



Faculty of Sciences and Technology

كلية العلوم والتكنولوجيا

Civil Engineering Department

قسم الهندسة المدنية

N° d'ordre : M2 /GC/2025

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Travaux publics

Option : Voie et Ouvrage d'Art (VOA)

Thème

**Désalinisation des sols : Application de la
méthode multicritère d'aide à la décision**

Présenté par :

GOUMIDI Rachida

Soutenu le 17/06/2025 devant le jury composé de :

Pr. MISSOUM Hanifi	—Président du jury	— Université de Mostaganem
Pr. MEBROUKI Abdelkader	— Examineur	— Université de Mostaganem
Pr. LAREDJ Nadia	— Encadrant	— Université de Mostaganem

Année Universitaire 2024/2025

Remerciement

Avant tout, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Dieu, pour m'avoir accordé la santé, la force et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce mémoire de fin d'études. Sans Sa bénédiction et Sa guidance, ce travail n'aurait pas été possible.

Je souhaite également à exprimer ma reconnaissance à **Mme LAREDJ Nadia**, Professeur au département de Génie Civil de l'Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, pour avoir accepté de m'encadrer dans cette étude. Je la remercie pour son implication, son soutien et ses encouragements tout au long de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance à **Messieurs MISSOUM Hanifi**, et **MEBROUKI Abdelkader**, Professeurs au département de Génie Civil de l'Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem. D'avoir accepté d'évaluer mon travail au sein du jury de soutenance, et pour le temps consacré à lire ce manuscrit et pour toutes les remarques constructives qu'il a pu apporter.

Pour terminer, j'ai une pensée pour toutes celles et ceux qui m'ont permis de mener à bien ce travail de recherche, à savoir ma famille et mes amis. Et pour terminer je remercie tous mes enseignants du primaire à l'université.

Dédicace

Je dédie ce travail :

À ma famille qui mon toujours encouragée et soutenue durant toutes ces années et qui mon permis d'aller au bout de mon projet. Merci d'avoir cru à mes choix d'étude et de m'avoir donné les moyens d'accomplir ce travail dans les meilleures conditions.

À **Ma Mère**, je n'aurai jamais pu réaliser et terminer ce travail sans toi et sans votre soutien,

À **Mon Père**, celui qui a toujours sacrifié tout pour me voir réussir.

À **Mon Mari**, celui qui a été mon soutien dans ce travail.

À **Mon petit prince Haitham Oussaid**, je prie Dieu de le garde pour moi.

À **Mes sœurs**, présentes toujours dans mon cœur :

Islem sans oublie son mari et ces enfants « Adam, Rayane, et Amina »

Salma et son mari, Je vous dis merci à vos conseils, soutien, et encouragements.

À **Mes cousins et mes cousines** sans oublié ses maris, merci à vos soutien, et encouragements.

À **Mes adorables copines**, merci pour vos fidélités et vos aides.

Résumé

Le phénomène de salinisation des sols représente un défi environnemental majeur, qui s'étend principalement dans les régions arides et semi-arides. Face à la diversité des options de remédiation disponibles pour améliorer les sols affectés par ce problème, on propose dans ce travail d'appliquer une démarche basée sur le principe d'Aide à la Décision Multicritères afin de pouvoir évaluer et choisir les solutions et les méthodes les plus adéquates.

Après avoir identifié les causes ainsi que les impacts de la salinité des sols, plusieurs techniques de remédiation ont été étudiées telles que l'amendement chimiques, le lessivage, la substitution, l'électrocinétique, et la phytoremédiation. Chaque méthode est analysée selon des critères environnementaux, techniques, et économiques.

L'utilisation de méthodes multicritères, notamment les méthodes **AHP**, **PROMETHEE II** ou **ELECTREI**, permettent de comparer les alternatives de manière structurée, en intégrant les préférences des parties prenantes. Une étude de cas illustre l'application de cette approche dans une zone touchée par le phénomène de salinité, mettant en évidence la pertinence des outils d'aide à la décision multicritères pour une prise de décision éclairée.

Ce travail démontre que l'approche multicritère constitue un levier efficace pour orienter les choix de remédiation, en conciliant plusieurs facteurs tels que la durabilité, l'efficacité ainsi que le coût.

Absract:

The phenomenon of soil salinization represents a major environmental challenge, primarily affecting arid and semi-arid regions. Given the diversity of remediation options available to improve soils impacted by this issue, this study proposes applying an approach based on the principle of Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) in order to evaluate and select the most appropriate solutions and methods.

After identifying the causes and impacts of soil salinity, several remediation techniques were examined, such as chemical amendments, leaching, substitution, electrokinetics, and phytoremediation. Each method is analyzed based on environmental, technical, and economic criteria.

The use of multi-criteria methods—particularly AHP, PROMETHEE II, or ELECTRE I—allows for a structured comparison of alternatives, integrating stakeholder preferences. A case study illustrates the application of this approach in an area affected by salinity, highlighting the relevance of decision support tools for informed decision-making.

This work demonstrates that the multi-criteria approach is an effective lever to guide remediation choices, by balancing factors such as sustainability, efficiency, and cost.

ملخص :

يُعدّ تملّح التربة ظاهرة بيئية خطيرة، وتُشكّل تحدياً رئيسياً خاصة في المناطق الجافة وشبه الجافة. ونظراً لتعدد الخيارات المتاحة لمعالجة هذه المشكلة، يقترح هذا العمل اعتماد نهج قائم على مبدأ "اتخاذ القرار متعدد المعايير" من أجل تقييم واختيار الحلول والطرق الأنسب.

بعد تحديد أسباب ومظاهر تملّح التربة، تمّ دراسة عدة تقنيات للمعالجة مثل التعديلات الكيميائية، والغسل، والاستبدال، والطريقة الكهروكيميائية، والمعالجة النباتية (المعالجة البيولوجية بالنباتات). وقد تم تحليل كل طريقة وفقاً لمعايير بيئية وتقنية واقتصادية.

تُتيح طرق اتخاذ القرار متعددة المعايير، مثل AHP و ELECTRE I و PROMETHEE II، مقارنة منظمة بين البدائل من خلال دمج تفضيلات الأطراف المعنية. ويعرض هذا العمل دراسة حالة تُطبّق فيها هذه المنهجية على منطقة متأثرة بالملوحة، مما يُبرز فعالية أدوات اتخاذ القرار متعددة المعايير في دعم اتخاذ القرار السليم.

ويُظهر هذا البحث أن النهج متعدد المعايير يُعتبر وسيلة فعالة لتوجيه اختيارات المعالجة، من خلال الموازنة بين عوامل متعددة مثل الاستدامة، والفعالية، والتكلفة.

Table des matières

Remerciement	i
Dédicace	ii
Résumé	iii
Listes des figures	xi
Liste des tableaux	xii
Liste des abréviations	xiii
Introduction générale :	1
ChapitreI : Propriétés physiques de sol	4
I.1. Introduction	4
I.2. Définition :	4
I.3. Les différents types de sol :.....	5
I.3.1. Les sols sableux :.....	5
I.3.2. Les sols argileux :.....	6
I.3.3. Sol limoneux.....	9
I.4. Caractéristiques des sols.....	10
I.5. Identification du sol.....	10
I.5.1. Objectif de l'identification du sol.....	10
I.5.2. Méthodes de l'identification.....	10
I.5.2.1. Examen visuel et tactile (reconnaissance de terrain).....	11
I.5.2.2. Essais de laboratoire	12
I.5.2.2.1. Analyse granulométrique :	12
I.5.2.2.2. Les Limites d'Atterberg :	12
I.5.2.2.3. Essai de proctor	13
I.5.2.2.4. Essai de compressibilité par paliers à l'oedomètre	15
I.5.2.2.5. Essai de cisaillement rectiligne	16
I.6. Classification géotechnique des sols	17
I.6.1. But de la classification.	17
I.6.2. La classification GTR.....	17
I.7. Conclusion.....	20
ChapitreII : Les Principaux problèmes liés aux sols	22
II.1. Introduction	22
II.2. Le retrait-gonflement.....	22

II.2.1.	Définition.....	22
II.2.2.	Les causes du retrait-gonflement.....	22
II.2.3.	Les conséquences du retrait-gonflement :	24
II.3.	L'érosion	26
II.3.1.	Définition :	26
II.3.2.	Les principaux agents d'érosion :	26
II.3.3.	Les conséquences de l'érosion :	26
II.4.	La liquéfaction de sol :	27
II.4.1.	Définition :	27
II.4.2.	Causes de liquéfaction des sols	27
II.4.3.	Conséquence de la liquéfaction du sol	27
II.5.	Instabilité des pentes	28
II.5.1.	Définition.....	28
II.5.2.	Causes principales de l'instabilité des pentes.....	28
II.5.3.	Conséquences de l'instabilité des pentes.....	29
II.6.	Le tassement de sol :	30
II.6.1.	Définition.....	30
II.6.2.	Les principales causes du tassement de sol :	31
II.6.3.	Les dégradations des sols par des produits chimiques :	31
II.6.3.1.	Acidification des sols par les produits chimiques.....	31
II.6.3.2.	Salinisation des sols par les produits chimiques.....	32
II.6.4.	Contamination des sols par les métaux lourds	33
II.7.	La salinisation des sols	33
II.7.1.	Définition :	33
II.7.2.	Causes de la salinisation.....	34
II.7.3.	Conséquences de la salinisation :	34
II.8.	Conclusion.....	35
ChapitreIII	: Salinisation des sols.....	37
III.1.	Introduction	37
III.2.	Définition et origine de la salinité	37
III.3.	La salinisation primaire :	38
III.4.	La salinisation secondaire :	39
III.5.	Répartition de la salinité du sol	40

III.5.1.	Les sols salins dans le monde	40
III.5.2.	Les sols salins dans L'Algérie 	41
III.6.	Causes principales de la salinisation	42
III.7.	Les différents types de salinisation	42
III.8.	PH du sol :	44
III.9.	Effet de la salinité :	44
III.9.1.	Effet de la salinité sur l'environnement	44
III.9.2.	Effet de la salinité sur les constructions :	45
III.10.	Classification des sols salins	46
III.11.	Les différents types de sels :	49
III.12.	Mouvement des sels dans le sol :	50
III.12.1.	Les mécanismes du mouvement des sels :	50
III.12.1.1.	La lixiviation :	50
III.12.1.2.	La capillarité :	50
III.13.	Conclusion :	51
ChapitreIV	: Méthodes de désalinisation des sols	53
IV.1.	Introduction :	53
IV.2.	Méthodes physiques de désalinisation des sols :	53
IV.2.1.	Le drainage :	53
IV.2.2.	Le lessivage :	55
IV.2.3.	La substitution su sol :	56
IV.3.	Méthodes chimiques de désalinisation des sols	57
IV.3.1.	Traitement par le gypse	57
IV.3.2.	Traitement par l'acide sulfurique	57
IV.4.	Méthodes biologiques de désalinisation des sols	58
IV.4.1.	Techniques de phytoremédiation	58
IV.5.	Méthode électrique de désalinisation des sols	60
IV.5.1.	Traitement électrocinétique :	60
IV.6.	Conclusion :	61
ChapitreV	Application des méthodes d'aide à la décision multicritères pour la	
désalinisation des sols.....	63
V.1.	Introduction :	63
V.2.	Décision et aide à la décision	63

V.2.1.	Décision.....	63
V.2.2.	Aide à la décision :	64
V.3.	Typologie des décisions	64
V.3.1.	Classification de la décision selon le degré de répétition.....	64
V.3.1.1.	Les décisions programmées	65
V.3.1.2.	Les décisions non programmées	65
V.3.2.	Classification selon le degré d'incertitude	65
V.3.2.1.	Les décisions en avenir certain	65
V.3.2.2.	Les décisions en avenir incertain	65
V.3.2.3.	Les décisions en avenir aléatoires.....	65
V.4.	Les acteurs du processus d'aide à la décision	65
V.5.	Analyse multicritère	68
V.6.	L'aide à la décision multicritères	68
V.7.	Les étapes d'aide à la décision multicritères	69
V.8.	Les méthodes multicritères.....	69
V.8.1.	La méthode AHP :	69
V.8.1.1.	Les différentes étapes de la méthode AHP :	70
V.8.1.2.	Avantages de la méthode AHP	71
V.8.1.3.	Pondération des critères par la méthode AHP	71
V.8.1.3.1.	Matrice de comparaison par paires.....	72
V.8.1.3.2.	Calcul des poids.....	72
V.8.1.3.3.	Vérification de la cohérence	73
V.8.2.	La méthode PROMETHEE II	73
V.8.2.1.	Les trois phases de la méthode PROMETHEE:	74
V.8.2.2.	Détermination des poids de chaque critère:	76
V.8.2.3.	Avantages et inconvénients de la méthode PROMETHEE II :	76
V.8.2.4.	Application de la méthode PROMETHEE II	77
V.8.2.4.1.	Résultats de la méthode PROMETHEE II	77
V.8.2.4.2.	Interprétation des résultats de la méthode PROMETHEE II.....	78
V.8.3.	La méthode ELECTRE I	78
V.8.3.1.	Application de la méthode ELECTRE I	79
V.8.3.1.1.	Matrice de Concordance	79
V.8.3.1.2.	Matrice de Discordance	79

V.8.3.1.3. Interprétation des résultats de la méthode ELECTRE I :	80
V.9. Conclusion :.....	81
CONCLUSION GENERALE	82
Référence Bibliographiques :.....	83

Listes des figures

FIGURE I-1 : PROPRIETES MECANIQUES ET PHYSIQUE DES SOLS.....	4
FIGURE I-2 : DIFFERENTS TYPES DE SOL.....	5
FIGURE I-3 : SOLS SABLEUX	6
FIGURE I-4 :SCHEMATISATION DES FEUILLETS D'ARGILE	7
FIGURE I-5 : KAOLIN D'ARVOR.....	7
FIGURE I-6 : STRUCTURE DE LA MONTMORILLONITE.....	8
FIGURE I-7 : STRUCTURE DE L'ILLITE STRUCTURE DE L'ILLITE.....	9
FIGURE I-8 : SOL LIMONEUX SOL LIMONEUX	9
FIGURE I-9 : EXEMPLE DE COURBE GRANULOMETRIQUE D'UN ECHANTILLON DE SOL.....	12
FIGURE I-10 : SCHEMATISATION DES LIMITES D'ATTERBERG	13
FIGURE I-11 : MATERIEL NECESSAIRE POUR REALISER L'ESSAIE	14
FIGURE I-12 : COUPE SCHEMATISE DE LA CELLULE ŒDOMETRIQUE	15
FIGURE I-13 : APPAREILLAGE DE L'ESSAI DE COMPRESSIBILITE PAR PALIER L'ŒDOMETRE.....	16
FIGURE II-1 : SCHEMA SIMPLIFIE LE PHENOMENE DE RETRAIT-GONFLEMENT	23
FIGURE II-2 : MECANISME DE FONCTIONNEMENT DU PHENOMENE DE RETRAIT-GONFLEMENT DES SOLS ARGILEUX..	24
FIGURE II-3 : MAISON FISSUREE EN RAISON DE TERRAIN INDUITS PAR LA RETRACTATION ET LE GONFLEMENT DU SOL ARGILEUX.	25
FIGURE II-4 : AFFAISSEMENT D'UN TERRAIN.....	25
FIGURE II-5 : GLISSEMENT DE TERRAIN	26
FIGURE II-6 : LIQUEFACTION DE SOL	28
FIGURE II-7 : SCHEMA DU TASSEMENT ET DU DEPLACEMENT LATERAL DU SOL DE FONDATION.....	30
FIGURE II-8 : PLUIES ACIDES ET ACIDIFICATION DES SOLS	32
FIGURE II-9 : SALINISATION DES SOLS PAR DES PRODUITS CHIMIQUES	32
FIGURE II-10 : CONTAMINATION DES SOLS PAR LES METAUX LOURDS.....	33
FIGURE II-11 : SALINISATION D'UN SOL.....	34
FIGURE III-1 : L'ACCUMULATION DE SEL DE L'EAU CHARGEE DE SEL PERCOLANT JUSQU'A LA SURFACE	38
FIGURE III-2 : MECANISME DE LA SALINISATION PRIMAIRE (DALIAKOPOULOS, 2016).....	39
FIGURE III-3 : SALINISATION SECONDAIRE.	40
FIGURE III-4 : REPARTITION DES SOLS SALINS DANS LE NORD DE L'ALGERIE (INSID, 2008)	42
FIGURE III-5 : SALINISATION DE SOL.....	45
FIGURE III-6 : CORROSION DES ACIERS DANS LE BETON.	46
FIGURE III-7 : LA DEGRADATION D'UN MUR EN BRIQUE PAR ACCUMULATION DE SELS.....	46
FIGURE IV-1 : PARAMETRES D'UN DRAINAGE VERTICAL.....	54
FIGURE IV-2 : LESSIVAGE DE SOL.....	55
FIGURE IV-3 : SCHEMA REPRESENTA LA PHYTOREMEDIATION	58
FIGURE IV-4 : LE TRAITEMENT ELECTROCHIMIQUE	61
FIGURE V-1 : ACTEURS IMPLIQUES DANS UN PROCESSUS DE DECISION	66
FIGURE V-2 : ÉTAPES DE PRISE DE DECISION DOUTRIAUX J,(1980).....	67
FIGURE V-3 : STRUCTURATION HIERARCHIQUE	70
FIGURE V-4 : POIDS DES CRITERES (METHODEAHP).....	73
FIGURE V-5 : GRAPHE A BARRE REPRESENTANT LE FLUX NET DE SURCLASSEMENT DE PROMETHEE II.....	78
FIGURE V-6 : GRAPHE DOMINANCE DE LA METHODE ELECTRE I	80

Liste des tableaux

TABLEAU I-1 : TEST TACTILE (METHODE APPROXIMATIVE)	11
TABLEAU I-2 : LES DEFERENTS TYPES DU MOULE PROCTOR	14
TABLEAU III-1 : REPARTITIONS DES SOLS SALINS ET SODIQUE DANS LE MONDE (MARLET ET JOB, 2006)	41
TABLEAU III-2 : ECHELLE DE SALINITE EN FONCTION DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE DE L'EXTRAIT DE PATE SATUREE (U.S.S.L., 1954)	43
TABLEAU III-3 : CLASSES DU SOL SELON LE PH DE PATE SATUREE (FIREMAN ET AL, 1951IN U.S.S.L.,1954	44
TABLEAU III-4 : LES PRINCIPALES PROPRIETES DES SOLS SALINS ET SODIQUES (MAILLARD, 2001)	48
TABLEAU V-1 : ROLES DU DECIDEUR ET DE L'ANALYSTE	66
TABLEAU V-2 : MATRICE DE COMPARAISON PAIRES DES CRITERES SELON L'EXPERT	72
TABLEAU V-3 : MATRICE DES CRITERES AVEC LEURS POIDS AHP	72
TABLEAU V-4 : FONCTIONS DE PREFERENCES PROMETHEE II CHOISIS POUR CHAQUE CRITERE	77
TABLEAU V-5 : MATRICE DE CONCORDANCE	79
TABLEAU V-6 : MATRICE DE DISCORDANCE	79
TABLEAU V-7 : MATRICE DE DOMINANCE	79

Liste des abréviations

C.E : conductivité électrique

C.E.C : capacité d'échange cationique

ESP ou PSE : pourcentage de sodium échangeable

SAR : rapport d'adsorption du sodium

GTR: Guide Technique pour la Réalisation

PH : Potentiel Hydrique

AHP : Analytical Heirarchy Process

PROMETHEE : Preference Ranking Organisation Methode For Enrichement Evaluation

ELECTRE: Elimination Et Choix Traduisant la Réalité

Wl : limite de liquidité

Wp : limite de plasticité

Wr : limite de retrait

$Al_2(OH)_6$: l'octaèdre d'alumine

$Mg_3(OH)_6$: éventuellement de magnésium

H_2O : l'eau

SiO_3 : silicate

Al_2O_3 : Alumine

SiO_4 : le tétraèdre de silice

Pb : plomb

Cd : cadmium

Hg : mercure

NaCl: chlorure de sodium

KCl: chlorure de potassium

$CaCl_2$: chlorure de calcium

Na_2SO_4 : sulfate de sodium

Na_2CO_3 : carbonate de sodium

$Mg SO_4$: sulfate de magnésium

CI: indices de cohérence

CR: rapport de cohérence

Mmhos : Milimohs

Introduction générale :

La salinisation des sols représente l'un des principaux défis environnementaux dans de nombreuses régions du monde. Ce phénomène, souvent aggravé par les pratiques d'irrigation inappropriées, les conditions climatiques arides et la remontée des nappes phréatiques salines, entraîne une accumulation excessive de sels solubles (chlorures, sulfates, carbonates de sodium, etc.). Face à l'ampleur de ce problème, la remédiation des sols salins devient une priorité pour restaurer les propriétés mécaniques et hydrauliques des sols.

Plusieurs stratégies de remédiation des sols affectés par le phénomène de salinisation peuvent être envisagées, notamment les méthodes physiques (lessivage, drainage), chimiques (ajout d'amendements comme le gypse), biologiques (utilisation de plantes halophytes ou de cultures tolérantes au sel), et électronique.

C'est dans ce cadre que les méthodes multicritères d'aide à la décision (MCDA) apparaissent comme des outils puissants et adaptés. Elles permettent d'analyser, de comparer et de hiérarchiser plusieurs alternatives de remédiation en prenant en compte un ensemble de critères parfois même contradictoires. En intégrant à la fois des données quantitatives et qualitatives, ces méthodes facilitent une évaluation globale et participative des options disponibles, en tenant compte des préférences des différents acteurs concernés.

L'objectif principal de ce travail est d'introduire les méthodes multicritères d'aide à la décision (MCDA) pour désalinisation des sols salins. Dans la perspective d'atteindre cet objectif, trois méthodes ont été choisies et appliquées dans ce travail.

Ce mémoire est structuré en cinq chapitres, en plus d'une introduction générale et une conclusion.

Dans le premier chapitre, la composition et la structure des sols y sont décrites. Ce chapitre contient les informations et les connaissances de base nécessaires aux géotechniciens afin de pouvoir comprendre les diverses propriétés physiques des sols et cerner leur modification dans les chapitres suivants, suite au processus de salinisation.

Le chapitre 2 mentionne les différents problèmes des sols en géotechnique ; tels que le phénomène d'érosion, le glissement, la liquéfaction des sols...etc. Ces problématiques liées aux sols y sont décrites dans ce chapitre et les méthodes de remédiation utilisées sont expliquées.

Le chapitre 3 aborde la clé de ce mémoire qui est la salinisation des sols. Les causes de ce phénomène, les conséquences qui lui sont liées ainsi que ses impacts, sont décrits dans cette section.

Le chapitre 4 explore les différentes méthodes de désalinisation des sols. Ces méthodes ont été classées dans ce travail en quatre catégories différentes : physiques, chimiques, biologiques et électriques, afin de faciliter leur introduction dans la méthode d'aide à la décision. Les avantages et les limites de chaque méthode ont été détaillés dans ce chapitre.

Dans le chapitre 5, on s'est intéressé à la méthode multicritère d'aide à la décision. Les différentes définitions, ainsi que les différentes approches et méthodes ont été expliquées en détail, afin de faciliter la compréhension aux utilisateurs de ce mémoire, quel que soit leur spécialité. Le choix de

l'utilisation de cet outil afin de résoudre le phénomène de salinisation, s'est présenté à nous afin de pouvoir sélectionner la meilleure alternative pour la désalinisation des sols.

