pour avoir partagé ce chemin avec détermination, complicité et courage. Ta présence a transformé les difficultés en défis partagés.

À Houda, ma meilleure amie, merci d'avoir toujours été là, avec ton écoute, tes mots justes et ton amitié précieuse.

Enfin, A la jeune femme que je suis, celle qui a avancé entre les tempêtes, le cœur parfois tremblant, mais l'âme obstinée.
Tu es la preuve qu'on peut tomber mille fois et se relever chaque fois, plus digne.

Et à toutes celles qui cherchent leur place, à celles qui espèrent en silence, ce travail vous est dédié.

Hadjar Chalabi

Dédicace

Je dédie ce mémoire à ma famille, dont le soutien constant et les encouragements ont été essentiels tout au long de mon parcours universitaire.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes encadrants, M. Laredj Adhane et M. Mohamedi Taibi Sabir, pour leur encadrement rigoureux, leur disponibilité et la qualité de leurs conseils.

Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble du corps enseignant de l'Université Abdelhamid Ibn Badis - Mostaganem, pour la formation de qualité qu'il m'a dispensée.

Enfin, je dédie ce travail à mon binôme, Chalabi Hadjar, pour son sérieux, son implication et l'excellente collaboration dont elle a fait preuve tout au long de cette recherche.

Naoui Wissam

Résumé

La salinisation des sols représente un enjeu majeur dans les régions semi-arides, compromettant la stabilité des infrastructures et la durabilité des projets d'aménagement. Ce mémoire s'inscrit dans une démarche de réhabilitation des sols salinisés, en proposant une approche multicritère pour sélectionner les techniques de désalinisation les plus adaptées dans un contexte de génie civil, avec un cas d'étude dans la région de Bordjia.

Après avoir étudié les mécanismes de salinisation et les différentes méthodes de traitement (lessivage, gypse, phytoremédiation, substitution du sol), une évaluation multicritère a été réalisée à l'aide de cinq méthodes d'aide à la décision : AHP (pondération), SAW, TOPSIS, PROMETHEE II et ELECTRE I (classement des alternatives). Les critères retenus portent sur l'efficacité, le coût, la durabilité, l'impact environnemental, l'occupation de l'espace et l'amélioration du sol.

Une application numérique, DMCT (Desalination Methods Comparison Tool), a été développée et personnalisée pour intégrer ces méthodes et automatiser l'analyse. Comparée à l'environnement RStudio, DMCT s'est révélé plus accessible, rapide et visuel, facilitant la prise de décision pour les ingénieurs et décideurs.

Les résultats obtenus montrent une cohérence entre les méthodes, avec une convergence vers le lessivage comme solution optimale. Le mémoire souligne ainsi l'intérêt de l'approche multicritère et de l'outil DMCT pour orienter les choix techniques dans les projets de réhabilitation des sols dégradés.

Mots-clés : MCDA/MCA, AHP, PROMETHEE II, TOPSIS, SAW, ELECTRE I, AMD, MADM, AMCD, GEFT, DMCT, FAO, CE, ESP

Abstract

Soil salinization is a major issue in semi-arid regions, threatening the stability of infrastructure and the sustainability of development projects. This thesis focuses on the rehabilitation of saline soils by proposing a multi-criteria decision-making (MCDM) approach to identify the most suitable desalinization techniques for civil engineering applications, based on a case study in the Bordjia region.

Following a detailed analysis of salinization mechanisms and desalinization methods (leaching, gypsum, phytoremediation, soil substitution), a comparative evaluation was carried out using five decision-making tools: AHP (for weighting criteria), and four ranking methods—SAW, TOPSIS, PROMETHEE II, and ELECTRE I. The evaluation criteria included efficiency, cost, durability, environmental impact, space requirement, and soil improvement.

A custom application named DMCT (Desalination Methods Comparison Tool) was developed to automate the analysis and integrate all MCDM methods. Compared to RStudio, DMCT proved to be more accessible, faster, and visually intuitive, offering engineers and decision-makers a practical decision support tool.

The results demonstrated a strong consistency among the methods, with leaching emerging as the most effective solution. This study highlights the relevance of multi-criteria analysis and the value of DMCT in supporting technical decisions for soil rehabilitation in civil engineering contexts.

Keywords: MCDA/MCA,AHP,PROMETHEE II,TOPSIS,SAW,ELECTRE I,AMD,MADM,AMCD,GEFT,DMCT,FAO,CE,ESP

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure 1-1	Superficie affectée par la salinité dans les différentes régions du monde. [6]	14
Figure 1-2	Répartition des sols salins du nord de l'Algérie. [11]	15
Figure 1-3	Représentation schématique de la distribution de quelques domaines pédologiques dans le Nord de l'Algérie [13]	16
Figure 1-4	Seuils critiques d'après Montoroi [23]	21
Figure 1-5	Le cycle des sels dans le sol. [24]	22
Figure 1-6	Duchaufour [26]	23
Figure 1-7	(A, B, C, D). Les différents types de profils salins. [21]	24
Figure 3-1	Type de fonction de préférences [85]	68
Figure 3-2	Le déroulement de la méthode ELECTRE I [86]	73
Figure 3-3	ELECTRE II [86]	74
Figure 3-4	Hierarchie de l'AHP [93]	75
Figure 4-1	Graph à barre des poids des critères (méthode AHP)	90
Figure 4-2	Graph à barre de la méthode SAW	93
Figure 4-3	Graph de surclassement SAW	93
Figure 4-4	Graph à barre de la méthode TOPSIS	95
Figure 4-5	Graph de surclassement TOPSIS	95
Figure 4-6	Graphe à barre représentant le flux net de surclassement de PROMETHEE II	98
Figure 4-7	Graphe de surclassement PROMETHEE II	98
Figure 4-8	Graphe dominance de la méthode ELECTRE I	100
Figure 4-9	Comparaison des classements obtenus par chaque méthode MCDA	101
Figure 5-1	Écran d'accueil de RSTUDIO	109
Figure 5-2	Importation des données	110
Figure 5-3	Affichage de la matrice de décision avec RSTUDIO	111
Figure 5-4	Graph Pie chart des poids AHP par RSTUDIO	112
Figure 5-5	Visualisation du flux net de PROMETHEE II par RSTUDIO	112
Figure 5-6	Visualisation des scores de TOPSIS par RSTUDIO sous forme d'un graphe à barres	113

Figure 5-7	Visualisation des scores obtenus par la méthode SAW dans RSTUDIO	114
Figure 5-8	Matrices concordance, discordance et dominance d'ELECTRE I	115
Figure 5-9	Page d'accueil de DMCT	117
Figure 5-10	Choix des alternatives	119
Figure 5-11	La matrice de performance	121
Figure 5-12	Choix des méthodes multicritères	122
Figure 5-13	Matrice de comparaison par pair	123
Figure 5-14	Résultat de la méthode SAW	124
Figure 5-15	Résultats de la méthode TOPSIS	125
Figure 5-16	Choix des fonctions de préférences pour chaque critère de la méthode PROMETHEE II	126
Figure 5-17	Résultats de la méthode PROMETHEE II	126
Figure 5-18	Frame permettant de choisir les seuils de la méthode ELECTRE I	127
Figure 5-19	Résultats de la méthode ELECTRE I	127

Liste des Tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau 1	Les différentes problématiques de décision [4]	64
Tableau 2	L'échelle de comparaison par paire de SAATY [91]	77
Tableau 3	Matrice de comparaison par paires des critères selon l'expert	89
Tableau 4	Matrice des critères avec leurs poids AHP	90
Tableau 5	Matrice de performances évaluent les quatre méthodes de désalinisations	92
Tableau 6	Résultats de SAW (Scores pondérés et classement des alternatives)	92
Tableau 7	Les distances (D+, D-) de TOPSIS	95
Tableau 8	Fonctions de Préférences PROMETHEE II Choisis pour Chaque Critère	97
Tableau 9	Les flux (positifs, négatifs et nets) selon la méthode PROMETHEE II	97
Tableau 10	Matrice de dominance	99
Tableau 11	Matrice de discordance	99
Tableau 12	Matrice de dominance	99
Tableau 13	Classement des alternatives selon les méthodes multicritères	102
Tableau 14	Comparaison entre le classement de TOPSIS, SAW, et Pi	102
Tableau 15	Classement obtenus des alternatives par chaque méthode multicritères en utilisant RSTUDIO	116
Tableau 16	Comparaison fonctionnelle entre l'outil DMCT et l'environnement RStudio pour l'analyse multicritère	130

Liste des Abréviations

Abréviation	Signification	Explication simple
MCDA / MCA	Multi-Criteria Decision Analysis / Multi-Criteria Analysis	Analyse multicritère, méthode pour comparer plusieurs options selon plusieurs critères.
AHP	Analytic Hierarchy Process	Méthode pour déterminer les poids relatifs des critères par comparaison par paires.
PROMETHEE	Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations	Méthode de surclassement utilisée pour classer les alternatives selon les critères.
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution	Méthode qui classe les options selon leur proximité à la solution idéale.
ELECTRE	ELimination Et Choix Traduisant la REalité	Méthode de surclassement pour éliminer les alternatives moins bonnes.
SAW	Simple Additive Weighting	Méthode où chaque critère est pondéré et les scores sont additionnés pour chaque alternative.
AMD	Analyse Multicritère de Décision	Processus d'évaluation et de choix basé sur plusieurs critères.
MADM	Multi-Attribute Decision Making	Prise de décision multicritère basée sur plusieurs attributs (critères).
AMCD	Aide à la Modélisation et à la Construction Décisionnelle	Outil ou approche pour aider à formaliser les problèmes de décision complexes.
GEFT	Groupe d'Experts pour la Formalisation de la Tâche	Méthode ou outil collaboratif pour structurer un problème de décision.

Abréviation	Signification	Explication simple
DMCT	Desalination Methods Comparison Tool	Outil informatique développé pour comparer les méthodes de désalinisation.
FAO	Food and Agriculture Organization (ONU)	Organisation qui fournit des normes et recommandations, notamment sur la salinité des sols.
CE	Conductivité Électrique	Mesure de la concentration en sels dissous dans le sol ou l'eau.
ESP	Exchangeable Sodium Percentage (Pourcentage de sodium échangeable)	Pourcentage de sodium présent dans la capacité d'échange cationique du sol, indicateur de salinité sodique.

Liste des équations

Équation	Numéro	Page
$1\text{dS/m}=1\text{mS/cm}=1\text{mmhos/cm}=0,1\text{S/m}=1000\mu\text{S/cm}$	1-1	22
$\text{mmol}(+)/\text{L}=10\times\text{CE}(\text{endS/m})$	2-1	22
$\text{PO}=0,36\times\text{CE}(\text{endS/m})$	3-1	22
$\text{mg/L}=640\times\text{CE}(\text{endS/m})$	4-1	22
ESP Na échangeable (en meq/l)/CEC (en l)	5-1	30
$\text{SAR}=\text{Na}+/(\text{Ca} + ++\text{Mg} + +)/2)^{0.5}$	6-1	30
$\text{Na}(\text{adsorbé}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}(\text{solution}) + \text{OH}^-$	7-1	31
$\text{Na}(\text{échangeable}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaOH} + \text{H}(\text{solution})$	8-1	33
$\text{NaOH} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{NaHCO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3$	9-1	34
$\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaSO}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	10-2	55
$\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	11-2	55
$2\text{S} + 3\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2\text{SO}_4$	12-2	56
$\text{opt } g_x : x \in A$	13-3	62
$\text{opt } g_1(x), g_2(x), \dots, g_m(x) : x \in A$	14-3	62
$\text{Max}(g_1(x), g_2(x), \dots, g_k(x)), x \in A$	15-3	66
$\text{Max } U(x), x \in A$	16-3	66
$U_x = U(g_1(x), g_2(x), \dots, g_j(x), \dots, g_k(x))$	18-3	66
$U_x = \sum_{j=1}^k \lambda_j \cdot g_j(x)$	19-3	66
$0 \leq P(a,b) \leq 1$	20-3	68
$P(a,b) = P(b,a)$	21-3	68
$IP(a,b) = \sum_{j=1}^n w_j \cdot p_j(a,b)$	22-3	69
$d_{ij} = f_j(a_i) - f_j(a_k)$	23-3	71
$d_{ij} = f_j(a_i) - f_j(a_k)$	24-3	71
$\pi(a_i, a_k) = \sum_{j=1}^n w_j \cdot P_j \cdot (f_j(a_i) - f_j(a_k))$	25-3	71
$\Phi^+(a_i) = 1/(n-1) \sum_{k \neq 0} \pi(a_i, a_k)$	26-3	71
$\Phi^-(a_i) = 1/(n-1) \sum_{k \neq 0} \pi(a_k, a_i)$	27-3	71
$\Phi(a_i) = \Phi^+(a_i) - \Phi^-(a_i)$	28-3	72
$\text{Ca}, b = \sum_{j \in j^+(a,b)} w_j$	29-3	73
$CI = (\lambda_{\max} - N)/(N - 1)$	30-3	79
$\lambda_{\max} = \text{moyenne de valeurs } (A \cdot \omega \omega)$	31-3	79
$CR = CI/RI$	32-3	79
$v_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}$	33-3	80
$\sum_{j=1}^n w_j = 1$	34-3	81
$v_{ij\text{pond}} = w_j \cdot v_{ij}$	35-3	81
$A^+ = \max(v_{ij}) \text{ si bénéfice ; } \min(v_{ij}) \text{ si coût}$	36-3	81
$A^- = \min(v_{ij}) \text{ si bénéfice ; } \max(v_{ij}) \text{ si coût}$	37-3	81
$S_i^+ = \sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2$	38-3	82
$S_i^- = \sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2$	39-3	82
$S_i^+ = \sum_{j=1}^n v_{ij} - v_j^+ $	40-3	82
$S_i^- = \sum_{j=1}^n v_{ij} - v_j^- $	41-3	82
$S_i^+ = \max_j v_{ij} - v_j^+ $	42-3	82
$S_i^- = \max_j v_{ij} - v_j^- $	43-3	82
$P_i = S_i^- / (S_i^+ + S_i^-)$	44-3	82
$r_{ij} = x_{ij} / \max(x_j)$	45-3	83
$r_{ij} = \min(x_j) / x_{ij}$	46-3	84
$v_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot r_{ij}$	47-3	84

Table des matières

1	Chapitre 1	10
1.1	Introduction	10
1.2	Définition	10
1.3	Les caractères des sels	12
1.3.1	La solubilité des sels	12
1.3.2	Le mouvement des sels	12
1.4	La salinisation dans le monde	13
1.5	La salinisation en Algérie	14
1.6	Les mécanismes de la salinisation	16
1.7	La salinisation	17
1.7.1	La salinisation primaire	17
	Répartition stratigraphique	18
	Dynamique actuelle	18
1.7.2	La salinisation secondaire	18
1.8	La sodisation	19
1.9	L'alcalinisation	20
1.10	Dynamique de la salinité dans les sols	21
1.11	Le processus de salinisation et d'alcalinisation des sols	22
1.11.1	Formes de présence du sodium dans les sols	22
	Combinaisons chimiques : $NaCl$, Na_2SO_4	22
1.11.2	Les sols sal sodiques	23
1.11.3	Typologie des profils salins	24
	-La forme A : est une salinisation	24
1.12	Conclusion	30
2	CHAPITRE 2	40
2.1	Introduction	40
2.2	Les méthodes physiques de désalinisation	41
2.2.1	Grattage mécanique du sol (Scraping)	41
2.2.2	Excavation des sols salinisés	43
2.3	Les méthodes hydrauliques de désalinisation	44
2.3.1	Lixiviation (Leaching)	45
2.3.2	Lessivage de surface	47
2.3.3	Flushing (Rinçage intensif)	48

2.3.4	Drainage (souterrain ou de surface).....	49
2.4	Méthodes Chimiques de Désalinisation des Sols	51
2.4.1	Application du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).....	51
2.4.2	Application d'acides minéraux (acide sulfurique, acide phosphorique)	52
2.4.3	Apport de soufre élémentaire.....	54
2.4.4	Utilisation de chlorure de calcium (CaCl_2).....	54
2.5	Méthodes biologiques de désalinisation des sols.....	56
2.5.1	Phyto-désalinisation (halophytes).....	56
2.5.2	Utilisation de micro-organismes bénéfiques.....	57
2.6	Conclusion.....	58
3	Chapitre 3 : Méthodes multicritères d'aide à la décision.....	59
3.1	Introduction	59
3.2	Les méthodes d'aide à la décision multicritères (MCDA)	60
3.2.1	Notion de problématique de décision	62
3.3	Classification des méthodes.....	64
3.3.1	Les méthodes d'agrégation	64
3.3.2	Méthodes interactives	65
3.3.3	Méthodes de surclassement	66
3.4	Les différentes méthodes MCDA.....	66
3.4.1	Méthode PROMETHEE II	66
3.4.2	Famille des méthodes ELECTRE.....	70
3.4.3	Méthode AHP	75
	Étape 1 : Structurer le problème dans une hiérarchie	76
	Étape 2 : Effectuez le calcul de priorité	76
	Étape 3 : Vérifier la cohérence de la matrice de comparaison par paires	77
	Étape 4 : Synthétiser les priorités finales.....	78
3.4.4	Méthode TOPSIS.....	78
	Étape 1 : Normalisation de la matrice de décision.....	79
	Étape 2 : Pondération des critères.....	79
	Étape 4 : Calcul des distances aux solutions idéales	80
2.	Distance de Manhattan (ou city block)	81
	Étape 5 : Calcul de la proximité relative.....	81
	Étape 6 : Classement des alternatives	82
3.4.5	Méthode SAW (Simple Additive Weighting)	82
1.	Identification des alternatives et des critères	82
2.	Construction de la matrice de décision	82

3. Normalisation de la matrice de décision	82
4. Application des poids	83
5. Classement des alternatives	83
3.5 Travaux antérieurs liés à la sélection des méthodes de désalinisation par approche multicritère.....	83
3.5.1 Études sur la gestion et la réhabilitation des sols dégradés.....	84
3.5.2 Thèses académiques pertinentes	84
3.5.3 Travaux sur les méthodes de pondération en AMCD	85
3.5.4 Projets collaboratifs de référence.....	85
3.6 Conclusion.....	86
4 Chapitre 3	88
4.1 Introduction.....	88
4.2 Pondération des critères par la méthode AHP	88
4.2.1 Matrice de comparaison par paires	89
4.2.2 Calcul des poids.....	90
4.2.3 Vérification de la cohérence	91
4.2.4 Application des méthodes multicritères.....	91
4. Noyau (Kernel) : Lessivage	99
4.3 Graphe de comparaison des classements obtenu par chaque méthode MCDA	101
4.4 Résultats, observations et discussion	101
4.4.1 Présentation des résultats des méthodes multicritères	101
4.4.2 Discussion critique.....	103
4.5 Conclusion.....	104
5 Chapitre 5	105
5.1 Introduction.....	105
5.2 Environnement de travail et outils utilisés.....	106
5.2.2 Présentation de l’outil DMCT adapté	116
5.2.3 Analyse critique des résultats entre RStudio et DMCT.....	129
5.3 Perspectives.....	131
5.4 Conclusion du chapitre.....	132

Introduction Générale

La salinisation des sols constitue l'un des défis majeurs auxquels sont confrontés les ingénieurs dans les régions arides et semi-arides, en particulier lorsqu'il s'agit d'aménager de nouvelles zones industrielles ou agricoles. Ce phénomène, résultant de l'accumulation excessive de sels solubles dans les couches superficielles du sol, altère non seulement les propriétés physico-chimiques du sol, mais compromet aussi la stabilité des infrastructures, la durabilité des matériaux de construction et la portance des fondations.

Face à cette problématique, plusieurs techniques de désalinisation ont été développées, allant des approches physiques et chimiques aux méthodes biologiques et agronomiques. Toutefois, leur mise en œuvre nécessite une évaluation rigoureuse prenant en compte un ensemble de critères souvent contradictoires : efficacité, coût, impact environnemental, faisabilité technique, etc. C'est dans ce cadre que les méthodes d'aide à la décision multicritère (MCDA) trouvent toute leur pertinence, en offrant une approche structurée et rationnelle pour comparer, classer ou sélectionner des alternatives de manière objective.

Ce mémoire s'inscrit dans une double démarche : d'une part, une revue approfondie des techniques de désalinisation adaptées au génie civil ; d'autre part, l'application comparative de plusieurs méthodes multicritères (SAW, TOPSIS, PROMETHEE II, ELECTRE I) sur un cas d'étude concret situé dans la région de Bordjia. L'objectif est de proposer un classement fiable des alternatives de désalinisation, tenant compte des contraintes locales et des priorités des acteurs du projet.

En complément de cette analyse, un outil numérique – le **DMCT (DesalinationMethodsComparisonTool)** – a été développé et adapté à partir d'un outil existant (GEFT). Ce logiciel permet de centraliser les différentes étapes de l'évaluation multicritère, de l'import des données à la visualisation des résultats, dans une interface intuitive et accessible aux non-spécialistes. L'outil propose deux modes (simplifié et avancé)

et automatise les calculs, les classements, ainsi que les représentations graphiques (graphes de surclassement, radar charts, etc.), facilitant ainsi la prise de décision dans des contextes opérationnels.

Ce travail s'articule autour de cinq chapitres principaux :

- **Chapitre 1** : Présentation du cadre théorique relatif à la salinisation des sols, ses causes, ses mécanismes et ses impacts, notamment dans le domaine du génie civil.
- **Chapitre 2** : Revue des principales méthodes de désalinisation des sols, en identifiant leurs avantages, limites et conditions d'application.
- **Chapitre 3** : Introduction aux fondements théoriques des méthodes multicritères d'aide à la décision (MCDM) et justification du choix des méthodes utilisées.
- **Chapitre 4** : Application pratique des méthodes multicritères sur un cas d'étude réel, en mettant en œuvre les méthodes SAW, TOPSIS, PROMETHEE II et ELECTRE I.
- **Chapitre 5** : Comparaison des résultats obtenus avec l'environnement RStudio et ceux générés par l'outil DMCT, en mettant en évidence les écarts, les avantages fonctionnels et les perspectives d'amélioration de l'outil.

À travers cette étude, ce mémoire vise à proposer une démarche d'aide à la décision opérationnelle, adaptée aux enjeux du génie civil, et à contribuer à la mise en œuvre de solutions durables et rationnelles pour la gestion des sols salinisés.

1 Chapitre 1 Définition de la salinisation .

1.1 Introduction

La salinisation des sols représente un enjeu environnemental majeur, notamment dans les régions arides et semi-arides, où elle compromet non seulement la qualité des sols mais également la stabilité et la durabilité des infrastructures civiles. Ce phénomène, défini par l'accumulation excessive de sels solubles dans les horizons supérieurs du sol, résulte de processus naturels (comme la remontée capillaire depuis des nappes phréatiques salées) et d'activités humaines (telles qu'une gestion inadaptée des eaux ou des aménagements hydrauliques inefficaces).

Du point de vue du génie civil, les effets de la salinisation sont particulièrement préoccupants : déstabilisation des fondations, gonflement des argiles, corrosion des matériaux ferreux, diminution de la portance des sols et altération des ouvrages en béton. Ces dégradations compromettent la viabilité des routes, des bâtiments, des barrages, et autres infrastructures essentielles.

Ce chapitre présente en détail les mécanismes de la salinisation, de la sodisation et de l'alcalinisation, leur étendue géographique à l'échelle mondiale et en Algérie, ainsi que leurs conséquences spécifiques dans le domaine du génie civil. Cette analyse est essentielle pour mieux comprendre les défis liés à la gestion et à la réhabilitation de ces sols dégradés.

1.2 Définition

La salinité désigne la concentration en sels minéraux dissous dans l'eau, principalement sous forme d'ions majeurs tels que le sodium (Na^+), le magnésium (Mg^{2+}), le calcium (Ca^{2+}), le potassium (K^+), le chlorure (Cl^-), le sulfate (SO_4^{2-}), le bicarbonate (HCO_3^-), le nitrate (NO_3^-) et le carbonate (CO_3^{2-}). Elle est généralement évaluée à partir de la conductivité électrique de la solution, celle-ci étant directement proportionnelle à la concentration totale en sels dissous [1].

La salinisation correspond à l'accumulation progressive de sels hautement solubles principalement des chlorures, sulfates et nitrates de sodium, calcium et magnésium dans la couche superficielle du sol. Ce phénomène, particulièrement marqué dans les régions arides et semi-arides, a des répercussions notables non seulement sur l'agriculture, mais également sur les infrastructures du génie civil. Selon [2], la salinisation résulte principalement de l'évaporation intense des eaux d'irrigation chargées en sels, des remontées capillaires des nappes phréatiques salines et de la minéralisation naturelle des sols. En plus de réduire la disponibilité en eau pour les plantes, cette accumulation de sels modifie la structure et les propriétés mécaniques des sols, les rendant plus instables et sujets à des phénomènes de gonflement, de retrait ou d'effondrement différentiel. En Algérie, certaines zones irriguées affichent des conductivités électriques supérieures à 8 dS/m un seuil critique non seulement pour les cultures, mais aussi pour la durabilité des fondations d'ouvrages, avec des taux de sodium échangeable pouvant atteindre 20 % de la capacité d'échange cationique d'après [3]. Cette salinisation, exacerbée par des pratiques agricoles inadaptées et les changements climatiques, constitue ainsi un risque important pour la stabilité et la pérennité des constructions en zones touchées.

La conductivité électrique, inverse de la résistivité (en ohms), était traditionnellement exprimée en mhos (symbole Ω^{-1}). Dans le système international, on utilise désormais le Siemens (S) et ses sous-multiples pour quantifier la conductivité électrique [3]. Les équivalences suivantes s'appliquent :

$$1dS/m = 1mS/cm = 1mmhos/cm = 0,1S/m = 1000\mu S/cm$$

$$(1.1)$$

Pour les analyses de salinité :

Dans la gamme (0,1-5 dS/m), la conductivité se convertit en concentration ionique par la relation :

$$mmol(+)/L = 10 \times (endS/m) \quad (1.2)$$

Pour les extraits de sol plus concentrés (3-30 dS/m), la pression osmotique (en bars) s'obtient par :

$$PO = 0,36 \times (endS/m) \quad (1.3)$$

La conversion en concentration massique s'effectue par :

$$mg/L = 640 \times (endS/m) \quad (1.4)$$

, valable pour($CE \leq 5 \text{ dS/m}$)

Pour convertir les résultats d'analyse chimique (en mmol/L) en mg/L, on multiplie chaque concentration ionique par sa masse molaire respective

Ces relations de conversion, établies par la [3], permettent d'unifier l'interprétation des mesures de salinité pour les eaux d'irrigation et les extraits de sol saturés.

1.3 Les caractères des sels

1.3.1 La solubilité des sels

La solubilité des sels dans les sols est principalement contrôlée par trois facteurs clés : la composition ionique de la solution, le pH et la température. Cette solubilité varie considérablement selon la nature des sels :

- Les chlorures (Cl , KCl) présentent la solubilité la plus élevée, se dissolvant facilement dans l'eau quelle que soit la condition environnementale.
- Les sulfates, carbonates et bicarbonates (Ca_2SO_4 , Na_2CO_3 , $NaHCO_3$) ont une solubilité modérée, mais leur dissolution dépend fortement du pH et de la présence d'autres ions.
- Les sels de calcium ($CaSO_4$, $CaCO_3$), en revanche, deviennent quasi-insolubles lorsque les sulfates ou carbonates y sont associés, formant des précipités (gypse, calcite) qui limitent leur mobilité dans le sol.

Ces différences de comportement expliquent pourquoi certains sels s'accumulent préférentiellement dans les couches superficielles (ex. $NaCl$), tandis que d'autres précipitent en profondeur (ex. $CaSO_4$), influençant ainsi la dynamique de salinisation et les stratégies de gestion des sols affectés. [4]

1.3.2 Le mouvement des sels

La mobilité des sels dans le sol est un processus dynamique influencé par plusieurs facteurs interdépendants. Les sels les plus solubles, comme les chlorures de sodium et de potassium,

présentent une grande mobilité et peuvent migrer facilement entre les différents horizons du sol. Ce mouvement est principalement contrôlé par la dynamique de l'eau (évaporation, infiltration, fluctuations de la nappe phréatique), les gradients de température, et les caractéristiques physiques du sol (texture, structure, porosité). À l'inverse, les sels moins solubles, tels que les sulfates et carbonates de calcium, ont tendance à précipiter et à s'accumuler localement. Ces processus de transport différencié entraînent souvent une hétérogénéité verticale et horizontale de la répartition des sels, avec des accumulations préférentielles en surface (croûtes salines) ou dans la zone racinaire, selon les conditions pédoclimatiques et les pratiques de gestion des sols. Une compréhension fine de ces mécanismes est essentielle pour développer des stratégies efficaces de gestion des sols affectés par la salinisation . [5]

1.4 La salinisation dans le monde

Selon les estimations de [6], la salinisation affecte déjà plus de 400 millions d'hectares dans le monde, avec une surface équivalente menacée, principalement dans les zones arides et semi-arides [7]. Les régions les plus touchées incluent l'Afrique du Nord (Égypte, Tunisie), le Moyen-Orient (Iran, Pakistan), l'Asie centrale (Ouzbékistan) et certaines parties de l'Amérique du Sud (Argentine). Les sols sodiques, caractérisés par une forte concentration en sodium, dominent en Australie et dans des zones localisées comme la Hongrie. En revanche, la salinisation d'origine humaine, souvent liée à une mauvaise gestion de l'irrigation, concerne environ 77 millions d'hectares [8]. Dans les pays du Maghreb, cette dégradation est particulièrement préoccupante en raison de pratiques agricoles inadaptées, entraînant une baisse de productivité et une dégradation des terres [9]. Ces chiffres soulignent l'urgence d'adopter des stratégies durables pour préserver les sols agricoles.

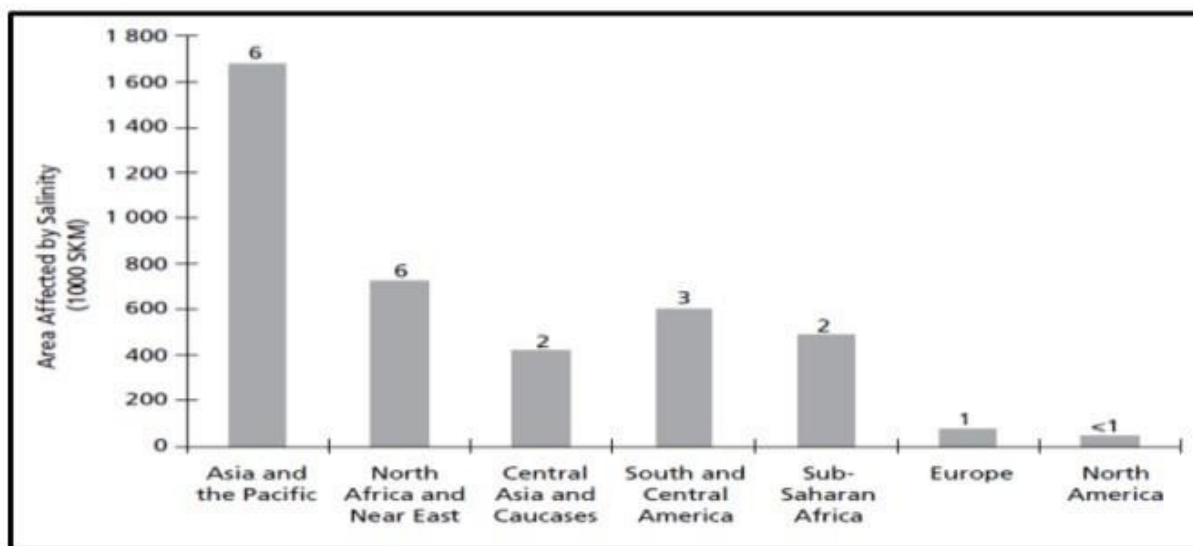


Figure 1-1 Superficie affectée par la salinité dans les différentes régions du monde. [6]

1.5 La salinisation en Algérie

L'Algérie présente une situation préoccupante de salinisation des sols, avec environ 3,2 millions d'hectares affectés [10], représentant 10-15% des terres irriguées du pays. Ces sols se répartissent selon trois grands ensembles géographiques :

1. Les plaines et vallées de l'Ouest (Mina, Cheliff, HabraSig).
2. Les hautes plaines de l'Est (Constantine, Sétif, Bordj Bou Arreridj)
3. Les zones sahariennes (oasis et lits d'oueds), avec une concentration particulière autour des chotts et sebkhas (Chott Chergui, Hodna, Melghir) [11]

D'un point de vue pédologique, c'est-à-dire en se basant sur l'étude scientifique des sols dans leurs aspects physiques, chimiques et minéralogiques, les sols salins se caractérisent par une conductivité électrique élevée, généralement supérieure à 7 dS/m, ainsi qu'un pourcentage de sodium échangeable (ESP) pouvant varier de 5 à 60 % de la capacité d'échange cationique (CEC), [12] La composition saline de ces sols est majoritairement constituée de chlorures et de sulfates de sodium, représentant entre 75 et 85 % des sels totaux.

À cela s'ajoutent des sulfates de magnésium (10 à 15 %) et, dans une moindre mesure, des carbonates de sodium (5 à 10 %) [10].

Trois facteurs principaux expliquent cette distribution :

- Climatique : la limite des 450 mm d'isohyète marque la transition vers les sols fortement sodiques [13]
- Géomorphologique : accumulation saline dans les dépressions fermées (sebkhas) et les bas-fonds
- Anthropique : irrigation avec des eaux de qualité médiocre dans les périmètres agricoles.

Bien que le problème d'alcalinisation active soit aujourd'hui maîtrisé (Daoud et Halitim, 1994), la réhabilitation de ces sols reste difficile, notamment dans les zones où la salinité dépasse 15 dS/m. Les défis actuels concernent particulièrement :

- La gestion durable des périmètres irrigués,
- La prévention de la remontée des nappes salines,
- L'adaptation des pratiques culturales aux conditions locales.

