

Faculty of Sciences and Technology

كلية العلوم والتكنولوجيا

Civil Engineering Department

قسم الهندسة المدنية

N° d'ordre : M2...../GC/2026

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Civil

Option : Matériaux en Génie Civil

Thème

**Comportement mécanique d'un sol salin traité par
du ciment**

Présenté par

ZIANI Ihssene

CHACHAT Halima Hafsa

Soutenu le 28/06/2026 devant le jury composé de :

Pr MISSOUM Hanifi	Président	Université de Mostaganem
Pr MEBROUKI Abdelkader	Examineur	Université de Mostaganem
Dr MOSTEFA Fouzia	Encadrante	Université de Mostaganem
Dr MEKAIDECHE Khalfallah	Co-Encadrant.	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2025-2026

Remerciement

La réalisation de ce mémoire, effectuée au sein du Laboratoire de l'Université de Mostaganem (LCTPE), n'aurait pu aboutir sans le soutien de plusieurs personnes que nous tenons à remercier chaleureusement.

Nous exprimons notre profonde gratitude aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font d'évaluer ce travail :

- *Monsieur le Professeur MISSOUM Hanifi, pour avoir accepté de présider ce jury.*
- *Monsieur le Professeur MEBROUKI Abdelkade, pour l'attention qu'il a bien voulu porter à l'examen de ce mémoire.*

Nous sommes particulièrement reconnaissants envers Mme MOSTEFA F. et M. MEKAIDECHE K. Leurs encouragements constants, leurs relectures attentives et leurs conseils avisés ont été déterminants dans l'élaboration de ce travail.

Nous tenons à saluer la collaboration de M. KHELIFA, Ingénieur de laboratoire, pour son aide technique efficace, ainsi que M. ZAOUI M., directeur du laboratoire LMPC, pour nous avoir ouvert les portes du laboratoire pour la réalisation de nos essais. Nous adressons également nos remerciements au Dr ZALAMT pour son soutien ses orientations précieuses.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'accomplissement de cette étude.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents, aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, la gratitude et le respect que je vous porte. Merci pour vos sacrifices, votre patience, votre soutien indéfectible et vos encouragements tout au long de mon parcours. Que ce travail soit le témoignage de ma profonde reconnaissance et de mon immense affection.

À mes chères sœurs Ikram, Tahani et Ghofran, pour leur amour, leur présence, leurs encouragements et tous les moments de bonheur partagés. Je leur souhaite beaucoup de réussite et de bonheur.

À mon seul et unique frère Islam, pour son soutien, sa confiance et son affection. Merci d'avoir toujours cru en moi.

À mon meilleur ami Abdellatif, pour son amitié sincère, sa fidélité, son soutien moral et les précieux conseils qu'il m'a apportés tout au long de ce parcours. Sa présence a été une véritable source de réconfort et de motivation, ton amitié est un véritable cadeau que je chérirai toujours.

Et enfin, à Kheira, une sœur d'une autre mère, qui a toujours été présente dans les moments importants. Merci pour ton affection, ton écoute et ton soutien constant.

À HSSSEN, pour son soutien et sa collaboration tout au long de ce travail

À toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Je dédie ce mémoire avec toute ma gratitude et mon affection.

Dédicace

Je dédie ce travail

À ceux qui n'ont jamais cessé de formuler des prières à mon égard de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs, à mes parents Nouredine et Latifa.

À mon frère Amjad, à mes sœurs Rihame et Arcua.

À madame Mostefa Fouzia qui n'a jamais cessé de nous encourager, conseiller et surtout de partager ses connaissances avec nous.

À mon binôme Chachat Hafima Hafsa pour son soutien et sa collaboration tout au long de ce travail.

À mon ami Ibrahim, pour son soutien indéfectible tout au long de ce parcours.

À toute personne qui a contribué de près ou de loin pour que ce travail soit possible.

Ihsene.

"تحسين الخصائص الميكانيكية للتربة المالحة المعالجة بالإسمنت"

ملخص :

يُعدُّ تَتمين النفايات، من قبيل الأسمنت منتهي الصَّلاحِيَّة، نهجاً واعداً ومجدياً اقتصادياً وصديقاً للبيئة، لاستصلاح التربة المالحة. إلا أن تطوير هذا النهج يتطلب مقارنة متعددة التخصصات، تدمج بين الهندسة الجيوتقنية وكيمياء المواد

ويهدف هذا البحث إلى تحديد الظروف المثلى لمعالجة تربة مالحة من سهل البرجية (ولاية مستغانم) باستخدام الأسمنت منتهي الصَّلاحِيَّة، إذ تشهد هذه المنطقة حالياً فقداناً كبيراً لأراضيها من جرّاء تفاقم مشكلة التملح. تسعى هذه الدراسة إلى تقييم السلوك الميكانيكي لخليط (التربة-الإسمنت) عند نسب إضافة مختلفة (8% و 12%).

وتُظهر النتائج أن إضافة الإسمنت تحسّن بشكل ملحوظ مقاومة الانضغاط، وتزيد من الكثافة الجافة القصوى للتربة. كما أن هذه المعالجة تُثبت التربة المالحة بفعالية عن طريق الحد التدريجي من قابليتها للانتفاخ وانضغاطيتها، مما يكسبها خاصية قليل الانضغاط. وفي ختام هذه الدراسة، تبين أن نسبة إضافة تبلغ 8% من الإسمنت تُعدّ النسبة المثلى لتحسين التربة المالحة في سهل البرجية.

الكلمات المفتاحية: التربة المالحة، التثبيت، الأسمنت منتهي الصلاحية، خاصية الميكانيكية

"Mechanical behavior of saline soil improved by cement."

Abstract:

The valorization of waste materials such as expired cement represents a promising, economically viable, and environmentally sound approach to remediating saline soils. However, its development requires a multidisciplinary approach, combining geotechnical engineering and materials chemistry.

The objective of this study is to determine the ideal conditions for treating saline soil in the Bordjias Plain (Mostaganem) with expired cement. This plain is currently experiencing considerable soil loss due to salinization.

This study aims to investigate the mechanical behavior of the soil-cement mixture at concentrations of 8% and 12%.

The results demonstrate that the incorporation of cement significantly improves compressive strength and increases the optimal dry density. This treatment effectively stabilizes the saline soil by progressively reducing its swelling potential and compressibility, ultimately resulting in a relatively incompressible soil. At the conclusion of this study, a cement dosage of 8% proves to be the optimal level for stabilizing the saline soil in the plain.

Keywords: saline soil, stabilization, expired cement, mechanical behavior

" Comportement mécanique d'un sol salin traité par du ciment

Résumé

La valorisation de déchets tels que les ciments expirés, représentent une voie prometteuse, économiquement viable et écologiquement pour la remédiation des sols salins. Leur développement nécessite toutefois une approche pluridisciplinaire, associant géotechnique et chimie des matériaux.

L'objet de cette étude consiste à déterminer les conditions idéales de traitement par le ciment expiré d'un sol salin de la plaine des Bordjias (Mostaganem). Cette plaine connaît actuellement une perte considérable de ses terres en raison du problème de salinisation. Cette étude vise à étudier les comportements mécaniques du mélange sol-ciment avec des pourcentage (8 et 12 %).

Les résultats mettent en évidence que l'incorporation de ciment améliore significativement la résistance à la compression et accroît la densité sèche optimale. Ce traitement stabilise efficacement le sol salin en réduisant progressivement son potentiel de gonflement et sa compressibilité, jusqu'à lui conférer un comportement peu compressible. Au terme de cette étude, un dosage de 8 % de ciment s'avère être le taux optimal pour la stabilisation du sol salin de la plaine.