Chapitre I

Propriétés physiques des sols

Chapitre I : Propriétés physiques de sol

I.1. Introduction

En géotechnique, le sol désigne l'ensemble des matériaux constituant le sous-sol, tels que les sables, les argiles, les graviers, les roches, etc., qui sont soumis à une étude approfondie. Cette discipline de l'ingénierie s'intéresse à l'analyse des propriétés physiques et mécaniques des sols pour évaluer leur comportement lorsqu'ils sont soumis à des charges ou à des variations environnementales (humidité, température, etc.). L'étude des sols géotechniques permet de déterminer les caractéristiques du sol afin de prévoir son comportement sous l'effet de différentes forces et de concevoir des solutions adaptées aux besoins de la construction. Les sols géotechniques sont un élément fondamental dans les projets d'infrastructures, car ils influencent directement la stabilité et la sécurité des ouvrages.

I.2. Définition :

Un sol est un mélange d'éléments solides constituant le squelette solide, d'eau libre ou liée et d'air ou de gaz. Il est donc, en général, constitué de trois phases : phase solide, phase liquide et phase gazeuse.

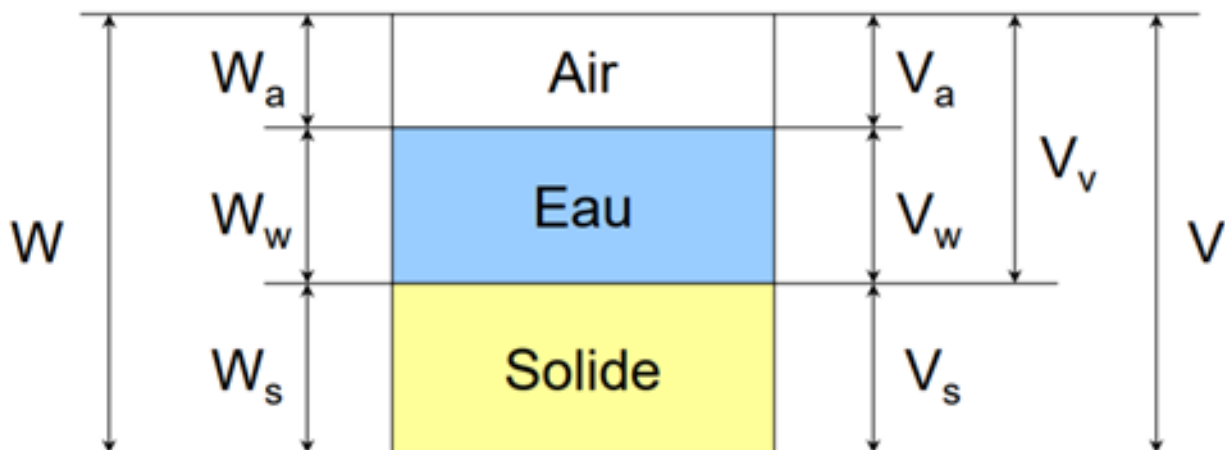


Figure I-1 : Propriétés mécaniques et physique des sols.

I.3. Les différents types de sol :

Il existe plusieurs types de sols en fonction de leur composition, leur texture et leur capacité à retenir l'eau, entre autres facteurs. Les plus types fréquents sont représentés sur la figure (I.2), et définis ci-dessous :



Figure I-2 : Différents types de sol

I.3.1. Les sols sableux :

Les sols sableux (figI.3) appelés aussi sols siliceux sont des sols bien aérés et très perméables. L'eau y passe comme dans un filtre entraînant avec elle les matières minérales. Dans le domaine du génie civil, ces sols se composent principalement de particules de sable, et présentent des caractéristiques spécifiques en termes de comportement mécanique et de propriétés géotechniques. Ils sont souvent classés en fonction de leur granulométrie et de leur teneur en argile, et sont généralement moins sensibles aux opérations de compactage et d'excavation que les sols argileux. Les sols sableux peuvent nécessiter des techniques spécifiques pour leur amélioration et leur stabilisation lors de projets de construction ou d'infrastructures. Les sols sableux sont faciles à reconnaître. Au toucher, une poignée de terre n'a pas de cohésion. Ce type de sol est léger et sa couleur est intermédiaire, ni sombre ni claire. D'autre part, un sol sableux est un sol dont la répartition des différents composants est :

- Argile : 0-10%
- Limon : 0-15%
- Sable : 85-100%



Figure I-3: Sols sableux

I.3.2. Les sols argileux :

L'argile est une roche sédimentaire composée pour une large part de minéraux argileux, en général des silicates d'aluminium plus ou moins hydratés présentant une structure feuilletée (phyllo silicates) expliquant leur plasticité, ou fibreuse (sépiolite et palygorskite) expliquant leurs qualités d'absorption.

Le sol argileux comprend plus de 40 % d'argile. Constitués d'argiles, ces sols peuvent entraîner des difficultés telle que la formation d'un horizon de sol imperméable, lourd et collant.

Structure élémentaire des minéraux argileux :

Tous les minéraux argileux sont composés par l'assemblage d'eau (H_2O), de silice sous forme de silicates (SiO_3) et d'aluminium sous forme d'alumine (Al_2O_3). Leur structure élémentaire, appelée feuillet, est constituée d'un arrangement de deux cristaux de base : silicates et alumines. Chaque minéral argileux est composé d'un empilement de feuillets. Ce dernier a un nombre variable de couches pouvant être regroupées en deux types :

Le Tétraèdre de silice SiO_4 : composé de 4 atomes d'oxygène disposés au sommet d'un tétraèdre régulier enserrant un atome de silicium. Les tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches planes dites couches tétraédriques.

L'octaèdre d'alumine $Al_2(OH)_6$ et éventuellement de magnésium $Mg_3(OH)_6$: composé de 6 ions hydroxydes enserrant un atome d'aluminium ou de magnésium. Les octaèdres se combinent également pour former des couches planes dites couches octaédriques.

Les différents types d'argiles

Les types d'argiles les plus fréquents sont représentés sur la figure(I.4).

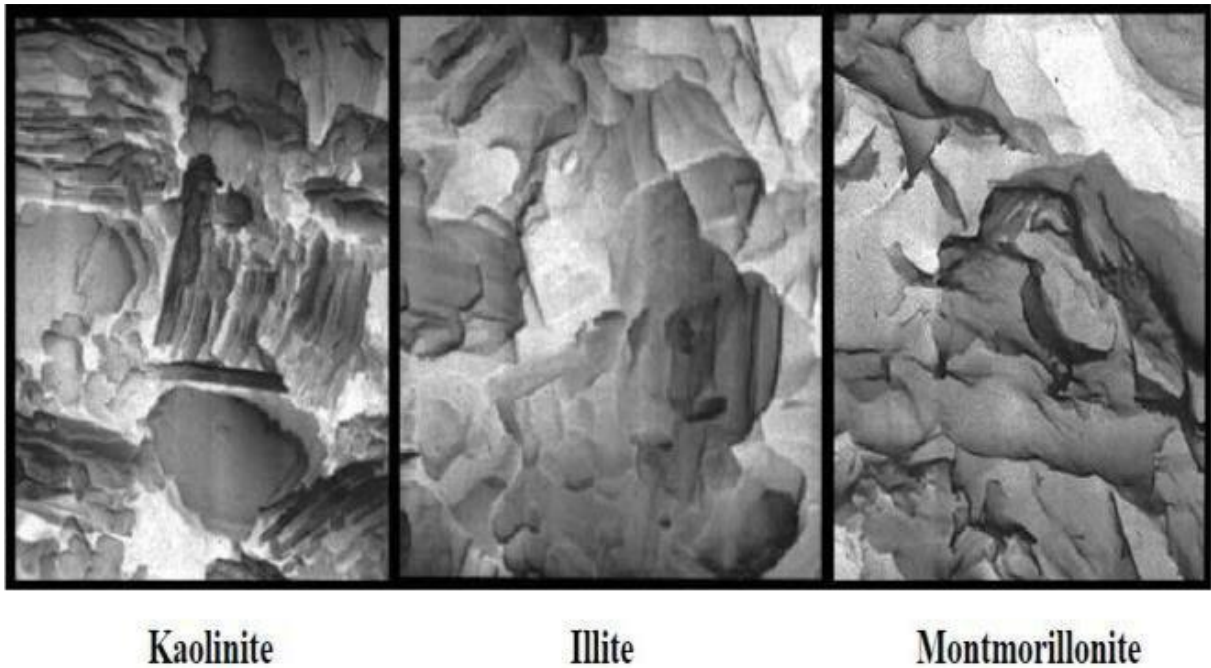


Figure I-4 :Schématisation des feuillets d’argile

- **Kaolinite**

La kaolinite est constituée d’une succession alternée de feuillets en tétraèdre(Silice) et de feuillets en octaèdre (aluminium ou gibbsite). Les deux feuillets sont liés de telle manière que les sommets du feuillet des silices et ceux d’une des couches du feuillet en octaèdre ne forment qu’une seule et même couche



Figure I-5 : kaolin d’Arvor

- **Montmorillonite :**

La montmorillonite, parfois appelée Smectite, est un minéral argileux important composé de deux feuillets de Silice et d'un feuillet d'Alumine. Les feuillets en octaèdres se trouvent entre deux feuillets de silice et les sommets des tétraèdres se confondent avec les hydroxyles du feuillet en octaèdre pour ne former qu'une seule couche.

Les sols qui contiennent de la montmorillonite peuvent être gonflants lorsque leur teneur en eau augmente, les pressions de gonflements qui en résultent peuvent facilement causer des dommages aux structures légères et pavages.

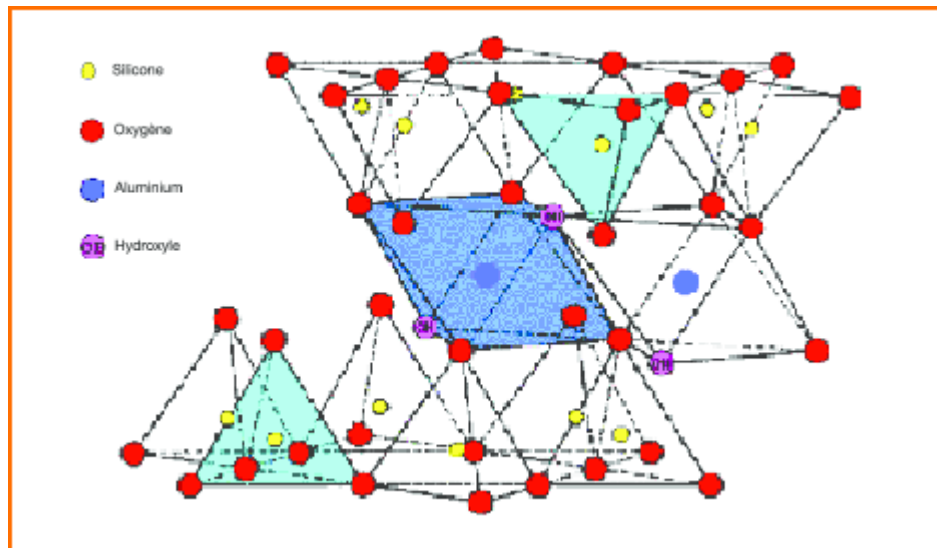


Figure I-6 : structure de la Montmorillonite

- **L'illite :**

L'illite est une autre composante importante des sols argileux. Elle a une structure analogue à la montmorillonite mais il y a des ions de potassium intercalés entre les feuillets tétraédriques. Grâce à ces ions, la liaison est relativement forte et les molécules d'eau ne peuvent pratiquement plus s'intercaler. Aux extrémités de la particule d'argile, il y a également des déséquilibres électriques et adsorption de cations. Ces cations dits échangeables jouent un rôle important dans le comportement des argiles.

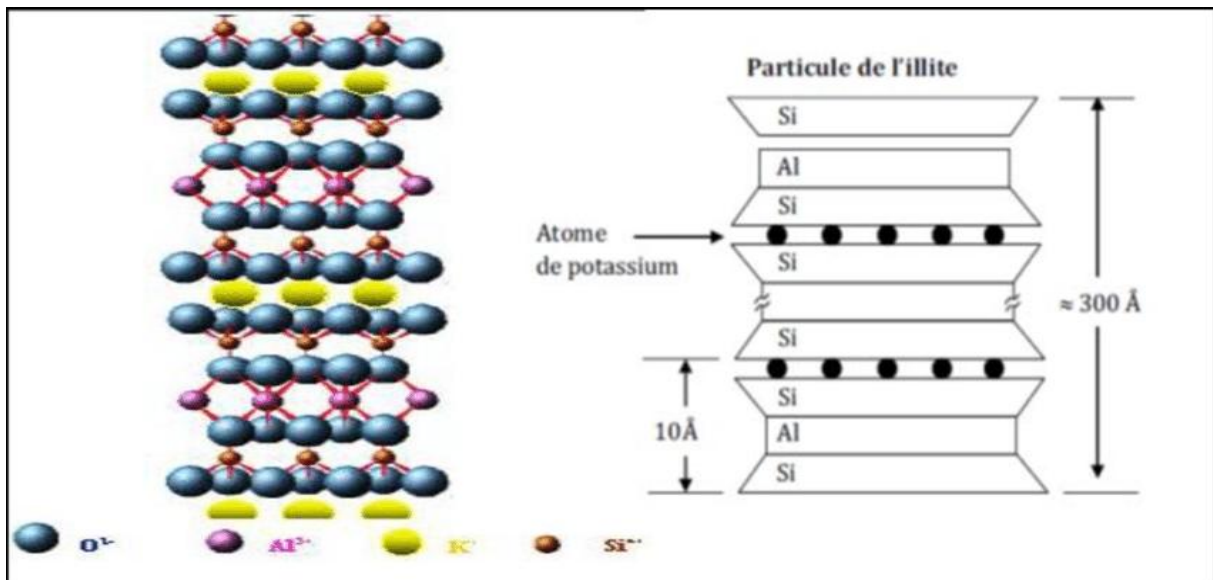


Figure I-7 : structure de l'illite structure de l'illite

I.3.3. Sol limoneux

Ce sont des sols composés principalement de particules fines, appelées limon, qui ont une taille intermédiaire entre celle des argiles et celle des sables.



Figure I-8 : sol limoneux sol limoneux

I.4. Caractéristiques des sols

Les caractéristiques des sols sont essentielles pour comprendre leur comportement et leurs applications dans le domaine du génie civil. Ces caractéristiques influencent la manière dont le sol réagit sous charge, son comportement hydrique, et sa stabilité.

- **La granulométrie :** Elle représente la distribution des tailles de particules d'un sol. Elle est généralement mesurée par tamisage pour les sols grossiers et par analyse de sédimentation pour les sols fins. Les sols sont classifiés en fonction de la taille des particules :

Sols grossiers (graviers et sables) ont des particules visibles à l'œil nu et une faible capacité de rétention d'eau.

Sols fins (limons et argiles) ont des particules invisibles à l'œil nu et peuvent retenir une grande quantité d'eau.

- **Cohésion et angle de friction :** La cohésion est la force qui maintient les particules d'un sol ensemble. Elle est particulièrement importante pour les sols argileux. Les sols cohésifs (comme l'argile) ont une forte résistance à la déformation, tandis que les sols non cohésifs (comme le sable) ne présentent pas une telle résistance. D'autre part, l'angle de friction interne mesure la résistance au glissement entre les particules d'un sol. Les sols sableux ont généralement un angle de friction élevé, ce qui leur permet de résister au glissement.

- **La Plasticité :** La plasticité des sols fins (argiles et limons) détermine leur capacité à se déformer sans se fissurer. Elle est directement liée au contenu en eau du sol. Les sols plastiques (principalement argileux) sont sujets à des déformations importantes sous charge et à des variations de volume en fonction de l'humidité.

- **La Perméabilité :** Elle mesure la capacité d'un sol à permettre à l'eau de s'y infiltrer ; et dépend de la taille des pores dans le sol et de leur connectivité. Les sols à grande granulométrie, comme le sable, ont une forte perméabilité, tandis que les sols fins, comme les argiles, sont peu perméables. La perméabilité est cruciale pour évaluer la capacité du sol à drainer l'eau, et pour déterminer si des systèmes de drainage doivent être installés.

- **La Capacité portante :** Elle représente la capacité d'un sol à supporter une charge sans se déformer de manière excessive. Elle dépend de la nature du sol, de son taux de compaction, et de son humidité. Les sols sableux ont généralement une capacité portante plus élevée que les sols argileux, mais la compaction du sol peut améliorer la capacité portante des sols fins.

I.5. Identification du sol

I.5.1. Objectif de l'identification du sol

L'identification des sols est une étape cruciale en géotechnique, qui permet de déterminer les propriétés physiques et mécaniques d'un sol donné. Elle vise à définir la nature, la granulométrie, la plasticité et le comportement mécanique des sols, dans le but de les classer pour des études de fondations, de terrassements... etc.

I.5.2. Méthodes de l'identification

I.5.2.1.Examen visuel et tactile (reconnaissance de terrain)

L'une des méthodes servant à évaluer approximativement la texture d'un sol est celle du test tactile. Ce test consiste à manipuler un peu de sol sec ou humide et à noter ses caractéristiques. Voici la classification des groupes de sol et les caractéristiques à observer (tab I.1)

Tableau I-1 : Test tactile (méthode approximative)

Texture du sol	Sol sec	Sol humide
Sol sableux	<p>Les grains de sables sont visibles à l'œil nu.</p> <p>Le sol coule entre les doigts comme du sucre.</p> <p>Le sol est très granuleux et abrasif.</p>	<p>Le sol se modèle très difficilement, il se brise au toucher.</p> <p>Le sol ne colle pas entre les doigts ; il est rude et abrasif au toucher</p>
Sol limoneux	<p>Le sol a une apparence poudreuse ou farineuse.</p> <p>Le sol est doux au toucher.</p>	<p>Le sol est très doux et glissant comme du savon.</p> <p>Il est possible de former un ruban avec la terre en la roulant entre les mains; le ruban se casse si on essaie de le plier.</p> <p>Le sol est peu collant.</p>
Sol argileux	<p>le sol est formé de mottes très dures, difficiles à briser.</p>	<p>Le sol est très collant ; il est lisse et brillant.</p> <p>Le sol se modèle très facilement ; il est possible de former de longs rubans flexibles en roulant la terre entre les mains.</p>

I.5.2.2. Essais de laboratoire

I.5.2.2.1. Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions pondérales des grains de différentes tailles dans le sol. Elle s'effectue par tamisage (tamis à maille carrée) pour les grains de diamètre supérieur à 80 μ , et par sédimentométrie pour les grains plus fins. L'essai consiste à laisser une suspension de sol se déposer au fond d'une éprouvette pleine d'eau. Plus les grains sont fins, plus la vitesse de décantation est lente conformément à la loi de Navier Stokes sur la vitesse de chute de billes sphériques dans l'eau. La mesure de la densité de suspension à des intervalles de temps variables permet de calculer la proportion des grains de chaque diamètre.

Un mode de représentation commode des résultats de l'analyse granulométrique est la COURBE GRANULOMETRIQUE. Elle représente pour chaque dimension le « % » de particule, le poids (ou masse) « % » des particules de cette taille ou de tailles inférieures. Ce poids est exprimé en pourcentage par rapport au poids total de la matière sèche de l'échantillon étudié. Cette courbe est tracée en coordonnées semi-logarithmique.

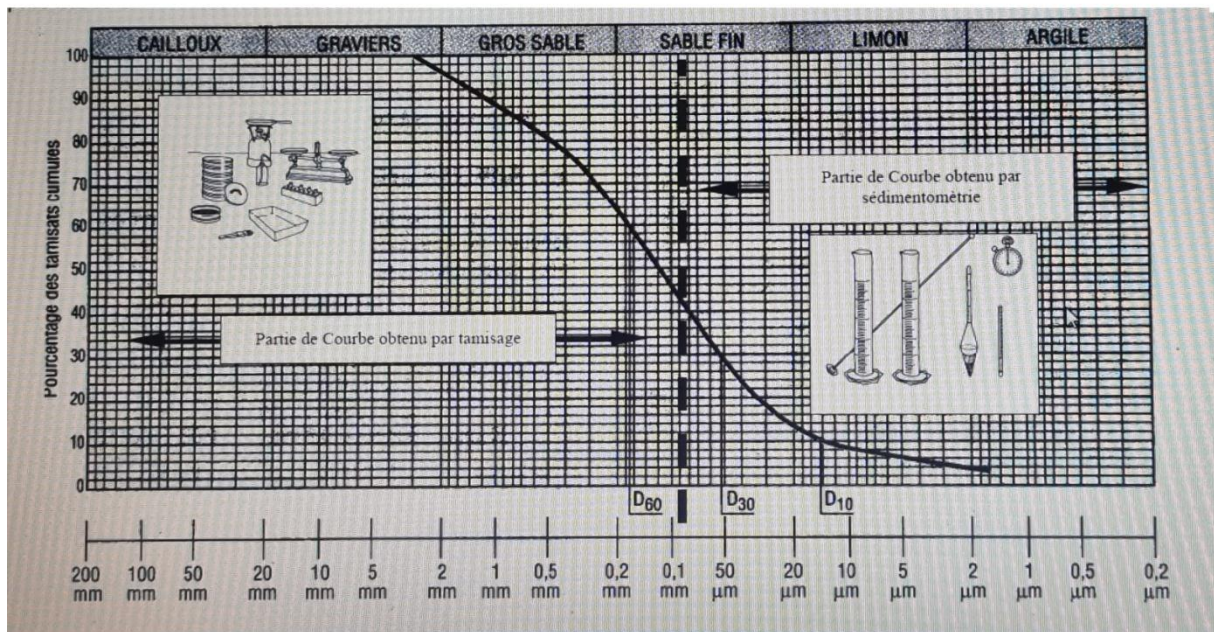


Figure I-9 : Exemple de courbe granulométrique d'un échantillon de sol

I.5.2.2.2. Les Limites d'Atterberg :

Dans les sols fins ou cohérents, où la surface spécifique des grains (rapport de la surface du grain à son volume) est grande, l'eau joue un rôle très important par son influence sur les forces qui s'exercent entre les particules. Selon la valeur de la teneur en eau, les propriétés mécaniques d'un sol fin évoluent depuis celle d'un solide jusqu'à celle d'un liquide. Entre ces deux états, pour les teneurs en eau moyennes, le sol présente des propriétés plastiques, c'est à-dire qu'il est capable de se déformer

rapidement et considérablement sans se casser, se fendiller ou changer de volume et sans présenter de déformation réversible notable. L'état solide peut lui-même être séparé en deux états : un état dans lequel l'eau adsorbée est encore en place, appelé état solide avec retrait ; et un état dans lequel toute l'eau adsorbée a disparu, appelé état solide sans retrait. Le retrait est une diminution du volume qui accompagne l'élimination de l'eau adsorbée. Pour les sols fins, on définit :

Une limite de retrait « w_r » qui sépare l'état solide sans retrait de l'état solide avec retrait.

Une limite de plasticité « w_p » qui sépare l'état plastique de l'état solide.

Une limite de liquidité « w_L » qui sépare l'état plastique de l'état liquide.

Ces limites sont désignées sous le nom de limites d'Atterberg. Elles ont été élaborées au début du XXème siècle par A. Atterberg, un pédologue suédois, qui s'intéressait à la plasticité des argiles en vue de la fabrication des produits céramiques. Les essais mis au point à cette époque ont été repris et modifiés par Casagrande, afin que leur interprétation puisse permettre d'établir un lien entre la teneur en eau du sol et son comportement.