Cette situation appelle des solutions intégrées combinant drainage, sélection variétale et gestion raisonnée des ressources en eau.

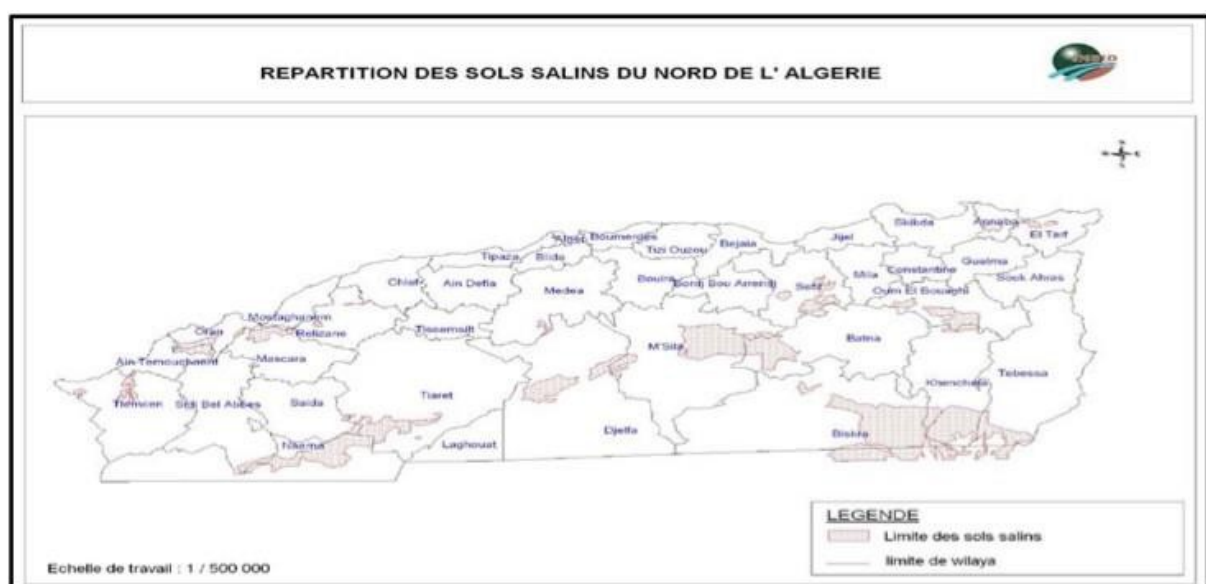


Figure 1-2 Répartition des sols salins du nord de l'Algérie. [11]

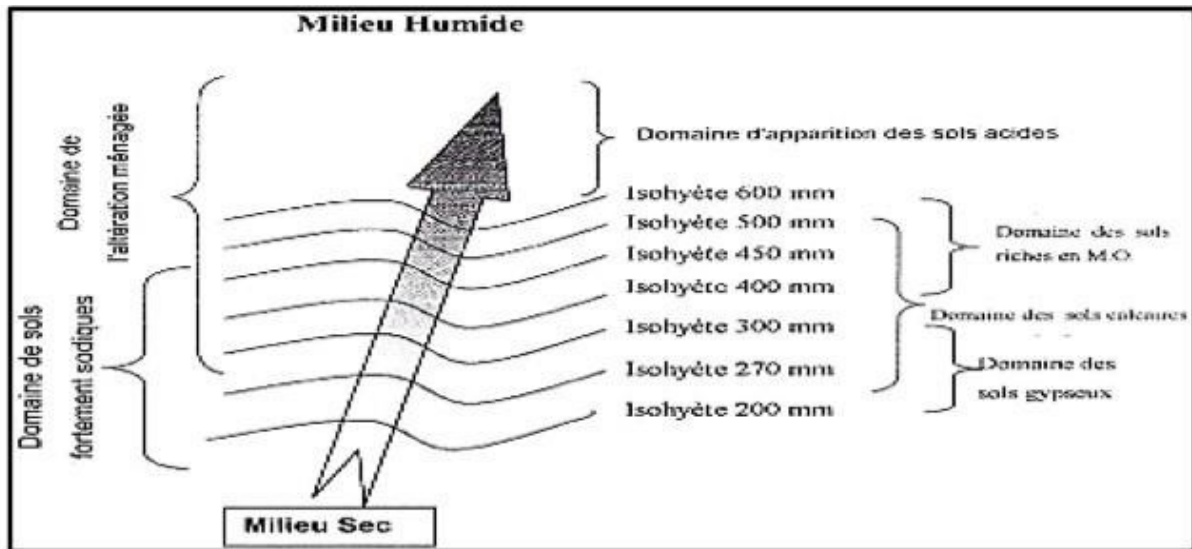


Figure 1-3 Représentation schématique de la distribution de quelques domaines pédologiques dans le Nord de l'Algérie [13].

1.6 Les mécanismes de la salinisation

La genèse des sols salés résulte de trois mécanismes physico-chimiques interdépendants [14] :

- La salinisation : accumulation des sels solubles ($NaCl$, $CaSO_4$)
- La sodisation : enrichissement en sodium échangeable (Na^+)
- L'alcalinisation : élévation du pH (>8.5) avec dominance des carbonates

Ces processus interagissent de manière différentielle selon :

- La composition minéralogique des sols
- La dynamique hydrique (nappes, irrigation)
- Les conditions climatiques (évaporation/précipitation)

Comme le souligne [15], leur combinaison produit des profils salins variés :

- Sols salés neutres (dominance chlorures/sulfates)
- Sols sodiques (ESP >15%)
- Solonetz (horizon *Bt* enrichi en Na^+)

1.7 La salinisation

La salinisation des sols résulte d'un processus complexe où la concentration en sels dissous dans la solution du sol excède un seuil critique, principalement sous l'action de mécanismes physiques dominants [14]. Ce phénomène s'amorce lorsque des facteurs tels que l'évaporation intense, un drainage inadéquat, l'altération des minéraux primaires ou des accumulations salines entraînent une minéralisation excessive de la solution du sol. Au-delà du seuil de tolérance des plantes (généralement >4 dS/m), deux effets délétères se manifestent : (1) une sécheresse physiologique induite par l'élévation de la pression osmotique (>0.2 MPa), et (2) une toxicité ionique spécifique (notamment due au Na^+ et Cl^-).

La quantification de ce phénomène repose sur la mesure de la conductivité électrique (CE) de l'extrait saturé du sol, exprimée en dS/m à 25°C. Cette mesure, qui présente une corrélation linéaire avec la concentration ionique totale ($R^2 > 0.95$ selon [14]), permet de distinguer deux grands types de salinisation :

1.7.1 La salinisation primaire :

La salinisation primaire résulte de processus naturels impliquant la présence initiale de sels dans les sols ou les nappes phréatiques, indépendamment de toute intervention humaine. Ce phénomène trouve son origine dans deux mécanismes géochimiques principaux :

1.7.1.1 Altération des roches mères :

- Dégradation des minéraux sodiques, potassiques et magnésiques [16].
 - Libération progressive de sels solubles (chlorures, sulfates, carbonates, bicarbonates)
- Formation secondaire de silicates hydratés.

1.7.1.2 Héritage géologique [17] [18] :

- Dépôts marins et lagunaires anciens (Trias à Quaternaire)
- Formations caractéristiques en Afrique du Nord :
 1. Gypse triasique

2. Marnes sénoniennes (Sud-Constantinois)
3. Séries détritiques oligocènes (Aquitaniens continentaux)
4. Formations sahariennes (Pliocène continental)

1.7.1.3 Cas spécifique de l'Algérie :

Répartition stratigraphique :

- Crétacé moyen (grès)
- Miocène (gisements gypseux sahéliens)
- Quaternaire (plaines littorales et sebkhas)

Dynamique actuelle :

- Remobilisation des sels par les eaux de ruissellement
- Concentrations dans les dépressions fermées
- Interactions nappes-sols en zones arides

1.7.2 La salinisation secondaire :

La salinisation secondaire constitue un processus anthropique majeur d'accumulation de sels solubles dans les sols, résultant principalement de pratiques d'irrigation inadaptées. Ce phénomène complexe s'explique par plusieurs mécanismes interdépendants :

- L'apport continu de sels dissous via les eaux d'irrigation souvent chargées en ions Na^+ , Cl^- et SO_4^{2-} (0.5 à 3 g/L en moyenne).
- La remontée capillaire des nappes phréatiques salées sous l'effet d'un excès d'irrigation
- l'insuffisance du drainage naturel ou artificiel empêchant la lixiviation des sels excédentaires [6] [19].

En Algérie, cette problématique affecte de manière préoccupante 20 à 50% des surfaces irriguées [20], avec des situations particulièrement critiques dans les périmètres agricoles intensifs comme la plaine du Cheliff ou la région de Bordjia, les oasis sahariennes.

Les principaux facteurs aggravants incluent l'utilisation d'eaux à conductivité électrique élevée (>2 dS/m), des systèmes de drainage souvent déficients (moins de 30% des périmètres équipés), et des rotations culturales inadaptées aux conditions locales. Les conséquences agronomiques sont sévères : baisse des rendements (30 à 70% selon les cultures), dégradation de la structure des sols (dispersion des complexes argilo-humiques), et réduction progressive de la diversité cultivable. Face à cette situation, une gestion intégrée s'impose, combinant l'amélioration de la qualité des eaux d'irrigation (mélanges, traitements), l'optimisation des systèmes de drainage (souterrain ou de surface), et l'adoption de pratiques culturales adaptées (cultures tolérantes, paillage, amendements organiques). La surveillance régulière de la conductivité électrique des sols (suivi trimestriel recommandé) et des nappes phréatiques constitue également un outil indispensable pour anticiper et gérer les risques de salinisation secondaire.

1.8 La sodisation

Le processus de sodisation se produit lorsque le complexe organo-minéral d'échange est progressivement saturé par l'ion Na^+ (horizon sodique). Les agrégats deviennent instables à partir d'un certain seuil et la dégradation des propriétés physique du sol est potentielle [21] :

On détermine la sodisation par le pourcentage de sodium échangeable ESP (Exchangeable Sodium Percentage) par rapport à la capacité d'échange des cations (CEC).

$$ESP = 100 * \frac{\text{Na}_{\text{échangeable}}(\text{en meq/l})}{\text{CEC}(\text{en/l})} \quad (1.5)$$

Si cette valeur est supérieure à 15%, on parle d'un sol sodique. Ce pourcentage est en étroite relation avec un paramètre utilisé par l'école de Riverside, aux USA, qui est le SAR (Sodium Absorption Ratio) de l'extrait de la pâte saturée.

Le **SAR** est défini par l'expression :

$$SAR = \frac{\text{Na}^+}{((\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++})/2)^{0.5}} \quad (1.6)$$

Dans laquelle : Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} sont les teneurs en meq/l de la solution.

La sodisation des sols est l'une des conséquences les plus dommageables et la plus répandue de l'irrigation, en zone aride. Elle influe sur la perméabilité en favorisant le gonflement et la dispersion des colloïdes du sol et entraîne des problèmes de toxicité des plantes [22].

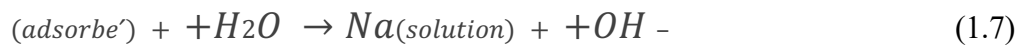
1.9 L'alcalinisation

L'alcalinisation représente une forme avancée de dégradation des sols qui se manifeste lorsque trois conditions sont réunies [23]:

- Saturation sodique du complexe adsorbant ($ESP > 15\%$)
- Présence de minéraux carbonatés (calcite, dolomite)
- Cycles humidification/séchage répétés

1. Mécanisme réactionnel :

Lors de l'humectation, les ions Na^+ échangés avec les protons (H^+) libèrent des OH^- en solution :



Cette hydrolyse élève progressivement le pH (>8.5), atteignant parfois 10-10.5

Les carbonates (CO_3^{2-}) et bicarbonates (HCO_3^-) deviennent dominants.

2. Transformations pédologiques :

Modifications physiques :

- Dispersion irréversible des argiles
- Formation de structures colonnaires en horizon B
- Apparition de vernis noirs (complexes organo-minéraux)

Modifications chimiques :

- Précipitation du Ca^{2+} sous forme $CaCO_3$
- Mobilisation de la silice et de l'aluminium
- Blocage des micronutriments (Fe, Zn, Mn)

Conséquences biologiques :

- Inhibition de l'activité microbienne (pH >9)
- Réduction de la minéralisation de la MO
- Toxicité racinaire directe.

Seuils critiques d'après [23]:

Paramètre	Valeur seuil	Effet observable
ESP	>15%	Début d'alcalinisation
pH (eau)	>8.5	Précipitation des carbonates
CO ₃ ²⁻ soluble	>1 meq/L	Toxicité pour les plantes

Figure 1-4 Seuils critiques d'après [23]

1.10 Dynamique de la salinité dans les sols

Selon [24], un apport massif d'eau, qu'il provienne d'une irrigation intensive ou d'une forte pluviométrie, peut entraîner la dissolution de minéraux naturellement présents dans le sol, tels que la calcite ou le gypse. Ces minéraux dissous sont ensuite entraînés en profondeur jusqu'aux nappes phréatiques. Ainsi, l'eau des nappes devient progressivement plus chargée en sels. Lorsque cette eau remonte vers la surface, notamment lorsqu'elle est exploitée pour l'irrigation, les sels dissous ont tendance à précipiter sous l'effet de l'évapotranspiration, ce qui provoque une augmentation de la salinité des sols. Par ailleurs, dans les régions côtières, la surexploitation des nappes souterraines peut abaisser leur niveau en dessous de celui de la mer. Ce déséquilibre favorise l'intrusion d'eau salée, ce qui accentue davantage la salinisation des nappes et, par conséquent, celle des sols irrigués à partir de ces ressources.

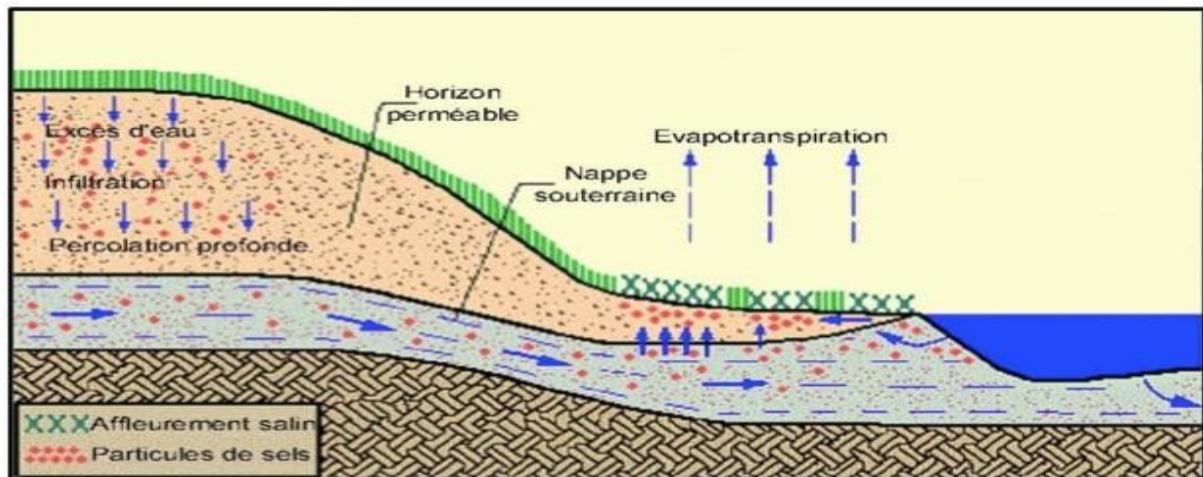


Figure 1-5 Le cycle des sels dans le sol. [24]

L'irrigation ne fait qu'aggraver ce problème, en effet, les sels sont apportés dans le sol à chaque irrigation, la culture prélève dans le sol ses besoins en eau, en laissant sur le sol une solution très concentrée en sel. Cette concentration sera encore très importante par l'irrigation suivante.

1.11 Le processus de salinisation et d'alcalinisation des sols

L'ion sodium (Na^+) présente une double modalité de présence dans les sols, engendrant des comportements radicalement différents :

1.11.1 Formes de présence du sodium dans les sols

1.11.1.1 Forme saline (neutre) :

Combinaisons chimiques : **$NaCl$** , **Na_2SO_4**

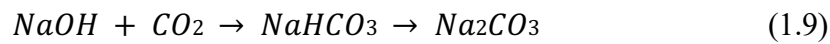
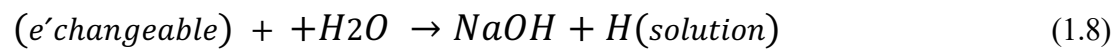
Propriétés :

- PH neutre (6.5-7.5)
- Mobilité élevée dans le profil
- Effets dominants : stress osmotique (réduction de ψ_{sol})

1.11.1.2 Forme alcalinisant (échangeable) :

Fixation sur le complexe adsorbant (CEC)

Dynamique réactionnelle :



Conséquences :

- Élévation drastique du pH (8.5-10.5) •Dispersion des argiles (réduction Ksat>90%)
- Blocage des micronutriments (*Fe, Zn, Mn*).

1.11.2 Les sols sal sodiques

1.11.2.1 Définition

Le terme "sols salsodiques", introduit par [25] désigne une classe pédologique particulière où coexistent simultanément les deux formes de sodium - saline et alcalinisante - engendrant des dynamiques complexes. Cette double caractérisation repose sur deux mécanismes distincts d'enrichissement en Na^+ :

1.11.2.2 Mécanismes d'enrichissement en sodium Saturation indirecte (Duchaufour):

Processus : Remontée capillaire depuis une nappe salée

Mécanisme d'échange :

Paramètre	Saturation indirecte	Saturation directe
Profondeur critique	0-1.5 m	Tout le profil
Minéraux indicateurs	Halite, thenardite	Dawsonite, trona
Rapport SAR	15-30	>40
Amendement prioritaire	Drainage	Acide sulfurique

Figure 1-6 [26]

La nappe souterraine en traversant des couches d'alluvions sodiques, transporte des éléments alcalinisant dont elle s'est chargée. Selon Duchaufour [26], l'ion sodium ne peut subsister qu'en climat sec où le drainage naturel est empêché par la forte évaporation qui sévit. En climat humide, tous les sels de sodium étant très solubles, sont rapidement transportés du profil par les eaux de drainage. A cet effet, deux conditions sont nécessaires à la formation des sols sal sodiques:

- Une condition climatique (ces sols sont quasi inexistants dans les régions humides).
- Une condition de station qui nécessite la présence d'une source de sodium.

1.11.3 Typologie des profils salins

1.11.3.1 Formes de salinisation

Selon [21], il est possible de distinguer quatre formes principales de salinisation :

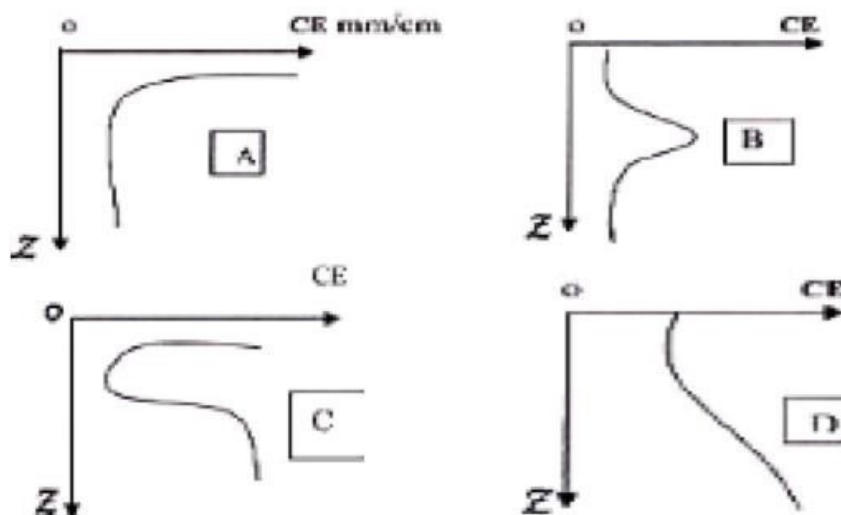


Figure 1-7 (A, B, C, D). Les différents types de profils salins. [21]

-**La forme A** : est une salinisation.

- **La forme B** : est une désalinisation temporaire.

- **La forme D** : est une désalinisation permanente

- **La forme C** : est une resalinisation

D'où Z : profondeur en centimètres.

CE : conductivité électrique en mmhos/cm

1.11.3.2 Types de profils salins

Selon [10], dans la zone aride de l'Algérie, il existe trois types de profils salins, semblables aux profils salins décrits par [25] : les profils descendants, ascendants et convexes.

1.11.3.2.1 Le profil descendant

Le profil descendant, conceptualisé par [25], représente une distribution caractéristique de la salinité où les concentrations maximales en sels solubles se localisent dans les horizons inférieurs du sol (30-100 cm de profondeur). Cette configuration particulière résulte de processus pédologiques actifs observés principalement dans deux contextes :

Contexte géomorphologique :

- Zones amont et médiane des séquences de Zahrez
- Sols à encroûtements calcaires ou gypseux de surface
- Pentes faibles à modérées (1-5%)

Mécanismes génétiques :

Phase de lessivage : Entraînement descendant des sels solubles ($^-$, $SO_4^{2-}Na^+$) par infiltration des eaux météoriques

Barrière pédologique : Ralentissement de la percolation par :

- Semelle de labour
- Horizon Bt compact
- Croûte calcaire fracturée

Concentration différentielle :

- Surface : Appauvrissement relatif (CE 2-4 dS/m)
- Profondeur : Accumulation (CE 8-15 dS/m)

Indicateurs diagnostiques :

- Rapport $CE_{surface}/CE_{profondeur} < 0.3$
- Présence de pseudomycélium calcaire
- Microstructures vacuolaires dans les horizons profonds

Interprétation dynamique :

Cette distribution témoigne d'une évolution pédogénétique marquée par :

- Un changement climatique récent (aridification)
- Une modification du bilan hydrique (réduction de la recharge)
- La persistance d'épisodes de lessivage saisonnier

1.11.3.2.2 Le profil ascendant

Le profil de type ascendant (ou type A selon [25]) se caractérise par une accumulation préférentielle des sels dans les horizons superficiels du sol, résultant de processus hydro-pédologiques spécifiques aux zones basses et déprimées des paysages arides.

Mécanismes clés :

- Remontée capillaire :
- Action combinée de l'évaporation intense (>2000 mm/an)
- Présence d'une nappe salée à faible profondeur ($<1,5$ m)
- Migration verticale des solutions salines (0,5-2 cm/jour)

Stratigraphie caractéristique :

- Horizon superficiel : Croûte saline (0-10 cm, CE >20 dS/m)
- Horizon intermédiaire : Appauvrissement relatif (10-50 cm)
- Horizon profond : Accumulation gypseuse/calcaire (50-100 cm)

Expressions morphologiques :

Pseudo-sables :

- Formation par dispersion des argiles sodiques ($ESP > 15\%$)
- Texture granulométrique apparente sableuse
- Stabilité structurale nulle (dispersion instantanée dans l'eau)

Efflorescences :

- Cristallisation de halite ($NaCl$), thenardite (Na_2SO_4)
- Structures en fleur de sel ou croûtes poreuses
- Variations saisonnières marquées

Cas sans nappe phréatique :

- Nécessite une texture argileuse ($> 40\%$)
- Teneur en sels totaux $> 5\%$
- Alternance humidification/évaporation intense

1.11.3.2.3 Le profil convexe

Le profil convexe (type B selon [25]) présente une distribution caractéristique des sels marquée par une accumulation maximale dans les horizons médians (20–60 cm de profondeur), formant ainsi une zone tampon saline entre les couches superficielles (moins salées) et profondes (appauvries). Ce modèle résulte de l'interaction complexe entre deux processus antagonistes :

Mécanismes dominants :

- Remontée capillaire depuis une nappe phréatique salée (< 2 m), concentrant les sels (Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}) dans la zone d'évaporation active.
- Lixiviation partielle par infiltration occasionnelle des eaux de pluie ou d'irrigation, entraînant un lessivage relatif des horizons superficiels.

Contexte pédologique :

- Sols à texture contrastée (ex. horizon sableux sur argile) favorisant la rétention saline à l'interface.
- Présence de barrières physiques (croûte calcaire, horizon compacté) limitant la percolation profonde.
- Alternance de phases humides et sèches, typique des climats semi-arides.

Indicateurs morphologiques :

- Horizon médian : Structure fragmentaire, efflorescences blanchâtres (gypse, halite), CE élevée (8–25 dS/m).
- Surface : Croûte saline discontinue (CE 4–10 dS/m), pseudosables en cas de texture argileuse. Profondeur : Horizon gypseux ou calcaire peu salin (CE <4 dS/m).
- Signification pédogénétique :
- Phase transitoire entre un profil ascendant (type A) et un profil lessivé (type descendant), reflétant une évolution dynamique des sols sous l'effet de changements hydrologiques ou climatiques.

Diagnostic de désalinisation incomplète lorsque la lixiviation commence à dominer sans avoir encore atteint les horizons profonds.

1.11.3.2.3.1 Dynamique de la salinisation en zones arides et semi-arides

1.11.3.2.3.1.1 Rôle du climat dans le processus de salinisation

Dans les régions arides et semi-arides, l'importante demande évaporatoire (dépassant souvent 2000 mm/an) entraîne un processus actif de concentration des sels en surface. Ce mécanisme naturel, amplifié par les pratiques d'irrigation [27], se manifeste par :

Processus de concentration saline :

- Évaporation intense des solutions du sol
- Cristallisation préférentielle en surface (halite, thenardite)
- Accumulation progressive formant des croûtes salines

Variabilité des profils salins :

-En zones semi-arides (pluviométrie >200 mm/an) :

- Profil de type D dominant (salinité croissante avec la profondeur)
- Rapport $CE_{surface}/CE_{profondeur} \approx 0,2$ (Morizet et al) [28].
- Lixiviation partielle du Na^+ pendant la saison humide

Exemple : Nord algérien Djili [29].

-En zones subdésertiques :

- Accumulation superficielle exclusive
- Formation d'efflorescences salines
- Absence de lessivage significatif

Impact pédogénétique :

- Dégradation de la structure des sols (dispersion des argiles)
- Réduction de la perméabilité (colmatage des pores)
- Modification des équilibres ioniques (Na^+ / Ca^{2+})

1.11.3.2.3.1.2 Rôle de la nappe dans le processus de salinisation

La présence d'une nappe phréatique salée accélère considérablement le processus de salinisation [5], particulièrement sous trois conditions principales :

- Nappe peu profonde (< 1,5 m de la surface), favorisant les remontées capillaires.
- Forte minéralisation (conductivité électrique > 5 dS/m), augmentant la charge saline disponible.
- Bilan hydrique négatif (Précipitations < Évapotranspiration potentielle), dominant en zones arides.

1.11.3.2.3.1.3 Facteurs influençant la distribution des sels :

Topographie et texture du sol :

- En terrain légèrement ondulé, les sels s'accumulent préférentiellement dans les zones élevées [30], où l'évaporation est maximale.
- Les sols à texture fine (argileux, limoneux) favorisent une remontée capillaire efficace, concentrant les sels (Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}) en surface.
- Les sols sableux, en revanche, limitent les remontées capillaires, réduisant l'accumulation saline en surface.

Profondeur critique de la nappe :

- Moins de 1 m : Risque très élevé de salinisation (croûtes salines, efflorescences).
- 1 à 2 m : Salinisation modérée, dépendant de la texture et du climat.
- Plus de 2 m : Impact limité, sauf en cas de forte évaporation.

Conséquences agronomiques :

- Sols argileux : Formation de croûtes de sel et perte de perméabilité.
- Dépôts sableux : Salinisation plus diffuse, mais risque de toxicité racinaire.
- Zones irriguées : Aggravation par la remontée des nappes si le drainage est insuffisant.

1.12 Conclusion

L'étude de la problématique de la salinisation des sols met en lumière un enjeu environnemental et agronomique de première importance, affectant la productivité agricole, la durabilité des écosystèmes et la sécurité alimentaire à l'échelle mondiale. Ce phénomène, accentué par les pratiques d'irrigation inadaptées et les changements climatiques, constitue une menace croissante qui nécessite une approche rigoureuse et multidimensionnelle pour être efficacement maîtrisée.

À travers ce premier chapitre, nous avons identifié les causes et les conséquences de la salinisation des sols, en mettant en évidence les multiples facteurs qui influencent son intensité et son expansion. Il est apparu que l'origine de ce phénomène peut être aussi bien naturelle qu'anthropique, impliquant des processus complexes de transport et d'accumulation des sels dans le profil du sol. L'impact sur les cultures est particulièrement alarmant, car il entraîne une réduction des rendements, une dégradation des sols et une altération de leur

structure physique et chimique. Par ailleurs, les implications écologiques ne sont pas négligeables, affectant la biodiversité et modifiant les écosystèmes terrestres et aquatiques.

2 CHAPITRE 2 Définition des différentes méthodes de désalinisation des sols

2.1 Introduction

Après avoir présenté les origines, les mécanismes et les conséquences de la salinisation des sols, ce chapitre s'intéresse aux solutions concrètes permettant de remédier à ce phénomène. La désalinisation des sols repose sur un ensemble de techniques variées, développées pour restaurer la qualité des terres affectées par une accumulation excessive de sels. Leur application est essentielle, notamment dans le contexte de nouvelles zones industrielles, où la qualité du sol conditionne la réussite de tout aménagement futur.

Les méthodes existantes peuvent être regroupées en plusieurs catégories : physiques et hydrauliques, chimiques, biologiques et agronomiques. Chacune repose sur des principes différents – extraction, dilution, neutralisation ou transformation des sels – et présente des niveaux de complexité, de coût et d'efficacité variables. Leur mise en œuvre dépend de plusieurs facteurs, tels que la nature du sol, les conditions climatiques, la disponibilité en ressources, et les objectifs d'usage du terrain traité.

Dans ce chapitre, nous procéderons à une analyse détaillée de ces méthodes, en exposant leurs mécanismes, leurs avantages et leurs limites. Cette étude servira de base à une évaluation multicritère approfondie, présentée au chapitre suivant, afin de déterminer les alternatives les plus appropriées pour le cas d'étude considéré.

Par ailleurs, une attention particulière sera accordée aux travaux de recherche existants ayant appliqué des méthodes multicritères d'aide à la décision dans des problématiques similaires. Ces travaux, menés dans des domaines tels que le génie civil, la géotechnique, l'environnement ou encore les systèmes de décision, apportent un éclairage précieux sur la pertinence de l'approche multicritère pour le choix des techniques de réhabilitation des sols. Ils serviront à positionner notre propre démarche dans un cadre scientifique éprouvé, tout en soulignant la contribution spécifique de ce mémoire au contexte du génie civil en Algérie.

2.2 Les méthodes physiques de désalinisation

Les méthodes physiques de désalinisation des sols consistent à intervenir mécaniquement sur la couche superficielle du sol afin de réduire la concentration en sels. Ces techniques visent principalement à éliminer ou à modifier physiquement les horizons salinisés, sans recours à des produits chimiques ou à de grandes quantités d'eau, contrairement aux approches chimiques ou hydrauliques. Elles sont souvent employées lorsque la salinité est concentrée dans les premiers centimètres du sol, notamment en milieu aride ou semi-aride, et peuvent représenter une première étape essentielle dans un processus de réhabilitation des sols dégradés.

2.2.1 Grattage mécanique du sol (Scrapping)

Le grattage mécanique, également connu sous le nom de scraping, est une méthode physique de remédiation des sols salinisés qui consiste à enlever mécaniquement la couche superficielle du sol, généralement celle où les sels solubles se concentrent par remontée capillaire et évaporation. Cette technique repose sur une intervention directe à l'aide d'engins de terrassement (bulldozers, scrapers, niveleuses) pour décaper la partie supérieure du profil pédologique, sur une épaisseur variant généralement de 5 à 30 cm, en fonction de la profondeur de salinisation détectée. [31]

Sur le plan conceptuel, le grattage ne vise pas à modifier chimiquement la composition du sol, ni à mobiliser les sels pour leur lessivage, mais plutôt à extraire physiquement la fraction du sol jugée inapte à un usage futur. Cette méthode est classée parmi les techniques de désalinisation passive ou de substitution partielle, car elle n'élimine pas les sels en profondeur, mais les retire en surface, là où leur accumulation est la plus problématique. [32]

Le recours au grattage est particulièrement indiqué dans les cas où la salinité est peu profonde et fortement localisée – comme c'est souvent le cas dans les zones arides et semi-arides, ou dans les terrains mal drainés affectés par des eaux souterraines salées. Elle est également adaptée aux projets de développement urbain ou industriel, car elle permet de préparer rapidement des plateformes stables, compatibles avec les exigences géotechniques des travaux de fondation. [33]

2.2.1.1 Fonctionnement pratique

Cependant, l'application du grattage nécessite une analyse préalable du profil salin du sol, généralement obtenue par des sondages et des mesures de conductivité électrique (ECe), afin de déterminer la profondeur optimale à excaver. En l'absence d'un tel diagnostic, l'intervention risque soit d'être inefficace (trop superficielle), soit trop invasive (perte excessive de sol fertile ou stable).