Mots-clés : sol salin, stabilisation, ciment expiré , comportement mécanique,

Table des Matières

Remerciements	vi
Dédicace	ii
ملخص.....	iv
Abstract	v
Résumé	vi
Tableau de matières	7
Liste des figures	10
Liste des tableaux	13
Abréviations	14
INTRODUCTION GÉNÉRALE	15
Chapitre I : Processus, conséquences et enjeux environnementaux de la salinisation des sols.....	18
I.1 Introduction.....	18
I.2 Définition de la salinisation.....	18
I.3. Les causes de salinisation des sols	19
I.3.1. Salinisation primaire	19
I.3.2 Salinisation secondaire	20
I.4. Classification des sols salins.....	21
I.4.1. Sol salin	21
I.4.2. Sol sodique.....	22
I.4.3. Sol Saline-sodique	22
I.5. Indicateurs clés identifiant la salinisation et la sodicité des sols	22
I.6. Risques et Distribution de la salinité dans le monde	24
I.7. Risques et distribution de la salinité en Algérie.....	25
I.8. Conséquences et préjudices engendrés par la salinité du sol.....	27
I.8.1 Effets de la salinité sur la structure des sols	27
I.8.2. Effets de la salinité sur les infrastructures de génie civil	29

I.9. Conclusion	31
Chapitre II : Méthodes de remédiation des sols salins	33
II.1. Introduction	33
II.2. Méthodes et approches de remédiation des sols salins	33
II.2.1. Méthode physique (Sablage)	33
II.2.2. Méthodes hydrologiques (drainage)	33
II.2.2.1. La lixiviation	33
II.2.2.2. Le lessivage de surface des sols salins (flushing)	34
II.2.3. Méthodes chimiques.....	35
II.2.4. Méthode biologique par phyto-désalinisation	38
II.2.4. Traitement électrocinétique des sols.....	39
II.3. Conclusion.....	41
Chapitre III : Identification du sol et protocoles d'essai	43
III.1. Localisation géographique	43
III.2. Facteurs de salinisation des sols de la plaine des Bordjias	44
III.3. Caractéristiques géotechniques	45
III.3.1. Propriétés physiques.....	45
III.3.2. Analyse granulométrique (NF P94-057)	45
III.3.3. Analyse par sédimentometrie (NF P94-057).....	45
III.3.4. Les limites d'Atterberg (NF P94-051).....	47
III.3.4.1. Limite de liquidité W_L.....	47
III.3.4.2. Limite de plasticité (W_P)	47
III.3.5. Valeur en bleu du sol (VBS) et surface active (NF P94-068)	48
III.3.6. Activité des argiles	49
III.3.7. Identification pédologique	50
III.3.7.1. Dosage de carbonates $CaCO_3$ (NF ISO 10693).....	50
III.3.7.2. Potentiel d'hydrogène pH (NF X 31-103)	51

III.3.7.3. La conductivité électrique à l'extrait dilué Ce1/5.....	51
III.3.7.4. Matière organique (MO).....	51
III.3.7.5. Capacité d'échange Cationique (CEC) (AFNOR NF X31-130)	52
III.3.7.6. Le dosage des anions solubles	53
III.3.7.7. Le dosage des bases échangeables	53
III.3.7.8. Minéralogie par diffraction des rayons X et composition chimique.....	54
III.4. Détermination des performances mécanique.....	55
III.4.1. Essai Proctor (NF P 94-093)	55
III.4.2. Essai de compressibilité et consolidation à l'œdomètre (NF P 94-090-1)	56
III.4.3. Essai de compression simple.....	60
III.4.3 Résistance à la compression EN 12390-3.....	61
III.4.4. Mesure des pertes de masse	62
III.5. Conclusion	63
Chapitre IV : Résultats et Analyses.....	65
VI.1. Introduction.....	65
VI.2. Définition générale du ciment.....	65
VI.2.1. Ciment expiré	65
VI.3. Procédé de préparation du sol pour traitement	66
IV.4. Evolution des propriétés mécaniques du sol traité	67
IV.4.1. Influence des teneurs en ciment sur les paramètres de compactage.....	67
IV.4.2. Effet sur les paramètres de consolidation et compressibilités	69
IV.4.3. Evolution des paramètres de compressibilité des sols traités	72
IV.4.4. Résistance à la compression simple	73
IV.4.5. Suivi de perte de masse.....	74
IV.5. Conclusion	76
Conclusion générale et perspectives	77
Références bibliographiques.....	80
Annexe : fiche technique du ciment	86

Liste des figures

Chapitre I : Processus, conséquences et enjeux environnementaux de la salinisation des sols

I.1	Salinisation des sols (F.A.O, 2021)	8
I.2	Mécanisme de la salinisation primaire (Daliakopoulos, 2016)	19
I.3	Illustration de la salinité de surface (Stavi et al ,2021)	20
I.4	Mécanisme de la salinité secondaire (Daliakopoulos, 2016)	21
I.5	sols affectés par le sel, à une profondeur comprise entre 30 et 100 cm (FAO, 2021)	25
I.6	Répartition des sols salins dans le nord de l'Algérie (source INSID, 2008)	26
I.7	Carte de répartition spatiale du risque de salinité de la plaine de Mina (Berkane et al, (2021)	27
I.8	Relations entre la salinité et la sodicité des différentes argiles (Pla, 2015)	28
I.9	Mécanisme de remonté des sels et traces d'efflorescences sur mur	30
I.10	Corrosion de l'acier due aux attaques des sels	30

Chapitre II : Méthodes de remédiation des sols salins

II.1	Technique de drainage et lixiviation des sels (Grismer, 1990)	34
II.2	Drainage de surface (lessivage) pour éliminer l'excès d'eau à la surface du sol (Ritzema et al, 1996)	34
II.3	Drainage de surface par fossé	35
II.4	Résistance à la compression dans des conditions de durcissement de 28 jours. (Yusong, 2026)	36
II.5	Résistance au cisaillement du sol traité avec différents pourcentages de ciment Portland (Fattah et Al-Kinani (2024)	36
II.6	Résistance à la compression uniaxiale (UCS) en fonction du nombre de jours de durcissement (a) avant trempage et (b) après trempage (Li Wei et al ; 2020)	37
II.7	Résumé du procédé de phytodésalement, de ses limites, de ses avantages et des utilisations des résidus (Boorboori, et Zhang, 2025)	38

II.8	Avantages de la culture des halophytes dans un système de phyto-désalement (Boorboori, et Zhang, 2025)	38
II.9	Changements CE chez six halophytes cultivés en milieu naturel sols salins (Ravindran et al, 2007)	39
II.10	Les mécanismes de transport dans le traitement électrocinétique (Mosavat, 2012)	40
II.11	Effet de la tension électrique sur l'élimination des sels en fin du traitement (Bessaim et al, 2020)	41
Chapitre III : Identification du sol et protocoles d'essai		
III.1	Localisation de la plaine des Bordjias	43
III.2	Localisation de Bordjias Sud-Est et parcelle d'étude	44
III.3	Zones inondées de la plaine des Bordjias	45
III.4	Essai de sédimentométrie	46
III.5	Courbe granulométrique d'échantillon de sol étudié	46
III.6	Classification du sol en fonction du triangle de texture	46
III.7	Essais des limites de plasticité et de liquidité	47
III.8	Résultats de limite de liquidité du sol naturel	48
III.9	Classification des sols fins, diagramme de plasticité	48
III.10	Essai de bleu méthylène	49
III.11	Essai de détermination de la matière organique	52
III.12	Essai de détermination (a) potentiel d'hydrogène pH, (b) conductivité électrique et (c) de la matière organique	52
III.13	Le spectrophotomètre à flamme pour la détermination des sels	53
III .14	Diagramme DRX du sol étudié	54
III.15	Essai Proctor du sol naturel	56
III.16	Essai Proctor échantillon confectionné	56
III.17	Appareil Œdométrique pour essai de consolidation	57
III.18	Schéma de la courbe de compressibilité (LCPC)	58
III.19	Courbe de compressibilité du sol naturel	59
III.20	Matériel pour l'essai de résistance à la compression (a) moule de compression (b) presse d'essai de compression	61
III.21	Essai à la compression	61
III.22	Eprouvettes cylindriques durant le suivi de la perte de masse	62

Chapitre IV : Résultats et Analyses

IV.1	Influence de l'addition du ciment sur le compactage	68
IV.2	Histogramme de relation entre $W_{opt}(\%)$, densité sèche et pourcentage en ciment	69
IV.2	Courbe de compressibilité œdométrique	70
IV.4	Evolution des indices de compressibilité, gonflement et des vides	71
IV.5	Evolution des résistances à la compression en fonction du temps	73
IV.6	Variation des résistances à la compression en fonction de la teneur en ciment	74
IV.7	Evolution des pertes en masse en fonction du temps	75
IV.8	Variation des pertes en masse en fonction de la teneur en ciment	75

Liste des tableaux

CHAPITRE I : Processus, conséquences et enjeux environnementaux de la salinisation des sols