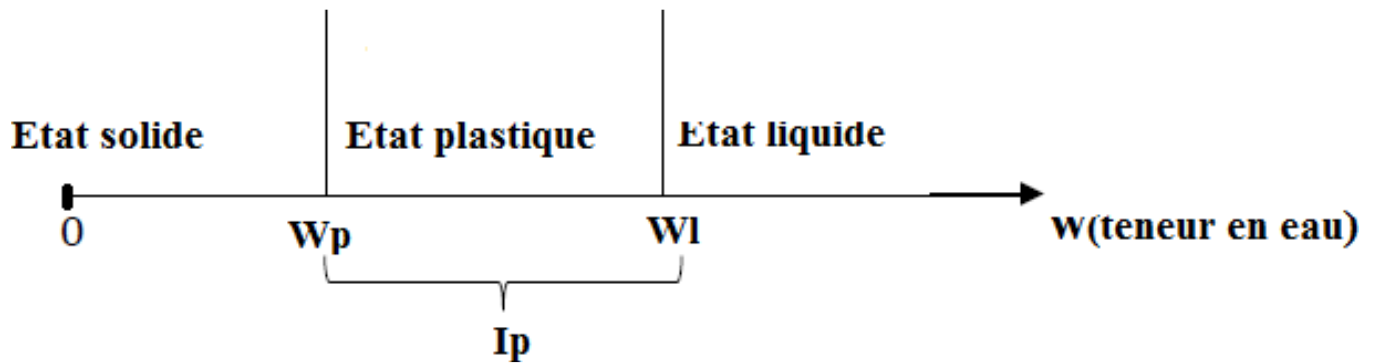


Figure I-10 : Schématisation des limites d'Atterberg

Les résultats obtenus à partir de ces essais permettent de prévoir le comportement des sols sous l'action des variations des teneurs en eau. L'essai s'effectue en deux phases :

Recherche de la teneur en eau w_L pour laquelle une rainure de dimension normalisée, pratiquée dans le sol disposé dans la coupelle de Casagrande, se ferme sous l'action de 25 chocs appliqués de manière normalisée.

Recherche de la teneur en eau w_p pour laquelle un cylindre de sol de diamètre 3 mm, confectionné manuellement, se fissure lorsqu'on le soulève.

I.5.2.2.3. Essai de proctor

L'essai proctor, développé par l'ingénieur ralph Proctor en 1933, est un essai géotechnique fondamental. Son objectif principal est de déterminer la teneur en eau optimale nécessaire pour obtenir la meilleure compaction d'un sol.

La figure(I.11) ci-dessous nous montre les outils nécessaires pour réaliser l'essai

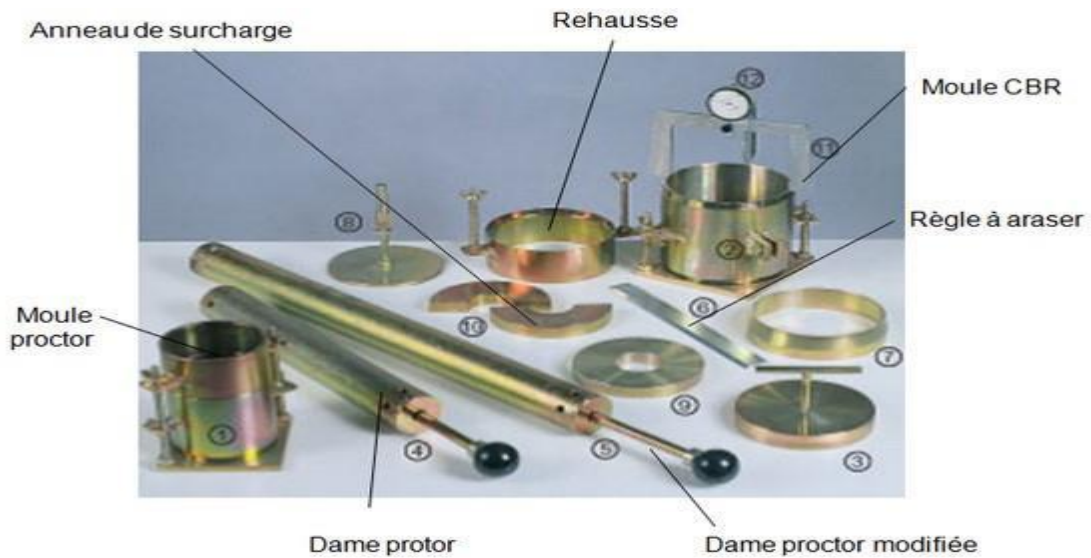


Figure I-11 : Matériel nécessaire pour réaliser l'essai

Tableau I-2 : Les Différents Types du Moule Proctor

Type	Nb total de coups	Hauteur de chut (cm)	Masse de la dame (kg)	Diamètre Du module (cm)	Hauteur de module (cm)	Energie KN.m/m ³
normal	75	30.5	2.490	10.15	11.65	593
modifié	280	45.7	4.535	15.20	11.60	2700

Il existe plusieurs types d'essais proctor :

Essai Proctor normal : Le compactage n'est que moyennement poussé. Il est généralement utilisé pour les études. Il s'effectue en trois couches avec « la dame Proctor normal », l'énergie de compactage est de :

55 coups de dame par couche dans le moule CBR.

25 coups par couche dans« le moule Proctor normal».

Essai Proctor modifié : Le compactage est beaucoup plus intense. C'est ordinairement par l'essai Proctor modifié que l'on détermine les caractéristiques de compactage (teneur en eau optima, densité sèche maxima) des matériaux destinés à constituer la fondation ou le corps de chaussée des routes et des pistes d'aérodromes. Le compactage dans ce cas s'effectue en cinq couches successives avec « la dame Proctor modifié » l'énergie de compactage est de 56 coups de dame par couche dans le moule C.B.R.

L'essai est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons à des teneurs en eau croissantes. On détermine ainsi plusieurs points de la courbe représentative des densités sèches en fonction des teneurs en eau, on trace alors la courbe en interpolant entre les points expérimentaux. Cette courbe présente un maximum dont l'abscisse correspond à la teneur en eau optimale et l'ordonnée correspond à la densité sèche maximale Proctor.

- Calcul de la teneur en eau : $W = (\text{Poids de l'eau} / \text{Poids sec}) \times 100$.
- Calcul de la densité sèche : $\text{Densité sèche} = \text{Poids sec} / \text{Volume}$

I.5.2.2.4. Essai de compressibilité par paliers à l'oedomètre

L'essai oedométrique, introduit au début du vingtième siècle dans la pratique de la mécanique des sols, est de loin l'essai le plus utilisé dans les études géotechniques de sols vulnérables à une telle déformation sous l'effet de plusieurs sollicitations ; c'est ainsi que cet essai permet de simuler le comportement mécanique d'un sol soumis à une augmentation de contraintes.

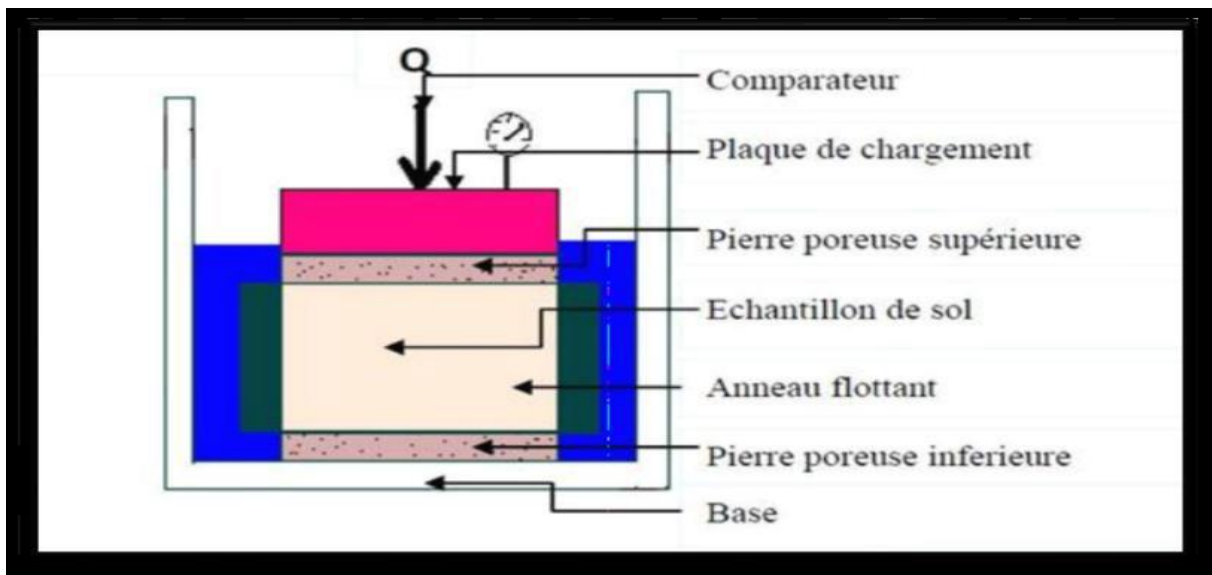


Figure I-12 : Coupe schématisé de la cellule œdométrique

En laboratoire, l'essai œdométrique traduit les conditions de déformation des sols en appliquant des charges sur un échantillon à sa teneur en eau naturelle, découpé et introduit dans l'anneau de l'œdomètre. Les pressions de ces charges sont transmises par l'intermédiaire d'un piston lié directement à l'échantillon. Les charges appliquées sont verticales (les déformations latérales étant empêchées), la cellule œdométrique (étant drainée du haut en bas et maintenue saturée pendant l'essai). Les charges sont effectués d'une manière progressive : on applique une charge, on mesure la déformation jusqu'à ce qu'elle se stabilise, puis on applique une charge plus forte et l'on recommence les observations.



Figure I-13 : Appareillage de l'essai de compressibilité par palier l'œdomètre

I.5.2.2.5. Essai de cisaillement rectiligne

L'essai a pour objectif de mesurer au laboratoire les caractéristiques de rupture d'un échantillon de sol placé dans la boîte de cisaillement constituée de deux demi boîtes indépendantes. Le plan de séparation des deux demi boîtes constitue un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette. L'essai consiste à :

- Consolider l'éprouvette de section (s) dans une première phase en appliquant sur la face supérieure un effort vertical constant maintenu pendant tout l'essai. La phase de consolidation permet de calculer la vitesse à laquelle doit être cisailé l'échantillon, celle-ci est achevée lorsque les lectures sur le comparateur exprimé en (mm) se stabilisent.
- Produire après consolidation de l'éprouvette sous l'effort (N) un cisaillement dans celle-ci selon le plan horizontal de glissement des deux demi boîtes, l'une par rapport à l'autre en leur imposant un déplacement relatif à vitesse constante ;
- Mesurer l'effort horizontal de cisaillement (T) correspondant. En fait, l'essai s'effectue sur trois éprouvettes contenant le même échantillon, préparées dans les mêmes conditions, cisailées ultérieurement à la même vitesse, mais soumises à des efforts verticaux différents depuis la phase de consolidation jusqu'à la fin de cisaillement.

I.6. Classification géotechnique des sols

I.6.1. But de la classification.

Pour résoudre les problèmes de mécanique des sols, il est important de caractériser un sol, mais aussi de les classer, c'est à dire de les mettre dans un groupe ayant des comportements similaires. Il existe de par le monde de nombreuses classifications.

I.6.2. La classification GTR

Cette classification est la seule présentant un réel intérêt pratique et utilisée dans les travaux de terrassement. Son utilisation est détaillée dans le Guide technique pour la réalisation des remblais et couches de forme ; C'est pour cette raison qu'elle est désignée par classification GTR. Cette classification est basée sur la granulométrie et l'état hydrique des sols. Elle distingue quatre grandes classes :

- **Classe A : Sols fins**

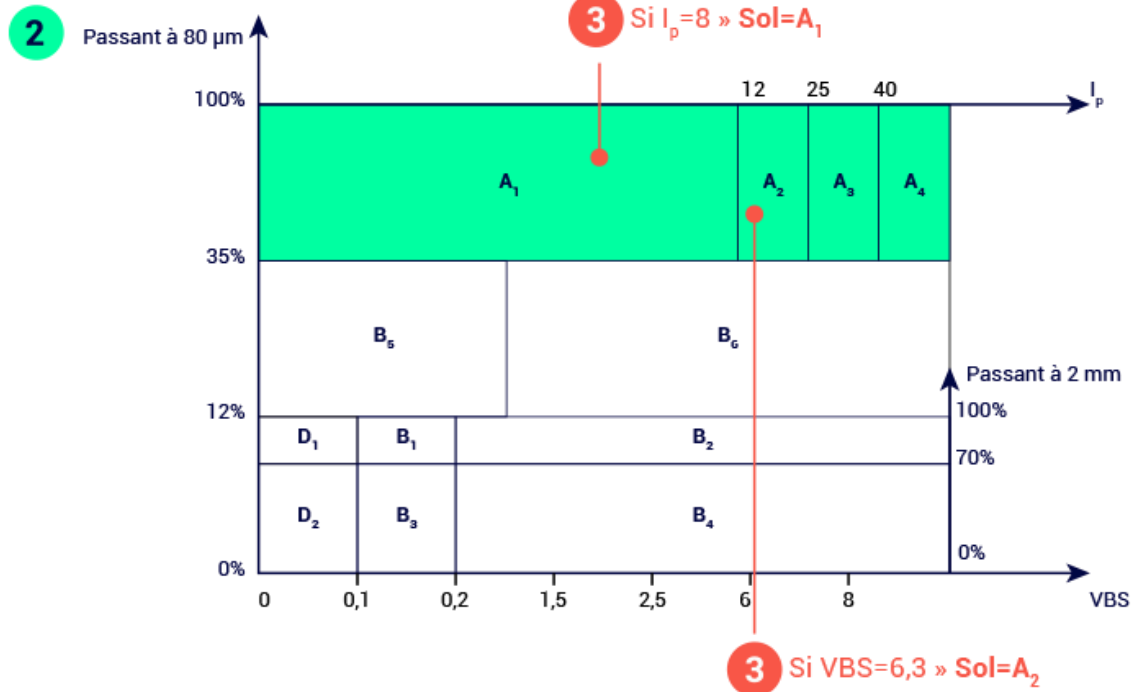
Un sol est en classe A si :

Le diamètre des plus gros éléments est inférieur ou égal à 50 mm

Le passant à 80 μm est compris entre 35 % et 100 %

La connaissance complémentaire de l'IP ou de la VBS, permet dans le tableau ci-dessous de déterminer si on se trouve en sous-classe A1, A2, A3 ou A4

1 Sol avec $D_{max} \leq 50 \text{ mm}$



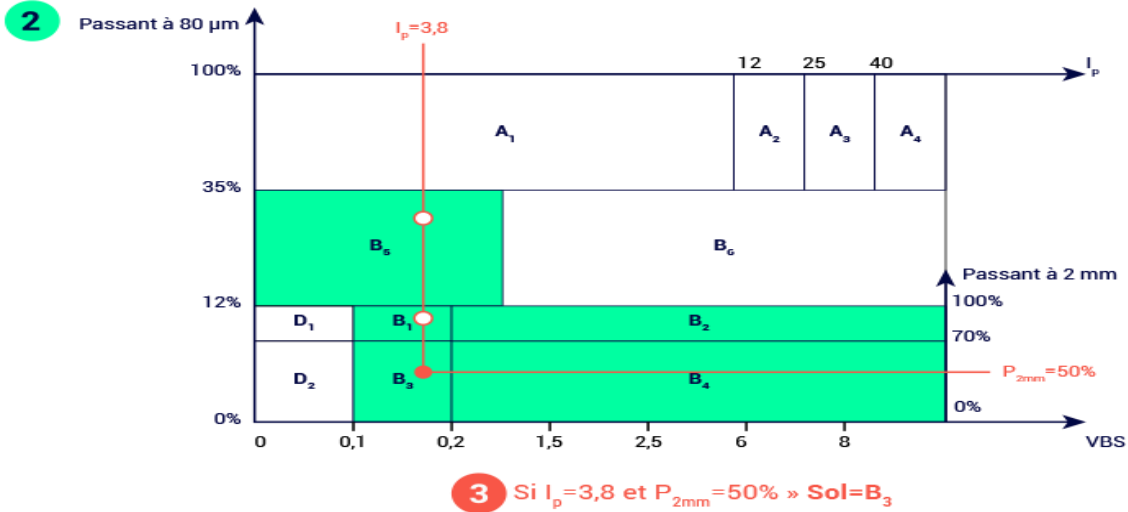
- **Classe B** : Un sol est en classe B si

Le diamètre des plus gros éléments est inférieur ou égal à 50 mm.

Le passant à 80 μm est inférieur à 35 % pour les sous classes.

La connaissance combinée de l'IP, ou de la VBS, et du passant à 2 mm, dans le tableau ci-dessous, permet de déterminer les sous classes Bi

1 Sol avec $D_{max} \leq 50 \text{ mm}$



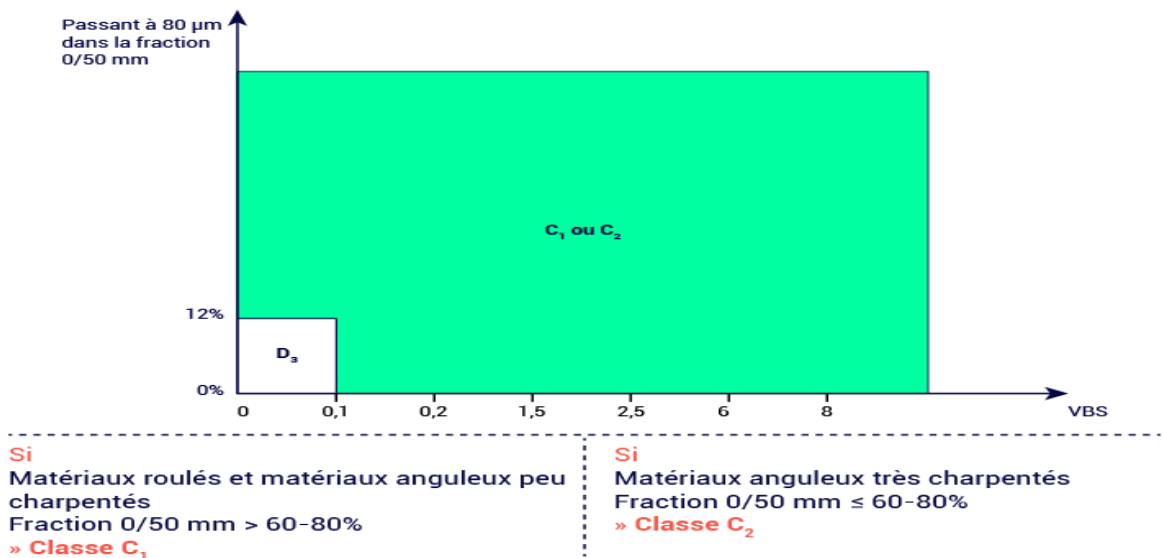
- **Classe C** : Un sol est en classe C si

Le diamètre des plus gros éléments est supérieur à 50 mm

Le passant à 80 μm est supérieur à 12 % ou le VBS supérieur à 0,1

L'analyse de la fraction granulométrique 0/50 et l'observation des granulats de composition (roulés et anguleux) permettent ensuite de conclure à l'aide du tableau ci-dessous quant à la catégorie C1 ou C2.

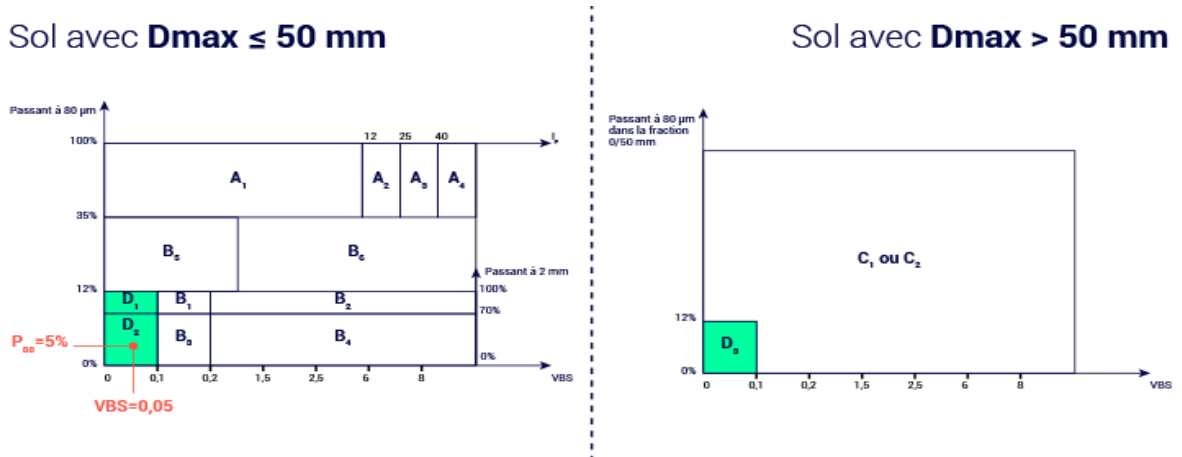
Sol avec $D_{max} > 50 \text{ mm}$



- **Classe D** :

Un sol est en classe D si :

Regarder le diamètre des plus gros éléments pour choisir le tableau à consulter
 Disposer de la VBS (entre 0 et 0,1) et éventuellement de la valeur du passant à 80 µm (entre 0 et 12 %) pour lire sur le tableau ci-dessous la catégorie recherchée D1, D2 ou D3



• **Classe R :**

La classe R regroupe les roches.

Elles se décomposent en 2 grandes catégories :

- Les roches sédimentaires, elles-mêmes subdivisées en sous catégories R1 à R5
- Les roches magmatiques et métamorphiques regroupées en catégorie R6

I.7. Conclusion

L'étude du sol est essentielle pour garantir la stabilité et la sécurité de toute construction. Une compréhension approfondie des propriétés du sol permet de choisir la méthode de fondation appropriée et d'éviter des problèmes coûteux et dangereux. La géotechnique est un domaine complexe qui combine des connaissances en géologie, en mécanique des sols, et en ingénierie civile pour optimiser les projets de construction.

Chapitre II
Les Principaux Problèmes liés aux sols

Chapitre II : Les Principaux problèmes liés aux sols

II.1. Introduction

Le sol est généralement un matériau hétérogène avec des caractéristiques très variables. Les principaux problèmes liés aux sols de manière générale se manifestent par une capacité portante faible, des déformations (tassement absolu et différentielle) ...etc. Dans ce chapitre, plusieurs problèmes vont y être décrits.

II.2. Le retrait-gonflement

II.2.1. Définition

Le retrait-gonflement des sols est un processus qui affecte principalement les sols argileux. Il résulte des variations par les alternances de périodes sèches et humides. Ces mouvements du sol peuvent engendrer des dommages importants aux constructions.

II.2.2. Les causes du retrait-gonflement

Nature d'argile

Les terrains argileux superficiels peuvent voir leur volume varier à la suite d'une modification de leur teneur en eau, en lien avec les conditions météorologiques. En effet, ils possèdent la propriété de voir leur consistance se modifier en fonction de leur teneur en eau. En contexte humide, un sol argileux se présente comme souple et malléable, tandis que ce même sol desséché sera dur et cassant. Des variations de volume plus ou moins conséquentes, en fonction de la structure du sol et des minéraux en présence, accompagnent ces modifications de consistance.