Dans la pratique, le grattage est mis en œuvre à l'aide d'engins lourds de terrassement tels que des niveleuses, des scrapers automoteurs ou des bulldozers équipés de lames. Ces machines sont utilisées pour décaper uniformément la surface du sol sur la profondeur ciblée, en retirant la strate affectée par les cristaux de sels. Les matériaux extraits, souvent impropres à la réutilisation directe, sont généralement évacués vers des zones de stockage ou des décharges contrôlées. Le sol raclé peut ensuite être nivelé, amendé ou compacté selon les besoins du projet. [34]

Dans le domaine du génie civil, cette technique est couramment employée dans les phases préliminaires de grands projets d'aménagement (zones industrielles, plateformes logistiques, infrastructures routières ou portuaires) où la qualité du sol joue un rôle déterminant dans la stabilité et la durabilité des ouvrages à venir. En présence de sols fortement salinisés, le grattage permet de réduire les risques de pathologies dans les matériaux de construction, comme la corrosion prématurée des aciers, les réactions sulfatiques dans les bétons, ou encore les gonflements différenciés liés aux variations d'humidité. [35]

De plus, dans les zones où la nappe phréatique est proche de la surface, et où les eaux sont souvent chargées en sels, le grattage peut constituer une solution transitoire, en attendant la mise en place de solutions plus durables, comme le drainage profond ou l'amélioration de la gestion de l'eau. Ainsi, il s'intègre fréquemment dans une stratégie de remédiation plus large, incluant le suivi hydrogéologique et l'amélioration des caractéristiques mécaniques du sol (compactage, ajout de couches granulaires, stabilisation chimique). [32]

2.2.2 Excavation des sols salinisés

L'excavation est une méthode physique de remédiation des sols salins consistant à retirer mécaniquement une couche plus profonde du sol affectée par la salinité, souvent au-delà des premiers centimètres superficiels. Contrairement au grattage, qui cible généralement la couche arable, l'excavation permet d'atteindre des profondeurs importantes lorsque les sels sont présents dans les horizons intermédiaires ou profonds du profil pédologique.

L'objectif est de remplacer ou de neutraliser les portions de sol fortement contaminées par des matériaux plus sains, soit en important des matériaux non salins (sols naturels, remblais), soit en exposant des couches plus stables et aptes à accueillir des fondations ou des aménagements futurs. [33]

2.2.2.1 Fonctionnement technique

Sur le terrain, l'excavation est réalisée à l'aide d'engins lourds comme des pelleteuses hydrauliques, des excavateurs ou des décapeuses. La profondeur d'excavation dépend du profil de salinité, qui doit être déterminé au préalable à l'aide de carottages, sondages et mesures de conductivité électrique (ECe) [36]. Une fois la couche affectée retirée, elle peut être :

- soit transportée vers une décharge ou une zone de stockage temporaire,
- soit traitée sur place (dans certains cas par mélange ou stabilisation chimique),
- soit remblayée avec
- un sol sain ou un matériau stabilisé (granulats, géotextiles...).

Dans un contexte de zone industrielle, cette méthode est particulièrement utile lorsque les sols présentent une salinité avancée sur plusieurs dizaines de centimètres, empêchant la réalisation d'ouvrages fiables et durables (fondations, chaussées, dallages, etc.). [35]

2.2.2.2 Avantages de l'excavation

- **Efficacité directe** : en éliminant la source du problème (le sol contaminé), on obtient un effet immédiat et mesurable.
- **Préparation optimale du sol** : elle permet d'obtenir un sol propre et stable, prêt pour des aménagements lourds.

- **Compatible avec d'autres méthodes** : on peut combiner l'excavation avec du drainage, du compactage, ou l'ajout de matériaux granulaires pour renforcer le sol. [37]

2.2.2.3 Limites et inconvénients

- **Coût élevé** : cette méthode est parmi les plus coûteuses, surtout si les volumes excavés sont importants et doivent être évacués.
- **Impact environnemental** : l'extraction et le transport des sols contaminés peuvent générer des nuisances (poussières, bruit, pollution des eaux).
- **Risque de déséquilibre géotechnique** : si l'excavation est mal contrôlée, elle peut altérer la stabilité du terrain ou exposer à des tassements différentiels. [38]

Dans les projets d'aménagement d'une **zone industrielle**, l'excavation est souvent une étape nécessaire lorsqu'on rencontre des sols **argileux salins, instables ou gonflants**. Elle permet de préparer une **plateforme fiable pour les fondations**, notamment pour les bâtiments industriels, les voies de circulation lourdes ou les zones de stockage.

De plus, elle peut être intégrée dans un **projet global de traitement de site** incluant :

- le **remblaiement avec des matériaux adaptés** (sable, gravier),
- l'**amélioration de sol** (stabilisation à la chaux ou au ciment),
- ou encore la **mise en place de géotextiles** pour séparer les couches. [39]

2.3 Les méthodes hydrauliques de désalinisation

Les méthodes hydrauliques de désalinisation sont fondées sur l'utilisation de l'eau comme vecteur pour dissoudre, déplacer et évacuer les sels solubles présents dans le sol. Ces techniques visent à améliorer la qualité du sol en favorisant le lessivage naturel ou artificiel des sels vers des couches plus profondes, en dehors de la zone racinaire ou de la zone d'infrastructure à construire.

Elles sont particulièrement efficaces dans les sols à texture légère à moyenne, disposant d'une perméabilité suffisante, et nécessitent généralement un système de drainage complémentaire pour assurer l'évacuation de l'eau saline.

Dans le contexte du génie civil, notamment pour l'aménagement de zones industrielles, ces méthodes permettent de stabiliser chimiquement les sols avant les travaux de fondation, tout en réduisant les risques de corrosion des matériaux, de gonflement des argiles, ou de dégradation des bétons.

2.3.1 Lixiviation (Leaching)

La lixiviation est l'une des techniques hydrauliques les plus couramment utilisées pour la désalinisation des sols. Elle consiste à appliquer une grande quantité d'eau douce à la surface du sol afin de dissoudre les sels solubles présents dans les pores du sol, puis à les entraîner vers des couches plus profondes, en dehors de la zone racinaire ou de la zone d'ancrage des fondations. Ce processus permet de réduire la concentration saline dans la zone active du sol, rendant celui-ci plus apte à l'usage agricole, mais également à l'implantation de structures en génie civil. [31]

Sur le plan technique, la lixiviation repose sur deux principes fondamentaux :

1. L'infiltration verticale de l'eau

À travers le sol, en fonction de sa perméabilité.

2. La mobilisation des sels

Par dissolution, sous forme d'ions (comme Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}), entraînés avec l'eau percolée.

Pour être efficace, la quantité d'eau appliquée doit être supérieure à la capacité de rétention du sol, afin d'assurer que les sels sont déplacés en profondeur plutôt que simplement dilués localement. En général, il est recommandé d'appliquer entre 2 à 5 fois le volume d'eau correspondant à la capacité de champ du sol, selon son niveau de salinité initial et sa texture. [40]

Dans le cadre des aménagements industriels, la lixiviation est particulièrement utile lorsqu'un sol salin est prévu pour accueillir :

- des fondations superficielles ou profondes,
- des voies de circulation lourdes,
- des zones de stockage,
- ou des structures sensibles aux réactions chimiques, comme les bétons ou les aciers.

[41]

La présence de sels dans les horizons proches de la surface peut provoquer des réactions sulfatiques, des gonflements, ou une corrosion accélérée des matériaux. La lixiviation permet alors de préparer chimiquement le sol, en réduisant ces risques, sans altérer directement sa structure mécanique. [42]

La réussite du leaching dépend fortement de :

- **La perméabilité du sol** : un sol argileux compact empêchera l'infiltration, tandis qu'un sol sableux la favorisera.
- **La qualité de l'eau utilisée** : elle doit être peu salée pour ne pas aggraver la situation.
- **La présence d'un système de drainage efficace** : pour éviter l'accumulation d'eau stagnante et la remontée capillaire des sels.
- **La planification du volume et du temps d'application** : un leaching mal dimensionné peut être inefficace ou causer une saturation inutile du sol. [36]

2.3.1.1 Avantages de l'excavation

- **Efficacité immédiate** : permet une élimination directe et visible des couches de sol fortement salinisées, sans attendre de processus biologiques ou chimiques. [43]
- **Adaptée aux travaux lourds** : elle garantit une préparation optimale du terrain pour accueillir des infrastructures industrielles, des fondations profondes ou des chaussées. [44]
- **Polyvalence d'intégration** : elle peut être combinée avec d'autres méthodes de stabilisation (remblaiement, géotextiles, compactage), pour renforcer les performances mécaniques du sol. [43]
- **Contrôle précis** : la profondeur d'intervention peut être ajustée selon les résultats des sondages géotechniques et des profils de salinité.

2.3.1.2 Inconvénients de l'excavation

- **Coût élevé** : les opérations de décapage profond, de transport et de remplacement du sol sont financièrement lourdes, surtout pour de grandes surfaces. [45]
- **Impact environnemental** : l'extraction de volumes importants peut générer de la poussière, du bruit, et une perturbation de l'écosystème local, en plus du risque de pollution des eaux souterraines si mal gérée.
- **Risque de déséquilibre géotechnique** : si l'excavation n'est pas bien planifiée, elle peut entraîner des tassements, des glissements ou une instabilité des talus ou fondations. [46]
- **Gestion des déblais complexe** : les sols excavés sont souvent impropres à la réutilisation directe, ce qui nécessite leur stockage en décharge ou leur traitement, augmentant les contraintes logistiques. [45]

2.3.2 Lessivage de surface

Le lessivage de surfaces est une méthode hydraulique complémentaire à la lixiviation. Elle consiste à appliquer de l'eau en faible débit, à la surface du sol, dans le but de diluer et entraîner les sels présents dans les premiers centimètres du profil pédologique. Cette technique vise principalement à nettoyer la couche superficielle, qui est la plus affectée par l'évaporation capillaire, phénomène fréquent dans les zones arides et semi-arides. [31]

Contrairement à la lixiviation profonde qui traite l'ensemble du profil racinaire ou de fondation, le lessivage de surface s'adresse spécifiquement aux problèmes de salinité superficielle, en agissant de manière localisée et progressive. Il est souvent réalisé à l'aide de systèmes d'irrigation douce, comme l'irrigation par ruissellement lent, les arroseurs à basse pression, ou même manuellement pour les petites surfaces.

Dans un contexte de préparation de terrain pour l'implantation d'une infrastructure industrielle, cette méthode peut être utilisée pour :

- **Éliminer les sels visibles cristallisés à la surface** avant des travaux de nivellement, de compactage ou de pose de géotextile,

- **Éviter les réactions chimiques en surface** qui peuvent nuire à la durabilité du béton ou à l'intégrité des enrobés,
- **Assurer une meilleure adhérence** entre les couches de fondation, en stabilisant chimiquement la surface avant compactage ou remblai.

Elle est également utile lorsqu'on ne peut pas inonder ou excaver le site, par manque de ressources ou par contraintes techniques (terrains en pente, sites confinés...). [32]

2.3.2.1 Avantages

- **Facile à mettre en œuvre** et peu coûteuse.
- **Permet un traitement ciblé** sans perturber la structure du sol en profondeur.
- **Faible consommation d'eau** par rapport à la lixiviation ou au flushing. [33]

2.3.2.2 Limites

- **Efficacité très limitée en profondeur** : ne convient pas aux salinités enracinées ou aux profils compacts.
- **Risque de re-salinisation rapide** si la source de salinité (nappe phréatique, irrigation salée) n'est pas contrôlée. [36]
- **Nécessite une répétition fréquente** en cas de forte évaporation ou d'apports salins constants.

2.3.3 Flushing (Rinçage intensif)

Le flushing, ou rinçage intensif, est une technique hydraulique de désalinisation qui consiste à inonder la parcelle avec un volume important d'eau douce, dans le but de forcer l'évacuation rapide des sels solubles présents dans le sol. Contrairement à la lixiviation qui repose sur une infiltration lente et progressive, le flushing vise un effet de choc hydraulique : l'eau traverse rapidement le profil pédologique ou ruisselle à la surface, entraînant avec elle les ions salins (Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}). [47]

Techniquement, le flushing nécessite des apports d'eau supérieurs à ceux de la lixiviation — souvent 5 à 10 fois la capacité de rétention du sol — ce qui implique l'utilisation de bassins, canaux d'irrigation à grand débit ou systèmes de pompage. Cette méthode est particulièrement

utilisée dans les zones à forte disponibilité en eau, ou dans les cas d'urgence où le sol présente une salinité critique, empêchant toute activité humaine ou construction. [48]

Dans le contexte des zones industrielles, le flushing peut être utilisé pour [49] :

- Nettoyer un terrain très salinisé avant des travaux de fondation, de compactage ou d'implantation de réseaux,
- Réduire rapidement la concentration saline en surface, afin d'éviter des réactions chimiques avec les matériaux de construction,
- Préparer le sol à un traitement chimique ou biologique complémentaire.

2.3.3.1 Avantages

- **Rapide** et efficace dans les sols bien perméables,
- Peut traiter de **grandes surfaces** en peu de temps,
- Solution de dernier recours dans les cas de salinité excessive. [40]

2.3.3.2 Inconvénients

- **Consommation d'eau très élevée**, difficilement applicable en zones arides,
- **Risque de contamination des nappes phréatiques** ou des eaux de surface,
- Peut provoquer un **lessivage des nutriments** et la déstabilisation des couches du sol. [50]

2.3.4 Drainage (souterrain ou de surface)

Le drainage est une méthode de gestion de l'eau essentielle dans la lutte contre la salinisation des sols. Il consiste à évacuer l'eau excédentaire du sol (et donc les sels qu'elle contient) à l'aide de systèmes de collecte et de transport d'eau, naturels ou artificiels. Le drainage peut être de deux types :

- **Drainage de surface** : réalisé à l'aide de fossés, caniveaux, rigoles, il permet l'évacuation des eaux de pluie ou d'irrigation stagnantes. [51]

- **Drainage souterrain** : plus complexe, il utilise des tuyaux perforés (en PVC, céramique ou PEHD) enterrés à une certaine profondeur pour capter et évacuer les eaux salines du sol. [52]

Le drainage est indispensable pour accompagner toutes les autres méthodes hydrauliques (leaching, flushing), car sans exutoire, l'eau appliquée reste dans le sol et la salinité peut revenir par capillarité. [53]

En génie civil, un bon drainage permet :

- De **préparer une plateforme de construction stable** en évitant la saturation en eau, [54]
- De **protéger les fondations** contre l'humidité et la corrosion,
- De limiter les risques de **gonflement des argiles** et d'**instabilité des remblais**,
- De **prolonger la durée de vie des routes, dallages, canalisations**, etc. [55]

Le drainage est aussi souvent intégré dans les **plans d'aménagement de zones industrielles**, avec des réseaux de collecteurs reliés à un système de traitement ou de rejet contrôlé.

2.3.4.1 Avantages

- Méthode **durable** et **efficace** pour maintenir un sol sec et sain, [56]
- **Indispensable** pour rendre les autres techniques de désalinisation viables, [57]
- Peut-être **dimensionné sur mesure** selon la profondeur de la nappe et la perméabilité du sol. [58]

2.3.4.2 Inconvénients

- **Coût élevé** (matériaux, terrassement, entretien), [59]
- Nécessite une **étude technique approfondie** avant installation, [54]
- L'eau drainée doit être **traitée ou rejetée dans des conditions contrôlées** pour éviter la pollution. [60]

2.4 Méthodes Chimiques de Désalinisation des Sols

Les méthodes chimiques consistent à modifier la composition chimique du sol ou à introduire des substances capables de neutraliser les effets de la salinité, notamment dans les sols sodiques [31] [36] et fortement alcalins. Ces techniques visent principalement à améliorer la structure du sol, faciliter le lessivage des sels et restaurer sa fertilité en agissant sur les propriétés chimiques et physiques du profil pédologique. Elles sont généralement appliquées dans les cas où les méthodes physiques ou hydrauliques s'avèrent insuffisantes, et nécessitent une gestion rigoureuse de l'eau, du dosage et des conditions du sol pour garantir leur efficacité.

2.4.1 Application du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

L'application du gypse, ou sulfate de calcium dihydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), constitue l'une des méthodes chimiques les plus courantes pour l'amendement des sols sodiques et salins- sodiques. [36] Ces sols se caractérisent par une teneur élevée en sodium échangeable (Na^+), responsable de la dispersion des particules argileuses, de la dégradation de la structure du sol, et d'une baisse significative de la perméabilité. Ces altérations compromettent non seulement l'infiltration de l'eau [34] [61] et l'aération du sol, mais nuisent également à la stabilité des fondations dans un cadre de construction ou d'aménagement industriel.

Le mécanisme d'action repose sur un échange ionique entre les ions calcium (Ca^{2+}) issus de la dissolution du gypse et les ions sodium (Na^+) fixés sur le complexe d'échange cationique du sol. Ce processus favorise la floculation des particules argileuses et la reconstitution d'une structure poreuse, augmentant ainsi la stabilité du sol, sa portance et sa capacité de drainage.

La solubilité modérée du gypse permet une libération progressive du calcium, assurant un effet durable sur l'amélioration structurale. En présence d'un apport d'eau suffisant et d'un drainage adapté, les ions sodium déplacés peuvent être évacués vers les couches profondes du sol, évitant ainsi leur accumulation résiduelle. [61]

Dans le cadre des projets de génie civil, l'application du gypse s'avère particulièrement utile dans la stabilisation chimique des sols avant la mise en œuvre de :

- fondations superficielles ou profondes, [62]
- plateformes industrielles, [63]
- zones de stockage sensibles,
- ouvrages en béton ou en acier exposés aux attaques chimiques. [64]

L'amendement permet de réduire le gonflement différentiel des sols argileux, d'améliorer leur compacité et de prévenir les réactions agressives liées aux sels, telles que la corrosion des armatures ou la désagrégation des matériaux cimentaires.

2.4.1.1 Avantages

- Méthode simple, économique et bien éprouvée. [65]
- Améliore la structure physique du sol et sa perméabilité.
- Libération progressive du calcium, assurant une efficacité durable. [66]
- Compatible avec d'autres traitements (compactage, géotextiles).
- Peut contribuer à l'amélioration de la disponibilité en certains nutriments (phosphore, soufre).

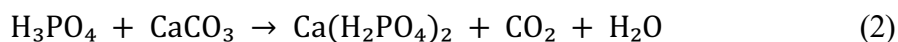
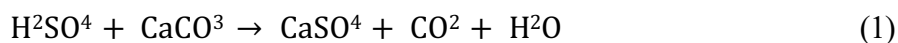
2.4.1.2 Limites

- Requiert un système de drainage fonctionnel pour évacuer les ions sodium libérés. [67]
- Inefficace sans apport d'eau (irrigation ou pluie) pour assurer le lessivage.
- Dose à ajuster selon les paramètres du sol (TSE, CE, pH) sous peine de surdosage.
- Risque de lixiviation excessive de nutriments en cas d'application non contrôlée. [68]
- Ne convient pas aux sols acides ou déjà enrichis en calcium.

2.4.2 Application d'acides minéraux (acide sulfurique, acide phosphorique)

2.4.2.1 Principe et mécanisme d'action

L'application directe d'acides minéraux, notamment l'acide sulfurique (H_2SO_4) et l'acide phosphorique (H_3PO_4), a pour objectif principal la correction de l'alcalinité excessive des sols, en particulier ceux riches en carbonates et bicarbonates. Ces acides réagissent avec les carbonates (CaCO_3 , Na_2CO_3) du sol selon les réactions suivantes :



Ces réactions génèrent du dioxyde de carbone (CO_2) gazeux, de l'eau, et surtout du gypse (sulfate de calcium), un produit favorable aux échanges ioniques. L'acide permet ainsi de libérer des ions calcium (Ca^{2+}) disponibles pour remplacer les ions sodium (Na^+) sur les sites d'échange cationique du sol. [69]

Cette méthode est particulièrement recommandée pour :

- Les sols très alcalins ($\text{pH} > 8,5$) où l'excès de carbonate entrave la disponibilité des nutriments.
- Les projets d'aménagement nécessitant une réactivité chimique rapide du sol, comme les fondations de structures industrielles ou les plateformes de stockage. [36]

En abaissant le pH, on favorise l'agrégation des particules d'argile, ce qui améliore la perméabilité et la portance du sol.

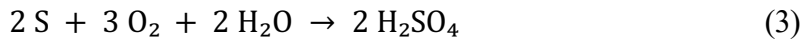
2.4.2.2 Contraintes et précautions

- Sécurité : Manipulation de produits corrosifs nécessitant un équipement de protection individuelle.
- Environnement : Risque de perturbation de la vie microbienne et d'acidification excessive.
- Technique : Dosage rigoureux basé sur des analyses du pH, de la teneur en carbonate, et du pouvoir tampon du sol.

2.4.3 Apport de soufre élémentaire

2.4.3.1 Principe de fonctionnement

Le soufre élémentaire (S^0) agit indirectement sur la chimie du sol à travers son oxydation biologique en acide sulfurique par des bactéries du genre *Thiobacillus* :



Ce processus génère une acidité naturelle qui réagit avec les carbonates du sol pour libérer du calcium, lequel remplace le sodium échangeable sur les complexes d'argile. Contrairement aux acides minéraux, cette méthode est lente mais durable. [46]

Le soufre est adapté aux projets :

- À long terme, nécessitant une stabilisation chimique progressive.
- Dans des sols modérément sodiques et mal drainés.
- Où l'introduction de produits acides liquides est risquée.

Il permet une préparation douce du sol, sans effet brutal sur l'écosystème. Il est donc pertinent dans les zones de future végétalisation industrielle ou de stabilisation en profondeur. [31]

2.4.3.2 Conditions de réussite

- Activité biologique suffisante (température, aération, humidité).
- Sol bien drainé.
- Suivi du pH et de la conductivité électrique pour ajuster la dose et éviter la toxicité.

2.4.4 Utilisation de chlorure de calcium ($CaCl_2$)

Le chlorure de calcium ($CaCl_2$) est un amendement chimique très soluble, utilisé dans la réhabilitation des sols sodiques en raison de sa capacité à fournir rapidement des ions calcium

(Ca^{2+}). Ce sel agit selon le même principe que le gypse, en facilitant le remplacement des ions sodium (Na^+) sur les sites d'échange cationique du sol [67]. Le calcium libéré par dissolution du CaCl_2 se lie aux argiles, induisant une floculation rapide des particules, ce qui améliore significativement la structure du sol, sa porosité et sa perméabilité à l'eau. [36] [70]

L'un des avantages majeurs du chlorure de calcium est sa solubilité beaucoup plus élevée que celle du gypse [71], ce qui permet une réponse plus rapide, particulièrement dans les sols compacts ou très imperméables. Cela le rend utile dans les situations nécessitant une amélioration urgente de l'infiltration ou une stabilisation chimique rapide, comme lors de travaux de génie civil sur des sites fortement alcalins [72]. Par exemple, il peut être utilisé avant un compactage, une pose de fondations ou l'installation de systèmes de drainage souterrains. [31]

Toutefois, cette efficacité rapide s'accompagne de certaines contraintes. L'utilisation de CaCl_2 entraîne une augmentation temporaire de la concentration en chlorures dans le sol, ce qui peut devenir phytotoxique à des concentrations élevées, en particulier pour les cultures sensibles au chlore [40]. De plus, le chlorure de calcium peut interagir de manière corrosive avec les structures métalliques, notamment les aciers non protégés dans les installations industrielles. [73] Par conséquent, son emploi doit être strictement contrôlé : il nécessite une dose adaptée à la capacité d'échange cationique du sol, [74] ainsi qu'un drainage efficace pour éviter l'accumulation de chlorures en profondeur.

2.4.5 Amendements salins spécifiques (ex. sulfate de fer)

Les amendements salins spécifiques regroupent un ensemble de sels utilisés pour modifier la chimie du sol, soit en abaissant le pH, soit en favorisant la libération d'éléments nutritifs, ou en facilitant le déplacement des sels toxiques. Parmi eux, le sulfate de fer (FeSO_4) est particulièrement intéressant dans les sols alcalins et salins, car il joue un double rôle : acidifiant et nutritif. [46]

L'ajout de FeSO_4 dans le sol entraîne une acidification locale par hydrolyse des ions Fe^{3+} , ce qui permet de dissoudre certains carbonates présents et de libérer des nutriments tels que le calcium et le fer assimilable. Cette acidification douce contribue à abaisser le pH des sols calcaires et à améliorer l'efficacité des échanges ioniques. Le sulfate de fer est également

une source de fer rapidement disponible, un élément essentiel au métabolisme des plantes, notamment dans les zones affectées par la chlorose ferrique due à un excès de calcaire. [34]

Dans les projets d'aménagement industriel ou d'aménagement paysager en zones salinisées, l'utilisation de ces amendements peut s'avérer précieuse pour créer des conditions favorables à l'enracinement de la végétation de couverture ou à la restauration de zones tampons. Ils peuvent aussi être appliqués ponctuellement pour corriger les déséquilibres nutritionnels spécifiques, comme la carence en micronutriments (Zn, Fe, Mn) souvent observée dans les sols dégradés.

Cependant, leur utilisation doit être basée sur une analyse préalable du sol : un excès d'amendements salins peut entraîner des effets antagonistes, comme la précipitation de phosphates ou la toxicité ionique. De plus, leur efficacité dépend fortement de la texture du sol, de son pouvoir tampon et de son activité biologique.

2.5 Méthodes biologiques de désalinisation des sols

Les méthodes biologiques de désalinisation s'appuient sur les interactions entre les organismes vivants (plantes, micro-organismes) et le sol pour atténuer l'impact de la salinité. Ces techniques visent non seulement à réduire la concentration en sels, mais aussi à restaurer les fonctions biologiques, physico-chimiques et structurales du sol. Elles sont particulièrement adaptées dans les zones où des approches douces, durables et respectueuses de l'environnement sont privilégiées, comme les aménagements paysagers, les zones tampons ou les projets de réhabilitation écologique.

2.5.1 Phyto-désalinisation (halophytes)

La phyto-désalinisation est une méthode basée sur l'utilisation de plantes halophytes – des espèces capables de tolérer, d'absorber et de stocker de fortes concentrations de sels dans leurs tissus. Ces plantes agissent comme des pompes biologiques, extrayant les ions Na^+ , Cl^- , et parfois d'autres sels du sol par leurs racines, et les accumulant dans leurs feuilles, tiges ou vacuoles.

Des espèces telles que *Atriplex lentiformis*, *Salicornia europaea* ou *Suaeda fruticosa* ont démontré leur efficacité dans des conditions arides et salines. [67] En plus de diminuer progressivement la salinité du sol, ces plantes offrent des co-bénéfices : stabilisation de la surface du sol, prévention de l'érosion, création de biomasse valorisable (alimentation animale, bioénergie).

Dans les zones industrielles, la phyto-désalinisation peut être utilisée pour végétaliser les abords de structures, restaurer des sols dégradés en périphérie, ou intégrer des corridors écologiques dans des projets d'aménagement durable. Toutefois, l'efficacité dépend du choix des espèces, des conditions climatiques, de la gestion hydrique et du temps nécessaire (plusieurs cycles cultureux).

2.5.2 Utilisation de micro-organismes bénéfiques

Certaines bactéries et champignons du sol sont capables de moduler les effets de la salinité, soit en améliorant la structure du sol, soit en agissant directement sur la biodisponibilité des ions. Par exemple, les champignons mycorhiziens forment des symbioses avec les racines des plantes, augmentant leur tolérance au stress salin en améliorant l'absorption de l'eau et des nutriments. [75]

De même, les bactéries du genre *Pseudomonas* ou *Azospirillum* peuvent produire des exopolysaccharides qui favorisent l'agrégation des particules du sol, tout en contribuant à la séquestration des sels ou à la stimulation de la croissance des plantes dans des conditions stressantes. Ces microorganismes peuvent être appliqués sous forme d'inoculants, de composts enrichis ou intégrés dans des stratégies de biofertilisation. [76]

Dans le contexte du génie civil, leur utilisation s'inscrit dans une approche de stabilisation écologique : création de sols vivants avant végétalisation, traitement biologique des remblais salins, ou encore gestion durable des sols dans des zones de transition urbaine ou industrielle.

2.5.2.1 Avantages des méthodes biologiques

- Approche naturelle, durable et respectueuse de l'environnement
- Possibilité d'intégrer ces solutions dans des stratégies paysagères ou de valorisation des espaces dégradés

- Coût faible à modéré (selon échelle et durée)

2.5.2.2 Limites

- Résultats progressifs et dépendants du climat, de l'eau et de la biologie du sol
- Moins efficaces dans les cas de salinité extrême ou profonde sans intervention préalable
- Nécessitent une planification et un suivi à moyen ou long terme [77]

2.6 Conclusion

L'étude menée dans ce chapitre a permis d'identifier et de caractériser les principales techniques de désalinisation des sols, mobilisées pour restaurer la qualité des terres affectées par la salinité. Ces approches, qu'elles soient physiques, hydrauliques, chimiques, biologiques ou agronomiques, présentent des principes d'action variés et souvent complémentaires. Leur efficacité dépend fortement du niveau de salinisation, des propriétés physico-chimiques du sol, de la profondeur affectée, ainsi que des contraintes techniques et environnementales spécifiques à chaque site.

Il ressort de cette analyse que le choix d'une technique de désalinisation ne peut se faire de manière universelle. Chaque solution présente des avantages, des limites, et des conditions d'application qui doivent être évalués de façon contextuelle. Les aspects liés à la faisabilité opérationnelle, au coût d'implantation, à la durabilité, à la compatibilité géotechnique et à l'impact environnemental doivent être considérés conjointement pour guider les décisions de réhabilitation.

Ce chapitre constitue ainsi une base de référence technique et comparative des différentes méthodes mobilisables dans un projet de réhabilitation des sols salinisés. Il prépare le terrain pour une réflexion structurée sur le choix des solutions à mettre en œuvre dans un cadre d'aménagement, en tenant compte de la réalité du terrain et des objectifs du projet.

3 Chapitre 3 : Méthodes multicritères d'aide à la décision

3.1 Introduction

La salinité des sols menace nos routes, nos bâtiments et nos infrastructures. Dans des régions comme Bordjia, où le sol accumule des concentrations de sels parfois importantes, les conséquences peuvent être graves : affaissements de fondations, corrosion des armatures, altération des matériaux...etc. Pour les professionnels du génie civil, faire le bon choix en matière de technique de désaliénation devient donc une priorité.

Mais choisir n'est jamais simple. Entre les coûts, l'efficacité à long terme, les impacts environnementaux ou encore la compatibilité avec le climat local, plusieurs paramètres doivent être pris en compte. C'est ici que l'aide à la décision (AD) trouve tout son sens. Bien qu'elle puise ses racines dans la recherche opérationnelle (RO), l'AD s'enrichit aussi d'autres domaines comme l'économie, la psychologie, la sociologie ou encore l'informatique. Elle ne se contente pas de modèles abstraits : elle aide les décideurs à faire face à la réalité.

Parmi les outils les plus utiles de l'AD, on trouve les méthodes de décision multicritère (MCDM), conçues justement pour analyser des situations complexes où plusieurs critères s'opposent. Ces méthodes permettent de grouper, classer ou choisir des alternatives tout en tenant compte des priorités propres au contexte.

Dans ce chapitre, nous allons donc présenter d'abord les grandes familles de méthodes multicritères, avant de nous concentrer sur quatre d'entre elles, choisies pour leur adaptabilité à notre problématique : trois méthodes de classement (PROMETHEE, ELECTRE, TOPSIS, SAW) et une méthode de pondération/agrégation (AHP).

3.2 Les méthodes d'aide à la décision multicritères (MCDA)

L'aide multicritère à la décision (MCDA) désigne un ensemble de méthodes visant à accompagner les décideurs dans des contextes où plusieurs critères, souvent contradictoires, doivent être pris en compte. Comme le définit Philippe Vincke :

« L'aide multicritère à la décision vise à fournir à un décideur des outils lui permettant de progresser dans la résolution d'un problème de décision où plusieurs points de vue doivent être considérés. »

Contrairement à l'approche classique fondée sur un seul critère à optimiser appelée « monocritère », la MCDA s'inscrit dans un paradigme nouveau, que Bernard Roy (1988) [1] qualifie de constructiviste, où l'on ne cherche pas une solution unique et objectivement « optimale », mais plutôt une aide à la compréhension et à la construction d'un compromis acceptable, c'est à dire il s'agit de maximiser ou minimiser une seule fonction objective bien définie :

$$\text{opt}\{g(x): x \in A\} \quad (3.1)$$

Où :

A représente l'ensemble des actions admissibles, et $g(x)$ la fonction à optimiser.

Mais dans la réalité, les problèmes décisionnels sont rarement réductibles à un seul critère. Dans une perspective multicritère, le problème prend la forme suivante :

$$\text{opt } g_1(x), g_2(x), \dots, g_m(x): x \in A \quad (3.2)$$

Il s'agit alors de traiter plusieurs fonctions objectives simultanément, sans qu'il existe généralement de solution unique qui optimise tous les critères à la fois. En d'autres termes, le problème est mathématiquement « mal posé » (ill-posed), car il ne possède pas de solution optimale unique, au sens classique du terme [4].

C'est ici que l'AMD (Approche Multicritère d'Aide à la Décision) propose une alternative : plutôt que de rechercher une solution optimale, elle vise à aider le décideur à construire un compromis parmi les alternatives en présence. Cette approche est fondamentalement constructiviste, il ne suffit pas d'adopter l'AMD parce que la réalité est multidimensionnelle ; il faut y adhérer par conviction, car la construction explicite de plusieurs critères peut enrichir le processus de décision selon [2]. C'est ce que [3] appelle « un nouveau paradigme » : celui de la pluralité des points de vue.

L'AMD se distingue ainsi par deux visions épistémologiques majeures :

- **La voie constructiviste** : les critères, les préférences et les jugements ne sont pas donnés a priori, mais Co construits par le décideur, les experts et les analystes. Il n'existe pas de « vérité absolue », mais une recherche progressive d'un consensus ou d'un compromis [5].
- **La voie axiomatique** : certaines méthodes (comme ELECTRE ou PROMETHEE) reposent sur des fondements logiques et formels, garantissant la cohérence du raisonnement, tout en permettant une certaine souplesse grâce à des paramètres adaptables (seuils, poids, fonctions de préférence) [6].