I.1	Classification des sols salins (USSS Staff 1954)	23
I.2	Classification de la CE, ESP en ce qui concerne les effets de la salinité et sodicité sur la croissance des cultures (F.O.A, 2021)	23

CHAPITRE II : Méthodes de remédiation des sols salins

II.1	Programme de stabilisation et ratio d'ajout de stabilisants (Li Wei et al ; 2020)	37
-------------	---	----

CHAPITRE III : Identification du sol et protocoles d'essai

III.1	Propriétés physiques du sol	50
III.2	Teneur en CaCO ₃ de quelques sols	51
III.3	Dosage des anions solubles et bases échangeables	53
III.4	Propriétés pédologiques	53
III.5	Composition minéralogique du sol en pourcentage	54
III.6	Composition chimique du sol en pourcentage	55
III.7	Résultats d'essai de compressibilité du sol naturel	59
III.8	Classification de sol selon l'indice de compressibilité	60
III.9	Classement des sols selon leurs indices de compressibilités et indices des vides, donné par Philipponnat et Hubert (1997)	60

CHAPITRE IV : Résultats et analyses

IV.1	Comparaison des propriétés physiques du ciment	66
IV.2	Notation des mélanges préparés pour l'étude expérimentale	66
IV.3	Résultats pour essai Proctor	67
IV.4	Résultats d'essai de compressibilité	69
IV.5	Classement des sols traités selon leurs indices de compressibilités et indices des vides	71
IV.6	Évolution des paramètres de compressibilité des sols traités	72

Liste des abréviations

AFNOR : Association Française de Normalisation

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

EN : Norme Européenne

FAO / F.A.O : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

GSAS : Carte Mondiale des Sols Affectés par le Sel (Global Soil Salinity Map)

INSID : Institut National des Sols, de l'Irrigation et du Drainage

ISO : Organisation Internationale de Normalisation

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

NF: Norme Française

USSL: United States Salinity Laboratory

CE : Conductivité Électrique

Ce1/5 : Conductivité Électrique à l'extrait dilué 1/5

CEC : Capacité d'Échange Cationique

DRX : Diffraction des Rayons X

ESP : Pourcentage de Sodium Échangeable (Exchangeable Sodium Percentage)

MO : Matière Organique

pH : Potentiel d'Hydrogène

SAR : Rapport d'Adsorption du Sodium (Sodium Adsorption Ratio)

Ac : Indice d'Activité des Argiles

Cc : Indice de compressibilité

Cg / Cs : Indice de gonflement

E_{œd} : Module œdométrique

I_p : Indice de Plasticité

SST : Surface Spécifique Totale

VBS / VBM : Valeur au Bleu du Sol / Valeur de Bleu de Méthylène

W_l : Limite de Liquidité

W_p : Limite de Plasticité

W_{opt} : Teneur en eau optimum Proctor

EK : Traitement Electrocinétique (Électrocinétique)

UCS : Résistance à la Compression Uniaxiale (Unconfined Compressive Strength)

av, mv, E_{œd} : Paramètres d'évaluation de la déformation œdométrique

R_c : Résistance à la compression simple

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'ingénierie géotechnique est un domaine spécialisé qui se focalise sur l'analyse des sols, des roches et leur comportement mécanique. Elle s'intéresse particulièrement aux projets de construction et aux infrastructures, en estimant la stabilité du sol, tous en proposant des solutions pour la gestion des risques géotechniques.

Le sol représente un matériau fondamental en génie civil, puisqu'il sert de support à la majorité des travaux de construction. Ses caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques ont une influence directe sur leur stabilité et leur durabilité. Toutefois, dans certaines régions, la présence de fortes concentrations de sels solubles dans le sol peut modifier son comportement et engendrer divers problèmes géotechniques.

La salinisation des sols est un phénomène de plus en plus préoccupant dans de nombreuses régions du monde, notamment dans les zones arides et semi-arides. Elle est causée par l'activité humaine ou par des processus naturels, et peut avoir des conséquences importantes sur la stabilité des ouvrages. En particulier, les sols salins présentent une compressibilité élevée et une faible résistance au cisaillement (Ashayeri et Shahabadin, 2004 ; Foncea et al. 2005) et leur mise en contact avec l'eau provoque la dissolution des sels, pouvant conduire à des phénomènes d'effondrement et de tassements différentiels (Ashayeri et Shahabadin, 2004 ; Foncea et al., 2005). Par ailleurs, les sols problématiques des régions arides et semi-arides, qu'ils soient salins ou gonflants, sont à l'origine de nombreux désordres structuraux observés dans les constructions à travers le monde.

Devant ces difficultés, diverses méthodes pour améliorer et stabiliser les sols ont été développés. Parmi celles-ci, le traitement par la méthode chimique, l'une des techniques les plus répandues en géotechnique (Karthik et al, 2019). Le traitement se fait généralement par des liants hydrauliques tels que les ciments et chaux, dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques (augmentation de la résistance à la compression, et la capacité portante des sols) (Razeghi et al, 2022). Toutefois, bien que le ciment Portland reste le liant le plus utilisé, son coût élevé et son impact environnemental constituent des limites importantes à son usage.

Dans ce contexte, l'utilisation de ciment expiré (c'est-à-dire du ciment ne répondant plus aux normes de résistance standard mais conservant une activité hydraulique résiduelle) représente une alternative économiquement et écologiquement intéressante. Effectivement, de

grandes quantités de ciment expiré sont stockées ou mise en décharge chaque année, engendrant un gaspillage considérable de ressources. Sa valorisation en tant qu'agent de stabilisation des sols salins pourrait ainsi réduire les coûts de traitement tout en limitant les déchets industriels

Dans ce cadre, ce projet de fin d'études vise à analyser le comportement mécanique des sols salins à travers une série d'analyses et d'essais expérimentaux permettant d'évaluer l'impact d'un traitement au ciment expiré sur leurs propriétés géotechniques. Les investigations ont été réalisées sur des sols de la plaine de Bordjia, située dans la partie sud-ouest de la wilaya de Mostaganem.

Afin de structurer cette étude, ce mémoire s'articule autour des chapitres suivants :

Le premier chapitre présente les processus de salinisation des sols, leurs conséquences ainsi que les enjeux environnementaux qui en découlent.

Le deuxième chapitre est consacré aux différentes méthodes de remédiation des sols salins.

Le troisième chapitre décrit la zone d'étude, l'identification du sol ainsi que les protocoles expérimentaux adoptés.

Le quatrième chapitre et le dernier, expose les résultats obtenus et leur analyse, afin d'évaluer l'impact du traitement au ciment expiré sur les propriétés géotechniques du sol étudié.

En final, on terminera avec une conclusion générale et perspective.

*Chapitre I : Processus, conséquences et enjeux
environnementaux de la salinisation des sols*

Chapitre I : Processus, conséquences et enjeux environnementaux de la salinisation des sols

I.1 Introduction

L'augmentation des sols salins à travers le monde est une conséquence des modifications climatiques récentes. L'une des plus grandes problématiques à l'échelle mondiale dans les régions arides et semi-arides, la salinité des sols alimente la dégradation de leur structure et entrave la production agricole. Dans le domaine du génie civil, les sols salins seraient jugés problématiques en raison de leurs propriétés géotechniques défavorables. Il est estimé que plus de mille millions d'hectares de terres salines se trouvent dans une centaine de nations à travers le globe. L'augmentation de la salinité provoque des changements dans la composition du sol, influant directement sur la stabilité et la pérennité des infrastructures basées sur ces sols.

I.2 Définition de la salinisation

La salinisation se définit comme une hausse de la concentration en sels solubles dans le sol, que ce phénomène soit d'origine naturelle ou due aux activités humaines (Rengasamy, 2006 ; Szabocs, 1989). Sa présence représente un danger significatif pour l'environnement (Fu et al, 2020 ; Diaz et al, 2021 ; Wei et al, 2021). Un excès de sel concentré au niveau des racines ou sur la surface terrestre entraîne une diminution de la fertilité et une modification des caractéristiques physico-chimiques des sols. La salinité limite la capacité d'hydratation des sols, provoquant ainsi le ruissellement de surface et l'érosion (Gorji et al, 2020).