Ainsi, lorsque la teneur en eau augmente dans un sol argileux, on assiste à une augmentation du volume de ce sol, on parle alors de « gonflement des argiles ». Au contraire, une baisse de la teneur en eau provoquera un phénomène inverse de rétractation ou « retrait des argiles ». Ces variations sont lentes mais elles peuvent atteindre une amplitude assez importante pour endommager les bâtiments localisés sur ces terrains. Le phénomène de retrait-gonflement des argiles engendre chaque année des dégâts considérables, indemnisables au titre des catastrophes naturelles. La grande majorité des sinistres concerne les maisons individuelles.

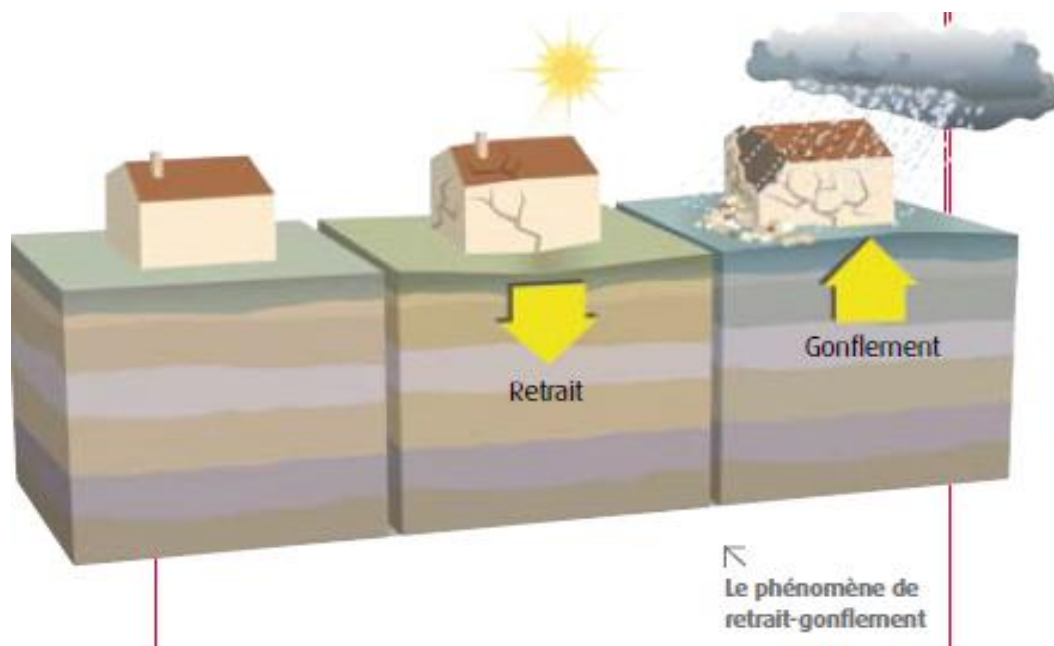


Figure II-1 : Schéma simplifié le phénomène de retrait-gonflement

Variation Climatique : Les phénomènes climatiques exceptionnels sont le principal facteur de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux. En effet, l’amplitude des variations de volume d’un sol argileux « gonflant » augmente avec l’importance de la variation de la teneur en eau du sol. Ainsi, la succession d’une période très pluvieuse et d’une période de déficit pluviométrique constitue un facteur de déclenchement majeur. En climat tempéré, les épisodes de sécheresse, caractérisés par des températures élevées, un déficit pluviométrique et une très forte évapotranspiration, ont pour répercussion immédiate d’assécher les sols argileux et donc de provoquer un phénomène de retrait provoquant des dégâts plus ou moins sérieux sur les bâtiments.

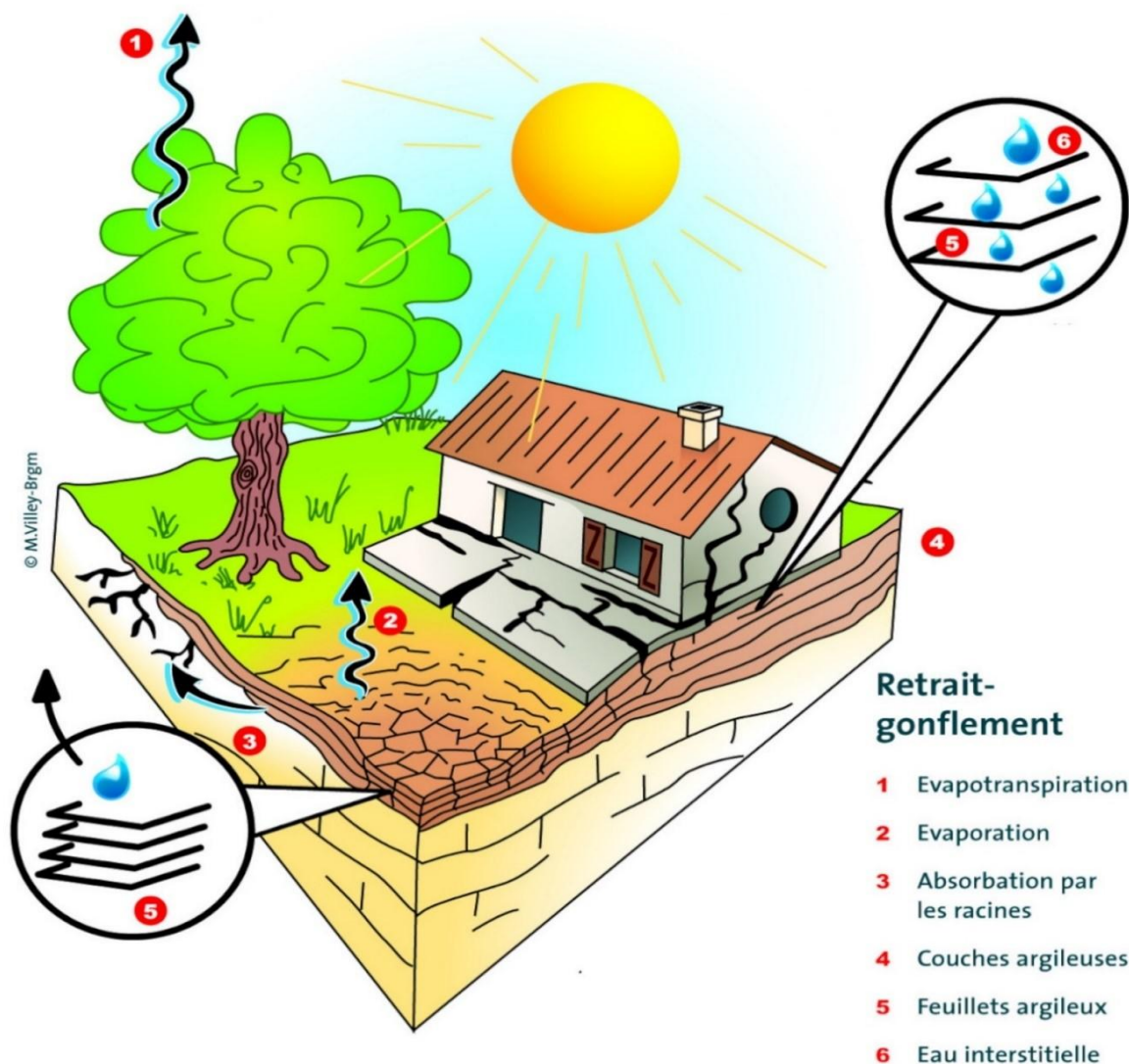


Figure II-2 : Mécanisme de fonctionnement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux.

II.2.3. Les conséquences du retrait-gonflement :

Les conséquences du retrait-gonflement sur les constructions peuvent être très importantes :

- **Fissures** : Les mouvements de terrain induits par le retrait et le gonflement des argiles se traduisent principalement par des fissurations en façade de l'habitation, souvent oblique, et passante par les points de faiblesse que constituent les ouvertures.



Figure II-3 : Maison fissurée en raison de terrain induits par la rétractation et le gonflement du sol argileux.

Affaissements : Dans les cas les plus graves, le retrait-gonflement peut entraîner des affaissements de bâtiments et des chaussées.



Figure II-4 : Affaissement d'un terrain

II.3. L'érosion

II.3.1. Définition :

L'érosion des sols est un phénomène de déplacement des matériaux à la surface de la couche la plus externe de la croûte terrestre. Elle est une des formes de régression et dégradation des sols. Ce phénomène façonne continuellement les paysages, mais peut être accéléré par les activités humaines.



Figure II-5 : Glissement de terrain

II.3.2. Les principaux agents d'érosion :

- L'eau : L'eau, sous forme de pluie, de rivières ou de vagues, est le principal agent d'érosion. Elle entraîne les particules du sol et les transporte vers de nouveaux endroits.
- Érosion pluviale : Les gouttes de pluie détachent les particules du sol et les ruissellements emportent ces particules.
- Érosion fluviale : Les rivières creusent leur lit et transportent de grandes quantités de sédiments.
- Érosion marine : Les vagues érodent les côtes et forment des falaises.
- Le vent : Le vent transporte les particules de sable et de poussière, usant les roches et les reliefs.

II.3.3. Les conséquences de l'érosion :

Dégâts aux infrastructures :

Encombrement des réseaux hydrauliques : Les sédiments transportés par l'érosion peuvent colmater les canalisations, les réservoirs et les cours d'eau, augmentant les risques d'inondation.

Dégradation des routes et des bâtiments : L'érosion peut affaiblir les fondations des constructions et endommager les routes.

Augmentation des coûts de production : Coûts de réparation des infrastructures : Les dégâts causés par l'érosion nécessitent des investissements importants pour réparer les routes, les bâtiments et les systèmes d'irrigation.

II.4. La liquéfaction de sol :

II.4.1. Définition :

Le phénomène de liquéfaction des sols se produit généralement lorsqu'un sol saturé en eau est soumis à une contrainte sismique. Sous l'effet d'une onde sismique, de vibration ou d'explosion, le sol perd une partie ou la totalité de sa portance. Le sol se comporte alors comme un liquide. Ce phénomène est généralement brutal et temporaire, les sols reprenant leur consistance solide après.

Les sols les plus susceptibles de subir une liquéfaction sont les sols saturés en eau, tels que les sables, les limons, les graviers, les argiles et les résidus miniers présentant une granulométrie uniforme de moins de 2 mm, une densité et une cohésion faible. Les conséquences de ce phénomène impactent les bâtiments, les ouvrages en terre, les ouvrages souterrains comme les réseaux de gaz ou d'eau....

II.4.2. Causes de liquéfaction des sols

Plusieurs facteurs contribuent à la liquéfaction des sols :

- Nature du sol : Les sols sableux et limoneux sont plus susceptibles à la liquéfaction.
- Saturation en eau : Un sol doit être saturé pour que la liquéfaction se produise.
- Vibrations : Souvent causées par des tremblements de terre, les vibrations augmentent la pression de l'eau dans les pores du sol.
- Historique sismique : Les zones fréquemment touchées par des séismes sont plus à risque.

Ces éléments, lorsqu'ils coexistent, créent les conditions propices à ce phénomène dangereux.

II.4.3. Conséquence de la liquéfaction du sol

- La liquéfaction des sols peut avoir des conséquences dévastatrices. Les effets incluent :
- Instabilité des fondations : Les structures peuvent s'affaisser ou se renverser.
- Déformation du sol : Le sol peut se fissurer ou se déplacer horizontalement, endommageant routes et pipelines.
- Inondations : Le déplacement du sol peut perturber les digues et autres protections contre les inondations.
- Les conséquences économiques et sociales potentielles rendent essentiel le renforcement des structures dans les zones à risque.

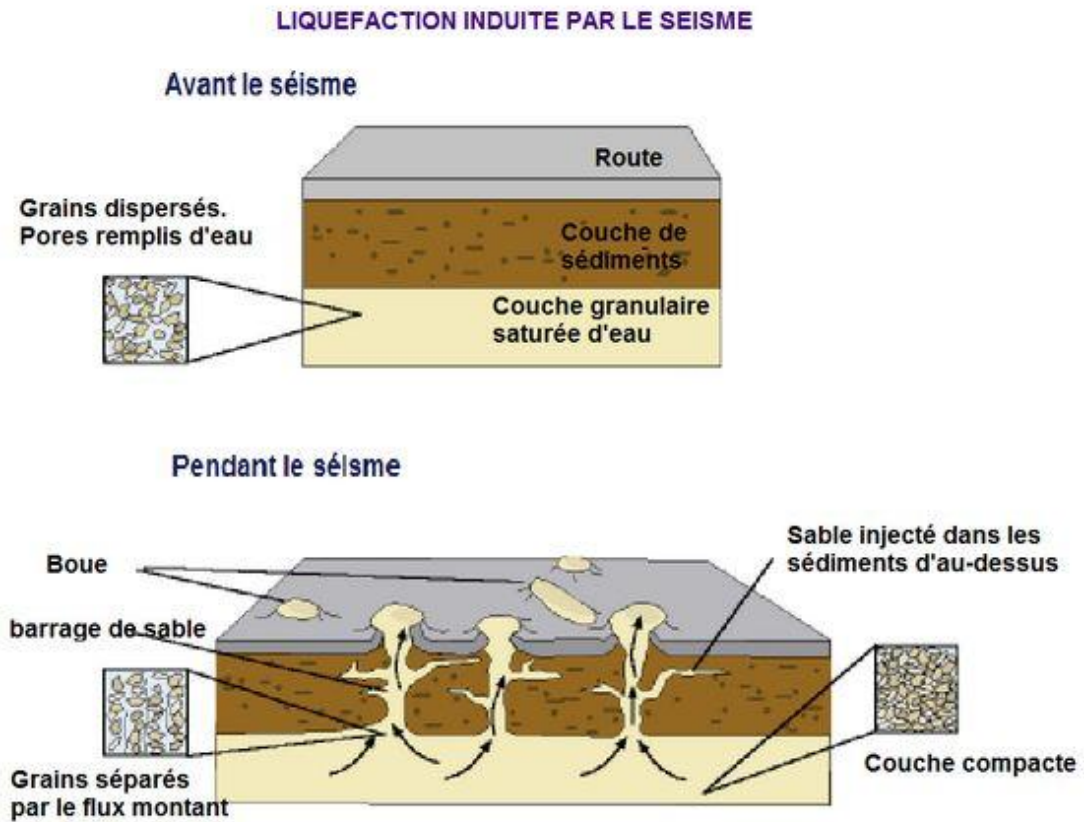


Figure II-6 : Liquéfaction de sol

II.5. Instabilité des pentes

II.5.1. Définition

L'instabilité des pentes est un problème courant en géotechnique, affectant les terrains naturels et les ouvrages construits sur ou près des pentes. Ce phénomène peut avoir des conséquences graves, comme les glissements de terrain, entraînant des pertes humaines, dommages matériels et des impacts environnementaux.

II.5.2. Causes principales de l'instabilité des pentes

Les facteurs responsables de l'instabilité des pentes peuvent être classés en deux catégories :

Facteurs naturels

- Propriétés des sols et des roches :

Faible cohésion ou faible résistance au cisaillement.

Présence de couches de sols ou roches altérées ou saturées en eau.

Hydrologie :

Infiltration d'eau (pluies abondantes, fonte des neiges).

Augmentation de la pression interstitielle, diminuant la résistance au glissement.

- Topographie :

Pentes abruptes ou surcharges naturelles (accumulation de matériaux).

Phénomènes sismiques

Vibrations dues aux séismes, réduisant la stabilité des couches de sol.

Facteurs anthropiques

- Activités de construction :

Excavations non contrôlées ou surcharge au sommet des pentes.

Déstabilisation due à des fondations mal conçues.

- Modification du drainage :

Mauvaise gestion des eaux pluviales, provoquant une infiltration accrue.

- Déforestation :

Réduction de la cohésion du sol et de la protection contre l'érosion.

Types de glissements de terrain

- Glissement de type rotationnel :

Caractérisé par une surface de rupture courbe.

Typique des sols cohésifs (argiles).

- Glissement de type translationnel :

Surface de rupture plane, souvent dans les sols peu cohésifs ou stratifiés.

- Chutes de blocs :

Détachement rapide de blocs rocheux, souvent en montagne.

Écroulements

Effondrement des masses de sols ou de roches, souvent rapide et destructeur.

Déplacement rapide de sols saturés, comme les coulées de boue.

II.5.3. Conséquences de l'instabilité des pentes

Sécurité humaine : Perte de vies humaines lors de glissements soudains.

Dommages matériels : Destruction des bâtiments, routes et autres infrastructures.

Impacts environnementaux : Modification des écosystèmes, déstabilisation des cours d'eau.

Coûts économiques : Réparations, relocalisations et mise en œuvre de mesures correctives.

- **Solutions géotechniques**

Drainage : Réduction de la pression interstitielle par des drains profonds ou des tranchées drainantes.

Renforcement des sols : Utilisation de géotextiles, ancrages ou clous de sol.

Murs de soutènement : Structures pour contenir les sols instables.

Reprofilage : Réduction de l'inclinaison de la pente.

- **Solutions environnementales :**

Végétalisation : Plantation pour améliorer la cohésion du sol et réduire l'érosion.

Gestion des eaux pluviales : Captage et déviation des eaux pour minimiser l'infiltration.

- **Surveillance et prévention**

Instrumentation géotechnique : Installation de capteurs pour surveiller les déplacements et la pression.

Cartographie des risques : Identification des zones sensibles à l'instabilité.

II.6. Le tassement de sol :

II.6.1. Définition

Le tassement de sol géotechnique est le phénomène de réduction de volume d'un sol sous l'effet d'une charge appliquée. En d'autres termes, le sol se comprime sous le poids des structures qui y sont construites.

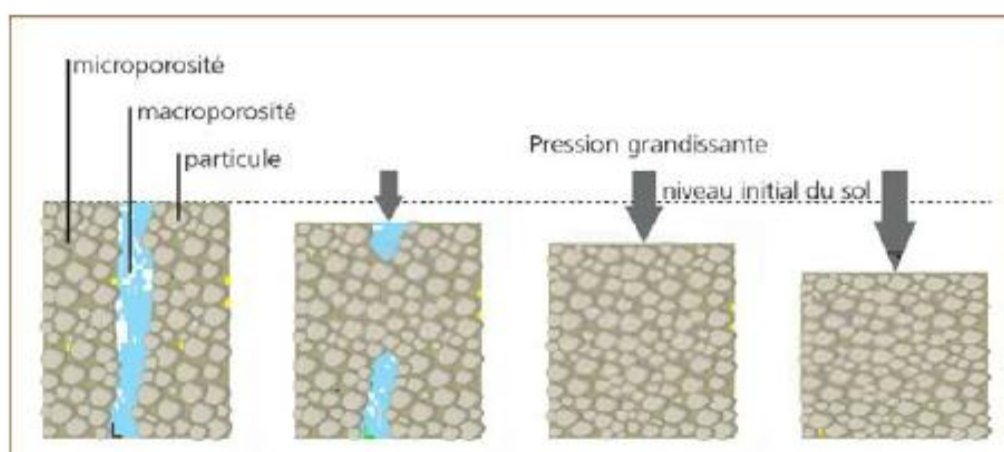


Figure II-7 : schéma du tassement et du déplacement latéral du sol de fondation

II.6.2. Les principales causes du tassement de sol :

Charge appliquée : Plus la charge est importante, plus le tassement est important. Cela peut être dû au poids des bâtiments, des routes, des infrastructures, etc.

Nature du sol : certains sols sont plus sujets au tassement que d'autres. Les sols argileux, par exemple, sont connus pour leur forte compressibilité.

Niveau d'eau souterraine : La présence d'eau dans le sol peut affecter sa compressibilité. Les sols saturés d'eau sont généralement plus compressibles que les sols secs.

Consolidation : C'est un processus graduel de tassement qui se produit au fil du temps, lorsque l'eau est évacuée des pores du sol sous l'effet de la charge.

Compactage : Un sol compacté est moins susceptible de se tasser, mais un compactage excessif peut créer des problèmes de drainage et augmenter la sensibilité au tassement différentiel.

Tremblements de terre : Les tremblements de terre peuvent provoquer des tassements importants, notamment dans les sols meubles.

II.6.3. Les dégradations des sols par des produits chimiques :

Les dégradations des sols par des produits chimiques sont un problème environnemental majeur. Ces produits, souvent utilisés dans l'agriculture, l'industrie, et d'autres secteurs, peuvent avoir des effets nocifs à long terme sur la santé des sols, la biodiversité et la qualité de l'eau.

II.6.3.1. Acidification des sols par les produits chimiques

L'utilisation de produits chimiques comme les engrais azotés peut entraîner une acidification des sols. Cela est dû à l'accumulation d'ions ammonium dans le sol, qui se transforment en acide lorsque les nitrates sont libérés. L'acidification peut :

Réduire la disponibilité de certains éléments nutritifs essentiels comme le calcium et le magnésium.

Augmenter la toxicité d'autres éléments comme l'aluminium, ce qui peut nuire aux plantes et aux micro-organismes du sol.

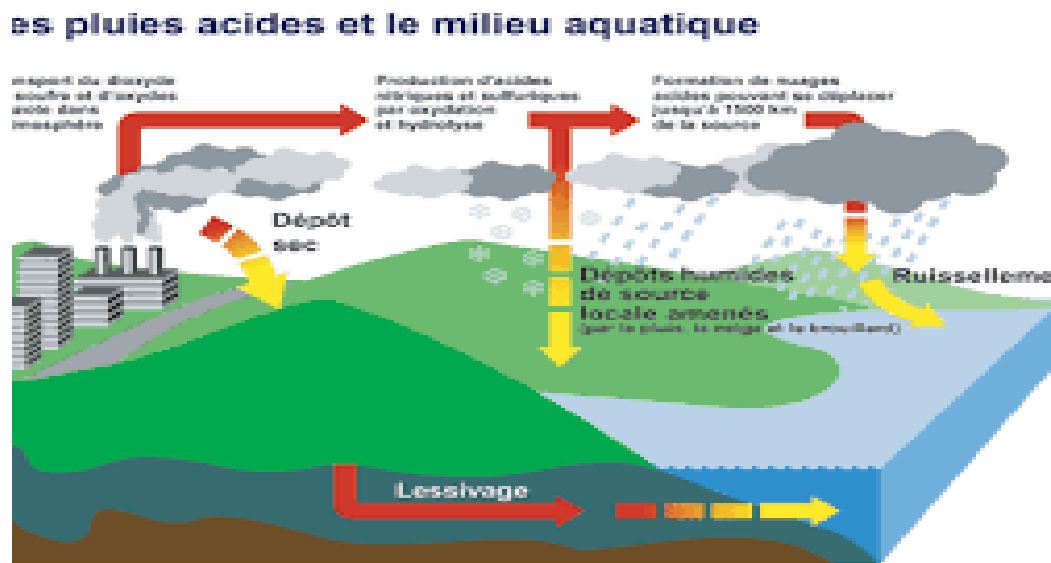


Figure II-8 : Pluies acides et acidification des sols

II.6.3.2. Salinisation des sols par les produits chimiques

L'utilisation excessive d'engrais et de produits chimiques peut entraîner l'accumulation de sels solubles dans le sol, un phénomène connu sous le nom de salinisation. Cela se produit surtout dans les régions où l'irrigation est courante, car les sels dissous dans l'eau d'irrigation s'accumulent dans le sol.



Figure II-9 : Salinisation des sols par des produits chimiques

II.6.4. Contamination des sols par les métaux lourds

Les métaux lourds comme le plomb (Pb), le cadmium (Cd), et le mercure (Hg) peuvent être introduits dans le sol par des produits chimiques industriels, des déchets urbains ou des engrais. Ces métaux lourds ne se dégradent pas et peuvent s'accumuler dans le sol, ce qui peut :

Nuire à la santé des plantes en perturbant leur métabolisme.