[4] rappelle que dans des problèmes complexes, notamment spatiaux, environnementaux ou techniques, les conséquences d'une décision sont multiples, difficilement mesurables par un seul critère. Une fonction objective unique ne suffit donc pas à appréhender l'ensemble des impacts et enjeux. Définir plusieurs critères, même conflictuels, permet de mieux cerner les dimensions d'un problème et d'en évaluer les compromis.

En somme, l'AMD constitue un champ théorique et pratique puissant, qui permet de transformer des situations complexes en modèles d'aide à la réflexion. Elle ne remplace pas le jugement du décideur, mais le soutient, le structure et le rend plus transparente.

3.2.1 Notion de problématique de décision :

Roy distingue quatre problématiques, dont les caractéristiques sont résumées dans le Tableau 1, de base que tout problème de décision multicritère doit se ramener nécessairement à l'une d'entre elles. [78]

- **Problématique du choix ($P.\alpha$) :** Elle consiste à sélectionner un sous ensemble aussi restreint que possible de l'ensemble des actions A , contenant les meilleures actions. L'idéal est d'obtenir une seule et meilleure action, mais à cause de la nature conflictuelle des critères, il est préférable de fournir au décideur quelques actions qui représentent différentes variantes de la "meilleure action". Évidemment, le résultat final peut être raffiné en utilisant de l'information additionnelle ou avec une analyse plus approfondie. Formellement, le résultat de la prescription est un sous ensemble $A_0 \subset A$. Exemple : choix d'un site pour une localisation industrielle où chaque site représente une action.
- **Problématique de tri ($P.\beta$) :** Elle consiste à affecter chaque action à un ensemble de catégories prédéfinies. Cette formulation est adéquate lorsque le problème de décision consiste à examiner chaque action indépendamment des autres (en tenant compte que des caractéristiques intrinsèques de chaque action) dans le but est de proposer une recommandation parmi un ensemble des recommandations spécifiées en avance. Chaque recommandation peut être associée avec une catégorie. Le problème de décision est alors vu comme trier les actions potentielles aux différentes catégories définies en termes de normes prédéfinies. La procédure de tri doit être définie de telle sorte que chaque action est affectée à une et seule catégorie. Formellement, une prescription consiste à une partition d' A . Exemple : affecter différentes parcelles d'un territoire (donc chaque parcelle est une action) à un type d'utilisation particulier parmi différentes utilisations possibles.
- **Problématique de rangement ($P.\gamma$) :** Elle consiste à ranger les différentes actions en allant de la meilleure action à la moins bonne avec éventuellement des

ex aequo. Cette problématique est intéressante lorsque les actions sont à différencier selon leur intérêt relatif. L'idéal est d'obtenir un ordre complet. Cependant, à cause de la nature conflictuelle des critères, à l'imprécision, à l'existence de systèmes de valeurs différents, il est souvent plus réaliste de présenter au décideur un ordre partiel. Il est à noter qu'en pratique, le rangement peut être nécessaire seulement pour les actions les plus intéressantes. Le rangement peut être vu comme une relation transitive définie sur A (ou un sous ensemble de A). Exemple : ranger les différents sites historiques en vue d'une restauration échelonnée sur plusieurs années qui commence par le site le plus urgent.

- **Problématique de description (P.δ) :** Elle consiste simplement à décrire les actions et leurs conséquences et non pas à les comparer comme c'est le cas avec les trois autres problématiques précédentes. Ici, il n'existe pas une prescription et la procédure d'investigation est cognitive. Exemple : identifier et décrire, dans le seul but d'apprendre et se de préparer à des éventuels accidents. Exemple : les différentes actions possibles pour lutter contre la pollution.

Problématique	Objectif	Procédure d'investigation	Prescription
P.α	Sélectionner un sous-ensemble aussi restreint que possible de A contenant les meilleures actions	Sélection	Sous-ensemble $A_0 \subset A \subset A$
P.β	Affecter chaque action de A à une et une seule des catégories définies selon de normes préétablies	Segmentation	Partition de A
P.γ	Ordonner les actions de A de la meilleure à la moins bonne	Classement	Ordre partiel sur A
P.δ	Décrire les actions et leurs conséquences	Cognitive	Aucune prescription

Tableau 1 Les différentes problématiques de décision [4].

3.3 Classification des méthodes

Les méthodes multicritères sont classées selon des informations qu'on peut possiblement extraire, c'est pour ça qu'il est nécessaire de choisir des méthodes mieux adapter à nos recherches, il existe trois groupes de classifications des méthodes :

- Les méthodes d'agrégation.
- La méthode interactive.
- Les méthodes de sur-classement. [79]

3.3.1 Les méthodes d'agrégation

Une fois que la liste des actions potentielles et des critères à prendre en considération sont établis, il faut juger chacune de ces actions vis-à-vis de chaque critère et également agréger

ces jugements pour déterminer l'action qui sera globalement la plus profitable [8]. Les méthodes d'agrégation visent à transformer le problème multicritère initial en un problème unique, en combinant les différents critères en une seule mesure synthétique. Les formules (3.3) – (3.6) montrent un exemple d'agrégation pour où tous les critères des critères de maximisation. [80]

$$\text{Max}(g_1(x), g_2(x), \dots, g_k(x)), x \in A \quad (3.3)$$

Le problème uni critère :

$$\text{Max}(U(x)), x \in A \quad (3.4)$$

Où :

$U(x)$ est une fonction d'utilité à maximiser ou à minimiser dans le cas des critères de minimisation.

$$U(x) = U(g_1(x), g_2(x), \dots, g_j(x), \dots, g_k(x)) \quad (3.5)$$

Ensuite, on agrège les k critères en un seul critère unique de synthèse [8]. On doit donc construire la fonction d'utilité, sous forme d'une somme pondérée des critères.

$$U(x) = \sum_{j=1}^k \lambda_j \cdot g_j(x) \quad (3.6)$$

Où :

- $g_j(x)$: valeur de l'alternative x pour le critère j ,
- λ_j : poids ou **pondération** associé au critère j , tel que $\sum_{j=1}^k \lambda_j = 1$.

3.3.2 Méthodes interactives

Une méthode interactive est un processus séquentiel se composant de plusieurs itérations. Chaque itération comprend une phase de calcul au cours de laquelle l'homme d'étude élabore une solution de compromis, et une phase de décision au cours de laquelle le décideur élabore progressivement la modélisation de ses préférences [8] [81].

3.3.3 Méthodes de surclassement

Les fondations de la théorie de la relation de sur-classement « Outranking relation theory(ORT) » ont été introduites par Bernard Roy à la fin des années 1960. Depuis lors, cette théorie a été employée par les chercheurs qui travaillent sur les approches multicritères, principalement en Europe [8] [82].

3.4 Les différentes méthodes MCDA

3.4.1 Méthode PROMETHEE II

La méthode PROMETHEE II est basée sur la comparaison mutuelle de chaque paire d'alternatives par rapport à chacun des critères sélectionnés. La comparaison se fait en se basant sur la différence entre la performance de chaque paire d'alternatifs. Pour effectuer un classement des alternatives à l'aide de la méthode PROMETHEE II, il est nécessaire de définir une fonction de préférence $P_{a,b}$ pour chaque critère. Les alternatives a et b sont évaluées en fonction des fonctions de critères. On considère que l'alternative a est meilleure que l'alternative b selon le critère j si $(a) > (b)$ dans le cas des critères avantageux. Dans le cas des critères de coûts a est meilleure que b si $(a) < f_j(b)$. [83]

Le décideur a la possibilité d'attribuer une préférence à l'une des alternatives sur la base d'une telle comparaison. La préférence peut prendre des valeurs sur une échelle de 0 à 1, et les combinaisons de relations peuvent être présentées à l'aide des relations suivantes :

- $(a, b) = 0$ Aucune préférence, indifférence.
- $(a, b) \approx 0$: Préférence faible $f_j(a) > f_j(b)$.
- $(a, b) \approx 1$: Préférence forte $f_j(a) \gg f_j(b)$.
- $(a, b) = 1$: Préférence stricte $(a) \gg f_j(b)$.

Les relations ont les limitations suivantes :

$$0 \leq P(a, b) \leq 1 \quad (3.7)$$

$$P(a, b) = P(b, a) \quad (3.8)$$

Une préférence plus élevée est définie par une valeur plus élevée dans l'intervalle donné. Cela signifie que, pour chaque critère, le décideur considère une certaine fonction de préférence [9]. Dans la figure 3, six critères généralisés sont donnés, ainsi que six fonctions de préférence (d), où d indique la différence de performance pour un pair d'alternatifs. [84]

Les six critères généralisés peuvent être illustrés à l'aide de fonctions linéaires, c'est dire qu'ils sont obtenus en choisissant les quatre points les plus élevés dans l'espace des critères du critère donné. Dans la Figure 3, en plus des fonctions de critères, les paramètres pour les points choisis dans l'espace des critères, illustrés sur l'axe x , sont donnés, et le niveau de préférence est indiqué sur l'axe (P). Concernant la fonction de préférence à niveaux (Type IV), la valeur de préférence (d) est 0 ou $\frac{1}{2}$ ou 1, au lieu de donner n'importe quelle valeur dans l'intervalle $0 < P(d) < 1$. Cela indique que si la différence est inférieure au seuil d'indifférence alors les deux alternatives sont indifférents. Par contre, si la différence est supérieure au seuil de préférence p alors le premier alternatif est strictement préféré par rapport au deuxième alternatif. Cependant, lorsque la différence est entre ces deux seuils p et q , on obtient une préférence faible entre le pair d'alternatifs.

Après avoir défini le type de critère général, il est nécessaire de déterminer la valeur de la fonction de préférence de l'action a par rapport à l'action b pour chaque critère, puis de calculer l'indice de préférence (IP) de l'action a par rapport à l'action b . Pour chaque paire d'actions qui appartient à l'ensemble A , l'indice de préférence est calculé selon la formule 9 :

$$IP(a, b) = \sum_{j=1}^n w_j \cdot p_j(a, b) \quad (3.9)$$

Où :

- **W_j** : Le poids du critère j (indiquant l'importance relative de ce critère dans le processus de décision).
- **(a, b)** : La fonction de préférence pour le critère j , mesurant la préférence de l'alternative a par rapport à b selon ce critère.[10].

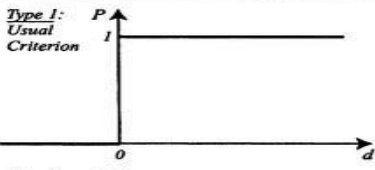
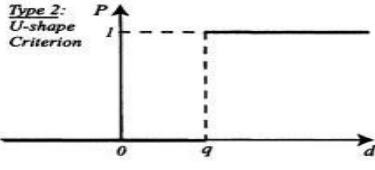
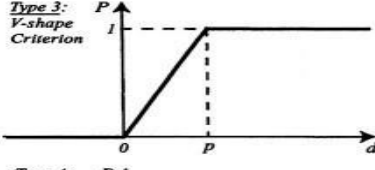
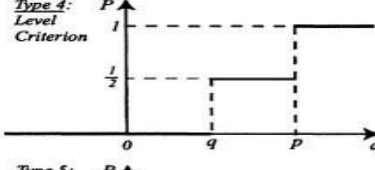
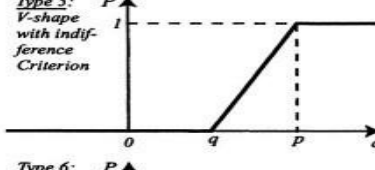
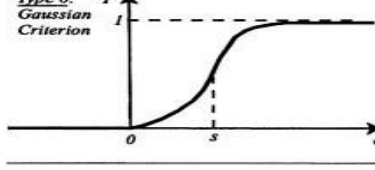
Generalised criterion	Definition	Parameters to fix
Type 1: Usual Criterion 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 & d > 0 \end{cases}$	—
Type 2: U-shape Criterion 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ 1 & d > q \end{cases}$	q
Type 3: V-shape Criterion 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ \frac{d}{p} & 0 \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p
Type 4: Level Criterion 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{1}{2} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q
Type 5: V-shape with Indif- ference Criterion 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q
Type 6: Gaussian Criterion 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2s^2}} & d > 0 \end{cases}$	s

Figure 3-1 Type de fonction de préférences [85]

3.4.1.1. Les trois phases de la méthode PROMETHEE II

La mise en œuvre de la méthode PROMETHEE II repose sur trois grandes étapes :

- **Étape 1 : Calcul des différences de performance**

Pour chaque paire d'alternatives (a_i, a_k) et pour chaque critère j , on calcule la différence de performance:

$$d_{ij} = f_j(a_i) - f_j(a_k) \quad (3.10)$$

Ce calcul permet d'évaluer à quel point une alternative est meilleure ou moins bonne qu'une autre pour un critère donné. [78]

- **Étape 2 : Choix et application des fonctions de préférence**

À chaque critère C_j est associée une **fonction de préférence généralisée** $P_j(d_{ij})$, qui transforme l'écart d_{ij} en une mesure de préférence dans l'intervalle $[0,1]$. Cette fonction permet d'éliminer les effets d'échelle entre critères.

On obtient ensuite un indice de préférence global $\pi(a_i, a_k)$, calculé comme une agrégation pondérée :

$$d_{ij} = f_j(a_i) - f_j(a_k) \quad (3.11)$$

$$\pi(a_i, a_k) = \sum_{j=1}^n w_j \cdot P_j(f_j(a_i) - f_j(a_k)) \quad (3.12)$$

Où :

- w_j est le **poids** du critère j , tel que $\sum w_j = 1$
- $\pi(a_i, a_k)$ est l'**indice de préférence globale** de a_i par rapport à a_k .

- **Étape 3 : Évaluation des flux de préférence (classement)**

On calcule les flux pour chaque alternative (a_i) selon les formules suivantes :

$$\Phi^+(a_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{k \neq i} \pi(a_i, a_k) \quad (3.13)$$

$$\Phi^-(a_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{k \neq i} \pi(a_k, a_i) \quad (3.14)$$

Le **flux net** est alors :

$$\Phi(a_i) = \Phi^+(a_i) - \Phi^-(a_i) \quad (3.15)$$

On utilise le flux net de surclassement afin d'obtenir un ordre total des alternatives (**PROMETHEE II**). Par contre les deux flux sortant et entrant quand ils sont utilisés sans le flux net, ils peuvent donner un ordre partiel (**PROMETHEE I**). [7] [83]

Le principe fondamental de **PROMETHEE II** repose donc sur une comparaison par paires des actions sur chaque critère, puis sur l'agrégation pondérée des préférences, afin de permettre une hiérarchisation claire et justifiée des alternatives.

3.4.2 Famille des méthodes ELECTRE

Une école de pensée francophone, initiée par les travaux de Bernard Roy, a développé une approche basée sur des comparaisons par paires d'actions pour établir une relation de surclassement. Contrairement à d'autres théories, les méthodes de surclassement, comme celles de la famille ELECTRE, ne sont pas totalement compensatoires, grâce à l'introduction du concept de discordance. Selon Roy, une action a surclasse une action b (aSb) si deux conditions sont remplies : concordance (une majorité d'arguments soutient que a est au moins aussi bonne que b) et non-discordance (aucun critère ne s'oppose fortement à cette conclusion). Ces méthodes permettent de gérer des décisions complexes en évitant la compensation totale entre critères. Les différentes versions de ces méthodes seront explorées plus en détail [12].

3.4.2.1 ELECTRE I

Cette méthode, considérée comme l'ancêtre de la famille ELECTRE, porte le nom Elimination Et Choix Traduisant la Réalité. Son objectif principal est de sélectionner un sous-ensemble d'actions parmi lesquelles se trouve le compromis optimal recherché.

[86] Elle repose sur une approche de comparaison par paires pour éliminer les alternatives dominées et identifier les solutions les plus pertinentes.

Pour chaque couple d'actions a et b dans cet ordre, on calcule l'indice de concordance en sommant les poids des critères "favorables" à l'action a :

$$C(a, b) = \sum_{j \in j^+(a, b)} w_j \quad (3.16)$$

Où :

- $j^+(a, b) = \{j \mid g_j(a) \geq g_j(b)\}$: ensemble des critères pour lesquels a est au moins aussi bon que b ,
- w_j : **poids** (ou importance) associé au critère j ,
- (x) : **performance** de l'alternative x selon le critère j .

Plus (a, b) est proche de 1, plus il y a **consensus entre les critères** en faveur de a par rapport à b .

Par construction, les poids étant normalisés, l'indice de concordance ca, b varie entre 0 (lorsque a est dominé par b) et 1 (lorsque a domine b). En fonction de la nature du problème, le décideur fixe un seuil de concordance. Lorsque $(a, b) \geq Sc$ qui est le seuil de concordance, on considère que a surclasse b ce qui permet d'établir une relation de surclassement entre les alternatives.

Le seuil de concordance Sc est un paramètre technique qui, étant donné la définition de ca, b et la signification de la relation S (au moins aussi bon que), doit appartenir à l'intervalle $[0.5 ; 1]$. En pratique, les valeurs les plus couramment utilisées pour Sc sont 0.6, 0.65, 2/3, 0.7, 3/4 et 0.8. En cas d'incertitude, une analyse de sensibilité sur Sc peut être réalisée pour ajuster la richesse de la relation S et obtenir des résultats plus adaptés aux objectifs du décideur.

En complément, nous intégrons l'aspect "non discordance", qui stipule que pour envisager la relation a surclasse b , il faut éviter les situations où, pour un critère donné,

l'avantage de b sur a est si important qu'il pourrait invalider cette relation. Autrement dit, même si a est globalement préférée à b (concordance), une discordance forte sur un critère spécifique peut empêcher la conclusion que aSb . Cet aspect renforce la robustesse de la méthode en garantissant que la relation de surclassement ne soit pas compromise par des désavantages critiques.

Pour chaque critère i , le décideur doit définir un seuil de veto S_{vi} , qui représente l'écart maximal toléré entre les évaluations de deux actions en faveur de b au-delà duquel l'affirmation a surclasse b , est remise en question. [87] Si au moins un seuil de veto est violé (c'est-à-dire si l'écart en faveur de b dépasse S_{vi} pour un critère i , alors la relation aSb est rejetée $\sim aSb$. Sinon, la relation de surclassement établie par la concordance aSb est conservée. Cette approche garantit que la relation de surclassement ne soit pas compromise par des désavantages trop importants sur certains critères

À ce stade, nous disposons d'une relation de surclassement S , qui peut être représentée visuellement par un graphe G . Si G est sans circuit, il est possible d'identifier un ensemble unique de sommets, appelé noyau N , dont les éléments sont incomparables entre eux et ne sont surclassés par aucune action extérieure à ce noyau. Ce sous-ensemble N représente les actions solutions. Cependant, une incertitude persiste quant au choix de la meilleure action parmi les sommets du noyau, car ceux-ci ne peuvent pas être comparés directement entre eux. Cette situation nécessite une analyse supplémentaire pour déterminer l'action optimale. [88]

Si le graphe contient des circuits, ajustez les seuils de concordance S_c et de veto S_{vi} avec l'expert pour les éliminer. Augmenter S_c réduit la relation et supprime souvent les circuits en éliminant d'abord l'arc de surclassement le moins solide. Cela permet d'obtenir un graphe sans circuit et de clarifier les actions solutions.

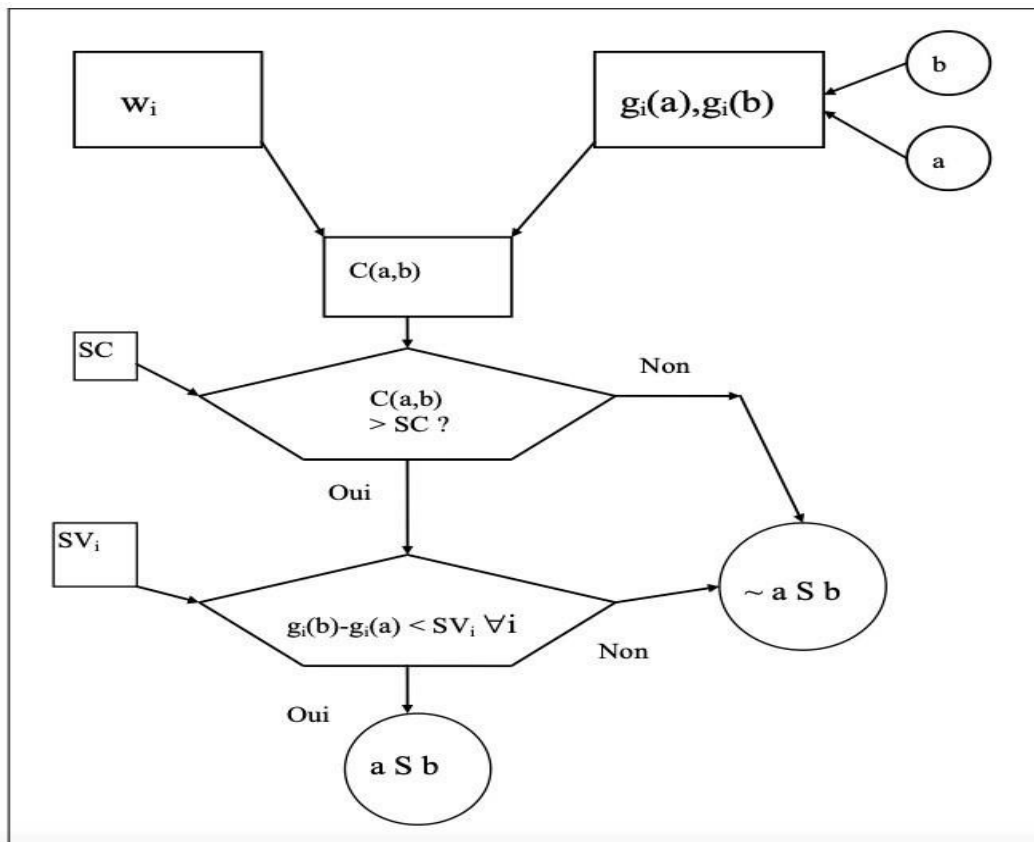


Figure 3-2 Le déroulement de la méthode ELECTRE I [86]

3.4.2.2 ELECTRE I

Fait un usage minimum de valeurs numériques. Par nature elle est mieux adaptée à des échelles qualitatives qu'à des critères à valeurs numériques. Pour cela il fallait étendre ce model en créant ELECTRE I [78] qui accepte les pseudo-critères (critères à seuils), et évite que de trop petits écarts entre les évaluations n'influencent trop le calcul des coefficients de concordance [89].

3.4.2.3 ELECTRE II

Utilise deux relations de surclassement de deux niveaux chacune, rangement direct et le rangement indirect : une forte S_f et une faible S_f (n'intervient qu'en fin de travail pour

raffiner le(s) classement(s) en départageant les actions qui, du point de vue de S_f , appartiennent à une même classe d'équivalence) dont la construction est basée sur deux seuils de concordance Sc_1 Sc_2 et deux seuils de veto Svi_1 Svi_2 par critère [90].

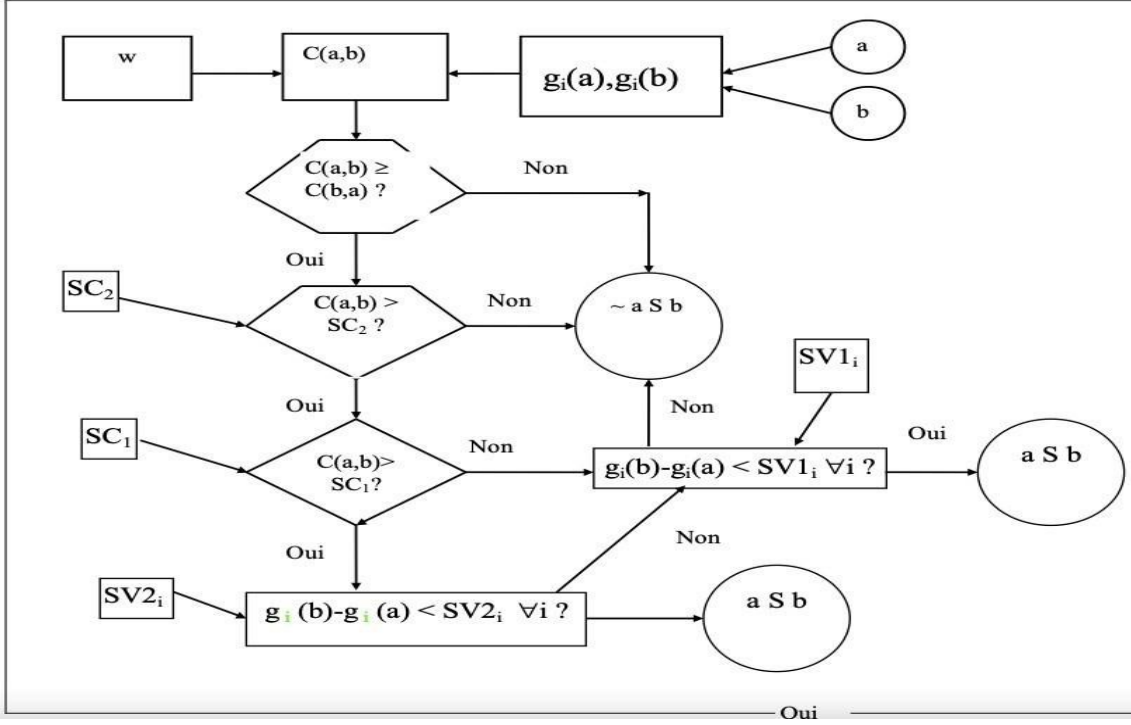


Figure 3-3 . ELECTRE II [86]

3.4.2.4. ELECTRE III

Qui utilise une relation de surclassement valuée et une procédure d'exploitation du graphe valuée utilisant des techniques proches de celles de manipulation des nombres floue pour modéliser les pseudo-critères. ELECTRE III a perdu de la simplicité des méthodes originales et n'a pas eu de succès vu sa grande complexité et un recours important aux valeurs numériques qui la rapproche des méthodes d'utilité [12].

3.4.2.4 ELECTRE TRI

Présume que tous les pseudo-critères sont de même importance. Elle comme ELECTRE II comporte deux relations de surclassement mais un seul jeu de seuils de veto et la notion de concordance est traduite par une notion de majorité de critères en absence de toute pondération [81].

3.4.3 Méthode AHP

Une autre méthode, développée en 1970 par [91] consiste à décomposer un problème de décision complexe en une hiérarchie de sous-problèmes plus simples, chacun pouvant être analysé indépendamment. Les éléments de cette hiérarchie peuvent concerner tout aspect du problème, qu'il soit matériel ou immatériel, mesuré avec précision ou estimé approximativement, bien ou mal compris.

Une fois la hiérarchie établie, les décideurs évaluent systématiquement ses éléments en les comparant deux à deux, en tenant compte de leur impact sur les éléments supérieurs de la hiérarchie. Bien que des données concrètes puissent être utilisées, l'AHP repose essentiellement sur les jugements humains pour évaluer l'importance relative des éléments. C'est cette intégration des jugements humains, et pas seulement des données objectives, qui constituent le cœur de la méthode AHP. Le programme AHP se déroule en quatre étapes pour obtenir l'installation de toutes les alternatives [92].

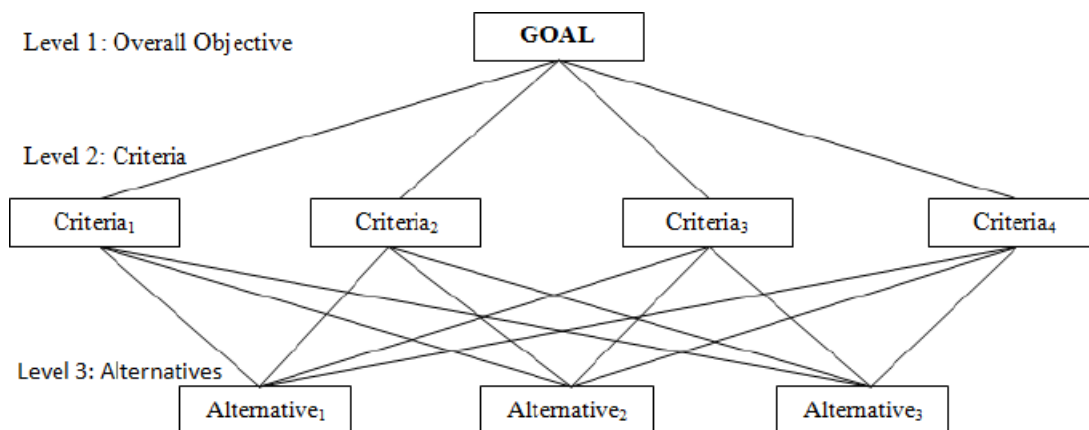


Figure 3-4 Hiérarchie de l'AHP [93]

Étape 1 : Structurer le problème dans une hiérarchie

Dans sa première étape, la méthode commence par définir la racine du problème, qui représente l'objectif global de la décision. Le deuxième niveau comprend les critères, c'est-à-dire les différentes dimensions ou aspects à prendre en compte pour évaluer les alternatives [94].

Dans une hiérarchie plus complexe, les critères peuvent être subdivisés en sous-critères, voire en sous-sous-critères, ajoutant ainsi des niveaux supplémentaires à la structure. Cependant, une hiérarchie valide doit comporter au moins trois niveaux : l'objectif, les critères et les alternatives.

Étape 2 : Effectuez le calcul de priorité

La deuxième étape consiste à calculer la priorité de chaque critère par rapport à l'objectif et la priorité de chaque alternative par rapport à un critère spécifique. La priorité est représentée par l'absolu un nombre entre zéro et un qui indique l'importance de chaque alternative par rapport à pour un critère spécifique et l'importance de chaque critère par rapport à l'objectif supérieur dans la résolution de problèmes. La technique utilisée pour calculer la priorité est appelée d'application Comparaison. Cette technique consiste généralement à comparer toutes les alternatives deux à deux avec Juger la meilleure alternative [95].

Intensité du jugement	Définition	Explication
1	Égalité d'importance	Les deux éléments contribuent également à l'objectif.
3	Faible supériorité	Une expérience ou un jugement favorise légèrement un élément par rapport à un autre.
5	Forte supériorité	L'un est fortement préféré à l'autre.
7	Très forte supériorité	Une dominance est démontrée dans la pratique.
9	Supériorité absolue	La preuve est écrasante en faveur d'un élément par rapport à un autre.
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires	Compromis entre les valeurs adjacentes.
Réciproques	1/x	Si l'élément ii a une importance xx sur jj, alors jj a une importance 1/x1/x sur ii.

Tableau 2 L'échelle de comparaison par paire de [91]

Etape 3 : Vérifier la cohérence de la matrice de comparaison par paires

La troisième étape consiste à vérifier la cohérence des matrices de comparaison par paires, et nécessite le calcul de l'indice de cohérence (**CI**), où $\lambda_{\max}$ est la valeur propre de la matrice et N est le nombre de lignes indépendantes dans la matrice [14].

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - N}{N - 1} \quad (3.17)$$

$$\lambda_{\max} = \text{moyennedevaleurs} \left(\frac{A \omega}{\omega} \right) \quad (3.18)$$

Pour évaluer la validité de l'indice **CI**, on le compare à un indice de cohérence aléatoire (appelé **RI** RandomConsistency Index), qui dépend du nombre N de critères. Le **rapport de cohérence (CR)** est alors :

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3.19)$$

Etape 4 : Synthétiser les priorités finales

La dernière étape consiste à synthétiser les priorités globales pour déterminer l'alternative finale à choisir. Cette approche est particulièrement utile pour résoudre des problèmes de décision complexes, où il s'agit de sélectionner la meilleure option parmi plusieurs alternatives, chacune étant évaluée selon plusieurs critères. Dans ce processus, les décideurs utilisent des comparaisons par paires simples pour établir des priorités, ce qui permet de développer un classement global des alternatives et de faciliter la prise de décision. [92]

L'expert alors remplit une matrice de comparaison par pair entre les alternatives pour chaque critère. Donc pour m critères il y aura m matrices de comparaison de dimensions $m \times m$. Cependant, AHP est souvent utilisé pour la pondération des critères. Dans ce cas, l'expert fait la comparaison entre chaque critère en indiquant à quel degré un critère est plus ou moins important que chaque autre critère.

En fin de compte, nous voyons que le programme AHP a reçu le plus d'attention parmi les universitaires et est fréquemment utilisé dans le monde entier en raison de sa simplicité, de sa qualité et de sa facilité d'utilisation.

3.4.4 Méthode TOPSIS

La méthode TOPSIS (Technique for OrderPreference by Similarity to Ideal Solution) est une approche largement utilisée en aide à la décision multicritère (MADM). Proposée en 1981 par [96], elle repose sur l'idée que la meilleure alternative doit être la plus proche de la solution idéale positive (meilleure performance possible) et la plus éloignée de la solution idéale négative (pire performance possible). Le déroulement de l'algorithme se fait selon les étapes suivantes:

Étape 1 : Normalisation de la matrice de décision

On commence par normaliser les valeurs de la matrice de performance. La méthode la plus couramment utilisée est la normalisation vectorielle :

$$v_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (3.20)$$

Où :

- x_{ij} est la valeur brute de l'alternative i selon le critère j
- v_{ij} est la valeur normalisée de l'alternative i selon le critère j

Étape 2 : Pondération des critères

À chaque critère j est attribué un poids w_j , représentant son importance relative. La somme de tous les poids doit être égale à 1 :

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (3.21)$$

La matrice pondérée est obtenue en multipliant chaque valeur normalisée par le poids correspondant :

$$v_{ij}^{pond} = w_j \cdot v_{ij} \quad (3.22)$$

Étape 3 : Détermination des solutions idéales

Il existe trois méthodes :

1. Méthode classique (valeurs extrêmes)

:

- La solution idéale positive A^+ (valeurs optimales pour chaque critère).
- La solution idéale négative A^- (valeurs les moins souhaitables).