Figure I.1: Salinisation des sols (F.A.O, 2021)

I.3. Les causes de salinisation des sols

Il existe deux processus de salinisation, d'une part la salinité primaire d'origine naturelle, due à la proximité de la mer, ou à l'existence de dépôts salins géologiques, et d'autre part, la salinité secondaire due à des processus de salinisation liés à des activités humaines dites anthropiques, en particulier à l'irrigation mal conduite dans certaines zones agricoles (Daliakopoulos et al, 2016 ; Zinck et Metternicht, 2009), (FAO, 2018).

I.3.1. Salinisation primaire

Elle est caractérisée par l'accumulation de sels dans le sol résultant de processus naturels (Daliakopoulos et al, 2016). Elle représente la formation de sels résultant de la présence de minéraux à la surface visible de la croûte terrestre. Ces minéraux sont libérés par des processus d'altération chimique comme l'hydrolyse, l'oxydation, l'hydratation et la carbonatation, et ils se dissolvent dans l'eau souterraine ou de surface. Dans les zones humides, ces particules seront transportées par l'eau vers les zones semi-arides et arides où elles se concentreront en raison de l'augmentation des températures et le manque de précipitations permettant un drainage naturel, ce qui peut provoquer leur précipitation et leur dépôt dans le sol. De plus, les sels peuvent être transportés dans les terres par des vents violents, et certains de ces sels peuvent infiltrer les régions côtières par intrusion d'eau de mer (Ramos et al, 2020). (Figure I.2).

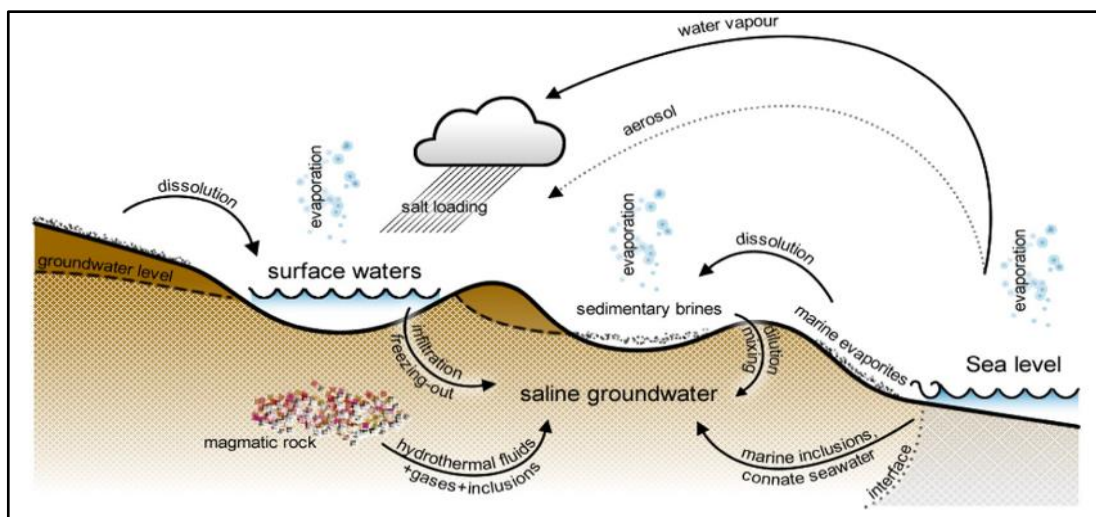


Figure I.2 : Mécanisme de la salinisation primaire (Daliakopoulos, 2016)

L'accumulation des sels à la surface du sol se produit du fait simultané de faibles précipitations annuelles de la remontée de la nappe phréatique et la température élevée. L'eau salée remonte en surface par effet capillaire, et avec un drainage entravé ou même une absence de drainage, l'eau évaporée provoque la précipitation et concentration des sels en surface. (Stavi et al ,2021). (Figure I.3)

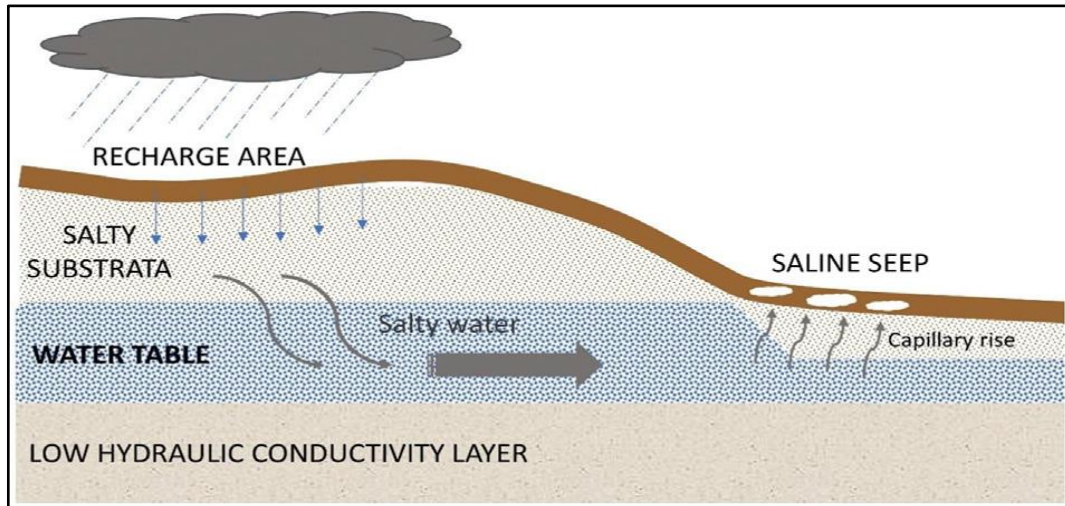


Figure I.3 : Illustration de la salinité de surface (Stavi et al ,2021)

I.3.2 Salinisation secondaire

La salinisation secondaire est le résultat d'activité humaine (Daliakopoulos et al, 2016 ; Pena et al, 2020). Elle est également appelée salinisation anthropique (Legros, 2007 ; Zinck et Metternicht, 2009). L'utilisation d'eau riche en sel ou saumâtre pour l'irrigation des cultures à cause des périodes de sécheresse prolongées, associée à l'utilisation d'engrais chimiques lourds, sont les principales causes de la salinisation. Ajouté à cela les pratiques d'irrigation mal adaptées souvent couplées à de mauvaises conditions de drainage (Fan et al. 2012) (figure I.4).

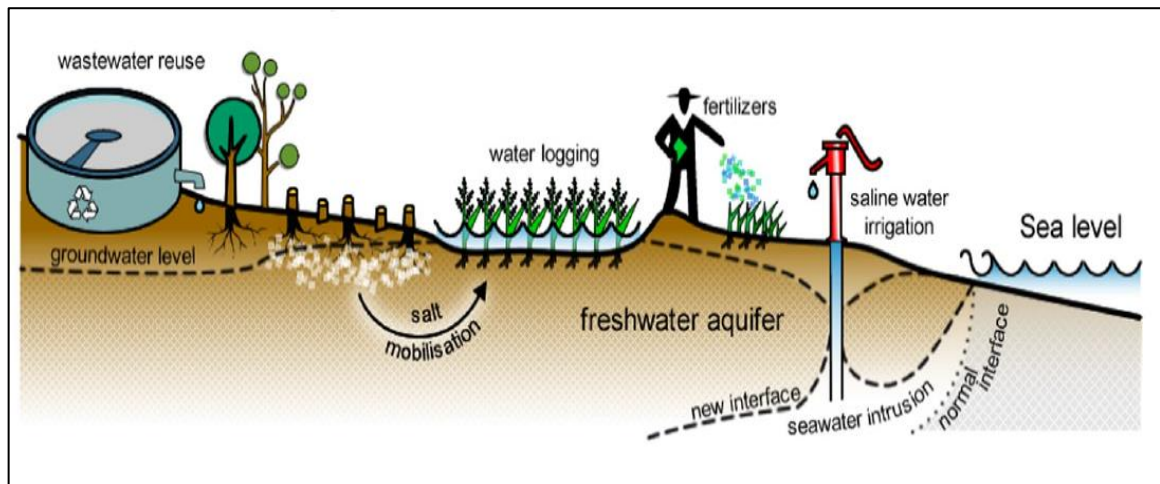


Figure I.4 : Mécanisme de la salinité secondaire (Daliakopoulos, 2016)

En générale, L'utilisation excessive de l'eau pour l'irrigation dans les climats aride et semi-aride, dans des sols fins, entraîne une accumulation de sel (Pouladi et al. 2019).