Contaminer la chaîne alimentaire lorsque les plantes ou les animaux absorbent ces métaux.

Perturber la biodiversité microbienne du sol.



Figure II-10 : Contamination des sols par les métaux lourds

II.7. La salinisation des sols

II.7.1. Définition :

La salinisation du sol est l'accumulation de sels solubles dans l'eau dans le sol. C'est un type majeur de dégradation du sol qui peut se produire à la fois naturellement ou en raison d'une mauvaise gestion des ressources en eau et en sol.

Ce phénomène bien que naturel est souvent exacerbé par les activités humaines.



Figure II-11 : Salinisation d'un sol

II.7.2. Causes de la salinisation

Causes naturelles :

Climat : Les régions arides et semi-arides sont particulièrement vulnérables à la salinisation en raison d'une forte évaporation qui concentre les sels.

Géologie : La présence de roches salines dans le sous-sol peut contribuer à la salinisation.

Causes anthropiques :

Irrigation excessive : Un apport en eau excessif sans drainage adéquat entraîne la remontée de la nappe phréatique salée et l'évaporation de l'eau, laissant les sels en surface.

Qualité de l'eau d'irrigation : L'utilisation d'une eau d'irrigation salée favorise l'accumulation de sels dans le sol.

Assèchement des zones humides : La disparition des zones humides, qui jouent un rôle de filtre naturel, peut accélérer la salinisation.

II.7.3. Conséquences de la salinisation :

Dégradation de la qualité des eaux souterraines : Les sels peuvent contaminer les nappes phréatiques, rendant l'eau impropre à la consommation humaine et à l'irrigation.

Perte de biodiversité : La salinisation modifie les écosystèmes, entraînant une diminution de la biodiversité.

II.8. Conclusion

En géotechnique, les problèmes des sols sont souvent liés à leur capacité portante, leur stabilité et leur comportement sous différentes conditions environnementales. Ces problèmes peuvent inclure la liquéfaction des sols ou encore la contamination des sols. Ces défis peuvent avoir des conséquences graves sur la construction d'infrastructures, la sécurité des bâtiments et des routes, et même sur la stabilité des terrains.

Chapitre III
Salinisation des sols

Chapitre III: Salinisation des sols

III.1. Introduction

La salinisation est l'un des processus majeurs qui contribuent à la dégradation des terres et dont les effets sont souvent néfastes. La gestion et la réhabilitation des sols affectés par ce phénomène nécessitent des études appropriées qui permettent d'évaluer son état actuel et de comprendre les facteurs qui l'influencent et qui régissent ses processus d'évolution spatiale et temporelle. Dans ce chapitre, nous présentons d'abord la salinité et ses origines ensuite ses effets sur le sol.

III.2. Définition et origine de la salinité

La salinité se réfère à la quantité des sels solubles qui se trouve dans le sol. Les sels solubles englobent une large gamme d'anions et de cations présents dans le sol soit sous forme cristallisée, soit sous forme dissoute dans la solution du sol, soit sous forme adsorbée sur la surface des colloïdes. Ils sont constitués principalement par le calcium, le magnésium, le sodium et le potassium pour les cations et par les chlorures, les sulfates, les carbonates et les bicarbonates et nitrates pour les anions. Plusieurs processus géochimiques peuvent avoir lieu comme conséquence à l'action des sels solubles dans le sol. Le processus suivant lequel le sol s'enrichit en sels solubles est la salinisation. L'autre processus qui est l'alcalinisation se produit lorsque le pH du sol augmente à des valeurs supérieures à 8,5. Ce processus est souvent accompagné du processus de sodisation lorsque le sodium échangeable est l'élément majoritaire adsorbé sur le complexe colloïdal. La salinité des sols a des sources très variées. Elle provient naturellement par le biais de l'altération des roches mères contenant des minéraux nécessaires à la formation des sels solubles (minéraux sodiques, potassiques, magnésiens, de produits de l'hydrothermalisme riches en soufre et en chlore, ou de la dissolution des évaporites. L'océan peut être une source principale de la salinité, notamment dans les zones côtières où le matériau de base est constitué de dépôts marins anciens. Les eaux salées des nappes phréatiques ou artésiennes peuvent aboutir à la salinité par remontée de la nappe. La salinité peut être provoquée en conditions anthropiques par l'irrigation par des eaux salées. La salinisation anthropique est la conséquence de la mauvaise combinaison d'une forte évaporation et d'un apport inadéquat d'eau d'irrigation chargée en sels dissous (Boualla et al., 2012). Marlet (2004) a révélé que plus de 50% des périmètres irrigués du monde sont affectés à des degrés divers par la salinisation. De plus, on confirme que 21% des terres irriguées souffrent d'engorgement, de salinisation et/ou d'alcalinisation qui réduisent leurs rendements agricoles. De même, 1 à 2% des surfaces irriguées sont perdues chaque année du fait de ces deux processus. A titre d'exemple et dans un contexte plus local, on a montré que les eaux souterraines de la nappe de la plaine du Bas-Chéouli ont une salinité élevée peu propice à l'irrigation indiquant des risques élevés de salinisation et de sodisation des sols. Ils ont montré également que l'évolution chimique de ces eaux sous l'effet d'une évaporation est susceptible de faire précipiter la calcite et la sépiolite et que l'addition continue d'eau d'irrigation causera une accumulation de carbonates de sodium entraînant ainsi une sodisation probable des sols.



Figure III-1 : l'accumulation de sel de l'eau chargée de sel percolant jusqu'à la surface

La salinisation des sols se manifeste par deux voies, qui sont :

III.3. La salinisation primaire :

Tout d'abord, la salinisation implique une accumulation de sel par des processus naturels du fait d'une forte teneur en sel du matériau parent ou des nappes souterraines. La salinité primaire est d'origine naturelle, due principalement aux sels qui ont pour origine le processus d'altération des roches. La migration puis le dépôt de ces sels solubles dépendent de l'intensité et de la répartition des précipitations et d'autre caractéristique de milieu naturel. Dans les régions arides et semi-arides, le lessivage et le transport en profondeur des sels dissous n'existent plus et l'évapotranspiration importante favorise la concentration des sels dans le sol.

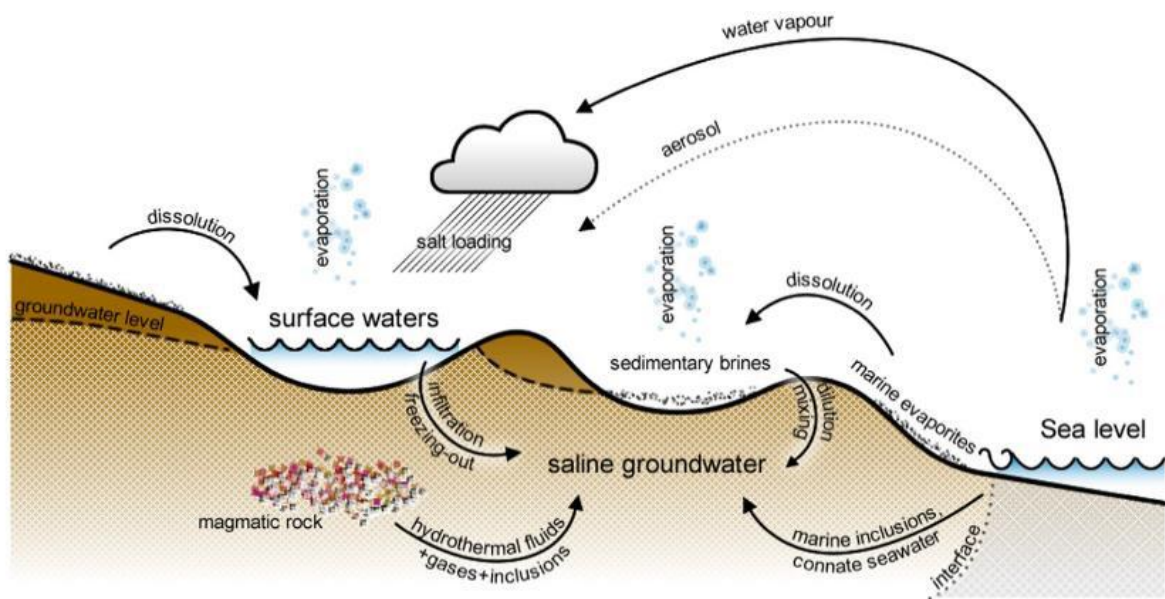


Figure III-2 : Mécanisme de la salinisation primaire (Daliakopoulos, 2016)

III.4. La salinisation secondaire :

La dégradation de la qualité des sols et des eaux suite à l'irrigation constitue un danger sérieux pour la durabilité d'exploitation des terres. Il est bien connu que la mise en valeur agricole sous irrigation dans les zones semi-arides et arides conduit le plus souvent à la dégradation de la qualité des sols. Le principal impact est La salinisation secondaire des sols .La salinité secondaire due à des processus de salinisation liés à des activités anthropiques, cette salinisation concerne des surfaces plus réduites que la salinité primaire mais a des conséquences économiques plus importantes car elle peut dégrader gravement la fertilité de zones cultivées.

Les principales causes de la salinisation secondaire sont :

- Le mauvais fonctionnement des systèmes de drainage/assainissement ;
- La remontée de la nappe phréatique salée et la forte évapotranspiration ;
- L'irrigation avec des eaux à forts risques de salinisation et de sodification et l'absence d'exutoire naturel pour l'évacuation des excès d'eau de drainage et d'assainissement



Figure III-3 : Salinisation secondaire.

III.5. Répartition de la salinité du sol

III.5.1. Les sols salins dans le monde

La salinité est un des processus de dégradation des sols les plus largement répandus sur la Terre. Les causes techniques les plus importantes à l'origine de la diminution de la production sur de nombreux périmètres irrigués, particulièrement dans les zones arides et semi-arides, ou de désastre sur de grandes surfaces en agriculture pluviale, sont l'engorgement, et la salinisation.

En Europe, on trouve des sols à forte teneur saline en Roumanie, en Grèce, en Italie et dans la péninsule ibérique. Dans les pays nordiques, le dévers glaçage des routes en utilisant du sel peut provoquer une salinisation localisée. On estime que la salinisation du sol affecte 1 à 3 millions d'hectares de terres en UE. Cette salinisation est considérée comme une cause majeure de désertification et constitue donc une forme grave de dégradation des sols. Ce problème de la salinisation en Europe s'accroît du fait de l'augmentation des températures et de la réduction des précipitations, caractéristiques du climat de ces dernières années.

Tableau III-1 : répartitions des sols salins et sodique dans le monde (marlet et job, 2006)

Régions	Superficie totale (10 ⁶ ha)	Sols salés (10 ⁶ ha)	%	Sols sodiques (10 ⁶ ha)	%
Afrique	1899.1	38.7	2.0	33.5	1.8
Asie, pacifique et Australie	3107.2	195.1	6.3	248.6	8.0
Europe	2010.8	6.7	0.3	72.7	3.6
Amérique latine	2038.6	60.5	3.0	50.9	
Proche orient	1801.9	91.5	5.1	14.1	0.8
Amérique du nord	1923.7	4.6	0.2	14.5	0.8
Total	12781.3	397.1	3.1	434.3	3.4

III.5.2. Les sols salins dans L'Algérie

En Algérie, de l'Est à l'Ouest et de la côte au Sahara, les sols agricoles sont, dans leur majorité, affectés par la salinité ou susceptible de l'être. Il n'est recensé aucune étude cartographique fiable et précise permettant de délimiter les zones touchées par la salinité des terres et la quantification de la teneur des sels dans le sol. Néanmoins il existe quelques données fragmentaires qui donnent une idée générale sur le phénomène de salinité et de la dégradation des terres.

Les sols salins sont très répandus dans les basses plaines d'Oranie, dans la vallée de Mina près de Relizane, sur les hautes plaines au Sud de Sétif et de Constantine, aux bords de certains chotts. Ils ont aussi une grande extension dans les régions sahariennes au Sud de Biskra jusqu'à Touggourt, Ouargla et au-delà. Leur conductivité électrique est supérieure à 7dS/m, sur l'ensemble du profil et le pourcentage de sodium échangeable sur la capacité d'échange cationique (C.E.C.) est variable de 5 à 60% .

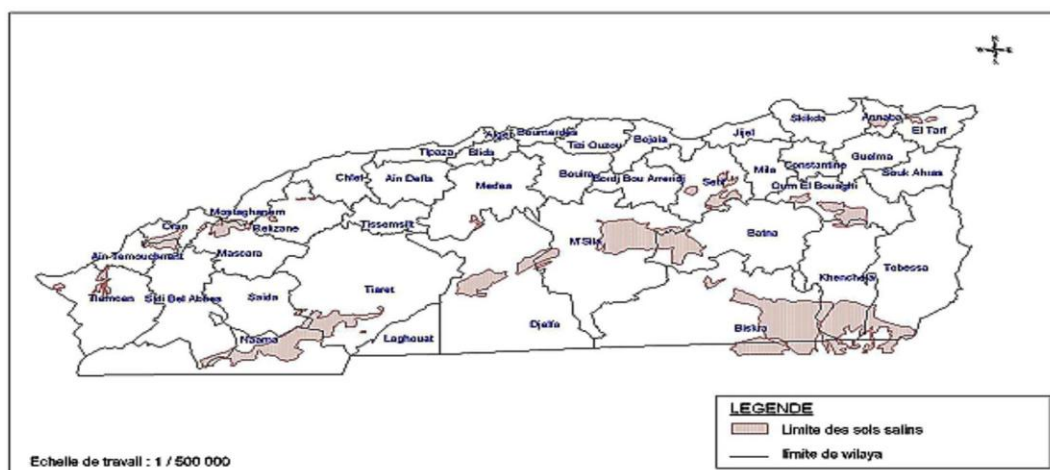


Figure III-4 : Répartition des sols salins dans le nord de l’Algérie (INSID, 2008)

III.6. Causes principales de la salinisation

Les facteurs principaux qui contribuent à la salinité croissante des sols peuvent être résumés comme suit :

- Utilisation d'une eau d'irrigation de qualité médiocre et lessivage naturel insuffisant.
- Remontée de la nappe souterraine à proximité de la surface et transport de sels par remontées capillaires
- Présence d'un aquifère côtier salin dont l'eau est prélevée pour l'irrigation

III.7. Les différents types de salinisation

En général, la salinisation regroupe plusieurs mécanismes de dégradation : la salinisation, la sodisation et l'alcanisation qui sont trois phénomènes différents. Ces mécanismes sont à la base des principales dégradations de sol.

-La salinisation : La salinité des sols a été longtemps mesurée par la résistivité des extraits de sol, qui permet de calculer leur teneur en sels solubles .cette salinité s' exprime en conductibilité spécifique à 25C°, de la solution obtenue à partir du sol ,soit C.E .25C°,en mmhos/cm .

La conductivité électrique sur extrait de pâte saturée (CES) des horizons d'enracinement est exprimée généralement en mmhos/cm .les limites adoptées correspondant à de résistances du sol aux cultures (échelle de RIVERSIDE).sont les suivant :

- <à 2 mmhos /cm très faible
- 2 à 4 mmhos /cm faible
- 4 à 7 mmhos /cm moyenne
- 7 à 14 mmhos/cm forte
- 14 à 28 mmhos /cm assez forte
- 28 mmhos /cm très faible, KHADRAOUI (2010)

Tableau III-2 : Echelle de salinité en fonction de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée (U.S.S.L., 1954)

C.E. (dS/m à 25°C)	Degré de salinité
≤ 2	Sol non salé
$2 < \text{C.E.} \leq 4$	Sol faiblement salé
$4 < \text{C.E.} \leq 8$	Sol moyennement salé
$8 < \text{C.E.} \leq 20$	Sol fortement salé
> 20	Sol extrêmement salé

- **La sodisation** : La capacité du sol d'échanger des cations est appelée capacité d'échange cationique CEC. La sodisation est mesurée en pourcentage de la CEC occupée par le sodium. Ce pourcentage est nommé ESP ou PSE pourcentage de sodium échangeable. Lorsque la garniture cationique des argiles dépasse un seuil de teneur en sodium (NaH) généralement situé aux environs de 10% (ESP > 10%) et plus, les argiles ont tendance à dé flocluler (se disperser). Le sol perd alors sa structure et sa perméabilité, il s'effondre. A un stade plus poussé, la sodisation s'accompagne d'une hausse du PH qui se traduit par une régression sévère des aptitudes agronomiques du sol, due en particulier à des carences. Un sol est considéré comme sodique si ESP est supérieur à 15 %. Le PH est seulement supérieur à 8,5.

-L'alcalinisation : il s'agit d'une élévation du pH du sol sous l'effet de l'accumulation de bases. En simplifiant le phénomène, il est utile de rappeler ceci :

En milieu aride, et en cas de drainage limité ou nul, la forte évaporation conduit à concentrer les eaux de surface et du sol.

Lorsqu'une eau même faiblement minéralisée se concentre, sa composition évolue : la teneur en ions augmente. A la limite une évaporation poussée conduira à des eaux concentrées et donc salées.

Toutes les espèces minérales ne se maintiennent pas en solution au cours de l'évaporation : lorsque le seuil de solubilité du minéral est atteint, il précipite et les ions correspondants cessent donc de se concentrer.

Le premier minéral qui précipite est la calcite CaCO_3 . Cette précipitation intervient pour une valeur constante du produit des concentrations en calcium et en carbonate. Or l'eau du fleuve est relativement plus riche en carbonate (base faible) qu'en calcium. La précipitation laisse donc des carbonates résiduels en solution. Sa concentration a donc tendance à continuer à augmenter. Ceci entraîne l'accroissement du PH de la solution.

III.8. PH du sol :

Dans les régions arides, la gamme relative aux sols s'étend d'un pH légèrement inférieur à 7 à un pH d'environ 9. Le pH peut être un paramètre de classification, FIREMAN et al. (1951 in U.S.S.L.,1954), ont classé le sol en fonction du pH de pâte saturée.

Tableau III-3 : Classes du sol selon le pH de pâte saturée (FIREMAN et al, 1951 in U.S.S.L.,1954)

pH	Classe du sol
$\geq 8,5$	Indiquent souvent un pourcentage de Na^+ échangeable supérieur ou égale à 15% et la présence des carbonates alcalino-terreux
$< 8,5$	Les pourcentages de Na^+ échangeable peuvent ou ne peuvent pas dépasser 15%
$\leq 7,5$	Ces sols ne contiennent jamais de Ca^{++} et Mg^{++}
< 7	Ces sols contiennent des quantités significatives d'ion H^+ échangeable

III.9. Effet de la salinité :**III.9.1.Effet de la salinité sur l'environnement**

Une accumulation excessive de sels solubles dans les milieux poreux du sol affecte les échanges ioniques et la chimie de la double couche diffuse, et par conséquent les propriétés physiques et chimiques du sol. Cette forte concentration entraîne une augmentation du potentiel osmotique, engendrant un stress osmotique plus important sur les plantes. De surcroît, les sels dissous réduisent la disponibilité de l'eau pour les plantes dans l'eau et provoquent l'extraction de l'eau du sol, comme le montre la Figure III.5 (Slinger et Tenison, 2007).



Figure III-5 : Salinisation de sol

III.9.2. Effet de la salinité sur les constructions :

La salinité a des effets particulièrement néfastes sur les constructions, notamment dans les zones côtières ou à sols salins. Les sels dissous dans l'eau peuvent pénétrer les matériaux poreux comme le béton ou la brique, provoquant des phénomènes tels que l'efflorescence (dépôts blanchâtres en surface) ou la cristallisation interne, qui entraîne des fissurations. L'un des effets les plus graves est la corrosion des armatures métalliques dans le béton armé : le sel accélère l'oxydation de l'acier, ce qui fragilise la structure et peut conduire à des dégradations majeures. De plus, les sels retiennent l'humidité, favorisant les cycles gel/dégel et les remontées capillaires, ce qui aggrave encore la détérioration des matériaux. Pour limiter ces impacts, il est essentiel d'utiliser des matériaux adaptés, de protéger les surfaces et de prévoir un bon système de drainage.



Figure III-6 : Corrosion des aciers dans le béton.



Figure III-7 : La dégradation d'un mur en brique par accumulation de sels

III.10. Classification des sols salins

- Sol salin

Un sol salin est un sol qui contient beaucoup de sels solubles ayant des effets néfastes sur la croissance des plantes et les propriétés du sol, mais qui ne contient pas trop de Na^+ échangeable. La plupart des sels solubles dans les sols salins sont composés les cations Na^+ , Ca^{+2} et Mg^{+2} et les anions Cl^- , SO_4^{-2} , et HCO_3^- , d'autres cations et anions se trouvent également dans les sols en concentrations minimale, tels que K^+ , NH_4^+ , NO_3^- .

• Sol sodique

Un sol sodique peut être défini comme un sol qui contient des concentrations suffisantes de Na^+ échangeables qui ont des effets graves sur la croissance et le développement des végétaux et les structures, mais qui ne contient pas de concentration excessive de sels solubles. Dans certains ouvrages, le terme « alcali » est utilisé à la place du terme « sodique ». La sodicité est exprimée soit en rapport d'adsorption du sodium (SAR), soit en pourcentage de sodium échangeable (ESP). En d'autres termes, la sodicité fait référence à un excès de Na^+ parmi les actions échangeables dans la solution du sol .

• Sol Saline-sodique

Un sol salin-sodique est un sol contenant à la fois des sels solubles et du sodium échangeable en quantités suffisantes pour avoir des effets nocifs sur tous les types de cultures, et propriétés physico-chimiques des sols.

Tableau III-4 : Les principales propriétés des sols salins et sodiques (Maillard, 2001)

Caractéristiques	Sols salins	Sols sodiques
Chimiques	Un pourcentage de sodium échangeable inférieur à 15%	Un pourcentage de sodium échangeable supérieur à 15%
	Conductivité électrique à 25°C CE >4 dS/m	Conductivité électrique à 25°C CE <4dS/m
	Le pH du sol Généralement moins de 8,2	Le pH du sol est plus de 8,2atteignant souvent 9 ou 10.
	La présence excessive de sels solubles neutres, la fraction argileuse est floculée et le sol est stable.	Un excès en sodium échangeable couplé à des valeurs de pH élevées rend l'argile dispersée et une instabilité structurale du sol
Physiques	La perméabilité à l'eau et à l'air de ces sols est généralement comparable à ceux des sols non salins	La perméabilité à l'eau et à l'air est restreinte. Les propriétés physiques de ces sols s'aggravent avec l'augmentation du pH et du sodium échangeable.
Distribution Géographique	Les sols salins dominent dans les régions arides à semi-arides.	Les sols alcalins se trouvent principalement dans les régions semi-arides et subhumides.

III.11. Les différents types de sels :

La salinisation est connue comme l'accumulation des sels au sein de la matrice du sol. Parmi ces sels, il existe trois grands groupes, à savoir les chlorures, les sulfates et les carbonates; Boutelli, (2012).

- **Les chlorures**

Les chlorures sont considérés comme étant les sels responsables de la formation des sols salins. Ils possèdent une solubilité extrêmement élevée, ainsi qu'une grande toxicité pour la végétation, les structures et les ouvrages en génie civil Boutelli, (2012). Parmi ces sels, nous distinguons :

Le chlorure de sodium (NaCl) :

C'est le sel le plus répandu au monde. Il est connu par sa forte solubilité et sa toxicité.

Le chlorure de potassium (KCl) :

C'est un sel monovalent, voisin du chlorure de sodium, mais peu répandu et de toxicité modérée.