Selon la nature du critère (à maximiser ou à minimiser), on détermine :

$$A^+ = \max(v_{ij}) \text{ si bénéfice ; } \min(v_{ij}) \text{ si coût} \quad (3.23)$$

$$A^- = \min(v_{ij}) \text{ si bénéfice ; } \max(v_{ij}) \text{ si coût} \quad (3.24)$$

2. Méthode basée sur une alternative fictive idéale :

Au lieu de prendre les valeurs max/min de chaque critère, on définit une alternative fictive représentant le profil idéal, parfois issu d'un consensus d'experts ou d'une politique publique.

3. Méthode basée sur un intervalle de satisfaction (approche floue) :

Dans les cas d'incertitude, on peut définir les solutions idéales sous forme d'intervalles ou de valeurs floues, surtout dans les contextes où les données sont imprécises ou subjectives.

Étape 4 : Calcul des distances aux solutions idéales

Une fois les solutions idéales A^+ et A^- déterminées, on calcule la distance entre chaque alternative et ces deux solutions. Différentes métriques peuvent être utilisées [97]:

1. Distance euclidienne :

- Distance à la solution idéale positive :

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (3.25)$$

- Distance à la solution idéale négative :

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (3.26)$$

2. Distance de Manhattan (ou city block) :

$$S_i^+ = \sum_{j=1}^n |v_{ij} - v_j^+| \quad (3.27)$$

$$S_i^- = \sum_{j=1}^n |v_{ij} - v_j^-| \quad (3.28)$$

3. Distance de Chebyshev (utilise le maximum des écarts) :

$$S_i^+ = \max_j |v_{ij} - v_j^+| \quad (3.29)$$

$$S_i^- = \max_j |v_{ij} - v_j^-| \quad (3.30)$$

Étape 5 : Calcul de la proximité relative

La proximité relative C_i (ou P_i) d'une alternative par rapport à la solution idéale est calculée par :

$$P_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (3.31)$$

Où :

- $P_i \in [0,1]$.
- Plus P_i est proche de 1, meilleure est l'alternative.

Étape 6 : Classement des alternatives

Les alternatives sont classées en ordre décroissant de P_i . L'alternative ayant la plus grande valeur de P_i est considérée comme la meilleure option.

3.4.5 Méthode SAW (Simple Additive Weighting)

La méthode SAW (Simple Additive Weighting), également connue sous le nom de méthode de pondération additive simple, est l'une des approches les plus simples et les plus utilisées dans l'analyse multicritère de décision (AMD). Elle est particulièrement appréciée pour sa facilité de mise en œuvre et sa capacité à fournir un classement clair des alternatives en fonction de leurs performances globales pondérées [98].

3.4.5.1 Étapes de la méthode SAW :

1. Identification des alternatives et des critères

Chaque alternative est évaluée selon plusieurs critères déterminés en amont du processus décisionnel.

2. Construction de la matrice de décision

Une matrice de décision est élaborée, où chaque ligne représente une alternative et chaque colonne un critère. Les valeurs dans la matrice correspondent aux performances des alternatives sur chaque critère. [99]

3. Normalisation de la matrice de décision

Les valeurs de la matrice sont normalisées pour permettre une comparaison entre des critères hétérogènes. [100]

- Pour les critères à maximiser :

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max(x_j)} \quad (3.32)$$

- Pour les critères à minimiser :

$$r_{ij} = \frac{\min(x_i)}{x_{ij}} \quad (3.33)$$

Où :

- x_{ij} est la valeur de l'alternative i sur le critère j.

4. Application des poids

Chaque critère est pondéré selon son importance, généralement issue d'une méthode comme l'AHP. Les poids w_j sont appliqués aux valeurs normalisées :

$$v_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot r_{ij} \quad (3.34)$$

Où :

- v_i représente la valeur finale de performance de l'alternative i.

5. Classement des alternatives

Les alternatives sont classées en fonction de leurs scores v_i . L'alternative avec la valeur la plus élevée est considérée comme la meilleure.

Cette méthode est adaptée aux problèmes nécessitant des solutions rapides et efficaces, et elle est largement utilisée dans des domaines variés, notamment l'ingénierie, la logistique, et l'évaluation environnementale [101].

3.5 Travaux antérieurs liés à la sélection des méthodes de désalinisation par approche multicritère

De nombreuses recherches ont été entreprises afin de sélectionner ou hiérarchiser des solutions de désalinisation ou de gestion des sols salins à l'aide de l'approche multicritère. Ces travaux démontrent la pertinence de l'AMCD dans des contextes environnementaux et

technologiques complexes, notamment dans le domaine de la gestion de l'eau et du génie civil.

3.5.1 Études sur la gestion et la réhabilitation des sols dégradés

- [102]a utilisé l'AHP pour évaluer les stratégies de réhabilitation des terres dégradées en Italie, démontrant la capacité de cette méthode à structurer les décisions en fonction de critères multiples.
- [103]ont couplé AHP et SIG pour identifier les zones les plus critiques dans un bassin semi-aride en Turquie, ce qui a permis d'optimiser les interventions.
- [104]ont fourni une revue exhaustive sur l'application de TOPSIS, AHP et ELECTRE dans la gestion durable des sols salins.
- [105]ont cartographié l'aptitude des sols égyptiens à l'aide d'un modèle SIG intégré à l'AHP.

3.5.2 Thèses académiques pertinentes

- [106]a comparé différentes stratégies de lutte contre la salinité en Tunisie centrale via PROMETHEE et ELECTRE.
- [107]a proposé une approche multicritère intégrée à un SIG pour prioriser les interventions de gestion des sols salins à l'Université de Liège.
- Travaux spécifiques à la désalinisation et au génie civil
- Plusieurs travaux récents ont exploré les méthodes de désalinisation à travers des approches multicritères appliquées aux technologies durables :
- [108]ont proposé une approche hybride floue (fuzzy MCDM) pour le choix de procédés de désalinisation, démontrant la supériorité des modèles hybrides dans les environnements incertains.
- [109]ont appliqué l'AHP à la sélection de stations de dessalement au Koweït, confirmant l'efficacité de l'AHP pour des choix technico-économiques.

- [110]ont comparé les technologies de dessalement alimentées par énergies renouvelables à l'aide d'une analyse conjointe basée sur le cycle de vie (LCA), PESTLE et MCDM.
- [111]ont effectué une revue sur les technologies de dessalement adaptées aux pays en développement, soulignant le besoin d'analyses multicritères pour intégrer des contraintes économiques et environnementales.

3.5.3 Travaux sur les méthodes de pondération en AMCD

La précision des résultats en AMCD dépend largement de la méthode de pondération utilisée.

Plusieurs publications ont approfondi cette problématique :

- [112]ont proposé une revue complète sur les méthodes de pondération objectives, subjectives et hybrides utilisées en MCDM.
- [113]ont introduit une méthode innovante de pondération appelée MEREC (Method based on the Removal Effects of Criteria), qui évalue l'importance des critères à partir de leur influence sur le classement final.
- [114]ont étudié l'impact des méthodes de pondération sur les résultats en gestion des ressources hydriques, soulignant que le choix de la méthode peut modifier de façon significative les décisions finales.

3.5.4 Projets collaboratifs de référence

Un exemple notable est le projet européen [115], qui a proposé une méthode d'évaluation multicritère pour comparer différentes alternatives de remédiation des sols en Europe, avec un accent sur les fonctions écosystémiques, la durabilité et le coût-bénéfice global. Ce projet a réuni plusieurs universités (Chalmers, Umeå, Université de Vienne) et agences environnementales.

Enfin, l'outil **GEFT** (GenericEvaluation Framework Tool), proposé par Sabir Mohammedi Taieb et Laredj A [116], constitue une plateforme multicritère personnalisable conçue pour comparer différentes alternatives en fonction de critères techniques, environnementaux et économiques. Développé initialement pour d'autres domaines

d'application, cet outil a servi de **référence conceptuelle** dans le cadre du présent mémoire. Il a inspiré la conception de **DMCT (Desalination Methods Comparison Tool)**, un outil spécifique que nous avons personnalisé pour évaluer les méthodes de désalinisation des sols dans un contexte de génie civil en Algérie.

3.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté de manière approfondie les principales méthodes d'aide à la décision multicritère (MCDM). Quatre approches majeures ont été explorées : PROMETHEE II, qui repose sur l'utilisation de fonctions de préférence pour établir un classement explicite des options ; ELECTRE I, qui se distingue par sa capacité à écarter les alternatives non pertinentes à l'aide de seuils de veto ; AHP, qui permet une structuration hiérarchique des critères en intégrant à la fois des éléments qualitatifs et quantitatifs ; et TOPSIS, SAW qui identifie la meilleure option en fonction de sa proximité avec une solution idéale théorique.

Chaque méthode présente des avantages spécifiques adaptés aux enjeux de Bordjia :

- PROMETHEE II et TOPSIS et SAW pour leur simplicité d'interprétation
- ELECTRE I pour sa robustesse face aux critères conflictuels
- AHP pour sa capacité à structurer des problèmes complexes

Cependant, leur efficacité dépendra étroitement :

- De la qualité des données disponibles sur les sols de Bordjia
- De la pertinence des critères sélectionnés (coûts, efficacité technique, impacts environnementaux)

- De l'adéquation aux spécificités locales (ressources en eau, type de cultures, capacités techniques)

Cette analyse théorique établit le cadre méthodologique nécessaire pour aborder la phase appliquée de notre recherche. Le quatrième chapitre mettra en œuvre ces différentes approches MCDM dans une étude de cas concrète centrée sur Bordjia. Nous procéderons à :

- Une collecte rigoureuse des données terrain (caractéristiques des sols, coûts des techniques)
- L'application comparative des quatre méthodes sur un même ensemble d'alternatives
- Une analyse critique des résultats obtenus par chaque approche
- La sélection de la méthode la plus adaptée au contexte local

L'objectif final sera d'aboutir à un classement fiable des solutions de désalinisation du sol, tout en évaluant la robustesse des différentes méthodes MCDM face aux réalités pratiques de la région. Cette étape cruciale permettra de passer de la théorie à des recommandations opérationnelles pour les décideurs de Bordjia.

4 Chapitre 3 Application des méthodes MCDA pour la désalinisation des sols .

4.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'appliquer des méthodes d'aide à la décision multicritères afin de sélectionner la meilleure alternative pour la **désalinisation des sols**. Ce processus repose sur l'analyse de plusieurs alternatives possibles, en tenant compte de critères spécifiques notamment l'efficacité, le coût, la durabilité et l'impact environnemental des solutions proposées.

L'approche multicritère est particulièrement pertinente pour ce type d'analyse, car elle permet de comparer des alternatives complexes sur la base de critères variés et souvent contradictoires. Dans notre cas, les alternatives étudiées incluent le **lessivage**, l'utilisation du **gypse**, la **phytoremédiation** et la **substitution du sol**.

Dans un premier temps, les critères sont pondérés à l'aide de la méthode AHP (AnalyticHierarchy Process), permettant ainsi de quantifier leur importance respective. Ensuite, quatre méthodes multicritères classiques — SAW (Simple Additive Weighting), TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution), PROMETHEE II et ELECTRE I sont appliquées pour comparer les alternatives en fonction de ces critères pondérés.

L'analyse proposée dans ce chapitre inclut l'application aux données du cas d'étude, ainsi qu'une comparaison des résultats obtenus pour en tirer des conclusions cohérentes et éclairées.

4.2 Pondération des critères par la méthode AHP

Dans le cadre de ce travail, AHP a été utilisée pour déterminer l'importance relative des critères d'évaluation des différentes méthodes de désalinisation des sols. Les critères retenus ont été fixés à la suite d'un entretien avec un expert du domaine. Cet interview a permis de déterminer les aspects les plus pertinents à considérer pour évaluer les méthodes de désalinisation des sols. Plusieurs critères ont été proposés à l'expert pour les évaluer et les valider. L'expert a aussi été demandé de proposer d'autres critères s'il en existe d'autres. Par conséquent, les critères validés par l'expert sont les suivants :

- **Efficacité** : capacité de la méthode à réduire efficacement la concentration en sels dans le sol.
- **Coût** : dépenses totales associées à la mise en œuvre de la méthode, y compris les coûts initiaux, d'exploitation et de maintenance.

- **Durabilité** : capacité de la méthode à offrir des résultats à long terme sans nécessiter des interventions fréquentes.
- **Impact environnemental** : influence de la méthode sur l'environnement local, notamment en termes de pollution, de consommation d'eau ou d'énergie, ou de perturbation des écosystèmes.
- **Espace nécessaire** : surface de terrain requise pour la mise en œuvre de la méthode, critère crucial en milieu industriel ou contraint.
- **Amélioration du sol** : potentiel de la méthode à restaurer les propriétés physico-chimiques du sol, notamment sa structure, sa fertilité et sa capacité à soutenir une végétation.

Ces critères présentent des degrés d'importance différents, et il est essentiel de les pondérer de manière rigoureuse pour évaluer chaque alternative.

4.2.1 Matrice de comparaison par paires

La première étape de la méthode AHP consiste à établir une **matrice de comparaison par paires** des critères. Cette matrice permet d'évaluer l'importance relative de chaque critère par rapport aux autres, en s'appuyant sur l'échelle de [91], qui va de 1 (importance égale) à 9 (extrême importance d'un critère sur un autre).

Pour construire cette matrice, un **expert en génie civil** ayant déjà travaillé sur des projets de désalinisation des sols a été interrogé. L'expert a été invité à comparer les critères deux à deux, en fonction de leur pertinence dans le contexte spécifique du projet situé à Bordjia.

Critères	Efficacité	Coût	Durabilité	Impact env.	Espace	Amélioration sol
Efficacité	1	3	5	7	5	3
Coût	1/3	1	3	5	3	1
Durabilité	1/5	1/3	1	3	2	1/3
Impact env.	1/7	1/5	1/3	1	1/3	1/5
Espace	1/5	1/3	1/2	3	1	1/3
Amélioration sol	1/3	1	3	5	3	1

Tableau 3 Matrice de comparaison par paires des critères selon l'expert

4.2.2 Calcul des poids

Une fois la matrice de comparaison construite, la méthode AHP consiste à calculer les poids des critères. Les poids ont été dérivés en utilisant le vecteur propre (Eigenvector) de la matrice de comparaison par pair, ce qui permet d'obtenir les poids relatifs de chaque critère. Ces poids représentent l'importance relative de chaque critère dans le processus décisionnel [91].

Les poids obtenus après application de la méthode AHP sur la matrice de comparaison sont représentés dans le tableau :

Critère	Poids AHP
Efficacité	0.4176
Coût	0.1905
Durabilité	0.0911
Impact environnemental	0.0373
Espace	0.0730
Amélioration du sol	0.1905

Tableau 4 Matrice des critères avec leurs poids AHP

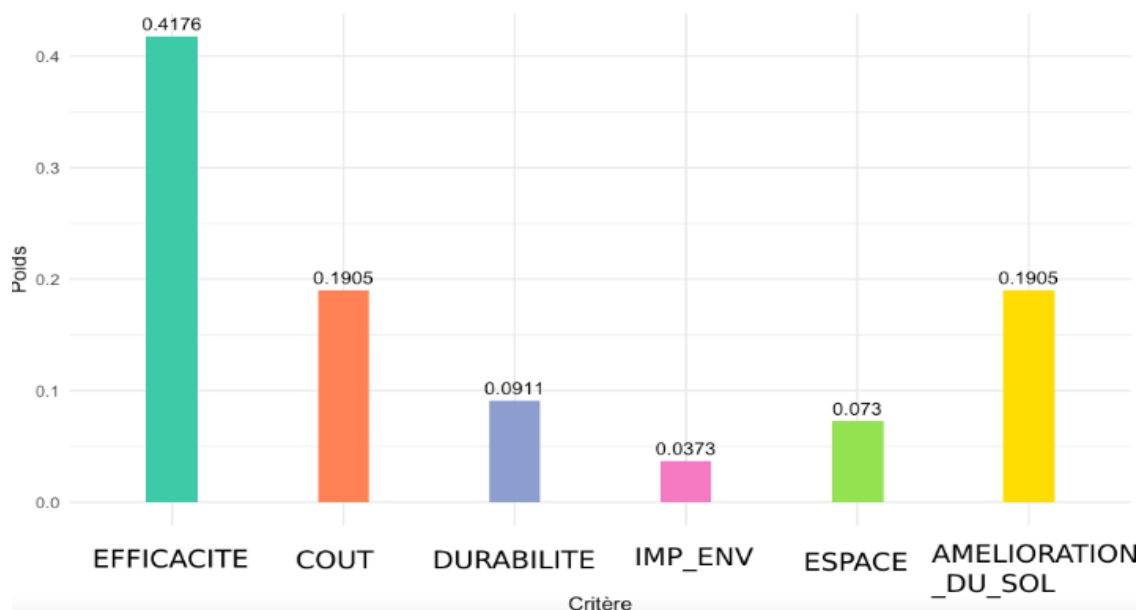


Figure 4-1 graph à barre des Poids des critères (méthode AHP)

Ces poids représentent l'importance relative de chaque critère dans le processus de décision multicritère. Par exemple, le critère "Efficacité" a un poids élevé de 0.4176, ce qui influence sur la décision finale, tandis que "Impact environnemental" a un poids plus faible de 0.0373, ce qui indique une importance moindre dans le processus.

4.2.3 Vérification de la cohérence

La méthode AHP permet également de vérifier la cohérence des comparaisons. La cohérence est mesurée par le calcul de l'indice de cohérence (CI) et du rapport de cohérence (CR). Un CR inférieur à 0.1 indique que la matrice de comparaison est cohérente pour que les résultats obtenus soient fiables et il n'y a pas de contradictions concernant les comparaisons.

Dans cette étude, le rapport de cohérence (CR) est de **0.04327**, ce qui indique une cohérence acceptable des comparaisons. Cela signifie que les jugements effectués lors de la comparaison des critères sont raisonnablement cohérents et que les résultats de l'analyse peuvent être considérés comme fiables.

4.2.4 Application des méthodes multicritères

Dans cette section, différentes méthodes multicritères sont appliquées aux alternatives de désalinisation des sols en utilisant les critères pondérés calculés précédemment via la méthode **AHP**. Ces méthodes permettent de comparer les alternatives sur la base des critères pondérés, en prenant en compte les différents avantages et inconvénients des solutions proposées. Les méthodes suivantes sont appliquées dans cette étude :

1. **SAW (Simple Additive Weighting)** : méthode additive permettant un classement complet.
 2. **TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)** : méthode fondée sur la distance à la solution idéale.
 3. **PROMETHEE II (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation)** : méthode basée sur des flux de préférence et produisant un classement complet.
 4. **ELECTRE I (Élimination Et Choix Traduisant la Réalité)** : méthode basée sur des relations de surclassement, **produisant un ordre partiel** entre les alternatives.
- Son inclusion dans cette étude est optionnelle selon les exigences d'analyse.

Les résultats obtenus de ces méthodes sont ensuite comparés afin de déterminer la solution la plus appropriée pour la désalinisation des sols.

4.2.4.1 Application de la méthode SAW

Les alternatives et les scores obtenus pour chaque critère sont les suivants :

Alternative	Efficacité	Coût	Durabilité	Impact env.	Espace	Amélioration du sol
Lessivage	4	2	4	1	4	4
Gypse	4	1	3	4	2	4
Phytoremédiation	2	4	2	2	4	3
Substitution du sol	3	1	4	5	5	4

Tableau 5 Matrice de performances évaluent les quatre méthodes de désalinisations.

En normalisant les scores pour chaque critère, puis en les multipliant par les poids respectifs, nous obtenons les scores SAW pour chaque alternative .Le tableau ci-dessous présente les résultats :

Alternative	Score SAW
Lessivage	0.8603
Phytoremédiation	0.6610
Gypse	0.7831
Substitution du sol	0.7527

Tableau 6 Résultats de SAW (Scores pondérés et classement des alternatives).

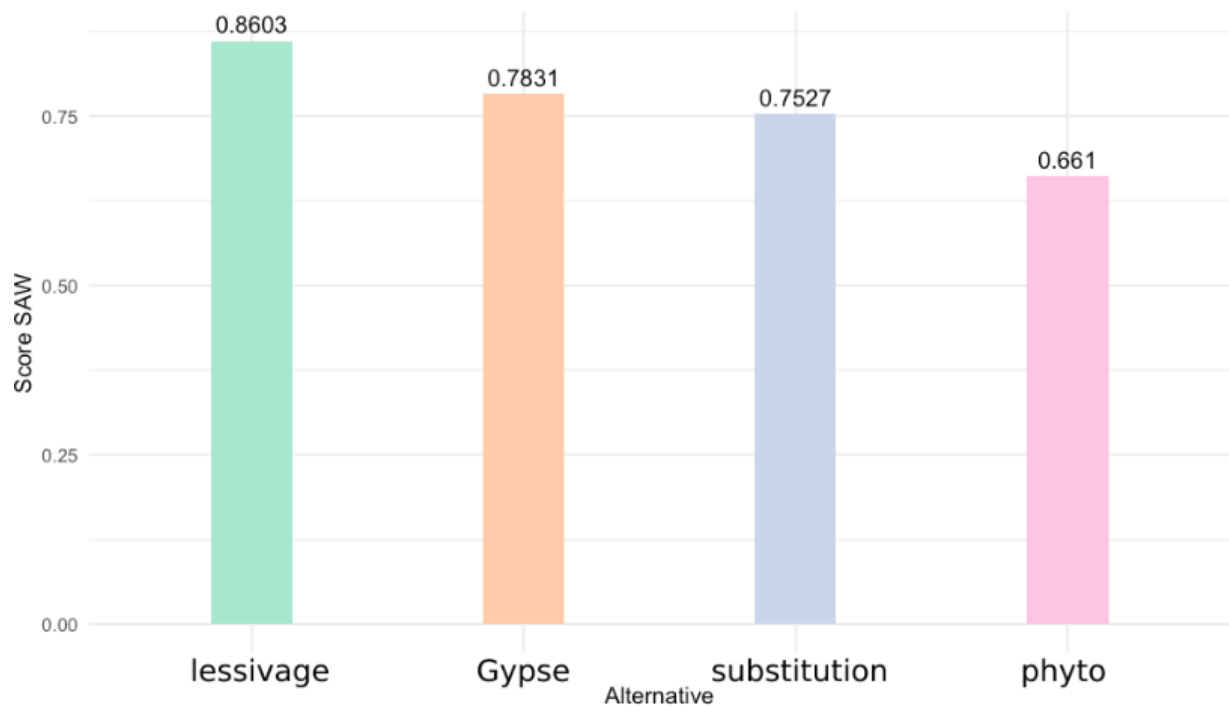


Figure 4-2 graph a barre de la méthode SAW

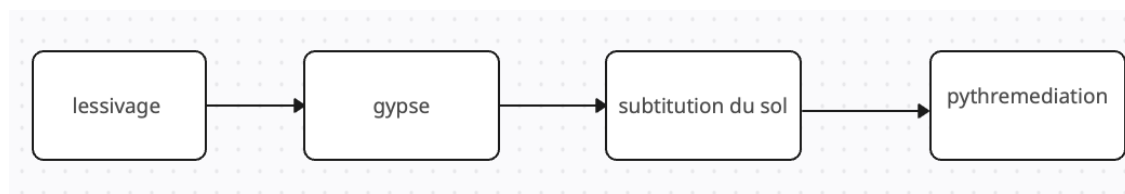


Figure 4-3Graph de surclassement SAW

4.2.4.1.1 Interprétation des résultats de la méthode SAW

Les scores SAW montrent que l'option **Lessivage** est la meilleure alternative, suivie de, **Gypse**, **Substitution du sol**, et enfin **Phytoremédiation**. Cela signifie que, selon la méthode SAW, **Lessivage** est la solution la plus optimale, avec un score plus élevé par rapport aux autres alternatives.

La méthode SAW consiste à normaliser les scores des alternatives pour chaque critère, puis à les multiplier par les poids correspondants obtenus via la méthode AHP. La somme pondérée de ces scores permet d'établir un classement global des alternatives.

4.2.4.2 Application de la méthode TOPSIS

La méthode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) est appliquée à la même matrice de performance utilisée pour la méthode SAW. Les poids des critères précédemment déterminés par AHP sont également intégrés dans le processus.

4.2.4.2.1 Détermination des vecteurs idéal et anti-idéal

Nous avons utilisé ici **la méthode classique de TOPSIS** (la plus courante), où :

- Le **vecteur idéal** (A^+) est constitué des **meilleures valeurs** (maximums) pour les critères à maximiser, et des **plus petites valeurs** (minimums) pour les critères à minimiser.

$$A^+ = (0.2490, 0.2490, 0.1009, 0.1625, 0.2490, 0.1009)$$

- Le **vecteur anti-idéal** (A^-) est constitué des **pires valeurs** (inverse du vecteur idéal).

$$A^- = (0.0165, 0.0187, 0.0165, 0.0272, 0.0374, 0.0220)$$

4.2.4.2.2 Résultats de la méthode TOPSIS

Les résultats des calculs pour les alternatives par rapport à la solution idéale et la solution anti idéale sont les suivants :

Alternative	Distance à la solution idéale (D^+)	Distance à la solution anti-idéale (D^-)	Score TOPSIS
Lessivage	0.3350	0.2403	0.6187
Gypse	0.3322	0.1996	0.5058
Phytoremédiation	0.3432	0.2032	0.4845
Substitution du sol	0.2821	0.3130	0.3711

Tableau 7 les distances (D^+ , D^-) de TOPSIS.

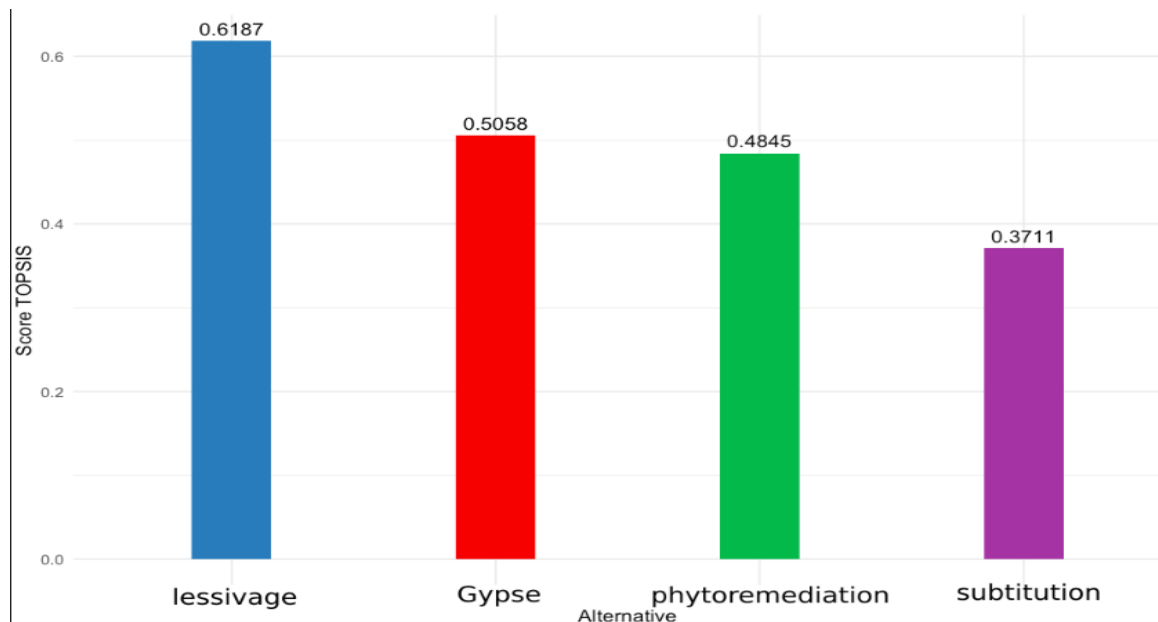


Figure 4-4 graph a barre de la méthode TOPSIS

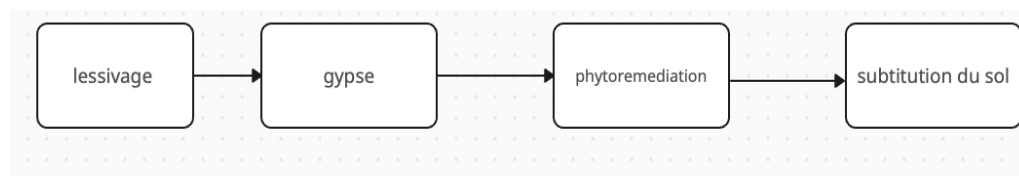


Figure 4-5 Graph de surclassement TOPSIS

4.2.4.2.3 Interprétation des résultats de la méthode TOPSIS

Les scores TOPSIS montrent que **Lessivage** est la meilleure alternative, avec le score de 0.617, ce qui signifie qu'il est le plus proche de la solution idéale et le plus éloigné de la solution anti-idéale parmi les alternatives.

- **Substitution du sol** a un score légèrement plus bas (0.3711), indiquant qu'elle est relativement éloignée de la solution idéale.
- **Gypse** et **Phytoremédiation** ont des scores encore plus bas, respectivement 0.5058 et 0.4845, ce qui les place plus loin de la solution idéale.

4.2.4.3 Application de la méthode PROMETHEE II

Les flux de surclassement sont ensuite calculés pour chaque alternative et pour chaque critère. Par exemple, pour le critère "Efficacité", on compare le score de chaque alternative avec celui des autres pour déterminer l'orientation de la préférence.

4.2.4.3.1 Résultats de la méthode PROMETHEE II

Ces flux permettent de quantifier à quel point une alternative est préférable à une autre. Pour chaque alternative, on obtient les résultats:

- **Lessivage** surclasse largement les autres alternatives ($\Phi_{\text{net}} = 0.42884568$), il est donc la meilleure option selon cette méthode.
- **Gypse** est aussi une alternative dominante mais avec un score inférieur ($\Phi_{\text{net}} = 0.12395328$).
- **Substitution du sol** et **Phytoremédiation** sont en revanche surclassées par les autres alternatives, avec des flux nets négatifs.

Type de fonction : Usuelle (Type I)

Critère	Efficacité	Coût	Durabilité	Impact.env	Espace	Amélioration.du.sol
Fonction de Préférence	Critère Usuel (Type 1)	Critère Usuel (Type 1)	Critère Usuel (Type 1)	Critère Usuel (Type 1)	Critère Usuel (Type 1)	Critère Usuel (Type 1)

Tableau 8 Fonctions de Préférences PROMETHEE II Choisis pour Chaque Critère

Nous avons utilisé la fonction de préférence usuelle (Type I), qui attribue une préférence de 1 dès que la différence entre deux alternatives est strictement positive, et 0 sinon. Cette fonction ne considère aucun seuil d'indifférence ou de préférence, ce qui en fait un choix strict adapté aux situations où toute amélioration, même minime, est significative.

Alternative	Φ_i^+ (flux positif)	Φ_i^- (flux négatif)	Φ_i (flux net)
Lessivage	0.5539710	0.1251253	0.42884568
Gypse	0.3971170	0.2731637	0.12395328
Phytoremédiation	0.2272853	0.7483880	-0.52110269
Substitution du sol	0.3737038	0.4054001	-0.03169627

Tableau 9 les flux (positifs, négatifs et nets) selon la méthode PROMETHEE II

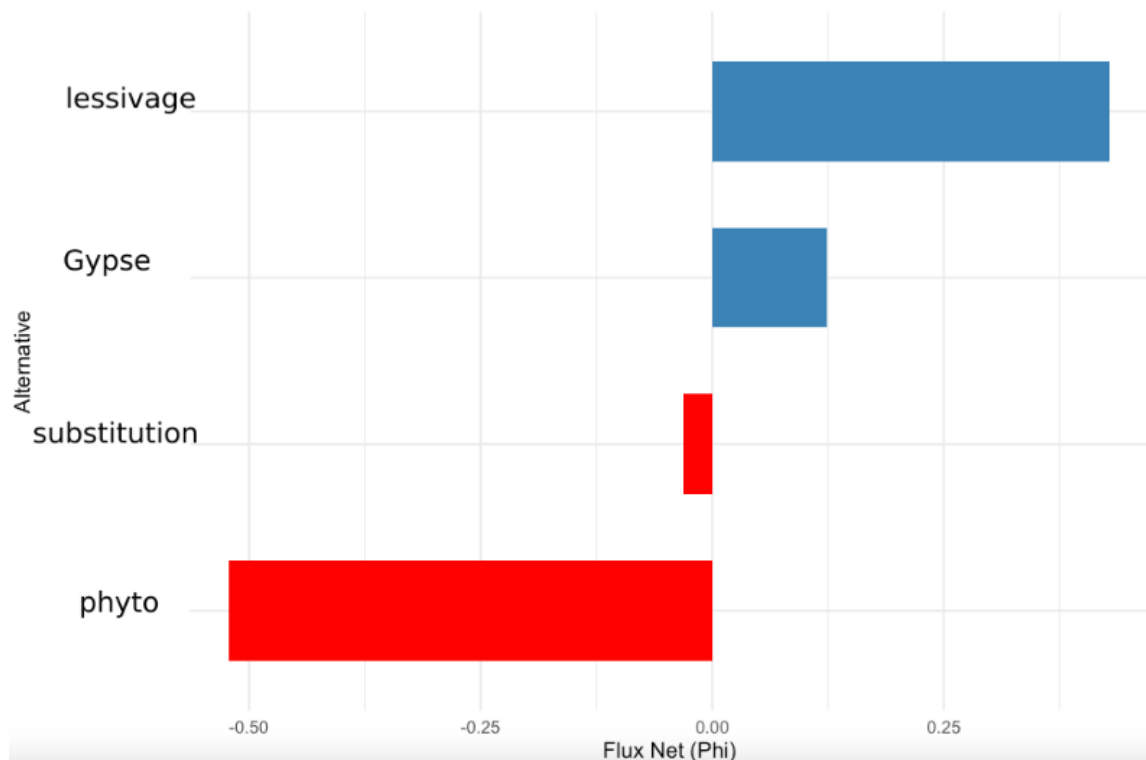


Figure 4-6 Graphe a barre représentant le flux net de surclassement de PROMETHEE II

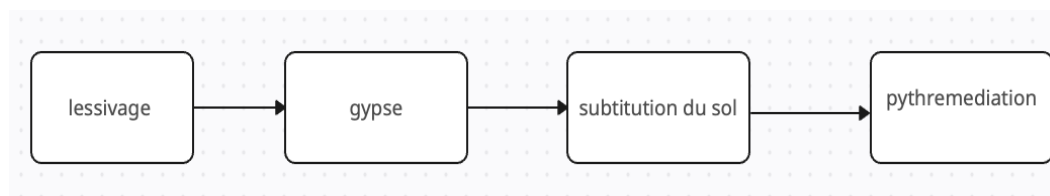


Figure 4-7 Graphe de surclassement PROMOTHEE II

4.2.4.3.2 Interprétation des résultats de la méthode PROMETHEE II

Les résultats de PROMETHEE II montrent que l'alternative **Lessivage** présente le meilleur flux net global, ce qui en fait la solution la plus favorable. Elle est suivie de **Gypse**, ensuite **Phytoremédiation**, et en dernière position **Substitution du sol**. Ces résultats confirment ceux des autres méthodes (SAW et TOPSIS), où Lessivage apparaît systématiquement comme la meilleure alternative dans le cadre de cette étude multicritère pour la désalinisation des sols.