I.4. Classification des sols salins

L'utilisation du mot salinité pour caractériser les sols salins, sodiques et saline-sodiques devient de plus en plus courante (Staff de l'USSS, 1954). Dans le domaine littéraire, on utilise fréquemment l'expression « sol salin » de façon générale, sans spécificité particulière. Il arrive parfois qu'il faille déduire le sens de termes tels que l'alcalinisation, la sodisation, ou même l'un d'eux. Cependant, il est primordial d'associer chaque terme à son mécanisme ou processus spécifique. D'après Legros (2007), ces trois expressions sont définies comme étant :

- La salinisation : qui correspond à l'apparition de sels dans la solution du sol.
- L'alcalinisation : qui représente l'augmentation du pH liée à la présence de carbonates ou bicarbonates en excès, en particulier Na_2CO_3 et NaHCO_3 . Ce sont des sels de base forte et d'acide faible dont la dissociation dans l'eau se traduit donc par une réaction alcaline.
- La sodisation : qui représente l'enrichissement du complexe absorbant en sodium échangeable.

I.4.1. 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-} , and HCO_3^- , d'autre cations et anions se trouvent également dans les sols en concentrations minimale, tels que K^+ et NH_4^+ , NO_3^- , CO_3^{2-} et BO_4^{2-} .

I.4.2. 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 (Qadir et al, 2007).

I.4.3. 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.

I.5. Indicateurs clés identifiant la salinisation et la sodicité des sols

Les indicateurs majeurs utilisés pour identifier la salinisation des sols sont :

1. le profil de sel où la salinisation du sol (salin) est évalué en teneur totale en sel (%) et en conductivité électrique (dS /m),
2. le pourcentage de sodium échangeable (ESP) pour évaluer la sodification (sol sodique)
3. l'origine potentielles de sel (eau souterraine ou eau d'irrigation) et la vulnérabilité des sols à la salinisation/sodification (sal-sodique) mesurée en teneur en sel [mg /l] et par le calcul du ratio d'adsorption du sodium SAR.
4. le potentiel hydrogène (pH) pour définir l'alcalinité.

La classification des différents sols salins en fonction des indicateurs su-cités est représentée par le tableau (I.1) selon USSL Staff 1954. La classification donnée par la F.O.A en ce qui concerne les effets de la salinité et sodicité sur la croissance des cultures est présentée par le tableau (I.2).

Tableau I.1 : Classification des sols salins (USSL Staff 1954)

Propriété du sol	Unité et symbole	Type de sol affecté par les sels		
		salin	sodique	Salin-sodique
Conductivité électrique	CE (dS/m)	>4	>4	>4
Taux de sodium échangeable	ESP	<15	>15	>15
Potentiel d'hydrogène	pH	<8,5	>8,5	<8,5
Sodium Adsorption Ration	SAR	<13	>13	>13

Tableau I.2 : Classification de la CE, ESP en ce qui concerne les effets de la salinité et sodicité sur la croissance des cultures (F.O.A, 2021)

CE (dS/m)	Degré de salinité	Effets sur les croissances	ESP(%)	Degré de sodicité
<0,75	Aucune	Aucune	15	Aucune
0,75-2	Légère	Aucune	15-30	Légère
2-4	Modérée	les rendements des cultures sensibles peuvent être limités	30-50	Modérée
4-8	forte	les rendements de nombreuses cultures sont limités	50-70	Elevée
8-15	Très forte	seules les cultures tolérantes ont un rendement satisfaisant	70	Extrême
> 15	Extrême	seules quelques cultures très tolérantes ont un rendement satisfaisant	/	/

I.6. Risques et Distribution de la salinité dans le monde

La salinisation des sols est en hausse au niveau mondial et s'étend à plus de 100 pays (Hammam & Mohamed, 2020). La majeure partie des zones salinisées se trouvent principalement en Inde, en Chine, aux États-Unis, au Soudan, au Pakistan et en Turquie (Seifi et al, 2020 ; Singh, 2018b). Le problème de la salinisation des sols s'est également répandu dans de nombreuses autres régions.

Par exemple, Metternicht et Zinck (2009) ont signalé que plus de 30 % de l'Iran est affecté par la salinisation, et que cette superficie ne cesse d'augmenter (Eishoei et al, 2019), causant divers problèmes écologiques, comme la salinisation des zones racinaires, l'érosion des sols et la réduction de la productivité agricole (Mirzaee et al, 2020).

Une carte mondiale de salinité a été établie couvrant 118 pays et des centaines de collecteurs de données, soit près d'un milliard d'hectares de sols touchés par la salinisation ont été recensés à travers le monde (soit 8,7% des sols de la planète). Ces sols sont principalement observés en milieu naturellement aride ou semi-aride se situant en Afrique, en Asie et en Amérique latine. Cette carte montre aussi que 20 à 50% des sols irrigués sur l'ensemble des continents sont trop salés. Elle permet aux experts de localiser les zones où il convient d'adopter des pratiques de gestion durable des sols afin de prévenir la salinisation et la sodification et de gérer durablement les sols touchés par la salinisation.

La carte GSAS (FAO, 2021) ; représentée par la figure (I.5) indique actuellement plus de 424 millions d'hectares de terre végétale (0-30 cm) et 833 millions d'hectares de sous-sol (30-100 cm) sont affectés par le sel, 85% des sols arables affectés par le sel sont salins, 10% sont sodiques et 5 % sont salin-sodiques, et 62 % des sous-sols affectés par le sel sont salins, 24 % sont sodiques et 14 % sont salin-sodiques.

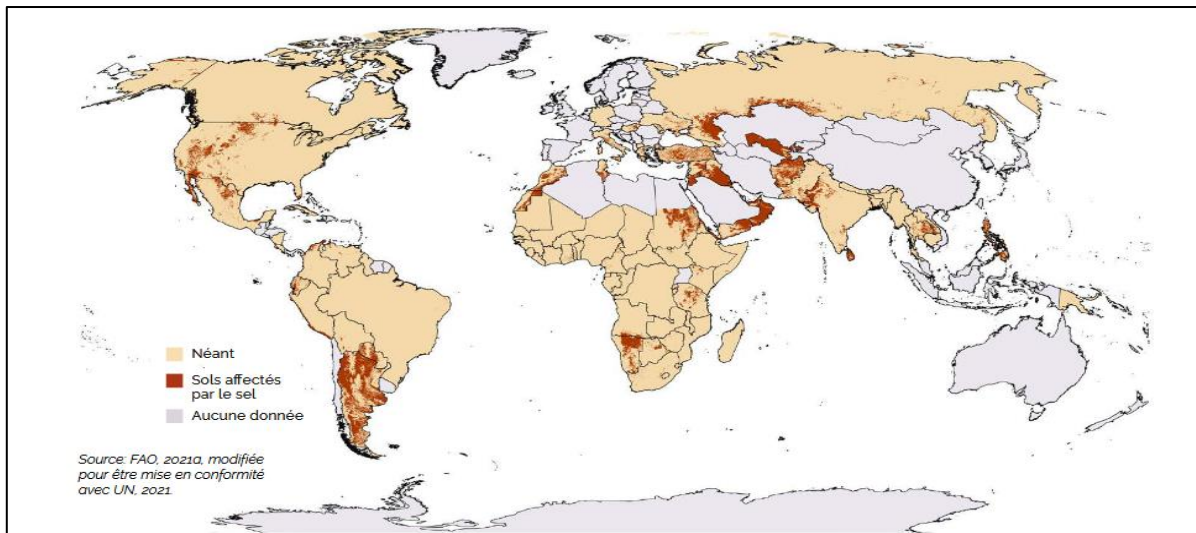


Figure I.5 : sols affectés par le sel, à une profondeur comprise entre 30 et 100 cm (FAO, 2021)

Ces estimations, basées sur les données de 118 pays couvrant 73% de la surface terrestre mondiale), montrent que plus de 4,4% de la couche arable et plus de 8,7% du sous-sol de la surface terrestre totale sont affectés par le sel. Plus des deux tiers des sols de la planète se trouvent dans des zones climatiques arides et semi-arides : 37% sont situés dans les déserts arides, et 27% sont répartis dans les steppes arides (la moitié dans les steppes arides froides et l'autre moitié dans les steppes arides chaudes)