Le chlorure de calcium (CaCl_2) :

C'est un sel voisin du chlorure de sodium, mais sa présence est rare dans la nature. Il est de faible toxicité, car, il réagit avec les sulfates de sodium (Na_2SO_4) ou les carbonates de sodium (Na_2CO_3).

- **Les sulfates**

Les sulfates se trouvent en quantités variables dans la nature, parmi ces sels nous distinguons :

Le sulfates de calcium (CaSO_4)

Les sulfates de calcium sont la forme la plus répandue des familles des sulfates. Ces sels sont connus par leur faible toxicité en raison de leur faible solubilité. Cependant, la forte présence des sulfates de calcium peut causer un ralentissement du développement du système racinaire. En termes de construction ces sels peuvent engendrer la corrosion des armatures et la dégradation du béton, Boutelli, (2012).

Le sulfate de magnésium (MgSO_4)

Les sulfates de magnésium sont relativement présents dans les sols salins ainsi qu'au niveau des eaux souterraines. Ces sels sont extrêmement toxiques en raison de leur forte solubilité.

Les sulfates de sodium (Na_2SO_4)

Les sulfates de sodium sont fortement répandus dans les sols salins et sodiques.

La présence de tels sels porte un énorme préjudice à l'environnement et aux constructions en raison de leur forte toxicité.

Les sulfates de potassium (K_2SO_4)

La présence de ces sels est relativement rare. Ces sels possèdent une faible agressivité et une faible toxicité pour l'environnement et les ouvrages en génie civil.

- **Les Carbonates :**

D'après la FAO et UNESCO (1992) et Boutelli (2012), les sels carbonatés sont très répandus dans les sols, parmi ces sels nous citons :

Le carbonate de magnésium (MgCO_3)

La solubilité de ce sel est trop élevée, ce qui lui donne un potentiel de toxicité important.

Le carbonate de sodium (Na_2CO_3)

Le carbonate de sodium est un sel très toxique par sa solubilité et son pouvoir alcalinisant, engendrant des effets néfastes sur l'environnement.

Le carbonate de potassium (K_2CO_3)

La présence des carbonates de potassium dans la nature est extrêmement rare. Ces sels possèdent les mêmes effets néfastes que les carbonates de sodium (Na_2CO_3).

III.12. Mouvement des sels dans le sol :

Le mouvement des sels dans le sol dépend principalement de la texture granulaire du sol. Un sol à texture grossière, possède une perméabilité importante et un pouvoir drainant plus élevé, par conséquent on aura un sol peu affecté par la salinisation. Cependant, un sol peu perméable avec une texture fine présente une réelle menace due à la forte accumulation de sels dans sa matrice poreuse. Les sols sablonneux présentent une vitesse d'écoulement élevée, mais avec une hauteur limitée de remontée capillaire. Les problèmes de salinité peuvent être rencontrés profondeur en raison de la lixiviation, mais souvent sans préjudice majeur. Les sols argileux montrent une vitesse d'écoulement faible, ainsi qu'une remontée très importante, mais cette dernière est réduite à cause des fissures qui se forment lors du dessèchement, qu'atténue cette remontée. Toutefois, les sols à risque majeur, sont les sols limoneux qui ne présentent aucune fissure lors du dessèchement, combinant une vitesse capillaire moyenne avec une remontée importante Van Hoorn, (1994).

III.12.1. Les mécanismes du mouvement des sels :

Le mouvement des sels dans le milieu poreux est assuré par le mouvement de l'eau. Ce dernier, peut être descendant connu sous le nom de lixiviation ou ascendant connu sous l'appellation de remontée capillaire.

III.12.1.1. La lixiviation :

La lixiviation est un processus de lessivage des sels présents dans le sol suite à une action de percolation avec l'eau. Cette dernière, va s'infiltrer dans la matrice du sol, en dissolvant ainsi tous les sels confinés. La dissolution de ces sels se fait selon leur degré de solubilité (Boutelli, 2012).

III.12.1.2. La capillarité :

La capillarité ou remontée capillaire est un mouvement ascendant des sels en solution dans un milieu saturé à faible profondeur. Ce mouvement est plus important au niveau des régions soumises à une intense évaporation (Duchaufour, 1977 ; Boutelli, 2012). Cette propriété dépend notamment de plusieurs paramètres, à savoir la perméabilité, la profondeur de la nappe superficielle, la granulométrie et la structure du sol (Durand, 1983).

III.13. Conclusion :

La salinisation des sols est un phénomène géotechnique majeur dans le monde qui affecte la durabilité des infrastructures, la fertilité des terres et la stabilité des constructions. Ce processus, souvent lié à des conditions naturelles (remontées capillaires, évaporation intense) ou anthropiques (irrigation inadéquate, pollution), entraîne une accumulation de sels qui modifie les propriétés physico-chimiques et mécaniques des sols.

Chapitre IV

Méthodes de désalinisation des sols

Chapitre IV : Méthodes de désalinisation des sols

IV.1. Introduction :

La salinisation des sols constitue l'un des problèmes environnementaux majeurs. Ce phénomène, souvent aggravé par les pratiques d'irrigation inappropriées, les conditions climatiques arides et la remontée des nappes phréatiques salines, entraîne une accumulation excessive de sels solubles (chlorures, sulfates, carbonates de sodium, etc.). Les conséquences incluent la dégradation de la structure du sol, la réduction de la disponibilité en eau et en nutriments, une baisse significative des rendements agricoles, et altération des propriétés mécaniques.

Face à cette problématique, la remédiation des sols salés se présente comme une solution indispensable pour restaurer les propriétés mécaniques et hydrauliques du sol. Elle englobe diverses techniques, allant des méthodes traditionnelles (comme lavage des sols et l'amendement chimique) aux approches innovantes telles que la phytoremédiation par les plantes halophytes et l'utilisation de microorganismes bénéfiques.

Ce chapitre explore les principales méthodes de traitement des sols salins, en mettant en lumière leurs principes, leurs avantages et leurs limites.

IV.2. Méthodes physiques de désalinisation des sols :

IV.2.1. Le drainage :

Le drainage est une technique de suppression naturelle ou artificielle des excès d'eau souterraine et de surface des sels dissous dans les sols. Le principe de drainage est :

- Évacuer l'excès d'eau de pluie par les drains de surface qui recueillent essentiellement l'écoulement de surface.
- Contrôler la profondeur de la nappe et de lessiver les sels.
- Transporter l'eau récupérée dans les drains secondaires jusqu'au collecteur.
- Transporter l'eau des collecteurs jusqu'à l'exutoire du système ou au site d'évacuation.

Type de drainage :

Le drainage de surface: Le drainage de surface est une méthode d'évacuation de l'eau excédentaire (eaux de pluie, d'irrigation ou de ruissellement) à la surface du sol, au moyen de fossés, rigoles, pentes.

Il a pour objectif de prévenir la stagnation d'eau, d'éviter l'engorgement du sol et de réduire la remontée des sels par évaporation, surtout dans les sols salés.

Drainage souterrain (ou artificiel) : Le drainage souterrain (ou drainage artificiel profond) est une technique qui consiste à évacuer l'eau et les sels accumulés dans le sol en profondeur à l'aide de tuyaux enterrés (drains) disposés sous la surface du sol, généralement entre 1 et 2 mètres de profondeur.

Son objectif principal est de réduire le niveau de la nappe phréatique salée, permettant ainsi un lessivage efficace des sels hors de la zone racinaire.

Drainage vertical : Le drainage vertical consiste à installer des puits ou forages dans le sol pour pomper l'eau souterraine. Ce processus permet de baisser le niveau de la nappe phréatique, réduisant ainsi la remontée capillaire des sels vers la surface, phénomène courant dans les sols salins. Les puits peuvent être soit ouverts, soit tubés, et leur conception dépend de la profondeur de la nappe et de la perméabilité du sol.

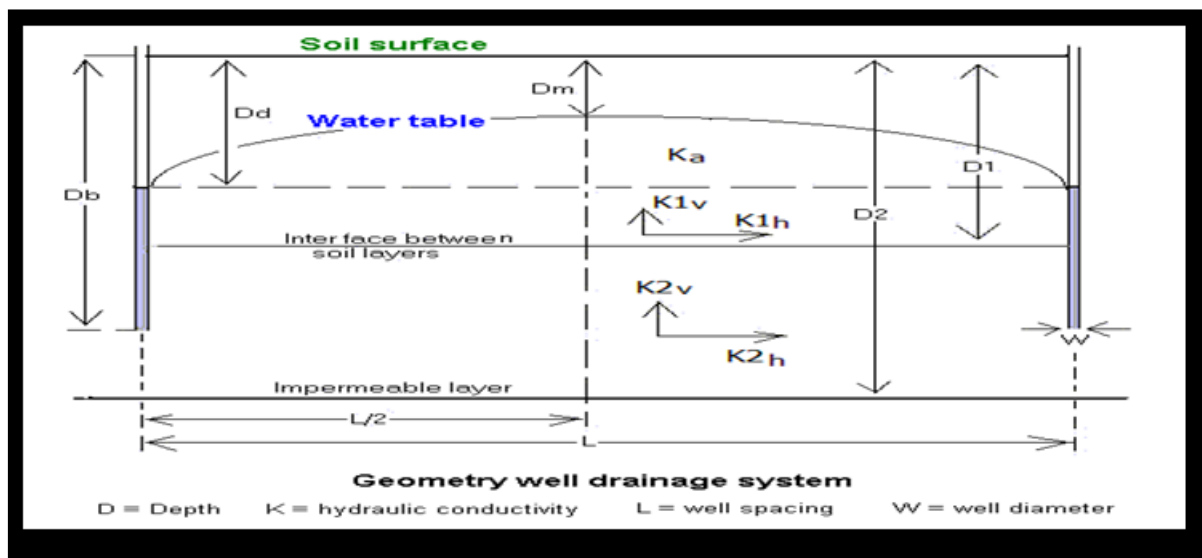


Figure IV-1 : Paramètres d'un drainage vertical.

Drainage bio drainant (drainage biologique) : C'est une méthode naturelle de gestion de l'eau dans les sols, qui repose sur l'utilisation de plantes à enracinement profond et à forte consommation d'eau (comme certaines espèces d'arbres ou de graminées) pour réduire le niveau de la nappe phréatique et limiter la remontée des sels à la surface.

Avantages du drainage

- Réduction efficace de la salinité : Le drainage permet d'éliminer les sels solubles accumulés dans la zone racinaire, améliorant la croissance des cultures.
- Amélioration de l'aération du sol : Un bon drainage réduit la saturation en eau et améliore la structure du sol, facilitant le développement racinaire.
- Prévention de la remontée capillaire des sels : En abaissant la nappe phréatique, le drainage limite la remontée des sels à la surface du sol.
- Compatible avec d'autres techniques : Le drainage est souvent combiné avec la lixiviation, les amendements ou la culture de plantes tolérantes au sel pour de meilleurs résultats.

Limites du drainage

- Coût élevé d’installation : Les systèmes de drainage souterrain (tuyaux, tranchées, pompes) peuvent être coûteux à installer et à entretenir, surtout dans les grandes exploitations.
- Risque de pollution secondaire : L’eau de drainage contenant des sels et parfois des produits chimiques peut contaminer les nappes phréatiques ou les cours d’eau voisins.
- Nécessité d’un bon système de gestion de l’eau : Sans une irrigation adéquate pour accompagner le drainage, les sols peuvent se resaliniser rapidement.
- Pas adapté à tous les types de sol: Dans les sols très argileux ou imperméables, l’installation d’un système de drainage efficace peut être difficile ou inefficace.
- Maintenance continue requise : Les drains peuvent se boucher ou s’ensaver, nécessitant une surveillance et un entretien réguliers.

IV.2.2. Le lessivage :

Le lessivage est une technique qui consiste à dissoudre les sels accumulés dans le sol par des apports d’eau importants et à les entrainer en dessous de la zone racinaire par le mouvement descendant de l’eau.

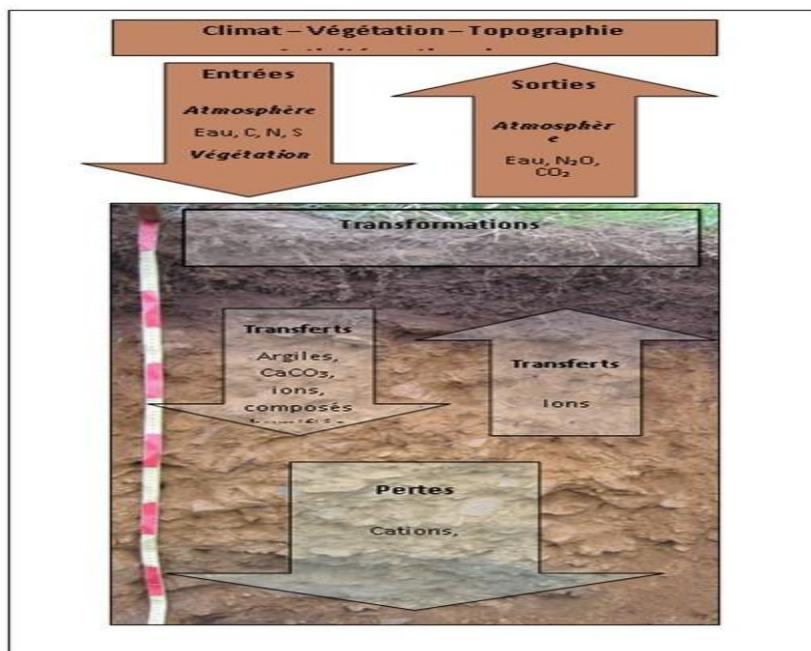


Figure IV-2 : Lessivage de sol

Le principe de lessivage est :

- Irrigation contrôlée : Apport d’eau en excès pour saturer le sol.

- Drainage efficace : Les sels dissous sont évacués par un système de drainage (drains souterrains, fossés, ou pentes naturelles).
- Éviter la remontée capillaire : Un bon drainage empêche les sels de revenir en surface par évaporation.

Facteurs Influençant l'Efficacité du lessivage :

- Texture du sol :

Sols sableux : Permettent un drainage rapide, donc plus de lessivage.

Sols argileux : Retiennent l'eau et les sels, moins perméables, donc lessivage plus lent. La structure du sol (compaction, présence de croûtes) influence aussi l'infiltration.

- Qualité de l'eau d'irrigation : Une eau faible en sels (ex : eau de pluie) est idéale.

Avantages du lessivage

- Réduction de la salinité : Élimine les sels solubles, améliorant ainsi la structure et la fertilité du sol.
- Amélioration de la croissance des plantes : En abaissant la concentration en sels, les racines peuvent mieux absorber l'eau et les nutriments.
- Prévention de la remontée capillaire : Diminue le risque de salinisation de surface.

Limites et précautions

- Consommation d'eau : Le lessivage nécessite de grandes quantités d'eau, ce qui peut être problématique dans les régions arides.
- Risque de lessivage des nutriments : Une application excessive d'eau peut entraîner la perte de nutriments essentiels, tels que les nitrates et les phosphates.
- Nécessité d'un drainage efficace : Pour que le lessivage soit efficace, il doit être accompagné d'un système de drainage permettant l'évacuation des eaux salées.

IV.2.3. La substitution du sol :

La substitution des sols salins vise à traiter les sols présentant une accumulation excessive de sels solubles, tels que le sodium, le calcium, le magnésium, le potassium, le chlore, le sulfate, le carbonate et le bicarbonate. Cette accumulation peut entraîner une détérioration des conditions physiques du sol, notamment une réduction de la perméabilité, une dispersion des argiles et une formation de croûtes superficielles. Ces effets nuisent à la stabilité des structures construites sur ces sols. Cette méthode consiste à remplacer partiellement ou totalement le sol salin par un autre sol plus fertile ou moins salin. L'objectif principal de cette méthode consiste à 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.

Avantage :

Amélioration rapide de la fertilité du sol : Remplacer les couches salines permet une amélioration immédiate des conditions de culture.

Amélioration de la structure du sol : En particulier si le sol apporté est riche en matière organique ou bien structuré.

Efficace même dans des situations extrêmes : Utile lorsque les autres méthodes de réhabilitation (lessivage, amendement chimique) ont échoué.

Limite :

Coût élevé : Le transport et l'apport de nouveaux sols peuvent être très coûteux.

Main-d'œuvre et logistique : Travaux mécaniques lourds, souvent nécessitant des engins spécialisés.

Risque de déséquilibres : Incompatibilité entre le sol d'origine et le sol substitut (pH, structure, activité biologique).

Durabilité incertaine : Si les causes de la salinisation (irrigation inappropriée, mauvais drainage) ne sont pas traitées, le problème peut réapparaître.

IV.3. Méthodes chimiques de désalinisation des sols

IV.3.1. Traitement par le gypse

La plupart des sols sodiques ont besoin d'amendements chimiques pour retrouver leur productivité. Il existe un grand nombre d'amendements qui peuvent être utilisés. Le gypse et le soufre sont les plus communs. Comme la plupart des amendements sont coûteux, il est toujours bon de faire analyser le sol pour déterminer le type et la quantité nécessaires.

Il n'est pas toujours indispensable d'apporter des amendements pour améliorer des sols sodiques. Certains sols sodiques, par exemple, contiennent du sulfate de calcium (gypse) et, lorsqu'ils sont lessivés. L'eau dissout le gypse et libère le calcium. Ce calcium dissous remplace le sodium adsorbé. Les sels de sodium formés par réaction peuvent être enlevés par lessivage.

Dans les sols calcaires, le risque est faible car le calcium se fixe sur le complexe absorbant. On rappelle ici que les divalents, en particulier Ca^{2+} sont absorbés préférentiellement aux monovalents, en particulier Na^+ .

C'est très important. En effet, la solubilité naturelle de CaCO_3 dans une eau, même très salée, suffit pour que le complexe absorbant soit saturé à 50 % par du Ca^{2+} .

La proportion monte à 80 % si l'eau n'est que faiblement minéralisée. On peut utiliser H_2SO_4 qui acidifie le milieu ce qui favorise la dissolution des carbonates et fournit au milieu des ions Ca. Mais c'est difficile, et la rentabilité n'est pas démontrée.

IV.3.2. Traitement par l'acide sulfurique

Une autre option est l'utilisation de l'acide sulfurique, quand le sol contient du CaCO_3 , le principe est de dissoudre du CaCO_3 pour libérer du calcium. Cette option, utilisée à grande échelle en URSS et aux États Unis, est en cours de développement rapide dans certains pays comme le Maroc, par contre l'Algérie connaît un terrible retard.

IV.4. Méthodes biologiques de désalinisation des sols

Les techniques de phytoremédiation exploitent les propriétés de certaines espèces végétales (strates herbacées, plantes, arbustes, arbres, algues) à interagir avec des composés chimiques organiques ou minéraux pour dépolluer un terrain contaminé. La biomasse produite peut contenir le polluant (tiges, feuilles) et doit être traitée d'une façon adéquate, qui revient souvent à récolter les végétaux pour les incinérer.

IV.4.1. Techniques de phytoremédiation

Différents types de phytoremédiation peuvent être utilisés selon le type et l'étendue de la contamination. Les types de phytoremédiation sont mentionnés ci-dessus :



Figure IV-3 : Schéma représente la phytoremédiation

La phytoextraction :

La phytoextraction, également appelée phytoabsorption et phytoaccumulation, se produit lorsque les plantes absorbent les contaminants du sol et l'eau par leurs racines et accumulent de la biomasse par translocation. Il s'agit d'un processus fascinant où les plantes absorbent et accumulent les polluants du sol ou de l'eau dans leurs racines, leurs tiges ou leurs feuilles aériennes. Cette méthode repose sur la capacité des racines à absorber les éléments du milieu environnant et à les transporter vers les parties aériennes de la plante. Certaines plantes, dites hyper accumulatrices, excellent dans ce domaine, démontrant une remarquable capacité d'absorption et de stockage des polluants.

Phytodégradation :

Absorption et décomposition des contaminants par la libération d'enzymes et par des processus d'oxydation et de réduction. Les polluants dégradés, donc moins toxiques, sont ensuite incorporés dans la plante ou libérés de nouveau dans le sol. Polluants concernés : composés organiques (hydrocarbures, pesticides, explosifs...).

Phytovolatilisation :

Transformation et dégradation de certains types de polluants en éléments volatils moins toxiques, qui sont ensuite libérés dans l'atmosphère par transpiration de la plante. Polluants concernés : quelques composés organiques et métaux (sélénium, mercure).

La phytostabilisation :

C'est une méthode essentielle pour limiter le mouvement et la dispersion des contaminants dans le sol. Ce processus consiste pour les plantes à immobiliser les éléments lessivables en les adsorbant et en les fixant à leurs structures, formant ainsi une masse stable empêchant les toxines de réintégrer l'environnement. En fixant les contaminants aux particules du sol près de leurs racines, les plantes réduisent efficacement la disponibilité de ces polluants pour leur absorption par d'autres plantes ou par l'homme. Contrairement à la phytoextraction, qui consiste à extraire les contaminants dans les tissus végétaux, la phytostabilisation se concentre sur la séquestration des polluants dans la matrice du sol.

Avantages de phytoremédiation

La phytoremédiation offre plusieurs avantages par rapport aux méthodes de remédiation conventionnelles, notamment :

- Option écologique : Parce qu'elle peut réduire l'exposition de l'environnement et de l'écosystème aux polluants, c'est une méthode écologique.
- Applicabilité et facilité d'élimination : Cette technique est facile à éliminer et peut être utilisée dans de nombreux domaines.
- Réduction de l'érosion et de la propagation : En stabilisant les métaux lourds, elle réduit le risque de propagation des polluants et limite l'érosion et le lessivage des métaux.
- Amélioration de la fertilité des sols : En introduisant différentes matières organiques dans le sol, elle peut également améliorer sa fertilité.

Limites de phytoremédiation :

- La phytoremédiation présente également des inconvénients, tels que :
- Relocalisation et non élimination : La phytoremédiation consiste à relocaliser les métaux lourds dangereux plutôt qu'à les éliminer de l'environnement.
- Portée limitée : Seules la surface et la profondeur occupées par les racines permettent la phytoremédiation.
- Croissance lente et biomasse limitée : Cette croissance lente et cette biomasse limitée nécessitent un engagement à long terme.

- Polluants impossibles à éviter complètement : Les approches de remédiation végétale ne peuvent pas éliminer complètement les fuites de polluants dans les eaux souterraines.
- Impact sur la survie des plantes : La toxicité des terres polluées, ainsi que la qualité globale du sol, affectent leur viabilité.
- Liaison des métaux à la matière organique : Lorsqu'une plante absorbe des métaux lourds, ceux-ci peuvent se lier à la matière organique du sol, ce qui rend leur élimination difficile.

IV.5. Méthode électrique de désalinisation des sols

IV.5.1. Traitement électrocinétique :

Définition : La méthode électrocinétique est une technique émergente qui a démontré un potentiel considérable pour l'élimination efficace et efficiente des contaminants organiques et inorganiques des sols à grains fins, peu perméables. Cette méthode prometteuse a été le sujet de nombreuses études en laboratoire, concernant son application sur plusieurs types de polluants (métaux) pour vérifier l'efficacité de cette technique dans le traitement des sols.

Le principe de base de l'électro-remédiation est de permettre le déplacement des espèces chimiques variées dans les sols sous un champ électrique entre deux ou plusieurs électrodes. Lorsqu'un potentiel électrique est appliqué, des processus électrocinétiques sont générés, tels que : électro-osmose, électromigration et électrophorèse (Acar et Alshawabkeh, 1993), ce qui conduit au transport des contaminants vers leurs électrodes de charge opposée, d'où leur récupération.