4.2.4.4 Application de la méthode ELECTRE I

Les résultats obtenus à partir des matrices de concordance et de discordance sont présentés :

1. Matrice de Concordance

	Lessivage	Gypse	Phytoremédiation	Substitution
Lessivage	1.00	0.96	0.77	0.89
Gypse	0.65	1.00	0.74	0.80
Phytoremédiation	0.30	0.26	1.00	0.89
Substitution	0.39	0.58	0.81	1.00

Tableau 10 matrice de dominance

2. Matrice de Discordance

	Lessivage	Gypse	Phytoremédiation	Substitution
Lessivage	0.00	0.75	0.50	1.00
Gypse	0.50	0.00	0.75	0.75
Phytoremédiation	0.50	0.50	0.00	0.75
Substitution	0.25	0.25	0.75	0.00

Tableau 11 matrice de discordance

3. Matrice de Dominance

	Lessivage	Gypse	Phytoremédiation	Substitution
Lessivage	0.00	0.00	1.00	0.00
Gypse	0.00	0.00	0.00	0.00
Phytoremédiation	0.00	0.00	0.00	0.00
Substitution	0.00	0.00	0.00	0.00

Tableau 12 matrice de dominance.

4. Noyau (Kernel) : Lessivage.

5. Alternatives dominées : Gypse, Phytoremédiation, Substitution.

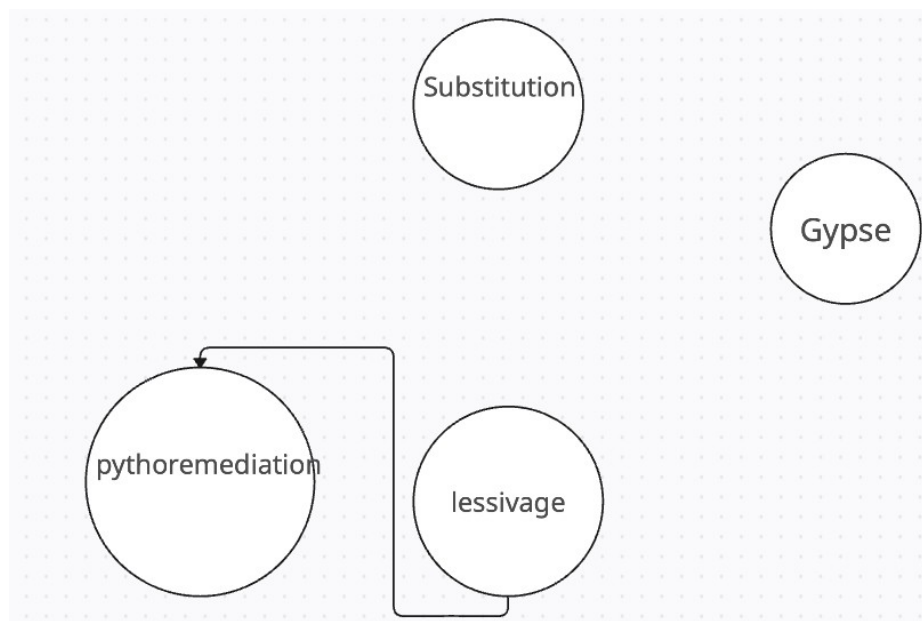


Figure 4-8 Graphe dominance de la méthode ELECTRE I

4.2.4.4.1 Interprétation des résultats de la méthode ELECTRE I

La méthode **ELECTRE I** met en avant l'alternative **Lessivage**, qui domine clairement les autres selon la matrice de dominance et figure dans le **noyau** (ensemble des alternatives non dominées). Elle est suivie par la **Substitution du sol** et le **Gypse**, tandis que la **Phytoremédiation** apparaît comme l'alternative la moins performante, étant dominée dans le processus de surclassement.

Ces résultats confirment ceux obtenus par les méthodes SAW et PROMETHEE II, dans lesquelles **Lessivage** occupe également la première place. Cela témoigne de la robustesse de cette alternative, indépendamment de la méthode multicritère utilisée. La position de la **Substitution du sol** (2^e selon ELECTRE I), bien qu'elle diffère légèrement de celle obtenue par **PROMETHEE II** (où elle est classée 3^e), reste globalement cohérente et confirme son potentiel en tant que solution efficace et durable.

La méthode ELECTRE I se distingue par sa capacité à mettre en évidence les critères discriminants, notamment l'**efficacité de réduction de la salinité** et l'**amélioration des propriétés mécaniques du sol**, qui ont fortement contribué au bon positionnement du **Lessivage** et de la **Substitution du sol**. En surclassant uniquement les alternatives les plus solides sur les critères jugés essentiels, **ELECTRE I** renforce leur légitimité dans le processus décisionnel.

En conclusion, cette méthode permet de valider et affiner les choix établis par les autres approches multicritères, tout en apportant un éclairage supplémentaire sur les rapports de dominance entre alternatives

4.3 Graphe de comparaison des classements obtenu par chaque méthode MCDA

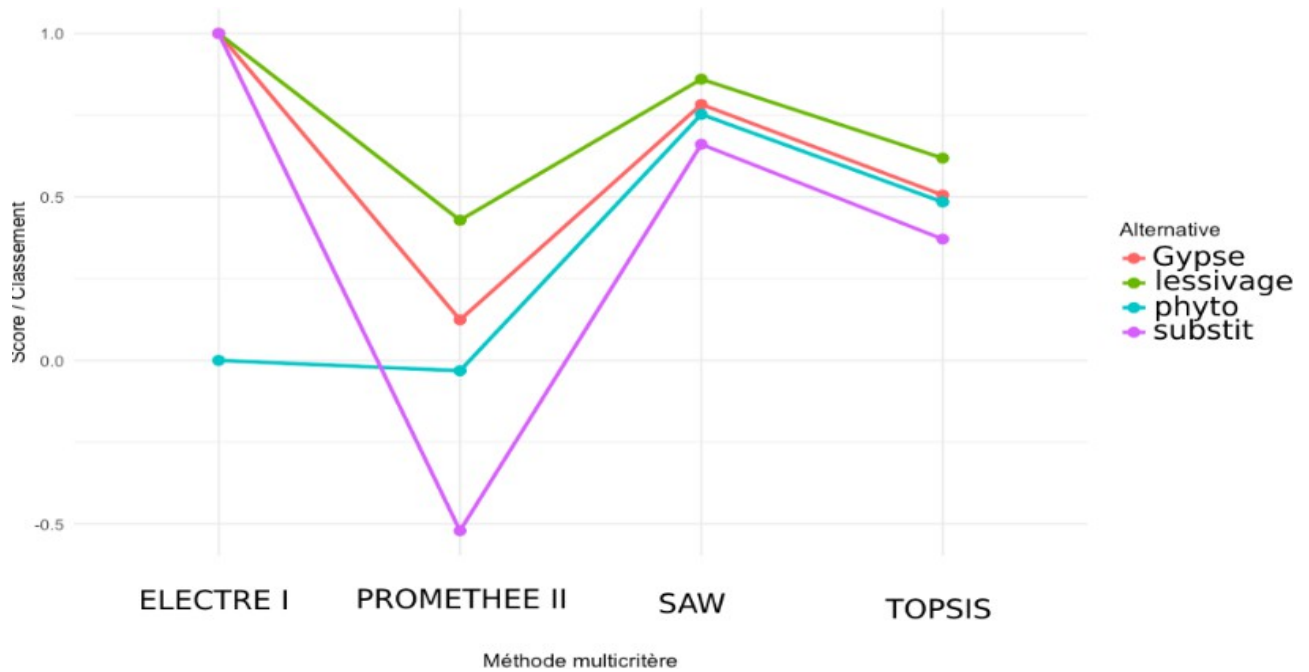


Figure 4-9 Comparaison des classements obtenu par chaque méthode MCDA

4.4 Résultats, observations et discussion

4.4.1 Présentation des résultats des méthodes multicritères

L'analyse multicritère menée dans cette étude a permis d'évaluer quatre alternatives de désalinisation des sols appliquées au génie civil, à savoir : **Lessivage**, **Gypse**, **Phytoremédiation** et **Substitution du sol**, en se basant sur six critères pondérés par la méthode AHP. Pour renforcer la robustesse de la décision, quatre méthodes d'aide à la décision multicritère ont été appliquées: **SAW**, **TOPSIS**, **PROMETHEE II** et **ELECTRE I**. Les résultats obtenus sont synthétisés dans le tableau 4.8 ci-dessous. Les résultats obtenus sont les suivants :

Alternative	SAW	TOPSIS	PROMETHEE II	ELECTRE I
Lessivage	0.8603	0.6187	0.4288	1
Gypse	0.7831	0.5058	0.1240	1
Phytoremédiation	0.6610	0.4845	-0.5211	0
Substitution	0.7527	0.3711	-0.0317	1

Tableau 13 Classement des alternatives selon les méthodes multicritères

Rang	Alternative	Rang SAW	Rang TOPSIS	Rang PII
1	Lessivage	1	1	1
2	Gypse	2	2	2
3	Substitution	3	4	3
4	Phytoremédiation	4	3	4

Tableau 14 Comparaison entre le classement de TOPSIS, SAW, et Pi

- **Lessivage** se démarque nettement comme l'alternative la plus performante selon toutes les méthodes. Elle arrive première dans SAW, TOPSIS et PROMETHEE II, et figure également dans le noyau (kernel) d'ELECTRE I. Cela confirme son efficacité globale en termes de réduction de la salinité, de coût raisonnable et de bonne adaptabilité aux conditions locales.
- **Gypse** se positionne en deuxième position, avec des scores satisfaisants, surtout en SAW et TOPSIS. Il est également retenu par ELECTRE I, bien qu'il ait une performance plus modeste selon PROMETHEE II. Cela s'explique par son coût d'implantation faible et sa disponibilité locale.
- **Phytoremédiation** obtient un classement intermédiaire dans SAW et TOPSIS, mais elle est désavantagée par PROMETHEE II (score net négatif) et exclue du noyau ELECTRE I, en raison de son impact environnemental potentiellement **élevé** et de sa durabilité limitée à court terme.
- **Substitution du sol**, bien que coûteuse, est conservée dans le noyau d'ELECTRE I. Son classement plus faible dans SAW et TOPSIS indique qu'elle est moins favorable dans une vision globale, mais sa pertinence structurelle pour certains projets de génie civil lui permet de rester compétitive selon certaines méthodes.

4.4.2 Discussion critique

a) Apport de l'approche multicritère

L'utilisation de plusieurs méthodes multicritères a permis une évaluation robuste et équilibrée des alternatives. Chaque méthode met en avant un aspect spécifique de la décision :

- **SAW** simplifie le calcul mais dépend fortement des poids.
- **TOPSIS** considère la distance à une solution idéale, ce qui nuance la dominance d'une seule alternative.
- **PROMETHEE II** fournit une vision des flux préférentiels permettant de mieux cerner les différences entre alternatives proches.
- **ELECTRE I** introduit une logique de surclassement, utile pour des décisions en contexte de conflit ou de rejet.

b) Influence des pondérations AHP

Les résultats sont directement influencés par les pondérations attribuées aux critères via la méthode AHP. Le poids très élevé de l'efficacité (plus de 60 % du total pondéré) a largement favorisé l'alternative Lessivage. Une analyse de sensibilité serait pertinente pour étudier l'impact d'une éventuelle variation des poids sur les résultats.

c) Validité des résultats dans un contexte réel

Bien que les calculs soient mathématiquement rigoureux, leur interprétation doit tenir compte du contexte local, en particulier les caractéristiques agro-environnementales des zones comme la plaine du Chélif ou Bordjia. Des facteurs tels que la disponibilité de matériaux, les coûts logistiques, les politiques de soutien des infrastructures ou encore l'impact à long terme sur les nappes phréatiques peuvent fortement influencer sur la mise en œuvre pratique des alternatives recommandées.

4.5 Conclusion

La désalinisation des sols, bien au-delà de son rôle traditionnel en agriculture, constitue un enjeu stratégique crucial pour le génie civil, notamment dans les régions semi-arides telles que Bordjia. En modifiant profondément les propriétés physico-chimiques du sol, la salinisation affecte directement la stabilité des fondations, la durabilité des infrastructures et la pérennité des projets d'aménagement. Dans ce contexte, ce travail a proposé une approche multicritère d'aide à la décision (AMCD) afin de comparer plusieurs techniques de désalinisation, en intégrant des critères techniques, économiques, environnementaux et géotechniques.

L'application conjointe des méthodes **AHP, SAW, TOPSIS, PROMETHEE II et ELECTRE I** a permis de réaliser une évaluation rigoureuse et croisée des alternatives, offrant ainsi une vision globale et nuancée. Les résultats obtenus mettent en évidence une convergence forte en faveur du lessivage, qui se distingue par son efficacité globale, sa compatibilité géotechnique, et son impact positif sur la portance du sol. La substitution du sol, bien que plus onéreuse, apparaît comme une alternative robuste et durable. En revanche, le gypse et la phytoremédiation présentent des performances plus modestes selon les critères retenus, bien qu'ils puissent rester pertinents dans des contextes spécifiques.

Ce chapitre met en lumière la pertinence de l'approche multicritère appliquée au domaine du génie civil. Elle offre aux décideurs un cadre structuré, objectif et transparent pour identifier la solution la plus adaptée aux réalités du terrain. Cette démarche constitue ainsi un pont essentiel entre les enjeux environnementaux et les contraintes techniques, contribuant à une gestion durable, rationnelle et contextualisée des sols salinisés.

5 Chapitre 5 Automatisation des MCDA et démonstration de l'outil.

5.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'automatisation des méthodes multicritères présentées précédemment et à la démonstration d'un outil de comparaison des méthodes de désalinisation. Ce chapitre contient deux démarches d'automatisation : d'une part, l'analyse des données réalisée dans l'environnement RStudio, où nos propres données ont été exploitées en lien direct avec notre problématique ; d'autre part, la personnalisation de l'outil GEFT (GDSS Facilitator Election Tool), adapté spécifiquement à notre cas d'étude.

L'objectif est de comparer l'IDE Rstudio avec l'outil proposé DMCT (DesalinationMethodsComparisonTool), afin d'évaluer la cohérence entre les méthodes et de mieux interpréter les différences de classement des alternatives selon les approches multicritères utilisées (TOPSIS, PROMETHEE II, ELECTRE I, SAW). Cette analyse croisée permet d'enrichir la réflexion sur la robustesse des résultats et la pertinence des outils mobilisés.

Les poids des critères utilisés dans ces méthodes ont été déterminés à l'aide de la méthode AHP (AnalyticHierarchyProcess), ce qui a permis d'intégrer de manière structurée les préférences des experts. Ce chapitre présentera également la façon dont AHP a été appliquée, tant dans RStudio que dans l'outil DMCT.

Dans un premier temps, l'environnement de travail RStudio et les outils utilisés seront brièvement introduits. Par la suite, des captures d'écran illustreront les principales étapes de l'analyse et les visualisations graphiques issues des deux outils.

Enfin, les classements doivent être les mêmes, donc c'est une comparaison en terme des résultats du classement, mais plutôt une comparaison entre la performance, l'utilité, la facilité d'utilisation et l'automatisation entre Rstudio et DMCT.

5.2 Environnement de travail et outils utilisés

5.2.1.1 Présentation de l'environnement RStudio

RStudio est un environnement de développement intégré (IDE) pour le langage R, largement utilisé pour l'analyse statistique et la visualisation de données. Dans le cadre de cette étude, RStudio a été utilisé pour traiter les données liées aux alternatives de désalinisation des sols et appliquer différentes méthodes multicritères (TOPSIS, PROMETHEE II, ELECTRE I, SAW), à partir des poids obtenus par la méthode AHP.

5.2.1.2 Description des données utilisées

Le jeu de données est constitué de quatre alternatives de désalinisation :

Lessivage, Amendement au gypse, Substitution du sol, et Phytoremédiation, évaluées selon six critères :

1. Efficacité de réduction de la salinité
2. Coût d'implantation
3. Durabilité
4. Impact environnemental
5. Occupation de l'espace
6. Adaptabilité au climat local

Les poids des critères ont été calculés à l'aide de la méthode AHP à partir de jugements recueillis lors d'une interview avec un expert en génie civil.

5.2.1.3 Implémentation des méthodes multicritères

- **AHP (AnalyticHierarchyProcess)**

L'implémentation de AHP dans R a permis de calculer les poids de critères et de vérifier la cohérence des jugements via le calcul du taux de cohérence (CR). Les poids normalisés ainsi obtenus ont ensuite été utilisés comme données d'entrée pour les autres méthodes multicritères.

Les bibliothèques utilisées :

- **ahpsurvey (AnalyticHierarchyProcess for Survey Data version 0.4.1)** : pour analyser les matrices de comparaison par paires et calculer les poids des critères.
 - **pmr (ProbabilityModels for Ranking Data version 1.2.5.1)** : alternative pour le calcul de poids AHP et la vérification de la cohérence.
 - **MCDA (Support for the MulticriteriaDecisionAidingProcess version 0.1.0)** : certains outils de calcul AHP sont également disponibles dans ce package plus général.
-
- **PROMETHEE II (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations)**

L'approche PROMETHEE II a été appliquée à l'aide de la bibliothèque MCDA qui contient l'implémentation de PROMETHEE II en langage R. Les flux nets de préférence ont permis d'établir un classement clair des alternatives.

Les bibliothèques et application utilisées :

- **MCDA** : contient une implémentation simple de PROMETHEE.
 - **MCDAIndexTool** : propose PROMETHEE I et II avec des visualisations.
 - **visualPromethee (non-CRAN)** : pour des visualisations de flux net si besoin (nécessite GitHub).
-
- **SAW (Simple Additive Weighting)**

La méthode SAW a été utilisée pour effectuer une agrégation pondérée simple des scores normalisés, produisant un classement basé sur la somme pondérée des performances par critère.

Dans RStudio, cette méthode a été mise en œuvre sans recours à un package spécifique dédié. L'implémentation s'est appuyée sur le package **dplyr**, qui a permis de manipuler les tableaux de données, de normaliser les scores, puis d'appliquer les pondérations à chaque critère.

- **TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)**

La méthode TOPSIS a été implémentée dans RStudio pour identifier l'alternative la plus proche de la solution idéale et la plus éloignée de la solution anti-idéale. la matrice de performance construite précédemment normalisée pondérée a été passée en entrée, suivie du calcul des distances et des scores finaux.

Les bibliothèques utilisées :

- topsis : package simple pour appliquer directement TOPSIS.
- MCDA : offre également une version basique de TOPSIS.
- dplyr et tidyr : Pour préparer les données.

- **ELECTRE I (Elimination Et Choix Traduisant la Réalité)**

Cette méthode repose sur la notion de surclassement. Les matrices de concordance et de discordance ont été calculées et les alternatives ont été comparées selon les seuils établis.

Les bibliothèques utilisées :

- OutrankingTools : plus complet pour ELECTRE I, II, III et tri.
- decisionSupport : utile pour le traitement des matrices de dominance (moins spécifique à ELECTRE mais exploitable).

5.2.1.4 Environnement de développement intégré RSTUDIO

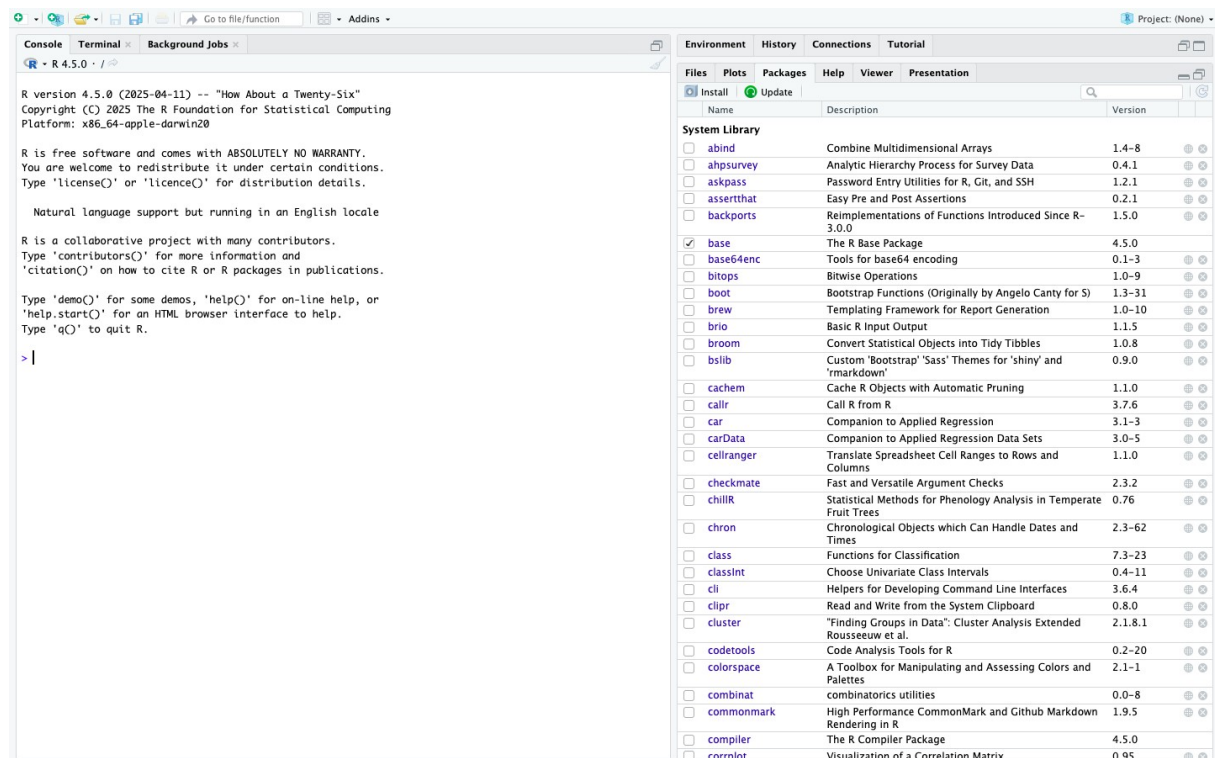


Figure 5-1 Ecran d'accueil de RSTUDIO

5.2.1.5 Possibilité d'intégrer les données avec (import data base)

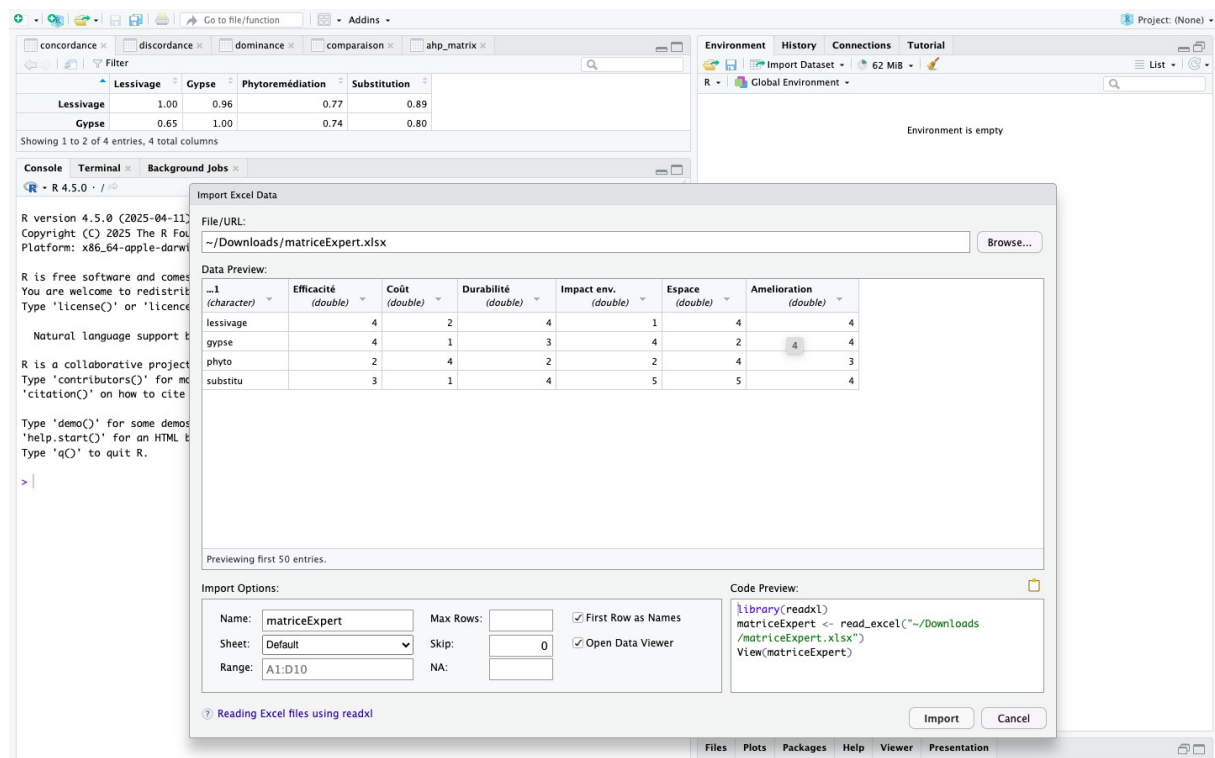


Figure 5-2 Importation des données

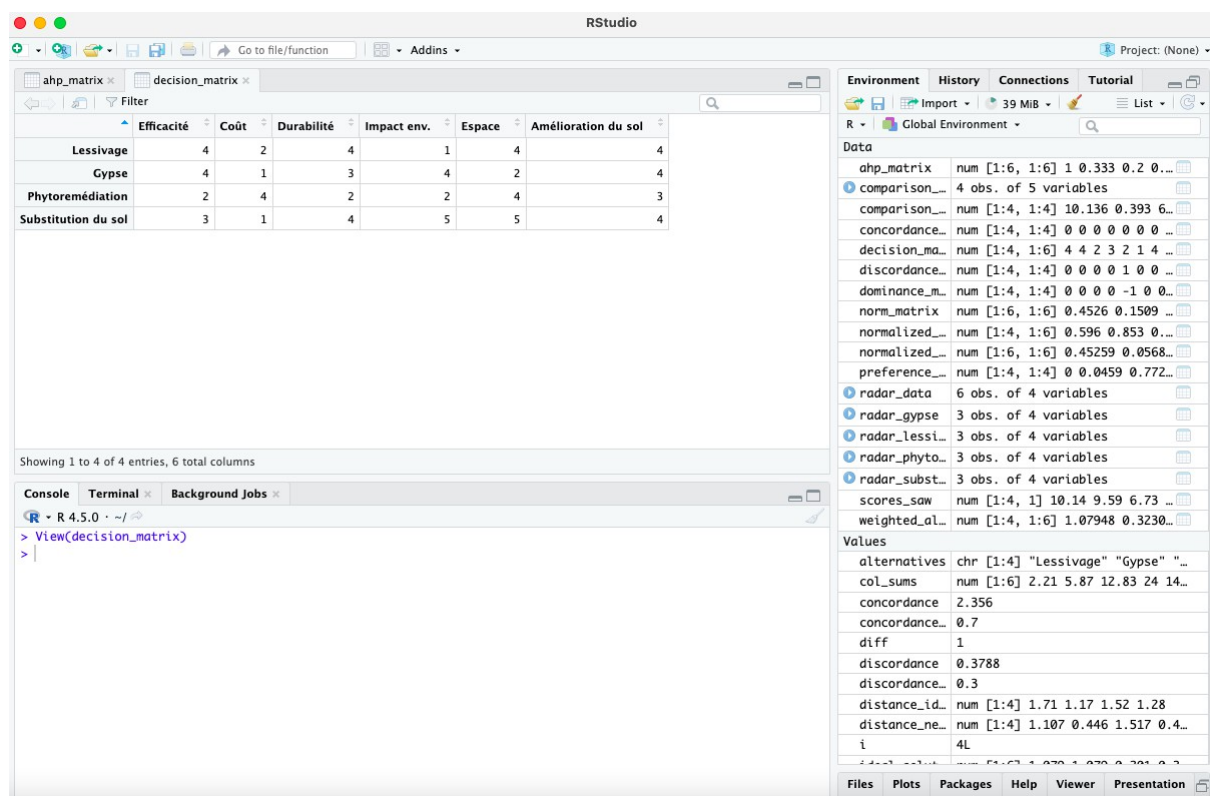


Figure 5-3 Affichage de la matrice de décision avec RSTUDIO

5.2.1.6 Visualisation des résultats

Des représentations graphiques ont été produites pour illustrer les scores finaux et les classements issus de chaque méthode. Ces graphiques permettent une lecture intuitive des résultats, facilitant la comparaison entre les différentes alternatives.

1) AHP

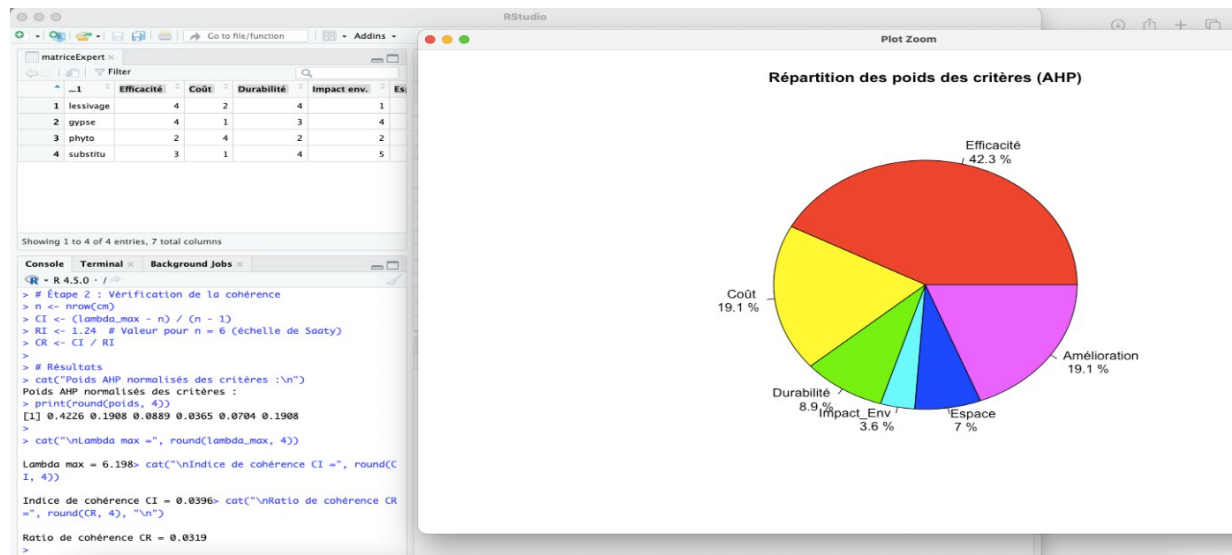


Figure 5-4 Graph Pie chart des poids AHP par RSTUDIO

Chaque méthode multicritère est ensuite calculée avec le poids de AHP calculer est sauvegarder dans (poids).