I.7. Risques et distribution de la salinité en Algérie

En Algérie, l'expansion des superficies irriguées, passées de 350 000 ha en 2001/2002 à 1,3 million ha en 2016/2017, s'accompagne d'un problème majeur de salinisation des sols, phénomène ancien mais aggravé par les pratiques agricoles modernes. Dès 2006, près d'un million d'hectares de terres agricoles étaient touchés, dont une partie significative dans les périmètres irrigués du Nord-Ouest, avec une salinisation secondaire affectant 20 à 50 % des terres irriguées. Ce phénomène concerne principalement les zones arides et semi-arides, notamment les plaines sub-littorales de l'Ouest, les basses plaines d'Oranie et la vallée de la Mina, où dominant des sols vulnérables de type solontchaks et solontchaks-solonetz. Selon Szablocs (1989), 3,2 millions d'hectares subissent une salinisation à divers degrés, favorisée par les températures élevées, l'absence d'exutoires naturels et un drainage insuffisant. Face à cette situation, l'INSID a établi en 2008 une carte de salinisation, basée sur des données fragmentaires, afin de mieux appréhender l'étendue et la gravité de la dégradation des sols, soulignant l'urgence d'une gestion durable des ressources en eau et en sols pour préserver la productivité agricole du pays. (Figure I.6)

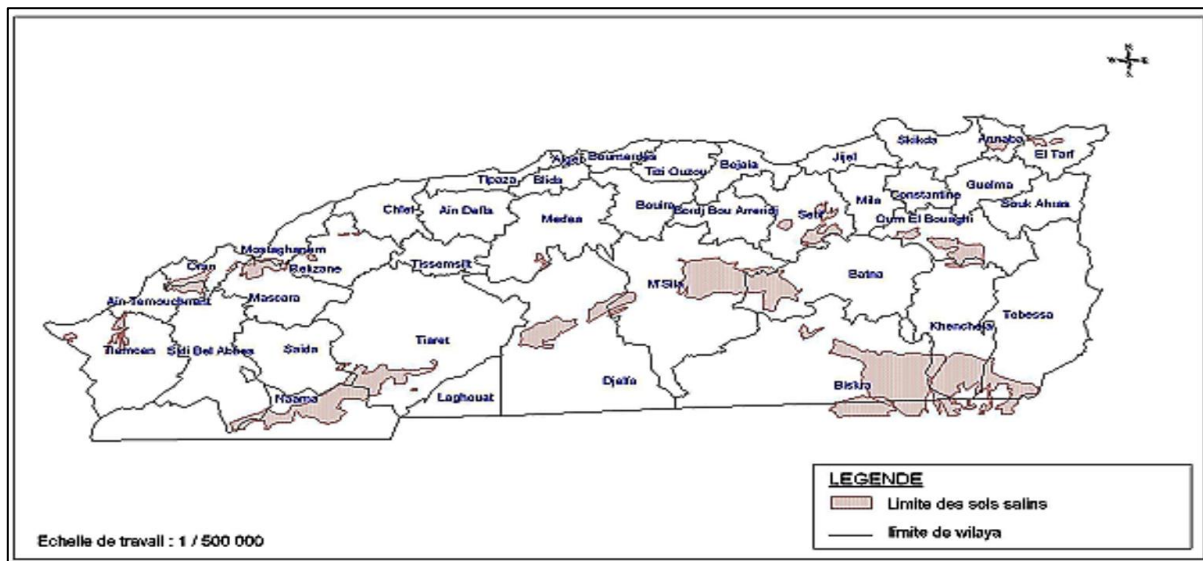


Figure I.6 : Répartition des sols salins dans le nord de l'Algérie (source INSID, 2008)

Dans l'ouest algérien, la salinisation des sols affecte particulièrement les plaines et vallées de la Mina, du Chéouli, de Habra-Sig et de Maghnia. Dans la plaine du Bas-Chéouli, une étude de Daoudi et Hartani (2006) révèle que 71 % de la superficie analysée est touchée par la salinisation, ne laissant que 29 % des terres saines. Plus récemment, Berkane et al. (2021) ont mis en évidence un risque élevé de salinité dans la plaine de la Mina, lié à l'utilisation des eaux souterraines pour l'irrigation : 90 % de la zone étudiée présente une conductivité électrique (CEe) supérieure à 4 dS/m, dont 65 % atteignent des niveaux très à extrêmement salins (CEe > 8 dS/m) (figure I.7).

Ce phénomène pose un double défi pour l'agriculture irriguée : d'une part, un risque potentiel pour les rendements agricoles lorsque l'eau riche en sodium altère les propriétés physiques des sols, et d'autre part, une menace pour la durabilité des espèces végétales, naturelles et cultivées, face à l'accumulation croissante de sels.

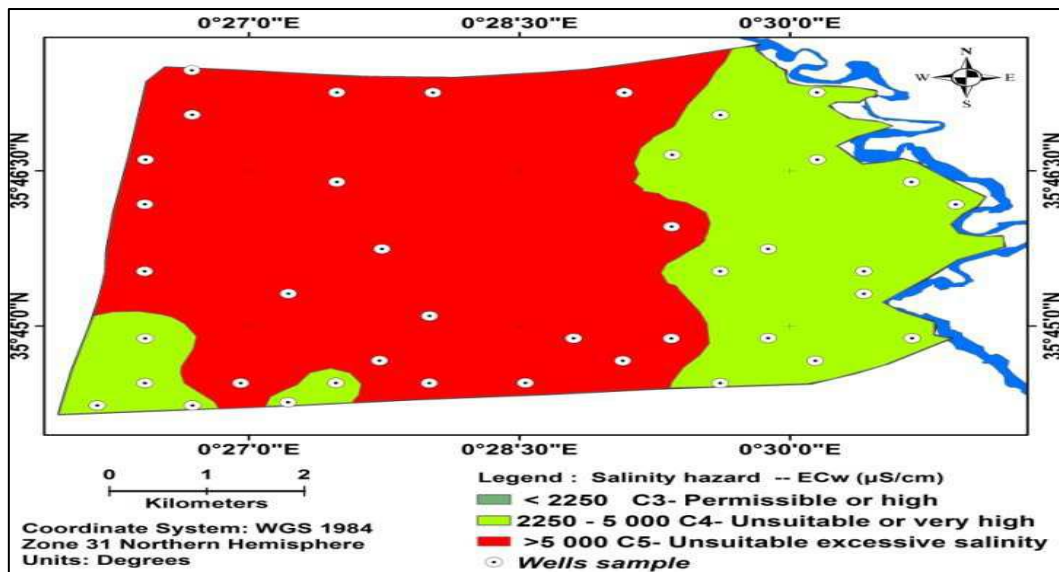


Figure I.7 : Carte de répartition spatiale du risque de salinité de la plaine de Mina (Berkane et al, 2021)

Dans le grand sud algérien, la salinisation des sols affecte principalement les oasis et les zones longeant les oueds, où plusieurs périmètres irrigués sont menacés par la mauvaise qualité des eaux souterraines (nappes artésiennes salées) utilisées pour l'irrigation, l'absence de réseaux de drainage adéquats et la remontée des nappes phréatiques, entraînant une dégradation des sols et une baisse de productivité. À l'est du pays, les hautes plaines de Constantine, Sétif, Bordj Bou Arreridj et Oum El Bouagui subissent également une extension de la salinité : l'étude de Bouhata et al. (2015) sur la plaine de Gadaine révèle que près de 42 % de sa superficie est touchée par la salinisation.

I.8. Conséquences et préjudices engendrés par la salinité du sol

I.8.1 Effets de la salinité sur la structure des sols

La salinisation entraîne une dégradation des propriétés physiques des sols argileux, notamment par la détérioration de leur structure et la réduction de leur conductivité hydraulique (Zhang et Norton, 2002 ; Shabtai et al, 2014). Les sols argileux sodiques, riches en sodium, voient leur capacité de conduction de l'eau diminuer, une relation linéaire et significative observée par McIntyre (1979) dans les sols riches en illite, mais moins marquée dans ceux riches en montmorillonite, confirmant que l'illite est plus sensible à la sodicité.