Électroosmose : le mouvement du liquide par rapport à la phase immobile (matrice solide). Le flux électroosmotique est lié au mouvement de la charge en excès de la surface des particules dans la direction du champ électrique. Comme l'eau est un fluide visqueux, le mouvement des ions chargés entraîne les molécules d'eau par couplage visqueux, ce qui conduit à un écoulement net d'eau dans la direction du champ électrique.

Électrophorèse : mouvement des particules chargées ou de colloïdes

Électromigration : transport d'ions chargés ou de complexes d'ions dans la solution

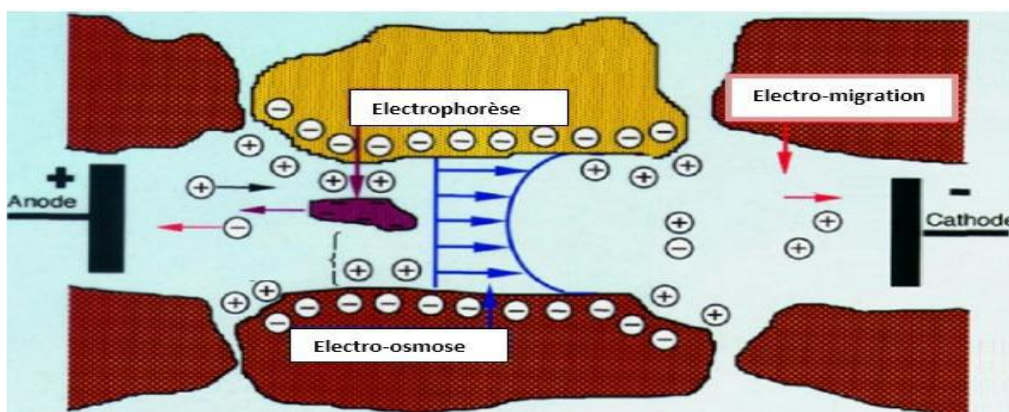


Figure IV-4 : Le traitement électrochimique

Avantage:

Simplicité : Facile à utiliser avec l'installation d'un équipement simple.

Sûreté : Exposition minimale aux personnels de fonctionnement et à l'environnement.

Economique : Peu de demande énergétique.

Flexible : Peut être employé au laboratoire et sur le terrain pour une vaste gamme de milieux : des sols, des boues, des dépôts et/ou des eaux souterraines et pour plusieurs types de contaminants (métaux, composés organiques...).

Limite :

Le traitement électrocinétique est limité par la solubilité du polluant et sa désorption. Le contrôle du pH est critique, afin d'éviter la précipitation du contaminant au voisinage de la cathode, en provoquant leur immobilisation. L'humidité du sol doit être suffisante pour assurer le transport des contaminants. La difficulté de généralisation des conditions de traitement pour tous les types de sols et de polluants.

IV.6. Conclusion :

La lutte contre la salinisation des sols est essentielle pour préserver les sols, surtout dans les zones arides et semi-arides. Bien que les techniques de traitement soient nombreuses, leur efficacité dépend fortement d'une bonne planification, d'une gestion rigoureuse de l'eau, et de la connaissance fine du sol concerné. Dans ce chapitre, les différentes méthodes de désalinisation des sols, qu'elles soient physiques, chimiques ou biologiques sont détaillées.

Chapitre V :

**Application des méthodes d'aide à la décision multicritères
pour la désalinisation des sols**

Chapitre V Application des méthodes d'aide à la décision multicritères pour la désalinisation des sols**V.1. Introduction :**

L'analyse multicritère est un outil d'aide à la décision développé pour résoudre des problèmes multicritères complexes qui incluent plusieurs aspects qualitatifs et quantitatifs dans le processus décisionnel. Le domaine de l'optimisation multicritère connaît une évolution importante. Cette évolution s'est traduite par le développement d'un grand nombre de méthodes multicritères.

Dans ce chapitre, notre travail consistera à définir ce qu'est la décision, d'aborder les thématiques de la décision, de l'aide à la décision et l'analyse multicritère. Par la suite on va décrire quelques méthodes d'analyse multicritères. Finalement on va appliquer des méthodes d'aide à la décision multicritères afin de sélectionner la meilleure alternative pour la désalinisation des sols.

V.2. Décision et aide à la décision**V.2.1. Décision**

L'étymologie du mot décider vient du Latin « déciderer » qui veut dire « trancher » et plus anciennement de « caederer » signifiant « couper ». Ils existent plusieurs définitions qui ont essayé de définir le terme « Décision ». Elle peut être définie comme un processus durant lequel un individu ou un groupe d'individu effectue un choix entre plusieurs possibilités susceptibles de résoudre un problème donné.

« Une décision est une action qui est prise pour faire face à une difficulté ou répondre à une modification de l'environnement, c'est à dire pour résoudre un problème qui se pose à l'individu ou à l'organisation » Adla (2010)

« Une décision est le résultat d'un processus mental qui choisit une parmi plusieurs alternatives mutuellement exclusives » Boudraa (2012)

Pour la plupart des écoles rationalistes-analytiques, la décision est définie comme un choix entre plusieurs possibilités. Pour d'autres aussi la décision est un processus de sélection de buts et d'alternatives. Le terme décision admet plusieurs définitions, il est assimilé à un acte, une action ou un processus de résolution d'un problème auquel l'on est confronté.

estiment que « la décision est souvent présentée comme le fait qu'un individu souvent isolé (décideur) qui exerce librement un choix entre plusieurs possibilités d'actions à un moment donné dans le temps ». Selon Mintzberg (1993), une décision, qu'elle soit individuelle ou le résultat d'un groupe de travail, peut être définie comme « l'engagement dans une action, c'est à dire, une intention explicite d'agir ». Pour beaucoup de décideurs une décision n'est qu'un choix : « A decision is a conscious choice between at least two possible courses of action »

« La prise et l'exécution des décisions sont les buts fondamentaux de toute organisation, de tout management. Toute organisation dépend structurellement, de la nature des décisions qui sont prises en son sein et non par des décideurs, qu'ils soient individuels ou collectifs »

Enfin selon Simon(1982), «les différentes prises de décision au sein d'une organisation permettent de les répartir au sein de cette dernière sur une échelle graduée qui va du moins normalisés au plus normalisés».

V.2.2. Aide à la décision :

L'aide à la décision a été défini par Boudraa(2012) comme étant : « l'activité de celui qui prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponses aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision, éléments concourants à éclairer la décision et normalement à recommander, ou simplement à favoriser , un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et les systèmes de valeurs au service desquels cet intervenants se trouve placé d'autre part»

L'aide à la décision est un processus qui se sert d'un ensemble d'informations collecté, disponible à un moment donné dans le but de formaliser un problème et aboutir à la résolution de ce problème à travers la prise d'une décision jugée adéquate.

« L'aide à la décision utilise des moyens, techniques et méthodologiques issues du domaine des mathématiques appliquées telles que l'optimisation, les statistiques, la théorie de la décision ainsi que des théories des domaines moins formels telles que l'analyse des organisations et les sciences cognitives » Zaraté (2005).

« L'aide à la décision correspond à une démarche constructive dans laquelle, on considère que les performances des intervenants sont souvent conflictuelles, peu structurées et appelées à évoluer au sein du processus et influencées du fait même de la mise en œuvre du modèle. » Hamdadou(2008).

V.3. Typologie des décisions

Plusieurs chercheurs qui s'intéressent à la décision ont apporté une classification des décisions en fonctions de plusieurs critères. Dans ce qui suit nous allons décrire les différents types de décisions.

V.3.1. Classification de la décision selon le degré de répétition

Simon propose deux types de décisions différentes :

- Les décisions programmées
- Les décisions non programmées

V.3.1.1. Les décisions programmées

Ces décisions sont pour la plupart connues par les acteurs de prise de décision. Leur traitement ne nécessite pas beaucoup d'efforts car elles n'ont pas ou ont peu évolués dans le temps. Il s'agira dans ce cas d'appliquer les procédures correspondantes afin de les résoudre. Elles sont relativement moins coûteuses en temps (Herbet S.,1982).

V.3.1.2. Les décisions non programmées

Une décision non programmée correspond à un nouvel événement. Les acteurs œuvrant dans cette prise de décision doivent procéder à des techniques afin de mieux cerner le problème dans le but de trouver une résolution à ce dernier. Les décisions non programmées sont plus coûteuses en temps mais aussi financièrement car le processus de prise de décision est partiellement maîtrisé ou pas du tout connu dans la plupart des cas (Herbet S.,1982).

V.3.2. Classification selon le degré d'incertitude

Dans ce contexte on peut classer les décisions selon trois types:

V.3.2.1. Les décisions en avenir certain

La prise de ce genre de décision est sans risque, car l'on a déjà été confronté à ce genre de problème. On peut prévoir à l'avance la résolution de ce type de problème. Les décisions certaines sont celles qui portent le moins de conséquences pour toute organisation.

V.3.2.2. Les décisions en avenir incertain

Les décisions à avenir incertain sont celles qui posent le plus de dégâts. D'une part elles sont mal maîtrisées et d'autre part elles sont dans la plupart des cas des décisions importantes et cruciales pour l'organisation. Leur traitement est relativement complexe.

V.3.2.3. Les décisions en avenir aléatoires

Il est quasi impossible de connaître le résultat à l'avance de ce type de problème. Les acteurs procèdent dans ce cas à des simulations dans l'optique de trouver une meilleure solution possible.

V.4. Les acteurs du processus d'aide à la décision

Pour (Hamdadou,2008), un acteur de l'aide à la décision est « tout individu intervenant dans le processus d'aide à la décision ». On distingue plusieurs acteurs dans un processus d'aide à la décision. (Hamdadou,2008)

- Le décideur : La personne qui est assistée par l'aide à la décision.
- L'homme d'étude (l'analyste) : Un individu ou un groupe d'individu dont le rôle est l'établissement d'un système de préférence, le choix du modèle d'aide à la décision, établissement des recommandations et conseils pour le décideur.

- Les intervenants : Les entités qui interviennent dans le processus de prise de décision et qui conditionnent directement la prise de décision.
- Les agis : Ils sont quand à eux concernés directement par les conséquences de la décision prise.
- Les demandeurs : Ils demandent l'étude et allouent les moyens
- Le négociateur : Il est mandaté par un décideur pour faire valoir la décision (point de vue) de celui-ci dans une négociation.
- Le médiateur : Il intervient dans le processus de prise de décision pour aider le décideur ou le négociateur en vue de la recherche d'un compromis.
- L'arbitre : L'arbitre ou le juge intervient quant à lui en se substituant aux acteurs dans la recherche du compromis.

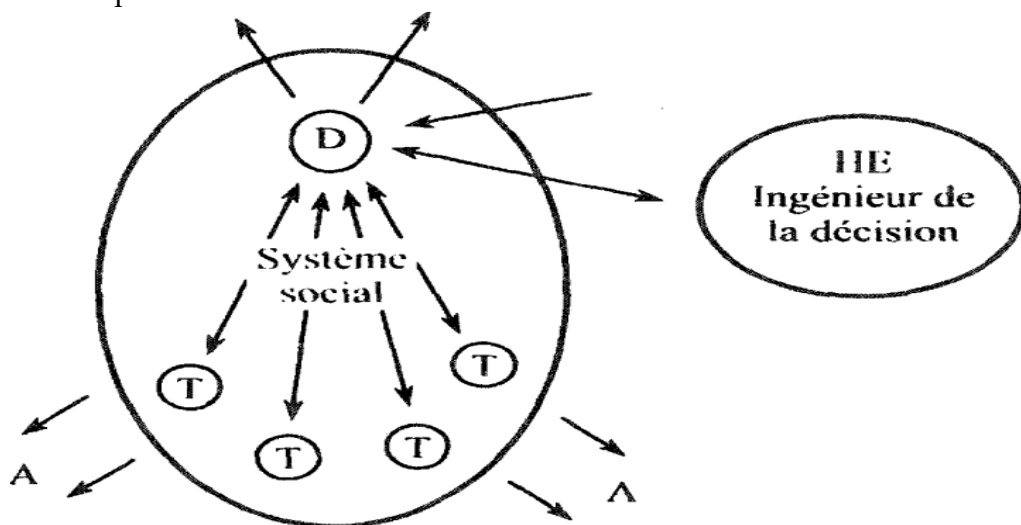


Figure V-1 : Acteurs impliqués dans un processus de décision

Tableau V-1 : Rôles du décideur et de l'analyste

le décideur	L'analyste
-décision -réalité -responsabilité -facteurs d'influence -objectifs	-analyse -modèle -aide, assistance -fonctions, contraintes -critères d'évaluation

Le processus de prise de décision doit obligatoirement passer par 5 étapes :

- Détermination des objectifs
- Recherches des alternatives et collectes de données
- Comparaison des alternatives
- Exécution de la décision
- Suivi de l'exécution et évaluation des résultats

Quelque soit le choix du nombre on peut considérer qu'un processus de décision doit obligatoirement passer par ces étapes qui sont nécessaires (Figure 2) :

- Reconnaissance du problème
- Analyse du problème
- Formulation d'alternatives
- Sélection de la meilleure alternative
- L'implémentation du choix
- Le contrôle du résultat

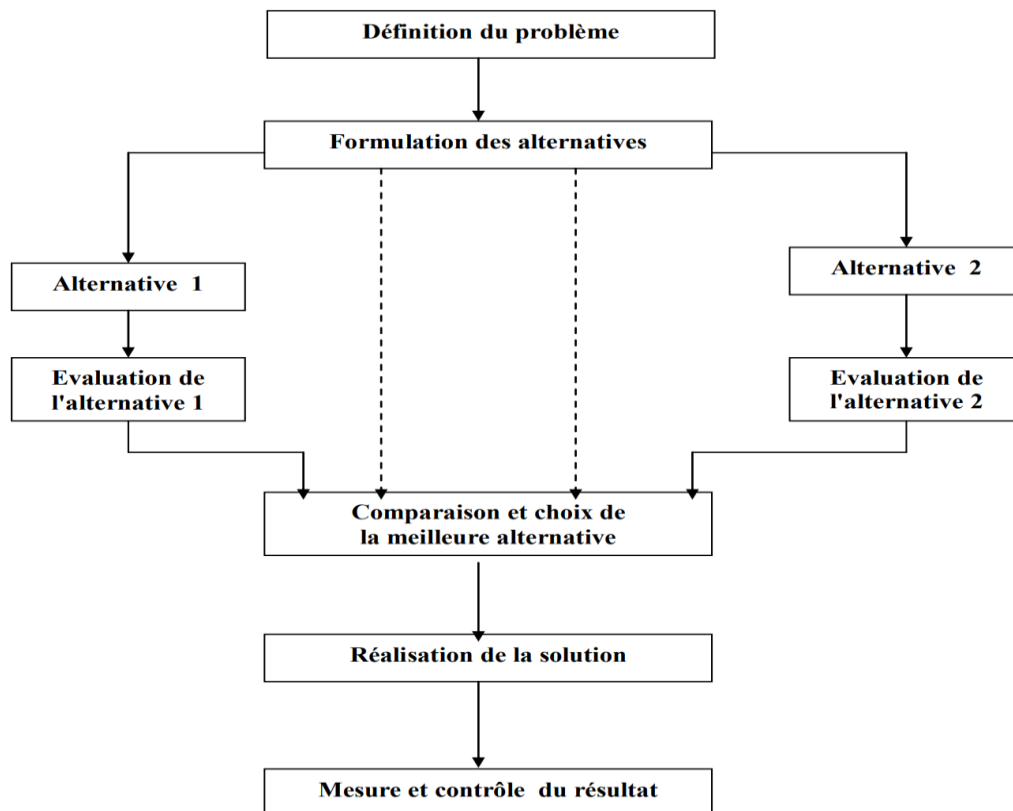


Figure V-2 : Étapes de prise de décision Doutriaux J,(1980)

V.5. Analyse multicritère

L'analyse multicritère est une méthode d'aide à la décision qui permet d'évaluer et de comparer différentes alternatives en fonction de plusieurs critères, souvent contradictoires. Elle est utilisée dans divers domaines tels que l'économie, l'environnement, la gestion de projet, l'urbanisme, etc.

Critère :

Un critère est principe, un élément de référence qui permet de juger, apprécier, estimer ou de définir un objet. Un critère est une conception permettant de comparer et d'évaluer des actions potentielles selon un point de vue défini.

« Un critère est une référence par rapport à laquelle on mesure la conséquence d'une action, en d'autres termes un critère exprime plus ou moins les préférences du décideur relativement à un attribut donné »

Un critère est « une fonction g , définie dans un ensemble A prenant ces valeurs dans un ensemble totalement ordonné et représentant les préférences du décideur selon un certain point de vue », le choix d'un critère passe obligatoirement par trois les facteurs suivant :

- L'exhaustivité
- La cohérence
- L'indépendance

V.6. L'aide à la décision multicritères

L'aide à la décision multicritère a vu le jour grâce aux nombreux inconvénients que représentent les prises de décisions sur les problèmes uni critère qui se basaient uniquement sur l'aspect économique pour trancher entre les différentes alternatives. Or, les problèmes à critères uniques bien qu'ayant des solutions mathématiques bien posées ne reflètent pas toujours la réalité. Ils sont difficilement modélisables et pratiquement impossibles à comparer entre eux. Dans le cas où une solution satisfaisante existe celle-ci est malheureusement dans la plupart des cas non optimale.

C'est ainsi que pour l'évaluation globale d'un problème, il est nécessaire voir primordial de le décomposer en structurant l'ensemble des critères d'évaluations grâce aux approche multicritères.

On stipule que « l'approche multicritère d'aide à la décision permet de pallier aux restrictions que pose le problème du critère unique en augmentant le niveau de réalisme et de lisibilité ».

Pour Phillippe Vincke(1989), l'aide à la décision multicritère « vise à fournir à un des outils lui permettant de progresser dans la résolution du problème de décision à plusieurs points de vue (critères) souvent contradictoires »

L'aide à la décision multicritère a pour principal objectif d'apporter des solutions et d'éclairer les décideurs sur les problèmes qui ont plusieurs critères qualitatifs et ou quantitatifs, des critères hétérogènes de nature conflictuels.

V.7. Les étapes d'aide à la décision multicritères

Pour Sebastien .B(2004) l'aide à la décision multicritère est une démarche en trois étapes.

1- Étape d'identification des alternatives potentielles : Cette étape permet d'identifier toutes les alternatives et construire l'ensemble A des alternatives potentielles. Cette étape ne converge pratiquement pas car à tout instant une alternative peut apparaître et une autre disparaître.

2- Étape de modélisation des préférences du décideur : Au cours de cette étape des comparaisons sont effectuées entre toutes les alternatives. Deux alternatives sont comparées entre elles grâce à un critère. Un critère est une fonction C réelle, définie sur l'ensemble des alternatives A. Ainsi deux actions potentielles a1 et a2 peuvent être comparées grâce au réel Ca1et Ca2.En fonction de la nature du critère et de son importance on peut lui attribuer un poids.

A l'issue de cette étape le décideur peut modéliser un tableau de préférence dans lequel chaque critère sera évalué.

Dans le tableau à plusieurs entrées les critères sont dans les colonnes et les alternatives sur les lignes. La case C j(ai) donne la performance du ai selon le critère C j.

Tableau V.2 : d'évaluation alternatives/critères1

		Critères					
		C1()	C2()	...	Cj()	...	Ck()
Alternatives	a1						
	a2						
	...						
	ai						
	...						
	an						
		w1	w2	...	wi	...	wk
		Poids					

3- Étape de la procédure d'agrégation : La procédure d'agrégation permet de s'appuyer sur le tableau des alternatives (tableau 2.1) afin de répondre à la problématique posée.

V.8. Les méthodes multicritères

Il existe plusieurs méthodes multicritères d'aide à la décision :

- Méthodes d'agrégation selon l'approche du critère unique de synthèse.
- Méthodes de sur classement selon l'approche du sur classement de synthés.
- Méthodes interactives selon l'approche du jugement local interactif.

V.8.1. La méthode AHP :

Analyse hiérarchique des procédés en anglais Analytical Hierarchy Process (AHP) est une méthode d'analyse d'aide à la décision multicritère créé dans les années 1970 par le mathématicien Thomas Saaty. L'AHP est préconisé pour résoudre des problèmes complexes avec une décision multicritères. La force de cette approche est qu'elle organise les facteurs de manière structurée tout en donnant une solution relativement simple pour les problèmes de prise de décision. Elle permet de décortiquer un problème d'une manière logique en passant d'un niveau supérieur à un niveau inférieur jusqu'à parvenir à une comparaison simple pour chaque paire de critères, par la suite on peut remonter au niveau supérieur pour la prise de décision.

V.8.1.1. Les différentes étapes de la méthode AHP :

La méthode AHP est effectuée suivants quatre étapes qui sont :

Étape 1 : Décomposer le problème en une structure hiérarchique

L'application de la méthode AHP commence d'abord par la décomposition du problème en une hiérarchie de critères afin d'être plus facilement analysé et comparé de manière indépendante. Cette hiérarchisation permettra aux différents décideurs de mieux évaluer les alternatives en faisant des comparaisons par paires pour chacun des critères choisis.

Cette première étape a pour but de :

- Définir l'objectif (niveau 0)
- Définir les critères de décision (niveau 1)

Le dernier niveau de la hiérarchie comprendra les différentes alternatives choisies au préalable (niveau 2).

Étape 2 : Effectuer les combinaisons binaires niveau par niveau

La structuration des priorités consiste en la création d'un couplage de comparaison matricielle rempli de nombres considérés comme l'importance relative entre les éléments.

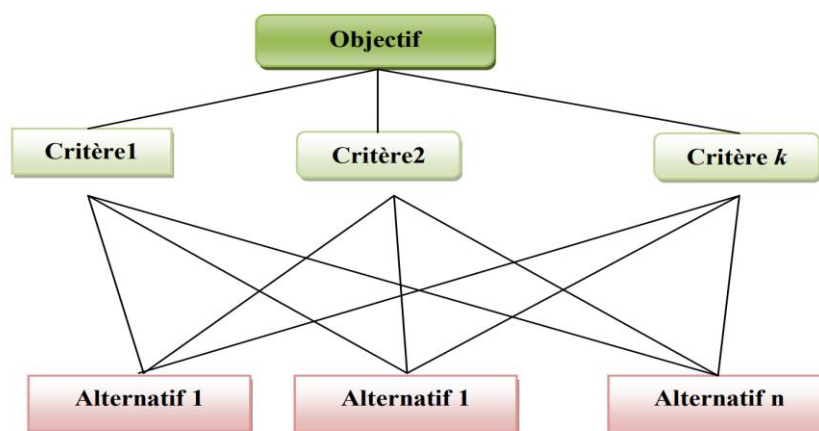


Figure V-3 : Structuration hiérarchique

Étape 3 : Déterminer les priorités

Cette étape permet de :

Calculer l'importance relative de chacun des éléments de la hiérarchie à partir des évaluations obtenues de l'étape 2

Détermination des priorités des éléments de chaque matrice se fait par la résolution du problème de vecteur propre.

Étape 4 : Synthétiser les priorités

Une fois que les priorités pour tous les critères figurant dans la hiérarchie ont été déterminées, le poids de chaque alternatif est calculé et un classement des alternatifs est réalisé.

V.8.1.2. Avantages de la méthode AHP

Les principaux avantages de la méthode AHP sont :

Structure hiérarchique : tri les éléments d'un problème dans différents niveaux et dans des groupes à caractéristiques similaires.