2) PROMETHEE II

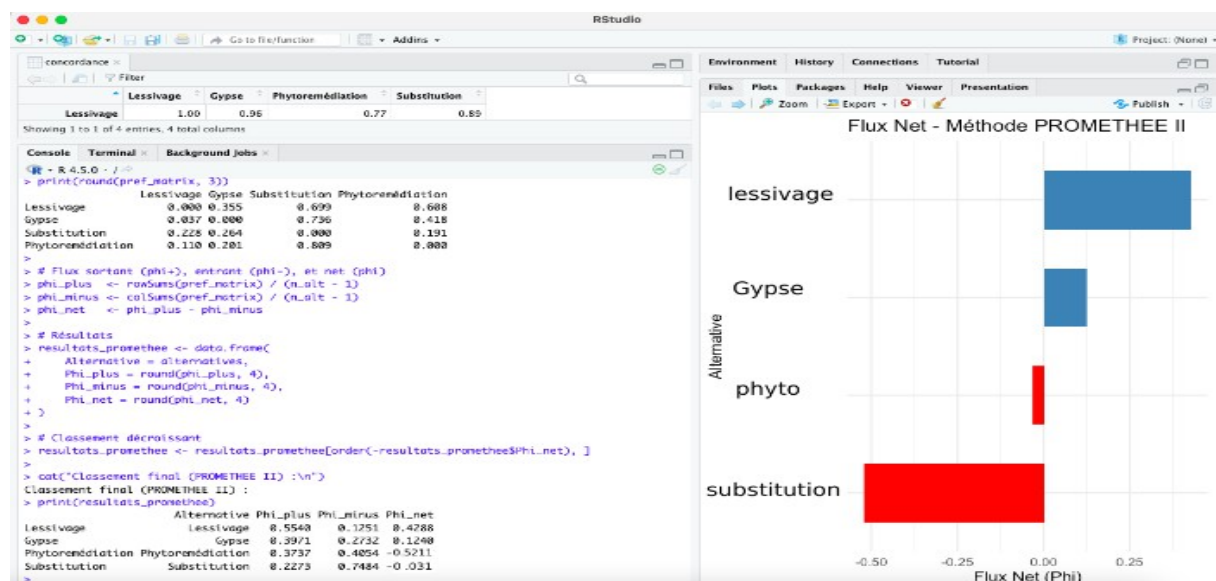


Figure 5-5 Visualisation du flux net de PROMETHEEII par RSTUDIO

3) TOPSIS

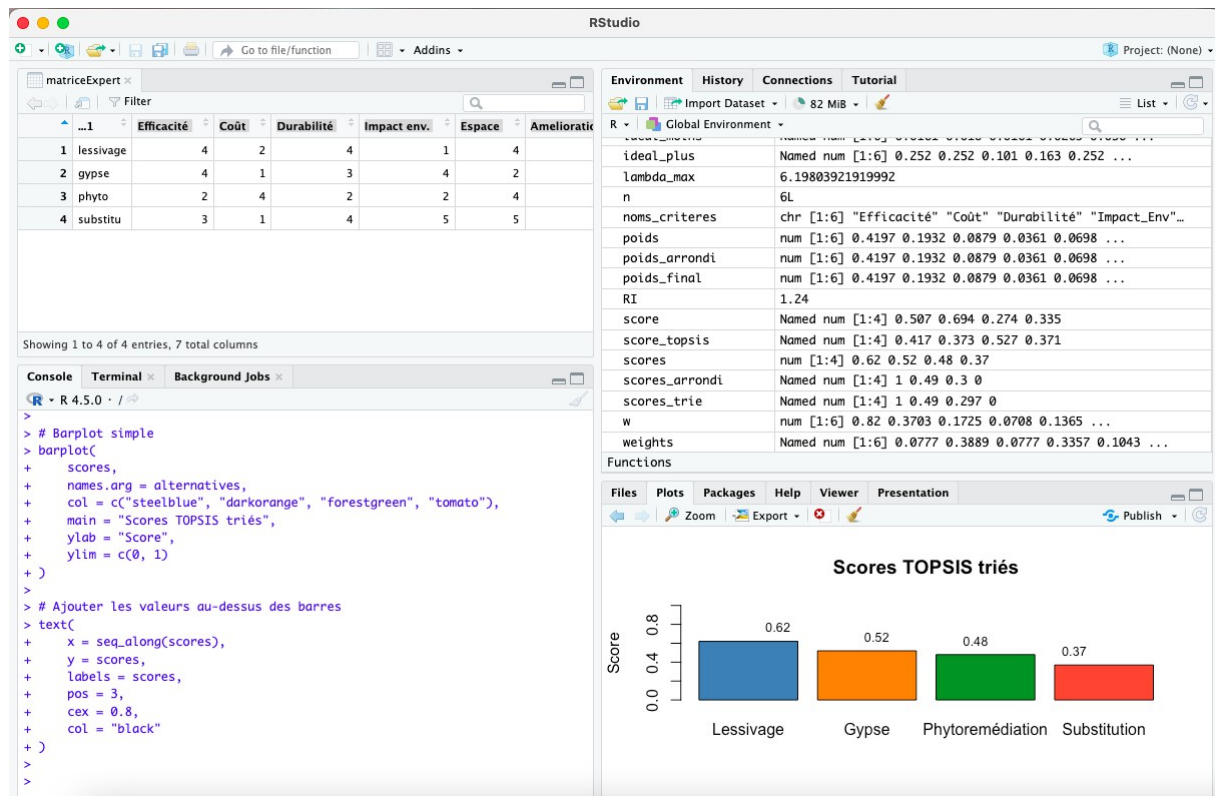


Figure 5-6 Visualisation des scores de TOPSIS par RSTUDIO sous forme d'un graphe à barres

4) SAW

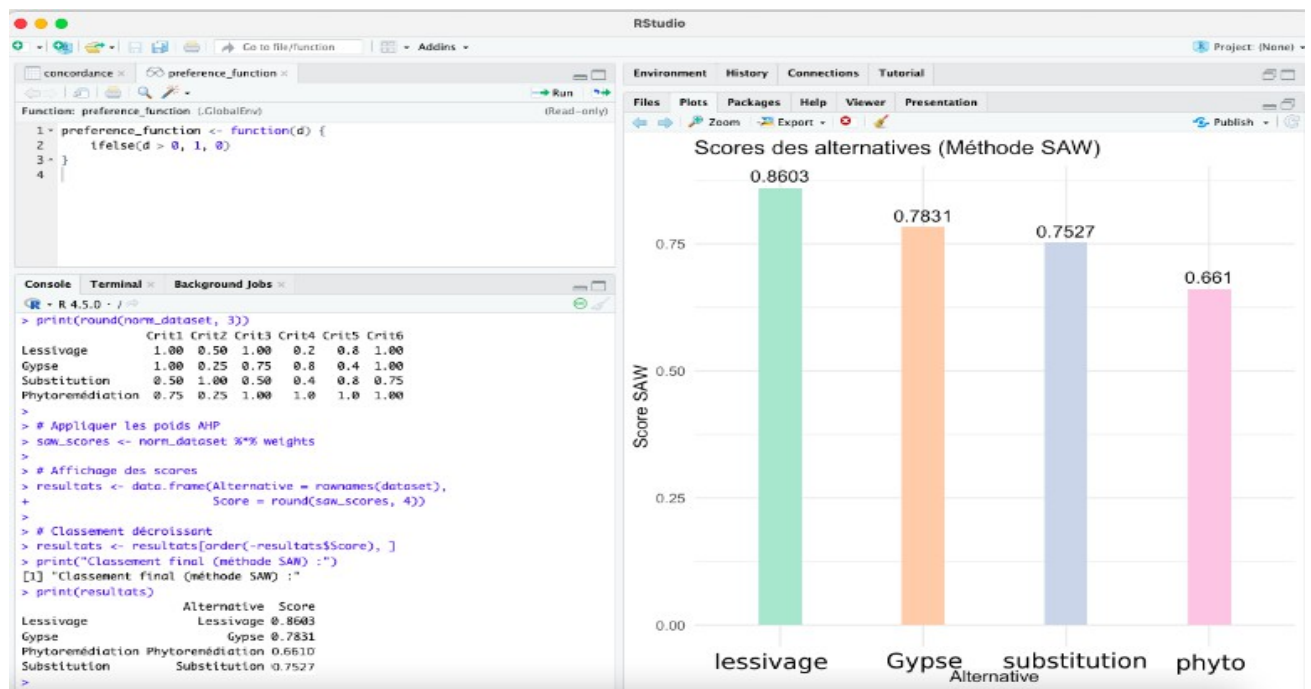


Figure 5-7 visualisation des scores obtenus par la méthode SAW dans RSTUDIO

5) ELECTREI

```
> print(round(concordance, 2))
```

	Lessivage	Gypse	Phytoremédiation	Substitution
Lessivage	1.00	0.96	0.77	0.89
Gypse	0.65	1.00	0.74	0.80
Phytoremédiation	0.30	0.26	1.00	0.19
Substitution	0.39	0.58	0.81	1.00

```
>
> cat("\nMatrice de Discordance:\n")
```

Matrice de Discordance:

```
> print(round(discordance, 2))
```

	Lessivage	Gypse	Phytoremédiation	Substitution
Lessivage	0.00	0.75	0.50	1.00
Gypse	0.50	0.00	0.75	0.75
Phytoremédiation	0.50	0.50	0.00	0.75
Substitution	0.25	0.25	0.75	0.00

```
>
> cat("\nMatrice de Dominance:\n")
```

Matrice de Dominance:

```
> print(dominance)
```

	Lessivage	Gypse	Phytoremédiation	Substitution
Lessivage	0	0	1	0
Gypse	0	0	0	0
Phytoremédiation	0	0	0	0
Substitution	0	0	0	0

```
>
```

Figure 5-8 Matrices concordance, discordance et dominance d'ELECTRE I

5.2.1.7 Interprétation des résultats obtenus sous RStudio

Les résultats montrent des convergences entre certaines méthodes, notamment entre PROMETHEE II et TOPSIS, qui placent l'alternatif **lessivage** en première position. D'autres méthodes, comme ELECTRE I, montrent des écarts liés à la prise en compte des seuils de préférence.

Rang	Alternative	Rang SAW	Rang TOPSIS	ELECTRE I	Rang PII
1	Lessivage	1	1	1	1
2	Gypse	2	2	1	2
3	Substitution	4	3	0	4
4	Phytoremédiation	3	4	1	3

Tableau 15 Classement obtenus des alternatives par chaque méthode multicritères en utilisant RSTUDIO

5.2.2 Présentation de l'outil DMCT adapté

Le DMCT (Desalination Methods Comparison Tool) est un outil personnalisé, dérivé de l'outil GEFT initialement développé par *Mohammed Taieb Sabir* [117] dans le cadre de travaux antérieurs. Dans le cadre de ce mémoire, une adaptation de cet outil a été réalisée afin de répondre aux spécificités du domaine du génie civil, notamment pour l'évaluation des alternatives de désalinisation des sols dans une zone industrielle.

L'outil modifié offre les fonctionnalités suivantes :

- **Intégration des poids issus de la méthode AHP**
- **Application automatisée** de plusieurs méthodes multicritères (PROMETHEE II, TOPSIS, ELECTRE I, SAW)
- **Affichage graphique des résultats** : radar charts, graphes de surclassement, tableaux comparatifs
- **Importation** des données (au format Excel)
- **Interface graphique ergonomique**, pensée pour une utilisation intuitive par des ingénieurs ou des décideurs non spécialistes de l'analyse multicritère.

5.2.2.1 Modes de fonctionnement de l'outil

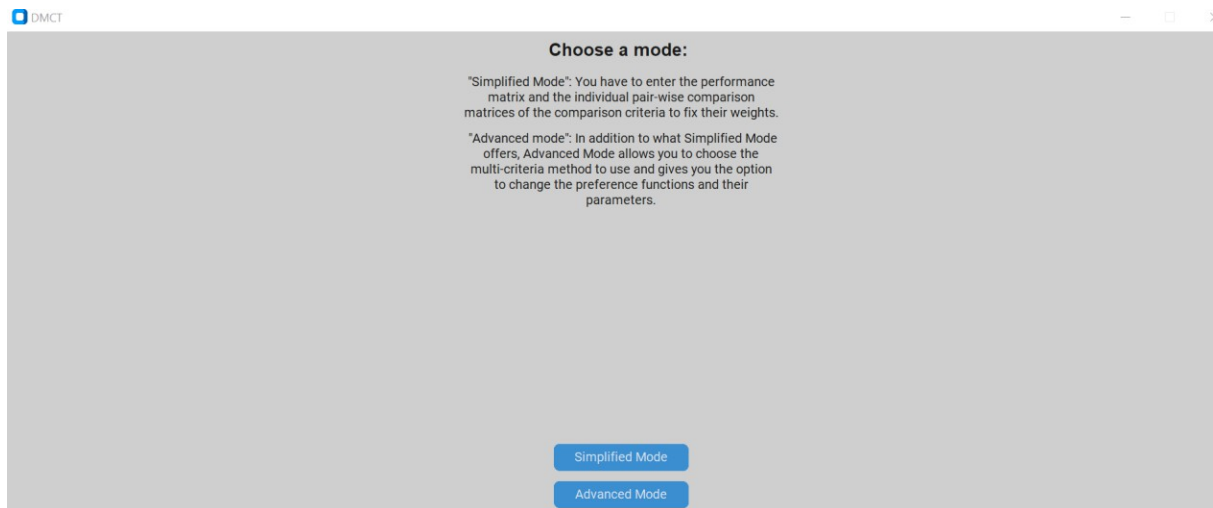


Figure 5-9 Page d'accueil de DMCT

L'outil DMCT propose deux modes de fonctionnement distincts pour s'adapter au niveau d'expertise de l'utilisateur :

- **Mode simplifié** : l'utilisateur sélectionne les alternatives de désalinisation, saisit la matrice de performance et les matrices de comparaison par paire des critères (AHP), puis clique sur « Appliquer une méthode MCDA ». Le logiciel applique **directement une méthode par défaut** (PROMETHEE II), sans demander de choix supplémentaire. Ce mode est idéal pour une utilisation rapide ou pour les utilisateurs non familiers avec les méthodes MCDA.
- **Mode avancé** : ce mode donne plus de liberté à l'utilisateur. Après avoir rempli les données nécessaires, il peut accéder à une interface dédiée pour **choisir lui-même** la méthode multicritère qu'il souhaite appliquer (PROMETHEE II, SAW, TOPSIS, ELECTRE I) et les paramètres de PROMETHEE II et ELECTRE I s'il souhaite changer les fonctions de préférences et les seuils par défauts, ce qui permet une comparaison plus approfondie.

Cette flexibilité permet au DMCT d'être utilisé à la fois comme outil d'aide à la décision pédagogique, et comme instrument opérationnel dans le cadre d'études ou de projets réels.

5.2.2.2 Bibliothèques et packages utilisés dans l'outil DMCT

Le développement de l'outil DMCT s'est appuyé sur plusieurs bibliothèques Python spécialisées, chacune remplissant un rôle précis dans la structure de l'application :

- **customtkinter**: Une version personnalisée de Tkinter pour la création de l'interface graphique moderne, permettant un affichage ergonomique et intuitif des différentes fenêtres et boutons.
- **numpy** : Utilisée pour le traitement matriciel, notamment dans les calculs multicritères (normalisation, pondération, comparaison).
- **pandas** : utilisée pour l'import des données au format Excel, facilitant l'interopérabilité avec d'autres outils.
- **matplotlib** et **FigureCanvasTkAgg** : employées pour générer des graphiques intégrés à l'interface, tels que les radars charts et les graphes de surclassement.
- **pyDecision** : une bibliothèque externe dédiée à l'aide multicritère à la décision. Elle a été utilisée pour implémenter des algorithmes comme **ELECTRE I** et **PROMETHEE II**, facilitant leur intégration sans recoder toute la logique.
- **fractions** : utilisée pour afficher proprement les valeurs fractionnelles lors des comparaisons AHP (ex. : $1/3$, $1/5$), ce qui améliore la lisibilité des matrices de jugements.

L'intégration de ces bibliothèques a permis de développer une application robuste, modulaire et facilement adaptable aux besoins spécifiques du projet de désalinisation des sols. Le choix de **Python** comme langage principal s'est révélé pertinent de par sa flexibilité, sa richesse en packages scientifiques, et sa large communauté et sa simplicité.

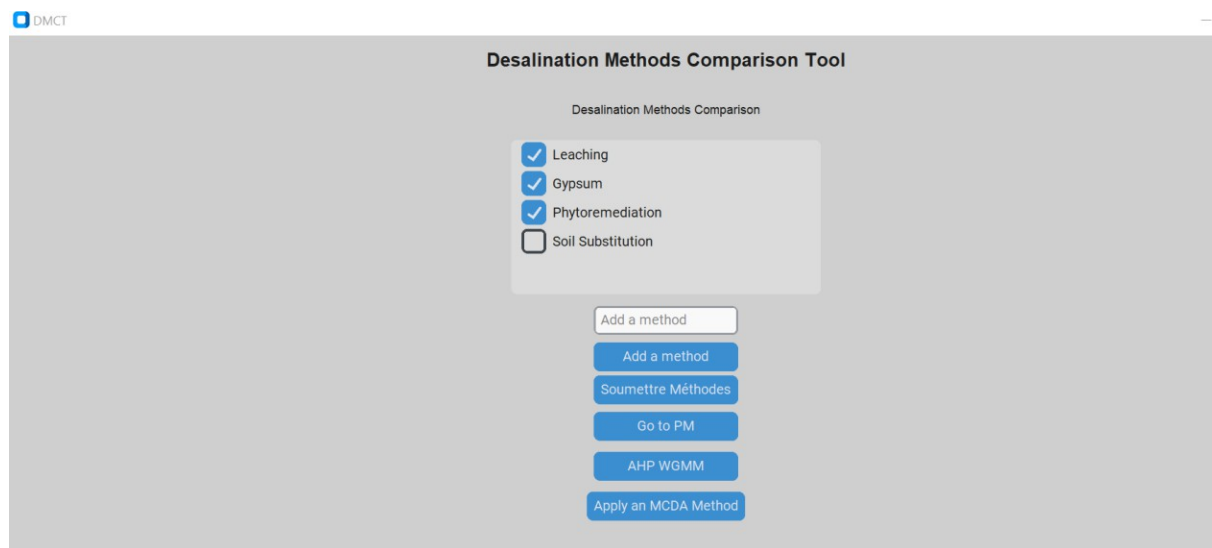
5.2.2.3 Description des données utilisées

L'application DMCT (Desalination Methods Comparison Tool) repose sur un ensemble structuré de données représentant les différentes alternatives de désalinisation à analyser, ainsi que les critères permettant leur évaluation.

► Alternatives (Méthodes de désalinisation)

Dans le cadre de cette étude, quatre méthodes principales ont été sélectionnées comme alternatives, en se basant sur leur pertinence dans le contexte des sols salins en génie civil :

- Lessivage
- Amendement au gypse
- Phytoremédiation
- Substitution du sol



The screenshot shows a web application titled "Desalination Methods Comparison Tool". It features a central panel with a list of methods: "Leaching" (checked), "Gypsum" (checked), "Phytoremediation" (checked), and "Soil Substitution" (unchecked). Below this list are several buttons: "Add a method" (text input), "Add a method" (blue button), "Soumettre Méthodes" (blue button), "Go to PM" (blue button), "AHP WGMM" (blue button), and "Apply an MCDA Method" (blue button). The interface is clean and modern, with a light gray background and blue accents.

Figure 5-10 Choix des alternatives

Ces méthodes ont été intégrées en tant qu'alternatives dans la matrice de performance utilisée pour l'évaluation multicritère.

L'utilisateur doit sélectionner au moins deux méthodes de désalinisation. La sélection se fait soit depuis les quatre méthodes proposées par défaut ou bien depuis des méthodes ajoutées manuellement par l'utilisateur, vu que l'utilisateur a aussi la possibilité d'ajouter d'autres méthodes par leurs noms, ou bien de supprimer certaines méthodes de la liste.

► *Critères d'évaluation*

Chaque alternative est évaluée selon six critères représentatifs des exigences techniques, environnementales et économiques :

1. **Efficacité de réduction de la salinité**
2. **Coût d'implantation**
3. **Durabilité**
4. **Impact environnemental**
5. **Occupation spatiale**
6. **Adaptabilité au climat local**

Ces critères ont été définis à partir de la littérature scientifique, des recommandations d'experts et des objectifs propres au projet de réhabilitation des sols dans les zones industrielles.

► **Matrice de performance**

La même matrice de performance présentée antérieurement a été aussi utilisée sur DMCT, associant à chaque alternative une évaluation sur une échelle de 1 à 5 par critère. Ces évaluations peuvent être :

- Saisies manuellement par l'utilisateur via l'interface graphique
- Importées à partir d'un fichier Excel

	Salinity Reduction Efficiency	Implantation Cost	Durability	Environmental Impact	Space Occupation	Adaptability to Local Climate
Leaching	4	2	4	1	4	4
Gypsum	4	1	3	4	2	4
Phytoremediation	2	4	2	2	4	3
Soil Substitution	3	1	4	5	5	4

Go to AHP WGMM
Go to Start Frame
Apply an MCDA Method

Performance matrix entered!

Import PM File
Reset
Submit

Figure 5-11 La matrice de performance

► Données pondérales

Les poids des critères sont déterminés par la méthode AHP (AnalyticHierarchyProcess), à travers une matrice de comparaison par paires remplie par l'utilisateur. Cela permet de refléter les priorités spécifiques du décideur ou du contexte de projet.

► Sources des données

Les valeurs utilisées pour la validation de l'outil sont issues :

- D'articles scientifiques et travaux antérieurs sur la désalinisation des sols
- De rapports de projets et thèses traitant de problématiques similaires
- Et, le cas échéant, d'estimations basées sur des hypothèses réalistes

5.2.2.4 Implémentation des méthodes multicritères

L'outil DMCT permet l'application de plusieurs méthodes d'aide à la décision multicritère afin d'analyser et de comparer les différentes alternatives de désalinisation des sols. Ces méthodes ont été choisies pour leur complémentarité et leur pertinence dans le cadre d'une évaluation à critères multiples.

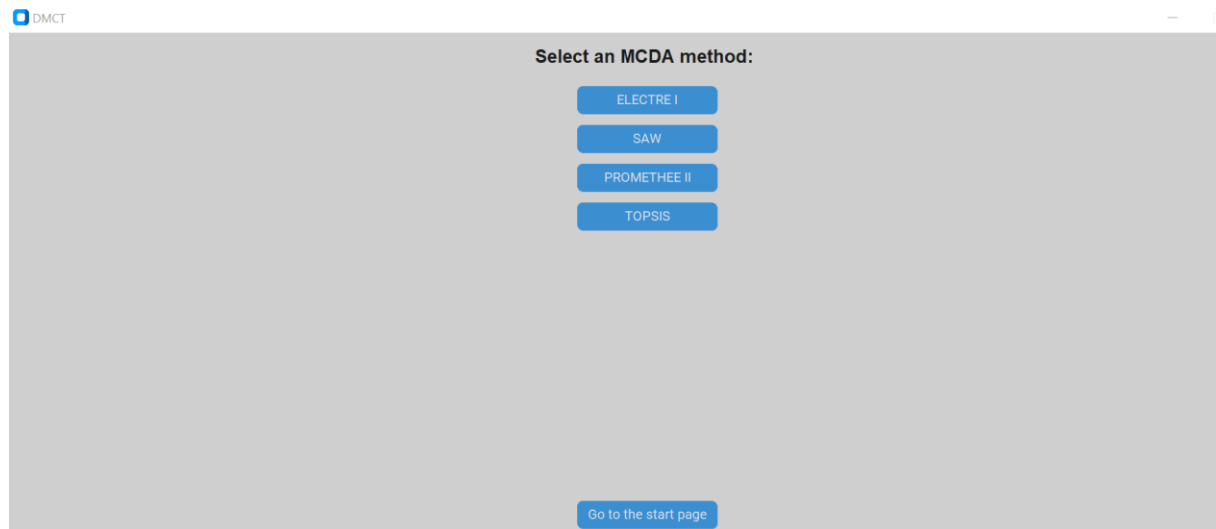


Figure 5-12 Choix des méthodes multicritères

5.2.2.4.1 Méthode AHP (Analytic Hierarchy Process)

La méthode AHP permet de déterminer les poids relatifs des critères en s'appuyant sur une matrice de comparaison par paires remplie ou importée par l'utilisateur. Dans l'application DMCT :

- L'utilisateur saisit les jugements relatifs entre critères selon l'échelle de Saaty.
- Une vérification automatique du taux de cohérence est effectuée.
- En cas de cohérence acceptable ($CR < 0,1$), les poids sont validés et utilisés dans l'analyse multicritère.

DMCT

AHP AIP WGMM for Fixing Comparison Criteria Weights

	Salinity Reduction Efficiency	Implantation Cost	Durability	Environmental Impact	Space Occupation	Adaptability to Local Climate
Salinity Reduction Efficiency	1	3	5	7	5	3
Implantation Cost	1/3	1	3	5	3	1
Durability	1/5	1/3	1	3	2	1/3
Environmental Impact	1/7	1/5	1/3	1	1/3	1/5
Space Occupation	1/5	1/3	1/2	3	1	1/3
Adaptability to Local Climate	1/3	1	3	5	3	1
Weights	0.42	0.193	0.088	0.036	0.07	0.193

Consistency Ratio is: 0.032 The matrix is consistent.

Submit Matrix

Import pair-wise comparison matrices file

Performance Matrix

Apply an MCDA Method

Reset

Go Back

Saaty's Scale of Relative Importance:

Intensity	Definition
1	Equal Importance
3	Moderate Importance
5	Strong Importance
7	Very Strong Importance
9	Extreme Importance
2, 4, 6, 8	Intermediate Values

Figure 5-13 Matrice de comparaison par pair

5.2.2.4.2 Méthode SAW (Simple Additive Weighting)

La méthode SAW repose sur la somme pondérée des performances normalisées.
Dans l'application :

- La matrice de performance est normalisée critère par critère.
- Chaque alternative obtient une note globale calculée comme la somme des produits poids $\times$ performance.
- Un classement des alternatives est alors généré.

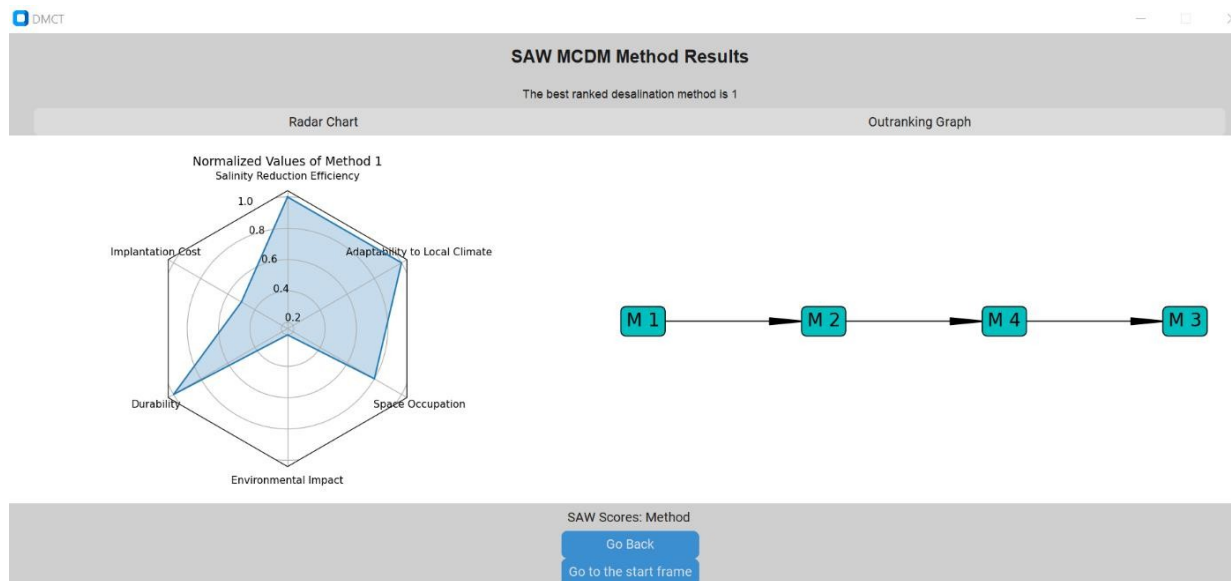


Figure 5-14 résultat de la méthode SAW

5.2.2.4.3 Méthode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)

TOPSIS classe les alternatives en fonction de leur proximité à une solution idéale (meilleure valeur possible) et à une solution anti-idéale (pire valeur possible). Dans DMCT :

- L'algorithme identifie les pôles idéaux et anti-idéaux.
- La distance euclidienne est calculée pour chaque alternative.
- L'indice de proximité relatif détermine le rang de chaque solution.

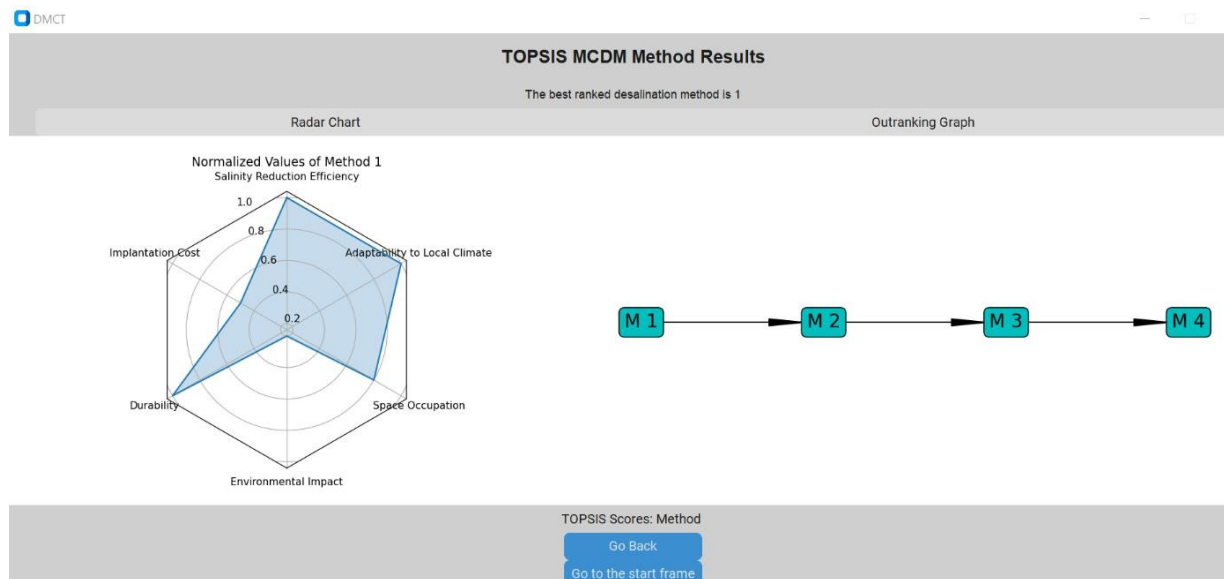


Figure 5-15 Résultats de la méthode TOPSIS

5.2.2.4.4 Méthode PROMETHEE II

Cette méthode repose sur le calcul des flux nets de préférence. Chaque alternative est comparée à toutes les autres, critère par critère.

L'outil DMCT permet :

- L'utilisation de fonctions de préférence (type 1 – Usual, par défaut).
- Le calcul des flux positifs, négatifs et nets sans les afficher.
- L'affichage d'un graphe de surclassement simplifié (sous forme de classement horizontal).

DMCT

Choose a preference function for each criterion:

	Preference Functions	Indifference (Q)	Preference (P)	Gaussian (S)
Salinity Reduction Efficiency	Usual			
Implantation Cost	Usual			
Durability	Usual			
Environmental Impact	Usual			
Space Occupation	Usual			
Adaptability to Local Climate	Usual			

Go Back Submit Parameters View Results

PROMETHEE II Parameters Submitted

Figure 5-16 Choix des fonctions de préférences pour chaque critère de la méthode PROMETHEE II

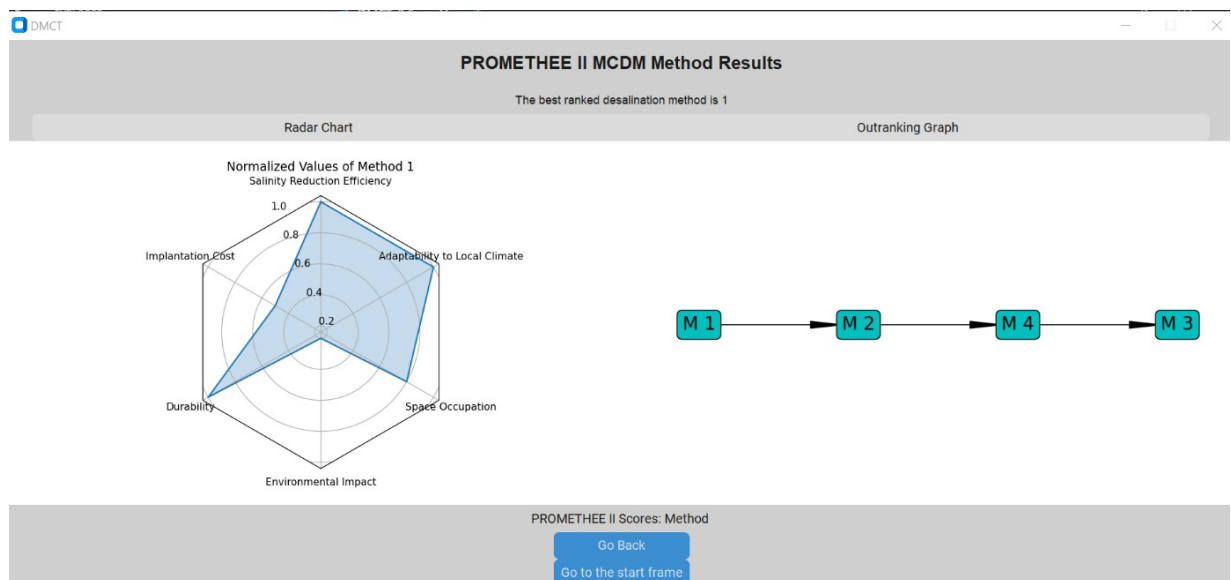


Figure 5-17 Résultats de la méthode PROMETHEE II

5.2.2.4.5 Méthode ELECTRE I

ELECTRE I repose sur les concepts de concordance et discordance pour établir des relations de surclassement entre les alternatives dans l'application :

- L'utilisateur définit les seuils de concordance et discordance.
- L'algorithme identifie les alternatives appartenant au **noyau** (ensemble non dominé).
- Les résultats sont visualisés à travers :
 - Un graphe de surclassement
 - Un graphe radar des performances normalisées des alternatives du noyau
 - L'utilisateur peut basculer entre les graphes radar des méthodes classé dans le noyau

The screenshot shows a web application window titled 'DMCT'. The main heading is 'Specify the concordance and discordance indices:'. Below this, there are two input fields: 'Concordance Index' with the value '0.75' and 'Discordance Index' with the value '0.50'. At the bottom, there are three buttons: 'Go Back', 'Submit Parameters', and 'View Results'.