Selon Keren et Ben-Hur (2003), les ions sodium réduisent la capacité du sol à former des agrégats stables en augmentant son potentiel de gonflement, tandis qu'un excès de sodium compromet davantage la stabilité structurale du sol (Subramani et al, 2005). Les argiles expansives aggravent ce phénomène : leur gonflement au contact de l'eau réduit fortement la conductivité hydraulique à saturation, limitant ainsi la lixiviation des sels et favorisant leur accumulation (Adam et al. 2012, Fang et Daniels (2017)).

Plusieurs recherches ont conclu que le comportement dispersif des sols est un processus de libération des particules argileuses à partir des agrégats du sol. Ce comportement est la principale forme de dégradation de la structure des sols argileux causé par la présence des solutés salés notamment le sodium. Selon Gabor et al (2020), il pourrait y avoir une relation entre le terme "dispersif" et le terme "sodique".

La figure (I.8) montre l'impact de salinité, la sodicité et le SAR sur la dispersion, le gonflement et la conductivité hydraulique du sol argileux (Pla ,2015).

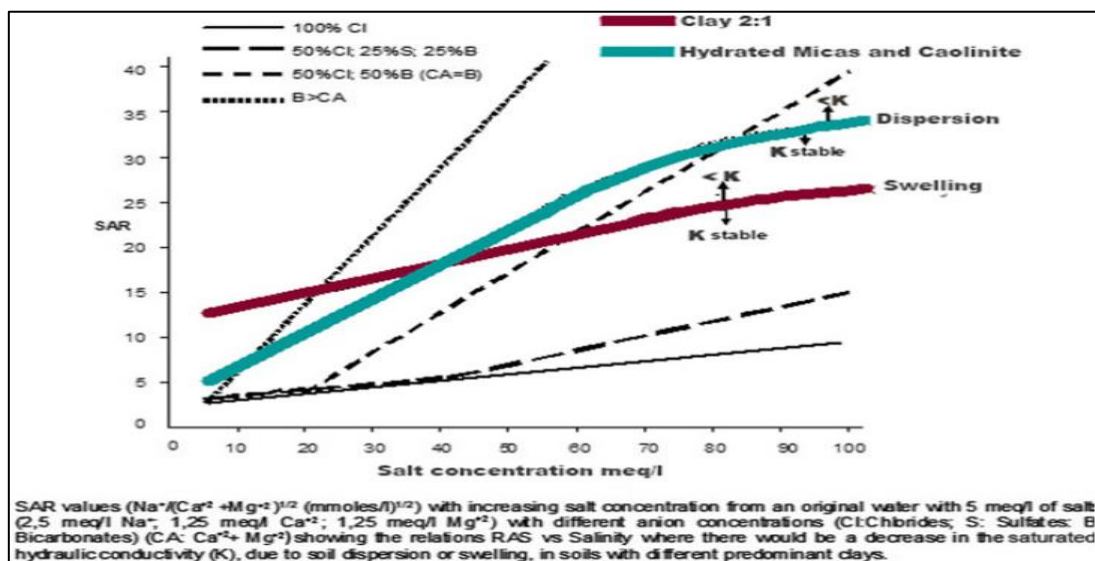


Figure I.8 : Relations entre la salinité et la sodicité des différentes argiles (Pla, 2015)

Subramani et al. (2005) ont démontré qu'un SAR élevé diminue la stabilité de la structure du sol. De même, Keren et Ben-Hur (2003) ont expliqué que les ions sodium réduisent le sol capacité de former des agrégats particuliers en raison de l'augmentation du potentiel de gonflement.

I.8.2. Effets de la salinité sur les infrastructures de génie civil

Les sols salins peuvent poser des défis importants aux projets de génie civil, et en particulier pour les infrastructures de transport (Fatahi et al. 2011). La compréhension du comportement du sol dans diverses conditions environnementales est nécessaire pour atténuer les problèmes possibles associés aux sols salins.

Les sels dissous affectent les propriétés physiques du sol telles que la stabilité structurelle, la conductivité hydraulique, le taux d'infiltration, le ruissellement et l'érosion (Shainberg, et al, 2001). Des effets néfastes importants sur les infrastructures bâties ont été signalés (McRobert, et al, 2003 ; Water Smart, 2003). En général, les sols salins-sodique ont certaines propriétés défavorables telles qu'une compressibilité élevée, une faible capacité portante et sont gonflant (Ashayeri et Shahabadin, 2004 ; Foncea et al. 2005)

La remontée du niveau des nappes phréatiques peut fréquemment engendrer de l'humidité et la présence de sels à proximité des fondations des constructions. L'action de l'humidification de manière répétée les fondations peut, par capillarité, entraîner une remontée d'humidité dans la brique, la pierre ou le ciment.

L'importance et la sévérité d'une problématique liée à l'humidité ascensionnelle sont fonction des matériaux employés, du volume d'humidité et de sel en présence, ainsi que du degré d'évaporation.

À mesure que les matériaux de construction passent par des phases de mouillage et de séchage, des cristaux de sel ont souvent tendance à se former dans les zones poreuses. Dans les situations critiques, ces cristaux risquent d'endommager la brique, la pierre et le ciment, potentiellement conduisant à des fissures dans les éléments en briques ou en pierre, ainsi que dans le mortier. Au fil du temps, la concentration de sel augmente à la surface du matériau laissant des traces visibles d'efflorescence (figure I.9).

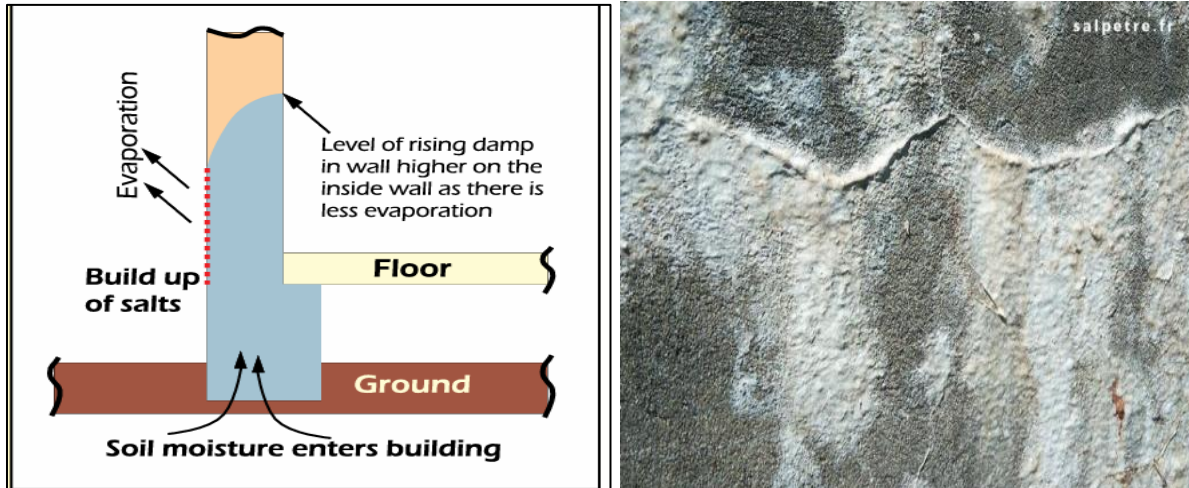


Figure I.9 : Mécanisme de remonté des sels et traces d'efflorescences sur mur.

La remontée des sels par capillarité peuvent provoquer la détérioration des éléments en béton armé affectant sa durabilité, allant même à la corrosion des aciers où la formation de rouille exerce une pression physique sur le béton environnant et conduit par conséquent la dégradation total (figure I.10).



Figure I.10 : Corrosion de l'acier due aux attaques des sels

I.9. Conclusion

L'un des problèmes environnementaux majeurs, la salinisation des sols, contribue à la dégradation des terres dans de nombreux pays à travers le monde, en particulier dans les zones à climat aride et semi-aride. L'Algérie est parmi les nations qui sont fortement affectées par ce problème.

L'autre élément qui contribue à la formation des sols salins est le changement climatique des dernières décennies. Dans des conditions d'aridité et de semi-aridité, l'eau est évaporée, laissant les cristaux de sel se former et se déposer à la surface du sol. De plus, les faibles précipitations dans ces régions climatiques n'encouragent pas complètement le transfert des sels vers les couches plus profondes du sol.