Identification des priorités : permet de considérer la priorité relative de chaque critère pour ainsi obtenir le meilleur alternatif selon l'objectif identifié.

La comparaison binaire des éléments (alternatives, critères, et sous critères).

V.8.1.3. Pondération des critères par la méthode AHP

Dans le cadre de ce travail, la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) 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'une recherche approfondie, et après un entretien avec des experts du domaine, dans le but de pouvoir déterminer les aspects les plus pertinents à considérer pour évaluer les méthodes de désalinisation des sols. Les critères qui ont été sélectionnés dans cette étude sont les suivants :

- L'Efficacité : capacité de la méthode à réduire efficacement la concentration en sels dans le sol.
- Le Coût : dépenses totales associées à la mise en œuvre de la méthode, y compris les coûts initiaux, d'exploitation et de maintenance.
- La Durabilité : capacité de la méthode à offrir des résultats à long terme sans nécessiter des interventions fréquentes.
- L'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.
- L'Espace nécessaire : surface de terrain requise pour la mise en œuvre de la méthode, critère crucial en milieu industriel ou contraint.
- L'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.

V.8.1.3.1. 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 Saaty, qui va de 1 (importance égale) à 9 (extrême importance d'un critère sur un autre). Les critères sont comparés deux à deux, en fonction de leur pertinence dans le contexte spécifique du projet de désalinisation.

Tableau V-2 : Matrice de comparaison paires des critères selon l'expert

critères	efficacité	cout	durabilité	Impact environnemental	espace	amélioration
efficacité	1	3	5	7	5	3
cout	1/3	1	3	5	3	1
Durabilité	1/5	1/3	1	3	2	1/3
Impact environnemental	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	3	3	5	3	1

V.8.1.3.2. 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.

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

Tableau V-3 : Matrice des critères avec leurs poids AHP

Critère	Poids AHP
Efficacité	0.4176
Cout	0.1905
Durabilité	0.0911

Impact environnemental	0.0373
Espace	0.0730
Amélioration du sol	0.1905

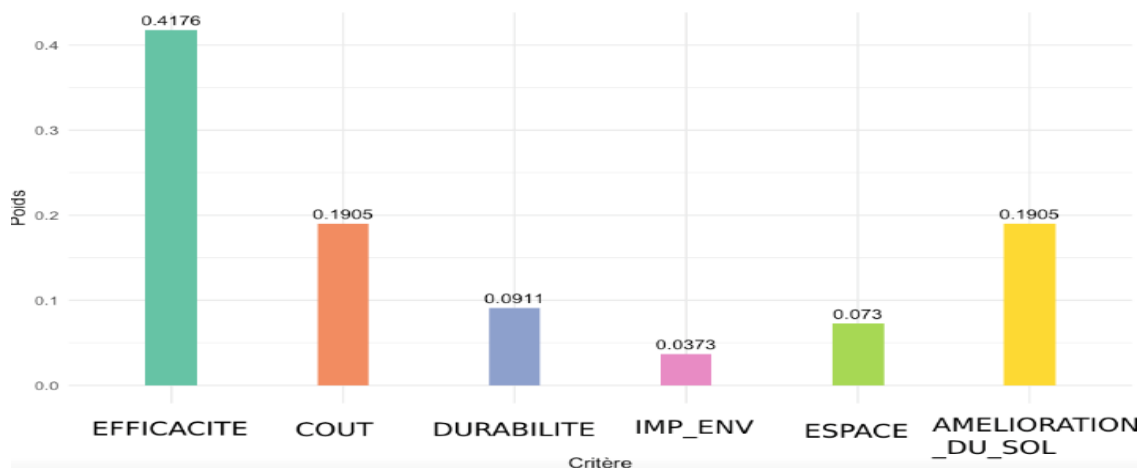


Figure V-4 : Poids des critères (methode AHP)

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.

V.8.1.3.3. 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.

V.8.2. La méthode PROMETHEE II

La méthode PROMETHEE (Preference Ranking Organisation Méthodes for Enrichement Evaluation) a été proposée pour la première fois en 1982 par Jean Pierre Brans¹. Elle fait partie de la famille des méthodes de surclassement value, pour lequel deux traitements mathématiques

particuliers sont proposés: le premier permet de ranger les actions en un proèdre partiel et qui mène à l'in comparabilité (méthode PROMETHEE I), le second permet de ranger les actions potentielles selon un proèdre total (méthode PROMETHEE II).

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

- Enrichissement de la structure de préférence :

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

- Enrichissement de la relation de dominance :

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

- Aide à la décision :

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

V.8.2.1. Les trois phases de la méthode PROMETHEE:

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

1-Choix de critère généralisés :

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

2-Détermination d'une relation de surclassement :

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

3-Evaluation des préférences :

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

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

Type I : critère usuel

La fonction type I est généralement employée lorsque les données présentent un caractère discret tel un classement ou ordinal ou encore une valeur de type tout ou rien. Dans ce cas, dès qu'il y a un

écart, il y a préférence stricte pour l'action ayant l'évaluation la plus élevée. Si le décideur choisit le type I pour un critère particulier, il ne doit fixer aucun paramètre.

Type II : quasi-critère

La fonction type II est employée lorsque les seuils d'indifférence sont clairement apparents dans les données du problème posé. Les actions a_1 et a_2 sont dans ce cas indifférentes aussi longtemps que l'écart $d_j(a_1, a_2)$ ne dépasse pas un seuil q_j , et au-delà de ce seuil, la préférence est stricte. Ici, il faut fixer le seuil d'indifférence q_j . Ce type de critère provient de la notion de quasi-ordre introduit par Luce D.

Type III : critère à préférence linéaire

La fonction type III est généralement employée lorsque les données sont telles que les écarts entre elles présentent un caractère continu, ou encore lorsque toutes les valeurs intermédiaires entre les valeurs maximales et minimales de ces écarts sont possibles. Un tel critère permet au décideur de préférer progressivement a_1 à a_2 en fonction de l'écart observé entre $f_j(a_1)$ et $f_j(a_2)$. Le degré de préférence croît alors jusqu'à ce que le seuil P_j soit atteint, et au-dessus de ce seuil, la préférence est stricte. Dans ce cas, le seul paramètre à fixer est le seuil de préférence stricte.

Type IV : critère à paliers (Pseudo)

La fonction type IV est parfois employée dans des cas d'espèce, en particulier lorsqu'on peut affirmer qu'un candidat n'est à la fois ni strictement préféré à un autre, ni indifférent. Ce candidat caractérisé par un écart donné par rapport à un autre se verra attribuer $\frac{1}{2}$ point.

Deux actions a_1 et a_2 sont ici considérées comme indifférentes aussi longtemps que l'écart entre $f_j(a_1)$ et $f_j(a_2)$ ne dépasse pas q_j ; entre q_j et p_j , le degré de préférence est faible, et au-delà de p_j , la préférence devient stricte. Il y a donc ici deux paramètres à fixer.

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

La fonction type V est employée lorsque les seuils d'indifférence et de préférence stricte sont clairement apparents dans les données du problème multicritère posé. Dans ce cas-ci comme dans le précédent, a_1 et a_2 sont considérées comme indifférentes aussi longtemps que l'écart entre $f_j(a_1)$ et $f_j(a_2)$ ne dépasse pas q_j ; au-delà de ce seuil, le degré de préférence croît linéairement avec d_j jusqu'à atteindre un seuil de préférence stricte à partir de p_j . Ici encore, deux paramètres doivent être fixés.

Type VI : critère gaussien

La fonction type VI (distribution gaussienne) est la fonction la plus employée dans les applications pratiques et est particulièrement indiquée en cas d'un nombre de candidats suffisamment élevé (en principe minimum 30). Dans ce cas il convient de calculer l'écart type σ de cette distribution. Dans ce cas, le degré de préférence croît de façon continue en fonction de d_j , un seul paramètre S_j doit être fixé. Pour un écart égal à S_j , on obtient une préférence moyenne (0.39).

Choix du type de critère généralisé :

- Cas où les évaluations sont des nombres réels mesurés sur une échelle continue : le type V s'adapte bien à la situation car il fait intervenir une zone de préférence stricte et une zone

d'indifférence ; et dans le cas où le décideur pense ne pas devoir tenir compte d'une zone d'indifférence, le type III s'impose.

- Cas où les données sont qualitatives, mesurées sur une échelle discrète, le type IV s'adapte bien à une échelle numérique associée au critère.

- Cas où le décideur veut considérer un degré de préférence positif même si l'écart entre les deux actions est faible, il peut choisir un critère généralisé de type I,

Et s'il souhaite voir croître ce degré de préférence lorsque l'écart grandit, il adoptera le critère

V.8.2.2. Détermination des poids de chaque critère:

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

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

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

V.8.2.3. Avantages et inconvénients de la méthode PROMETHEE II :

Les Avantages:

Les méthodes Prométhée sont parmi les méthodes les plus utilisées dans la catégorie des méthodes de sur classement. Ceci est dû à un certain nombre d'avantages offerts par ces méthodes.

L'introduction de six fonctions de préférence différentes dans un seul et même processus ; il s'agit d'une extension de critère mais de façon bien formalisée.

Cette méthode est parvenue à intégrer de façon simple les développements récents dans la modélisation des préférences.

PROMETHEE II, quoique dépourvue d'une base mathématique, a essayé de combler ce manque en procédant par la systématisation de la fonction de préférence. En effet, le décideur, ayant à choisir la forme de sa préférence parmi six formes, se sentirait plutôt rassuré

La simplicité de Prométhée la place sur une bonne position pour être utilisée si on cherche à ranger des actions potentielles et que le décideur ne trouve pas beaucoup de peine à déterminer les poids des critères.

Bien souvent cette méthode est sujette à des modifications ou des extensions.

Les inconvénients:

- **PROMETHEE II** fait partie de la famille des méthodes de surclassement ; les critiques qui se trouvent dans la littérature s'adressent généralement à cette famille. Néanmoins on peut indiquer quelques critiques qui la concernent directement.
 - Par rapport à Electre III, Prométhée perd des nuances dans l'évaluation des arcs de surclassement (qui expriment par exemple que «a1 est préférée à a2»).
 - En tant que méthode de surclassement de type rangement. Prométhée permet de ranger les actions mais ne permet de rendre compte des différences quantitatives relatives à ces actions.
 - Le fait de prendre des seuils d'indifférence et de préférence constants peut être considéré comme une restriction.

V.8.2.4. 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.

V.8.2.4.1. 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:

- Le lessivage surclasse largement les autres alternatives ($\Phi_{net} = 0.42884568$), il est donc la meilleure option selon cette méthode.
- Le traitement chimique par le gypse représente une alternative dominante mais avec un score inférieur ($\Phi_{net} = 0.12395328$).

Les deux autres méthodes, substitution du sol et phytoremédiation, sont en revanche surclassées par les autres alternatives, avec des flux nets négatifs

Type de fonction : Usuelle (Type I)

Tableau V-4 : Fonctions de Préférences PROMETHEE II Choisis pour Chaque Critère

critère	efficacité	cout	durabilité	Impact environnemental	espace	Amélioration du sol
Fonction de préférence	Critère usuel (type1)	Critère usuel (type1)	Critère usuel (type1)	Critère usuel (type1)	Critère usuel (type1)	Critère usuel (type1)

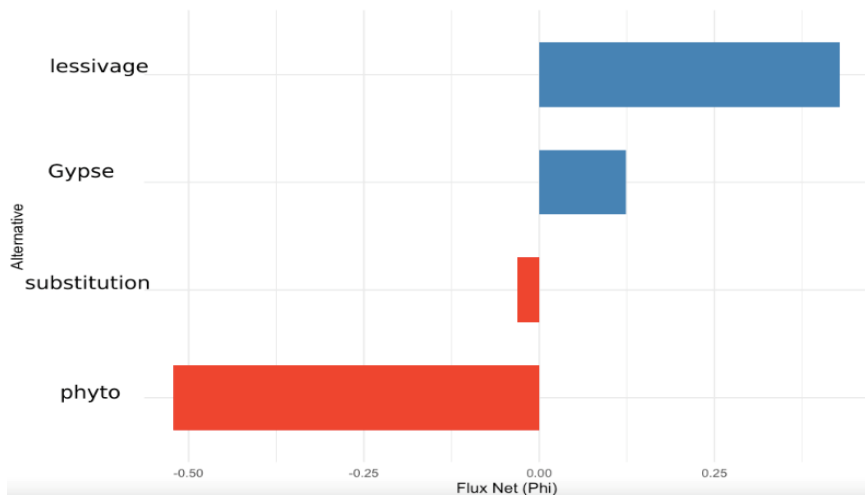


Figure V-5 : Graphe a barre représentant le flux net de surclassement de PROMETHEE II

V.8.2.4.2. 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.

V.8.3. La méthode ELECTRE I

Cette méthode construit une relation de surclassement qui servira à comparer les actions entre elles. Le but est de sélectionner un sous-ensemble d'actions, aussi restreint que possible. Le surclassement par le biais de cette méthode repose sur :

- une condition de concordance : condition imposant qu'une majorité des critères se dégagent en faveur de l'action surclassante.
- une condition de non-discordance : condition imposant qu'il n'existe pas une trop forte pression, dans un des critères de la minorité en faveur du surclassement inverse (Schàrlig 1985, Scharlig 1996).

La méthode ELECTRE I vise à obtenir une partition de A en deux sous ensembles N et A N. N est appelé le noyau du graphe de surclassement (c'est le siège des actions non surclassées) ; La meilleure action est contenue dans N, tel que : toute action du noyau ne se surclassement pas entre elles.

- Toute action hors du noyau est surclassée par au moins une action de N.
- Le déroulement de la méthode se fait comme suit :

1. Définir les critères j de jugement des actions (les critères sont vrais critères).
2. Attribuer à chaque critère j un poids π_j d'autant plus grand que le critère est important.
3. Calculer pour chaque couple d'action (a_i, a_k) l'indice de discordance.

Cet indice $C(a_i, a_k)$ mesure les arguments en faveur de l'affirmation « a_i surclasse a_k » ; e_{ij} : l'évaluation de l'action a_i suivant le critère j. L'indice de concordance est donc donné par la somme

des poids des critères pour lesquels l'action «ai » est au moins égale à l'action « aj » sur l'ensemble des critères.

V.8.3.1. Application de la méthode ELECTRE I

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

V.8.3.1.1. Matrice de Concordance

Tableau V-5 : 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

V.8.3.1.2. Matrice de Discordance

Tableau V-6 : 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

Matrice de Dominance

Tableau V-7 : 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

Noyau (Kernel) :

Lessivage.

Alternatives dominées :

Gypse, Phytoremédiation, Substitution.

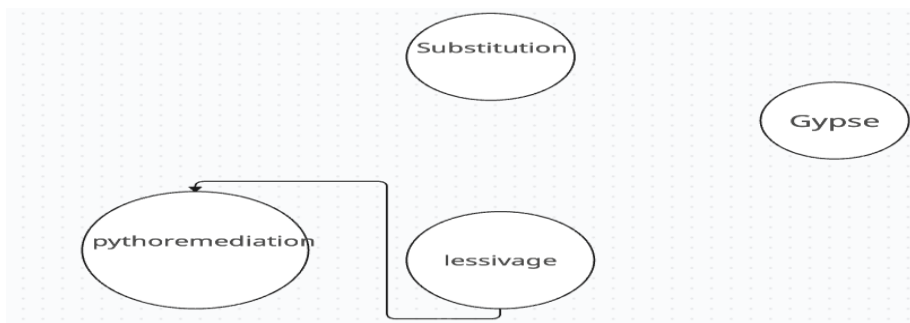


Figure V-6 : Graphe dominance de la méthode ELECTRE I

V.8.3.1.3. 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 l'ajout de gypse, tandis que la Phytoremédiation apparaît comme l'alternative la moins performante, étant dominée dans le processus de surclassement.

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.

V.9. Conclusion :

La désalinisation des sols salins est un défi majeur, notamment dans les régions arides et les terrains semi-arides où l'accumulation de sels altère les propriétés physico-chimiques et mécaniques du sol. 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 des méthodes multicritères (telles que AHP, PROMETHEE II et ELECTRE I) a permis de réaliser une évaluation rigoureuse et croisée des alternatives, offrant ainsi une vision globale et nuancée.. Chaque méthode met en avant un aspect spécifique de la décision. D'autre part, l'utilisation des méthodes multicritères d'aide à la décision permet d'aborder de façon plus objective les problèmes de décision rencontrés dans la vie active. Pour ce faire, la réalité à laquelle fait face le décideur est remplacée par un modèle dans lequel les objectifs du décideur, ainsi que ses préférences, sont représentés de façon quantitative.

CONCLUSION GENERALE

La **salinisation des sols** est un phénomène croissant qui menace et déstabilise tous les écosystèmes. Qu'elle soit d'origine naturelle ou anthropique, le phénomène de salinisation affecte directement la stabilité des fondations, la durabilité des infrastructures et la pérennité des projets d'aménagement.

Face à cette problématique, diverses **méthodes de remédiation** ont été développées. Elles peuvent être de nature **physique** (lessivage, drainage, et substitution), **chimique** (amendements tels que le gypse), **biologique** (phytoremédiation) ou électrique. Le choix de la méthode dépend des caractéristiques du sol, du degré de salinisation, des ressources disponibles et des objectifs de gestion.

Dans ce contexte, les méthodes multicritères d'aide à la décision (MADM) offrent un cadre rigoureux et structuré permettant d'évaluer, de comparer et de hiérarchiser les différentes options de désalinisation. En intégrant à la fois des critères quantitatifs et qualitatifs, ces outils facilitent la prise de décision éclairée, tenant compte à la fois des aspects techniques et des enjeux socio-économiques.

Notre travail a pour objectif d'évaluer et de comparer différentes techniques de désalinisation des sols salins à l'aide des méthodes d'aide à la décision multicritères (MADM), dans le but d'identifier la ou les solutions les plus adaptées à un contexte environnemental donné. En tenant compte de plusieurs critères, tels que l'efficacité technique, le coût, la durabilité, les impacts environnementaux. Ce travail vise à proposer une démarche d'aide à la décision structurée et rationnelle, permettant de guider les acteurs locaux et les décideurs vers une gestion durable et optimisée des sols dégradés par la salinité.

En perspective, il serait pertinent d'appliquer cette démarche multicritère à un cas réel de sol salin afin de valider les résultats obtenus et d'ajuster les critères selon les spécificités du terrain. L'intégration de nouveaux critères tels que l'acceptabilité sociale, la facilité de mise en œuvre ou la disponibilité locale des ressources pourrait enrichir l'analyse. Par ailleurs, une comparaison entre différentes méthodes multicritères (AHP, PROMETHEE, ÉLECTRE) permettrait d'évaluer la robustesse des résultats. Le développement d'un outil numérique interactif faciliterait la prise de décision par les acteurs locaux, en simulant différents scénarios de remédiation. Enfin, un suivi à long terme des solutions appliquées serait essentiel pour mesurer leur efficacité réelle et assurer une gestion durable des sols salinisés.

Référence Bibliographiques :

- **Acar, Y.B., Alshawabkeh, A.N. (1993)**. Principles of electrokinetic remediation. Environmental science and technology, 27(13), 2638-2647.
- **Adla,(2010)**. Adla,"Facilitation pour une prise de decision collective",Thèse de doctorat ,Université de Toulouse, France,2010
- **BOUALLA .N,2012**. Origine de la salinisation des sols de la plaine de M'léta (bordure sud du bassin sebkhia Oran), Journal of Applied Biosciences 53: 3787 – 3796.
- **Boutelli, M.H. (2012)**. Salinité des eaux et des sols au niveau de la sebkhia de Bamendil, caractérisation et conséquences sur l'environnement. Mémoire de magister, Université Ouargla, Algérie.
- **Boudraa.N,(2012)**. Boudraa.N" Élaboration d'un système d'aide multicritères à la décision spatiale de groupe", Memoire de Master,Université Oran 1,Algérie,2012
- **Brans J.P,(1982)**. Brans J.P"Élaboration d'instruments d'aide à la décision : méthode PROMETHEE", colloque d'aide à la décision, Université Laval, Québec, 1982
- **Duchaufour, P. (1977)**. Pédologie. Pédogenèse et classification. Tome 1. 2eme édition. Ed. Masson, Paris, France, 477p.
- **DURAND JH., (1983)**. Les sols irrigables, Agence de coopération culturelle et technique. P.U. France, 190 p.
- **Doutriaux J(1998)**. "Principe d'économie managériale", 1^{er} Ed, Graeton morin, 1998.
- **Daliakopoulos, I. N.(2016)**, Tsanis, I. K., Koutroulis, A., Kourgialas, N. N., Varouchakis, A. E., Karatzas, G. P., & Ritsema, C. J.(2016).“The threat of soil salinity: A European scale review”. Science of the Total Environment, 573, 727-739. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.177.
- **FAO., UNESCO. (1992)**. Un logiciel pour la planification et la gestion des systèmes d'irrigation.
- **Hamdadou,(2008)**. Hamdadou" Un modèle d'aide à la décision en aménagement du territoire, une approche multicritere et une approche de négociation", Thèse de doctorat,Université Oran1, Algerie2008.
- **MOSTEFA .F. (2023), INSID, (2008)**. : thèse de doctorat, Université de Mostaganem, Algérie, Les sols salins en Algérie. Institut national des sols, de l'irrigation et du drainage.
- **KHADRAOUI A, (2010)**.Sols et hydraulique agricole dans les oasis algériennes
- **MARLET, S, et J.O. Job, (2006)**.Processus et gestion de la salinité des sols. In : Tiercelin, J.R. Traité d'irrigation, seconde édition. Tec & Doc Lavoisier. ISBN-13: 978-2743009106.
- **Mintzberg H,(1993)**. Mintzberg H"Structure et dynamique des organisations", 1er Ed, Ed d'organisation, Paris,1993.
- **Maillard, J. (2001)**. Le point sur l'irrigation et la salinité des sols en zone aride: Risques et Recommandations. Handicap International.

Référence Bibliographiques

- **MARLET,(2004).**Processus et gestion de la salinité des sols. In : Tiercelin, J.R. Traité d'irrigation, seconde édition. Tec & Doc Lavoisier. ISBN-13: 978-2743009106.
- **Philippe Vincke,(1998).** "L'aide multicritère à la décision", 1^{er} Ed, Ed de l'université de Bruxelles, Belgique, 1989.
- **Besaim.M,(2019 Slinger, D., Tenison, K. (2007).** thèse de doctorat, Université de Mostaganem, Algérie, Salinity Glove Box Guide: NSW Murray and Murrumbidgee Catchments. NSW Department of Primary Industries.
- Simon H,(1982).** Simon H,"Rational choice and the structure of environment", Models of bounded rationality,Cambridge, 1982.
- **Sébastien Bernard,(2004).**Spécification d'un environnement d'ingénierie collaborative multiste", Thèse de doctorat, Ecole national supérieur d'arts et métiers, Centre d'Aix-en-Provence, 2004.
- Scharlig.A,(1985)** . scharlig.A"Décider sur plusieurs criteres" ;Panorama de l'aide à la decision multicritere vol 1 , Edition PPUR press polytechniques , 1985.
- **U.S.S.L, (1954).** «Diagnosis and improvement of saline and alkali soils». Handbook Number 60.
- **Van Hoorn, J,(1997).** Long-term salinity development in a lysimeter experiment. Agricultural Water Management, 34(1), 47-55.
- Zaraté,(2005).** Zaraté"Des systèmes interactifs d'aide à la décision aux systèmes coopératifs d'aide à la décision ", Thèse de doctorat,Université Toulouse ,France,2005