Figure 5-18 Frame permettant de choisir les seuils de la méthode ELECTRE I

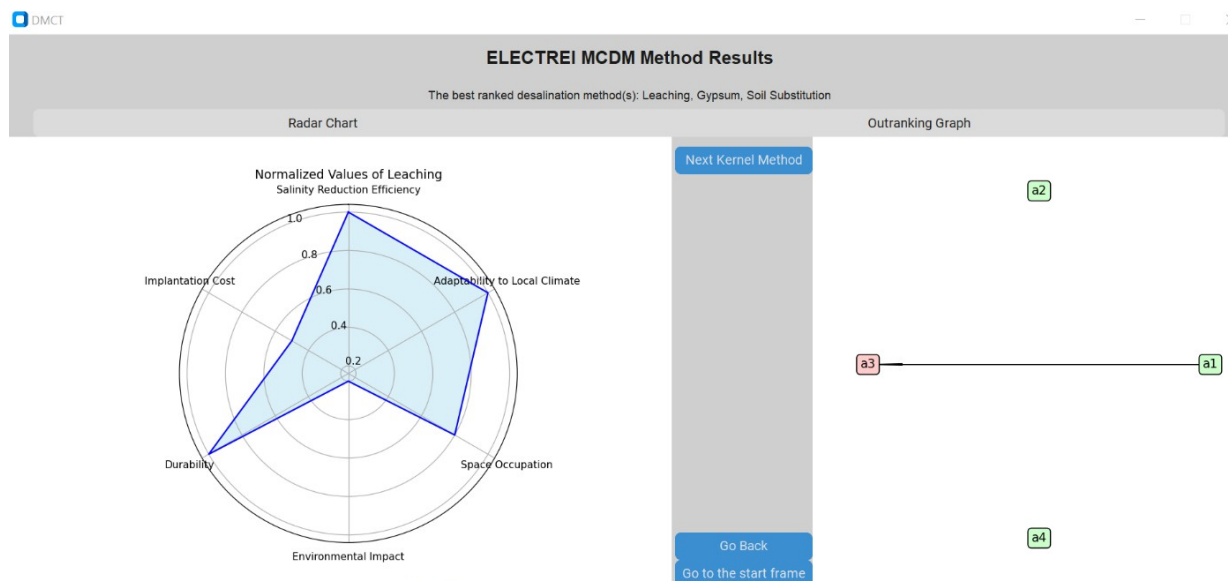


Figure 5-19 Résultats de la méthode ELECTRE I

5.2.2.5 Visualisation des résultats

Chaque méthode offre une visualisation graphique adaptée :

- Graphes radars pour visualiser les performances normalisées par critère.
- Graphes de surclassement ou de dominance.

Ces visualisations visent à rendre l'analyse plus intuitive et plus lisible pour l'utilisateur. Elle facilite aussi l'analyse comparative entre les différentes méthodes de désalinisation.

5.2.2.6 Interprétation des résultats obtenus sous DMCT

L'outil DMCT a permis de générer automatiquement les classements des différentes alternatives de désalinisation selon plusieurs méthodes d'aide multicritère à la décision : **SAW**, **PROMETHEE II**, **ELECTRE I** et **TOPSIS**. Ces méthodes ont été appliquées sur un ensemble commun de données, comprenant quatre alternatives de désalinisation (Lessivage, Gypse, Phytoremédiation, Substitution du sol) et six critères d'évaluation (Efficacité, Coût, Durabilité, Impact environnemental, Occupation de l'espace et Amélioration du sol).

• Méthode SAW

La méthode SAW a produit un classement linéaire basé sur la somme pondérée des performances. Elle a généralement favorisé les alternatives présentant des scores élevés sur les critères fortement pondérés, même si certains aspects comme l'impact environnemental ont pu être sous-représentés. Cela a parfois conduit à valoriser des méthodes efficaces mais moins durables.

• Méthode PROMETHEE II

PROMETHEE II a mis en évidence les alternatives les plus équilibrées en termes de préférences nettes, en prenant en compte les différences de performance et les préférences progressives. L'une des forces de cette méthode est sa capacité à discriminer finement les alternatives proches, ce qui a permis d'identifier les solutions les plus robustes dans un contexte incertain.

● Méthode ELECTRE I

ELECTRE I a permis de définir un noyau d'alternatives non dominées selon une logique de surclassement. Ce noyau représente les solutions qui surpassent les autres sur plusieurs critères sans être significativement inférieures sur les autres. Le graphe de surclassement généré par DMCT a permis de visualiser les relations de dominance, offrant une vision stratégique pour les décideurs.

● Méthode TOPSIS

La méthode TOPSIS a classé les alternatives selon leur proximité à l'idéal théorique. Les alternatives les plus proches de la solution idéale (meilleure performance sur tous les critères) ont été mises en avant, tandis que les plus éloignées ont été reléguées aux derniers rangs. Cette méthode a été particulièrement utile pour valoriser les compromis équilibrés entre les critères.

Globalement, les résultats obtenus sont cohérents entre les méthodes, bien que quelques variations apparaissent dans l'ordre exact du classement. Cela met en lumière l'intérêt de recourir à plusieurs méthodes **pour** diversifier les perspectives de décision. Le DMCT facilite cette analyse croisée, en permettant de comparer rapidement les résultats sous différents angles.

L'interprétation conjointe des résultats obtenus avec DMCT constitue donc un appui précieux pour les décideurs, en particulier dans les projets d'aménagement ou de réhabilitation de sols, où les contraintes techniques, économiques et environnementales doivent être équilibrées avec rigueur.

5.2.3 Analyse critique des résultats entre RStudio et DMCT

L'application DMCT développée dans le cadre de ce travail a été confrontée à une analyse réalisée précédemment sous RStudio afin d'évaluer la cohérence et la fiabilité des résultats produits.

D'une manière générale, les quatre méthodes multicritères (SAW, TOPSIS, PROMETHEE II et ELECTRE I) appliquées dans les deux environnements ont abouti à des

classements très similaires des alternatives de désalinisation. Les tendances globales sont donc confirmées, ce qui valide le bon fonctionnement des algorithmes implémentés dans DMCT.

L'intérêt du DMCT réside dans sa capacité à centraliser l'ensemble des calculs et visualisations au sein d'une interface conviviale, sans recourir à la programmation. Là où RStudio requiert une certaine expertise en codage pour exploiter les bibliothèques multicritères, DMCT permet à tout utilisateur d'accéder facilement aux résultats, de tester différents scénarios (grâce au double mode simplifié/avancé), et d'utiliser ses résultats pour une exploitation directe dans des rapports ou présentations.

En somme, DMCT constitue un complément pratique aux outils d'analyse classiques tels que RStudio, en offrant une solution clé en main, plus adaptée aux ingénieurs de terrain et aux décideurs non spécialisés en méthodes multicritères.

Le tableau ci-dessus met en évidence les avantages fonctionnels et pratiques de l'outil DMCT par rapport à l'environnement RStudio, dans le cadre de l'analyse multicritère appliquée à la désalinisation des sols.

Aspect Comparé	DMCT	RStudio
Interface	Graphique (interface utilisateur conviviale)	Basée sur le code (interface en ligne de commande)
Accessibilité	Accessible aux ingénieurs et décideurs non techniciens	Requiert des compétences en programmation (langage R)
Méthodes intégrées	SAW, TOPSIS, ELECTRE I, PROMETHEE II	SAW, TOPSIS, ELECTRE I, PROMETHEE II
Visualisation	Graphes radars, surclassement, tableaux automatisés	Graphes générés manuellement, nécessitant du code
Modes d'utilisation	Deux modes : Simplifié et Avancé	Un seul mode (manuel via script)
Temps d'exécution	Rapide, avec calcul et affichage automatisés	Plus lent, dépendant du code écrit par l'utilisateur
Adaptation au projet	Conçu pour la désalinisation des sols (génie civil)	Utilisation générique sans personnalisation directe

Tableau 16 Comparaison fonctionnelle entre l'outil DMCT et l'environnement RStudio pour l'analyse multicritère

5.3 Perspectives

L'implémentation et l'adaptation de l'outil GEFT à la problématique de désalinisation des sols dans un contexte de génie civil ouvrent la voie à plusieurs axes de développement futurs :

- **Amélioration de l'interface utilisateur** : Une ergonomie plus poussée, une compatibilité multiplateforme (web, mobile) et une personnalisation des visualisations graphiques peuvent rendre l'outil plus accessible aux praticiens et aux décideurs.
- **Extension du référentiel de critères** : L'intégration de critères supplémentaires, propres au génie civil (ex. : portance du sol après traitement, compatibilité avec les matériaux de construction, comportement mécanique post-intervention), permettrait une évaluation plus fine des alternatives.
- **Base de données élargie** : Constituer une base de données régionale (voire nationale) recensant des cas réels de traitement des sols salinisés permettrait d'enrichir le système avec des retours d'expérience pratiques.
- **Validation sur terrain** : L'application de l'outil à des cas concrets de zones industrielles en cours d'aménagement permettrait de valider la robustesse du modèle, d'ajuster les pondérations empiriques, et de mesurer l'écart entre les recommandations théoriques et les performances observées.
- **Intégration de l'intelligence artificielle** : L'ajout de modules d'apprentissage automatique pour affiner automatiquement les recommandations selon des retours d'expérience enregistrés dans l'outil est également envisageable.
- **Approche participative** : L'outil pourrait être adapté à un usage collaboratif en ligne pour permettre à plusieurs experts ou décideurs de co-construire les pondérations des critères et les scénarios d'évaluation.
- **Analyse de sensibilité aux pondérations des critères** : La robustesse des résultats obtenus via les méthodes multicritères dépend fortement

des poids attribués aux critères. Une perspective d'amélioration consisterait à intégrer un module d'analyse de sensibilité dans DMCT, permettant d'évaluer l'impact des variations de pondérations sur les classements finaux. Cela offrirait aux décideurs une vision plus fine de la stabilité des solutions proposées, et renforcerait la fiabilité des recommandations en situation d'incertitude.

5.4 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a permis de présenter de manière approfondie l'application des méthodes multicritères de décision (MCDA) à la problématique de désalinisation des sols, à travers deux outils distincts : RStudio, utilisé pour les premières analyses, et DMCT, développé et adapté spécifiquement dans le cadre de ce mémoire.

Les résultats obtenus sous RStudio ont permis d'établir un premier classement des alternatives de traitement à l'aide des méthodes SAW, PROMETHEE II, TOPSIS et ELECTREI. Ces résultats ont ensuite été reproduits et comparés à ceux générés par DMCT, confirmant ainsi la robustesse des algorithmes implémentés et la cohérence des classements obtenus dans les deux environnements. Cette double approche a permis de valider la fiabilité des calculs tout en soulignant les spécificités d'interprétation propres à chaque méthode.

L'outil DMCT s'est toutefois distingué par sa facilité d'utilisation, sa capacité à centraliser l'ensemble des méthodes, et surtout par la richesse de son interface graphique, permettant une visualisation intuitive des performances et classements. Grâce à ses deux modes (simplifié et avancé), il s'adapte à différents profils d'utilisateurs, du technicien au décideur stratégique.

En intégrant la pondération via AHP, la gestion dynamique des alternatives, l'import des données et l'automatisation des visualisations (radar charts, graphes de surclassement, etc.), DMCT représente un véritable outil d'aide à la décision opérationnelle, conçu pour répondre aux besoins concrets du terrain dans les projets de réhabilitation de sols salinisés.

Conclusion Générale

La salinisation des sols constitue une problématique complexe aux répercussions significatives dans les domaines de l'agriculture, de l'environnement et, plus spécifiquement dans le cadre de ce mémoire, du génie civil. Dans un contexte comme celui de Bordjia, où le développement de nouvelles zones industrielles dépend fortement de la qualité du sol, il est essentiel de sélectionner avec rigueur les techniques de désalinisation les plus adaptées.

Ce travail a permis d'adopter une démarche structurée en trois temps : une revue approfondie des mécanismes de salinisation et des méthodes de réhabilitation existantes ; l'intégration d'outils multicritères d'aide à la décision pour comparer les alternatives ; et enfin, la mise en œuvre d'une solution numérique adaptée, le DMCT, pour centraliser les analyses et en faciliter l'exploitation.

L'application des méthodes multicritères AHP, SAW, TOPSIS, PROMETHEE II et ELECTRE I a permis de mettre en évidence la robustesse de certaines alternatives telles que le lessivage ou la substitution du sol, en fonction de différents critères (efficacité, coût, durabilité, impact environnemental, etc.). La complémentarité de ces méthodes a démontré l'intérêt d'une approche croisée pour éclairer les décisions dans des situations complexes où plusieurs objectifs doivent être conciliés.

L'outil DMCT développé et adapté dans le cadre de ce mémoire a prouvé sa pertinence sur le plan opérationnel : grâce à son interface intuitive, ses modes simplifié et avancé, et ses capacités de visualisation, il facilite grandement l'analyse multicritère et la prise de décision, même pour des utilisateurs non spécialistes. Sa comparaison avec l'environnement RStudio a permis de valider sa fiabilité tout en mettant en lumière sa valeur ajoutée en matière d'ergonomie, d'accessibilité et de rapidité d'exécution.

En définitive, ce mémoire démontre que le recours à des outils d'aide à la décision multicritère, couplés à une plateforme numérique dédiée, offre une réponse concrète, rigoureuse et adaptée à la gestion des sols salinisés dans des projets d'aménagement. Cette démarche pourrait être étendue à d'autres contextes géotechniques ou environnementaux, et ouvre la voie à plusieurs perspectives d'amélioration, notamment par l'intégration de nouveaux critères, l'analyse de sensibilité des pondérations, ou encore l'introduction de l'intelligence artificielle pour des recommandations adaptatives.

Bibliographie

- [1] U. S. L. Staff, «Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils, Washington,,» D.C.: U.S. Government Printing Office,, 1954..
- [2] Mermoud.A, «Processus de salinisation en zones arides. Presses Agronomiques,» 2006.
- [3] fao, «Water Quality for Agriculture. Irrigation and Drainage Paper NO 29,» 1988.
- [4] L. (. Richards, « Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. USDA Handbook No. 60.,» 1954.
- [5] FAO, «Guidelines for Soil Profile Description. 5th ed. Rome. (Chapitre sur la dynamique des sels),» 2016.
- [6] fao, «Gestion des sols affectés par la salinisation,» 2006.
- [7] J. Legros, «Les grands sols du monde,» 2009.
- [8] S. & J. J. Marlet, «Processus de salinisation anthropique,» 2006.
- [9] K. e. a. Djili, «Impacts de l'irrigation au Maghreb,» 2003.
- [10] Halitim, «Études fondatrices sur les sols algériens,» 1985-1988.
- [11] INSID, «Cartographie nationale des sols salés,» 2008.
- [12] aubert, 1975.
- [13] Djili, «Répartition nord-sud des sols sodiques,» 2000.
- [14] M. J.P, «Processus géochimiques des sols salés,» 2005.
- [15] I. I., «Variabilité des profils salins en zones arides,» 1995.
- [16] M. & A. C. Zahow, « Geochemical processes in saline soils. Soil Science Society of America Journal, 56(2), 456-461.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600020020x>,» 1992.
- [17] G. Aubert, « Pédogenèse des sols méditerranéens. Mémoires ORSTOM, 78, 1-203.,» 1975.
- [18] M. Benchetrit, «Géologie des formations salifères algériennes. Bulletin du Service de la Carte Géologique d'Algérie, 12, 1-150.,» 1956.
- [19] P. e. a. Boivin, «Processus de salinisation dans les périmètres irrigués. Étude et Gestion des Sols, 9(3), 201-215.,» 2002.
- [20] A. & H. T. Douaoui, « Impact de l'irrigation sur la salinisation en Algérie. Sécheresse, 18(1), 45-52.,» 2007.
- [21] J. Servant, « Les sols sodiques : caractéristiques et évolution. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, 16(3), 245-268.,» 1978.
- [22] I. Ilou, « Gestion des sols sodiques en irrigation. Revue d'Agronomie Saharienne, 7(2), 45-62.,» 1995.
- [23] J. Montoroi, «Alcalinisation des sols : processus et réhabilitation. Éditions IRD. ISBN 978-2-7099-1568-7,» 2005.
- [24] M. e. a. Lahlou, «Dynamique des sels en irrigation pérenne. Revue de Géologie Méditerranéenne, 29(3), 45-60.,» 2002.

- [25] J. Servant, «Classification des sols sodiques et salsodiques. Science du Sol, 13(2), 89-104.,» 1975.
- [26] P. Duchaufour, «Pédogenèse des sols à accumulation sodique. Masson.,» 1977.
- [27] I. Ilou, « Impacts de l'irrigation sur la salinisation. Revue d'Agronomie Saharienne,» 1995.
- [28] J. e. a. Morizet, « Dynamique des sels en zones arides. Cahiers ORSTOM.,» 1970.
- [29] K. Djili, «Salinisation des sols en Algérie. Thèse Université d'Oran.,» 2000.
- [30] J. Franzén, « Salinisation et gestion des nappes en zones arides.,» 2005.
- [31] I. P. Y. J. S. P. & M. F. I. Abrol, Salt-affected soils and their management, FAO Soils Bulletin 39 éd., FAO, Éd., Rome, 1988.
- [32] FAO, «Managing salt-affected soils for sustainable agriculture,» Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2011.
- [33] F. J. A. J. & N. H. A. Ghassemi, Salinisation of land and water resources: Human causes, extent, management and case studies, C. Publishing, Éd., Wallingford, 1995.
- [34] P. Rengasamy, «World salinization with emphasis on Australia,» *Journal of Experimental Botany*, vol. 57, p. 1017–1023, 2006.
- [35] D. P. & R. K. V. G. K. Sharma, «Strategy for long-term use of saline drainage water in Haryana,» *Agricultural Water Management*, vol. 36, n° %12, p. 149–163, 1998.
- [36] M. O. J. D. S. S. N. A. D. & S. K. L. Qadir, «Phytoremediation of sodic and saline-sodic soils,» *Advances in Agronomy*, vol. 96, p. 197–247, 2007.
- [37] M. H. Wong, «Ecological remediation of contaminated soils,» *Environmental Reviews*, vol. 12, n° %11, p. 1–20, 2004.
- [38] R. M. L. a. A. C. B. A. C. Leone, «Remediation of salt-affected soils: Engineering practices and challenges,» *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 131, n° %110, pp. 1252–1260,, 2005.
- [39] B. I. i. S. S. A. Review, «Canadian Society for Civil Engineering Annual Conference (CSCE 2019), Laval, Québec, Canada,» chez *Canadian Society for Civil Engineering Annual Conference (CSCE 2019), Laval, Québec, Canada*.
- [40] R. & W. D. Ayers, «Water Quality for Agriculture. Irrigation and Drainage Paper No. 29, Rev. 1.,» FAO, ROME, 1985.
- [41] J. W. v. H. a. J. G. v. Alphen, «Salinity Control,» chez *Drainage Principles and Applications*, I. I. f. L. R. a. I. (ILRI), Éd., H. P. Ritzema, Ed., 2nd ed., Wageningen, The Netherlands, 2006, p. 533–600.
- [42] S. Grattan, «Managing Salts by Leaching. University of California Agriculture and Natural Resources,» vol. 8550, 2011.
- [43] M. H. Wong, Environmental Contamination: Health Risks and Ecological Restoration, CRC Press, 2012.
- [44] R. M. L. a. A. C. B. A. C. Leone, «Remediation of salt-affected soils: Engineering practices and challenges,» *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 131, n° %110, p. 1252–1260, 2005.
- [45] F. Graham, «Evaluating contaminated soil removal costs and considerations,» 2003.
- [46] J. D. B. S. L. T. a. W. L. N. J. L. Havlin, «Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management,» 7th ed, 2005.

- [47] M. Bessenasse, «Système de flushing et de lavage,» Université de Blida, 2021.
- [48] J. D. & S. F. W. Oster, «Infiltration as influenced by irrigation water quality,» *Soil Science Society of America Journal*, pp. 444-447, 1979.
- [49] M. N. A. D. & O. J. D. Qadir, «Capacity development for irrigation water management to combat salinity,» *International Journal of Water Resources Development*, vol. 21, n° 13, p. 393–406, 2005.
- [50] U. EPA, «(United States Environmental Protection Agency).,» *CLU-IN Technology Focus*, 2023.
- [51] F. (2002), «Drainage Manual: Planning and Design of Agricultural Drainage Systems. FAO Irrigation and Drainage,» chez *Guide technique de la FAO sur les systèmes de drainage agricole, incluant des calculs de dimensionnement et des études de cas*, 2002, p. 62.
- [52] H. P. Ritzema, «Drainage principles and applications,» chez *International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI).*, 1994, p. 114.
- [53] A. S. M. P. G. Q. M. & A. Z. Qureshi, «Sustainable management of saline waters and salt-affected soils for agriculture,» chez *International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA)*, 2013, p. 78.
- [54] H. R. Cedergren, «Seepage, drainage, and flow nets,» (3e éd.). Wiley, 1989, p. 203.
- [55] E. Commission., «Guidelines for sustainable drainage systems (SuDS) in urban areas.,» *Publications Office of the EU*, p. 33, 2015.
- [56] A. Q. M. & M. G. Ghafoor, «Efficiency of subsurface drainage for controlling soil salinity in irrigated areas.,» *Journal of Soil Science.*, vol. 521–530, p. *53*(4), 2012.
- [57] U. S. D. o. A. (USDA)., «Agricultural drainage: Water quality impacts and subsurface drainage studies in the Midwest.,» *USDA Natural Resources Conservation Service.*, p. 13, 2017.
- [58] H. P. S. T. V. R. S. & B. J. Ritzema, «Subsurface drainage to combat waterlogging and salinity in irrigated lands.,» *Agricultural Water Management.*, vol. 95, n° 12, p. 165–178, 2008.
- [59] F. a. A. O. (FAO), «Drainage manual: Planning and design of agricultural drainage systems».(FAO Irrigation and Drainage Paper No. 62). FAO..
- [60] K. K. & K. N. C. Tanji, «Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas.,» *FAO*, 2002.
- [61] M. E. (. Sumner, «Science, Handbook of Soil,» 2000.
- [62] F. H. Chen, «Foundations on expansive soils,» *Détaille l'utilisation du gypse pour stabiliser les sols avant construction*, 2012.
- [63] F. H. A. (FHWA)., «Soil stabilization for pavement systems (FHWA-HRT-21-021).,» 2021.
- [64] P. C. A. (PCA)., «Chemical attacks on concrete and prevention methods. PCA Technical,» pp. Bulletin, 42, 2019.
- [65] K. L. Y. B. & N. L. D. Dontsova, «Gypsum for agricultural and construction use. In Soil Amendments,» *ACS Publications*, pp. 153-170.
- [66] I. S. M. E. M. W. P. F. M. P. W. P. M. A. & F. M. V. Shainberg, «Use of gypsum on soils.,» *Advances in Soil Science*, vol. 9, pp. 1-111.
- [67] A. G. a. G. M. N. Qadir, «Amelioration of calcareous saline–sodic soils through

- phytoremediation and chemical strategies,» *Land Degradation & Development*, vol. 12, n° 12, p. 175–186, 2001.
- [68] N. L. A. & A. C. A. Association, «Guide to soil stabilization with lime and fly ash.,» *Comparaison avec d'autres amendements chimiques*, 2018.
- [69] J. D. O. a. J. D. F. D. Rhoades, «Reclamation and Management of Salt-Affected Soils after Irrigation with Saline Water,» *Agricultural Salinity Assessment and Management*, p. 349–388, 1992.
- [70] U. S. L. Staff, «Diagnosis and improvement of saline and alkali soils».(*USDA Handbook No. 60*)., 1954.
- [71] I. S. & R. J. E. Alcorido, «Phosphogypsum and other by-product gypsums in agriculture.,» *Advances in Agronomy*, vol. 49, pp. 55-118.
- [72] F. H. A. (FHWA), «Soil stabilization methods for road construction».
- [73] N. A. o. C. E. (NACE)., «tandard SP0169: Control of external corrosion on underground or submerged metallic systems.,» 2020.
- [74] U. S. L. Staff., «Diagnosis and improvement of saline and alkali soils (USDA Handbook No. 60).,» 1954.
- [75] R. D. B. a. N. M. v. S. M. G. A. van der Heijden, «The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems,» *Ecology Letters*, vol. 11, n° 13, p. 296–310, 2008.
- [76] R. S. a. A. S. S. Upadhyay, «Salt-tolerant plant growth-promoting rhizobacteria: a novel approach for sustainable agriculture,» *Environmental Sustainability*, vol. 1, p. 113–121, 2018.
- [77] R. D. B. a. W. H. v. d. Putten, «Belowground biodiversity and ecosystem functioning,» *Nature*, vol. 515, p. 505–511, 2014.
- [78] B. Roy, Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision, Economica, Paris, 1985.
- [79] B. Roy, Multicriteria Methodology for Decision Aiding., Springer., (1996).
- [80] K. & R. (1993), Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-offs., Cambridge University Press., pp. 45-72.
- [81] F. e. a. (2005), «Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys,» chez *Interactive Methods*, Springer.
- [82] V. (1992), «Section 3.2 sur les relations de surclassement.,» chez *Multicriteria Decision-Aid*. Wiley.
- [83] J.-P. a. V. P. Brans, «A Preference Ranking Organisation Method: The PROMETHEE Method,» *Management Science*, vol. 31, n° 16, pp. 647--656.
- [84] J.-P. a. M. B. Brans, «PROMETHEE Method,» chez *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, Springer, 2005, pp. 163--186.
- [85] J. P. & M. B. Brans, PROMETHEE Methods. In *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys* (pp. 163–186). Springer, 2005.
- [86] R. (1968), «Classement et choix en présence de points de vue multiples : La méthode ELECTRE». *Revue Française d'Informatique et de Recherche Opérationnelle*.
- [87] R. & B. (1993), «Aide Multicritère à la Décision : Méthodes et Cas».
- [88] F. e. a. (2013), «ELECTRE Methods: Main Features and Recent Developments». *International Series in Operations Research & Management Science*.

- [89] R. (1985), «Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision».
- [90] R. & B. (1993), «Aide Multicritère à la Décision : Méthodes et Cas».
- [91] S. (2008), «Decision Making with the Analytic Hierarchy Process». *International Journal of Services Sciences*.
- [92] V. & K. (2006), «Analytic Hierarchy Process: An Overview of Applications». *European Journal of Operational Research*.
- [93] M. S. b. V. M. c. ., M. B. d. V. S. Agarwal a, «Supplier Selection in Dynamic Environment using Analytic Hierarchy Process,» *I.J. Information Engineering and Electronic Business*, , 2014.
- [94] T. L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, 1980.
- [95] T. L. Saaty, «Decision Making with the Analytic Hierarchy Process,» *International Journal of Services Sciences*, vol. 1, n° %11, pp. 83--98, 2008.
- [96] C.-L. a. Y. K. Hwang, «Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications,» 1981.
- [97] M. a. O. S. a. Y. M. a. I. J. Behzadian, «A State-of-the-Art Survey of TOPSIS Applications,» *Expert Systems with Applications*, vol. 39, n° %117, pp. 13051--13069, 2012.
- [98] K. R. MacCrimmon, «Decision Making Among Multiple-Attribute Alternatives,» *Journal of Mathematical Psychology*, vol. 5, pp. 428--455, 1968.
- [99] M. (1968), «Decision Making Among Multiple-Attribute Alternatives,» *Journal of Mathematical Psychology*, pp. 428-455.
- [100] E. Triantaphyllou, «Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study,» 2000.
- [101] C.-L. a. Y. K. Hwang, «Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications,» 1981.
- [102] P. Zdruli, ««Land degradation and desertification in the Mediterranean region: A case study from southern Italy,»,» ITALY, 2014.
- [103] H. e. a. Akinci, ««Assessment of land degradation using Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) in a semi-arid river basin, Turkey" (Environmental Earth Sciences),»,» TURKEY, 2013.
- [104] S. e. a. Kumar, ««Multi-criteria decision analysis for sustainable management of salt-affected soils: A review" (Agricultural Water Management),»,» 2020.
- [105] A. A. e. a. El Baroudy, ««Mapping and evaluating land suitability using a GIS-based model" (CATENA),»,» 2020.
- [106] M. Bouaziz, ««Évaluation multicritère des stratégies de lutte contre la salinisation des sols en zones arides : Cas de la Tunisie centrale,»,» TUNISIE, 2016.
- [107] N. Oulbachir, ««Aide à la décision pour la gestion durable des sols salins par approche multicritère et SIG" (Thèse, Université de Liège),»,» 2018.
- [108] S. A. G. a. S. Danesh, ««A hybrid fuzzy multi-criteria decision making approach for desalination process selection,» *Journal of Environmental Management*, vol. 233, pp. 222--233,,»,» 2019.
- [109] M. H. a. A. Al-Othman, ««Application of the analytical hierarchy process in the selection of desalination plants,» *Desalination*, vol. 174, pp. 97--108, 2005.,»,» 2005.

- [110] T. P. D. F. F. M. a. A. J. T. H. T. Do Thi, «Comparison of Desalination Technologies Using Renewable Energy Sources with Life Cycle, PESTLE, and Multi-Criteria Decision Analyses,” *Energies*, vol. 14, no. 20,,» 2021.
- [111] M. S. I. F. P. a. A. S. A. H. M. Saadat, ««Desalination Technologies for Developing Countries: A Review,” *Journal of Environmental Research and Development*, vol. 12, no. 2, pp. 1–14,,» 2017.
- [112] S. A. a. M. P. B. B. Ayan, ««A Comprehensive Review of the Novel Weighting Methods for Multi-Criteria Decision-Making,” *Mathematics*, vol. 11, no. 1, p. 123,,» 2023.
- [113] M. A. E. K. Z. Z. T. a. J. A. M. Keshavarz-Ghorabae, ««“Determination of Objective Weights Using a New Method Based on the Removal Effects of Criteria (MEREC),” *Symmetry*, vol. 10, no. 12, p. 626,,» 2018.
- [114] K. A. S. M. S. S. a. Z. B. Y. N. H. Zardari, «Weighting Methods and their Effects on Multi-Criteria Decision Making Model Outcomes in Water Resources Management, Springer Briefs in Water Science and Technology, Springer,,» 2015.
- [115] Y. R. L. N. J. B. M. D. G. A. R. T. M. & M.-G. D. Volchko, «SNOWMAN - MCA: Multi-criteria analysis of remediation alternatives to assess their overall impact and cost/benefit, with focus on soil function (ecosystem services and goods) and sustainability,,» Engineering Geology Research Group, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.,, 2016:6.
- [116] S. M. T. e. M. A. Laredj, «Proposition of a new tool for the election of group decision support system facilitator based on the multi-criteria approach,,» ALGERIA, 2021.
- [117] S. M. T. e. M. A. Laredj, «Proposition of a new tool for the election of group decision support system facilitator based on the multi-criteria approach,,» ALGERIA, 2021.
- [118] J. D. Oster, «Use of saline and sodic waters for irrigation,,» *Soil Use and Management*, vol. 10, n° %11, p. 1–9, 1994.
- [119] E. K. E. L.-C. a. R. B. S. P. Sohi, «A review of biochar and its use and function in soil,,» *Advances in Agronomy*, vol. 105, p. 47–82, 2010.
- [120] F. T. I. a. M. R. Islam, «International Journal of Environmental Science and Technology,,» *Role of organic matter in improving soil properties and crop productivity in saline soils*, vol. 15, p. 1605–1614, 2018.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم -
كلية العلوم الاجتماعية و الإنسانية

**تصريح شرفي خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية
لإنجاز البحث**

أنا الممضي أدناه،
الطالب (ة): تاروي ويسام رقم التسجيل
الجامعي: 202037028630
الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم: 14.003096304905004 ... والصادرة بتاريخ: 2014.10.26
عن بلدية بنت مسرة
المسجل بكلية العلوم الدقيقة والإعلام الآلي / قسم رياضيات وعلوم الحاسوب
شعبة الرياضيات
التخصص الرياضيات
والعنوان: المكلف بإنجاز مذكرة مستر بعنوان:

.....
L'élaboration de l'approche multicritères pour la sélection des alternatives
de désalination des sols

أصرح بشرفي أنني ألزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية ومعايير الأخلاقيات العلمية والنزاهة الأكاديمية المطلوبة في إنجاز البحث ، وأتحمل المسؤولية الشخصية عن كل المحتوى المتضمن في البحث المذكور أعلاه .

التاريخ: 14/06/2025

إمضاء المعنى

附錄一

* ملحق القرار الوزاري رقم 933 المؤرخ في 28 جويلية 2016 الذي يحدد القواعد المتعلقة بالولاية من السيرة العظمى ومناقبها.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم -
كلية العلوم الاجتماعية والإنسانية

تصريح شرفي خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية
لإنجاز البحث

أنا الممضي أدناه،

الطالب(ة): شحاتة بن هاجي رقم التسجيل

الجامعي: 2018370303918

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم: 18.0006.0012.3012.96.00000000 والصادرة بتاريخ:

2024-10-26

عن بلدية مستغانم
المسجل بكلية العلوم الدقيقة والإعلام الآلي / قسم الرياضيات والإحصاء
شعبة الإعلام الآلي / التخصص

شركات وانظمة

والمكلف بإنجاز منكرة ماستر بعنوان:

استخدام الذكاء الاصطناعي في اختيار بدائل النقل البشري

بالترجمة: L'utilisation de l'approche peut-être utiles pour la sélection des alternatives de développement des transports

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية ومعايير الأخلاقيات العلمية
والنزاهة الأكاديمية المطلوبة في إنجاز البحث ، وأتحمل المسؤولية الشخصية عن كل
المحتوى المتضمن في البحث المذكور أعلاه .

التاريخ: 2025/06/04

إمضاء المعني