Chapitre II : Méthodes de remédiation des sols salins

Chapitre II : Méthodes de remédiation des sols salins

II.1. Introduction

Les méthodes élaborées communément connues s'appuient sur trois stratégies : une première, physique et hydraulique, qui repose sur l'utilisation d'eau pour le nettoyage ; une seconde, impliquant l'usage de produits chimiques, qui est connue sous le nom d'apport d'amendement ; et enfin, la méthode biologique, basée sur l'utilisation d'amendements organiques et la phytoremédiation grâce à l'emploi de plantes tolérantes au sel. Une quatrième méthode a fait son apparition ces dernières années portant le nom du traitement électrocinétique. Un résumé des techniques seront présenté ci-dessous.

II.2. Méthodes et approches de remédiation des sols salins

II.2.1. Méthode physique (Sablage)

Dans cette méthode, le sol de texture lourde (sol très argileux), est mélangé avec une quantité connue de sable en vue de modifier la texture originale du sol (Argile) en une moins fine ; comme le sol (loam argilo-sableux), ainsi le sol devient plus perméable et plus facile à drainer des sels (Zaman et al 2018). L'inconvénient est que changer la texture du sol est une tâche difficile et coûteuse.

II.2.2. Méthodes hydrologiques (drainage)

II.2.2.1. La lixiviation

C'est une méthode classique basée sur le mouvement de l'eau dans et à travers le sol utilisé pour le contrôle des concentrations en sels (Dai et al, 2015 ; Zaman et al 2018). Elle consiste à appliquer une quantité d'eau relativement importante pour dissoudre et transporter les sels par un lavage (Hillel, 2000) (figure II.1). Cette technique est plus adaptée pour les sols à texture moyenne que fine.

Pour des sols à texture fine, cette technique est moins efficace notamment pour les sols argileux qui ont généralement une conductivité hydraulique très faible limitant ainsi la lixiviation des sels (Hillel, 2000 ; Sun et al, 2012). Cette méthode demeure vraiment difficile et

même coûteuse pour les régions aride et semi-aride à cause de la disponibilité et mobilisation de l'eau.

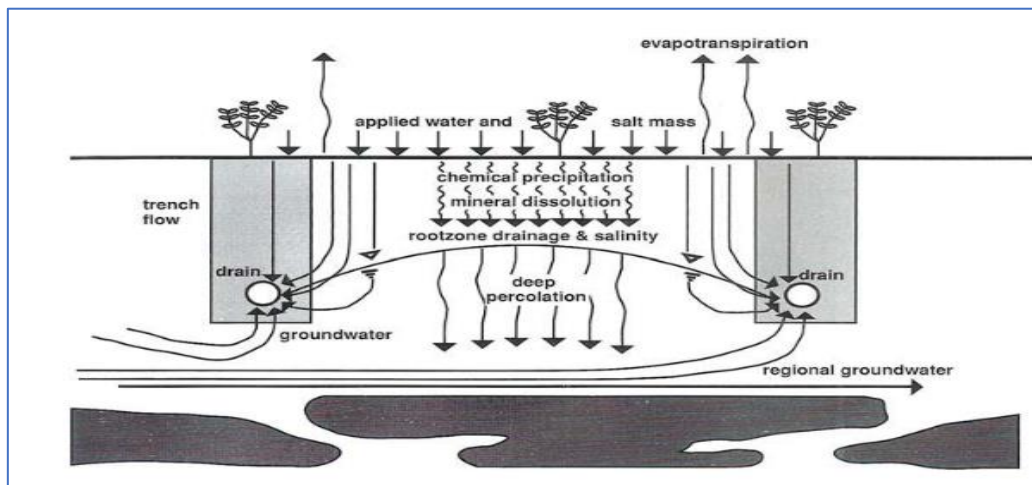


Figure II.1 : Technique de drainage et lixiviation des sels (Grismer, 1990)

II.2.2.2. Le lessivage de surface des sols salins (flushing)

La technique du lessivage de surface (drainage de surface) convient aux sols salins recouverts par des croûtes salines superficielles. Le rinçage des sels de surface est possible lorsque les sols ont une texture lourde à faible perméabilité. L'eau est mise en étang pendant un temps suffisant pour dissoudre la croûte saline, après quoi ; l'eau stagnée peut être soit évacuée du champ, éliminant ainsi les sels de surface ou évacuer par un système de drainage (figure II.2) (Ritzema et al. 1996)

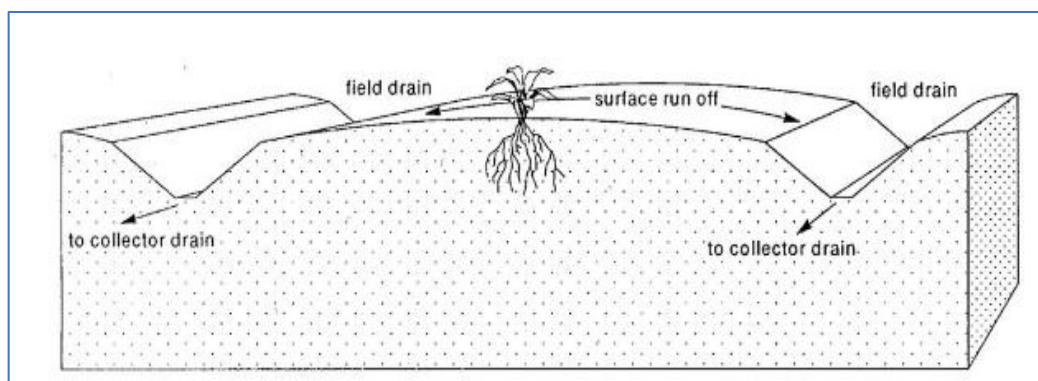


Figure II.2 : Drainage de surface (lessivage) pour éliminer l'excès d'eau à la surface du sol (Ritzema et al, 1996)

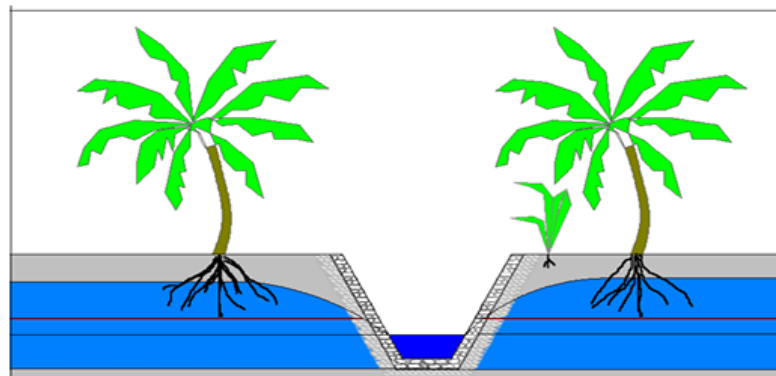


Figure II.3 : Drainage de surface par fossé.

II.2.3. Méthodes chimiques

L'amendement chimique est une pratique classique utilisée pour traiter les sols salins notamment par le gypse (CaSO_4) ; qui est utilisé comme source de calcium (Ca^{2+}) pour améliorer les propriétés physiques et chimiques notamment la macroporosité, la perméabilité et réduire la salinité et/ou l'alcalinité des sols (Reading et al, 2012a ; Gharaibeh et al, 2014).

Pour les sols sodiques l'objectif est de diminuer l'ESP en dessous de la valeur seuil de 15 (USSSL, 1954) par ajout d'amendement approprié riche en calcium. La méthode la plus appropriée consiste à remplacer le sodium échangeable par du calcium, puis utiliser de la matière organique comme amendement naturel afin de lier entre les particules de sol et par conséquent améliorer sa structure. Le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et la chaux (CaO) peuvent tous deux être source de calcium. Le calcium peut limiter la dispersion par l'augmentation des forces de liaison inter-particules et provoque la formation de flocculats, (Zaman et al 2018)

Une recherche expérimentale a procédé à examiner les effets conjoints de la chaux, de la poudre de résidus de fer et des fibres de basalte sur la solidification et l'amélioration mécanique d'un sol salin (Yusong, 2026).

La résistance à la compression simple à 28 jours de cure a servi d'indicateur principal d'efficacité, évaluée par comparaison avec le sol. L'analyse a révélé que la teneur en chaux est le facteur prédominant dans l'augmentation de la résistance, tandis que la poudre de résidus de fer, la teneur en fibres et leur longueur exercent des effets positifs mais statistiquement moins marqués (figure II.4).

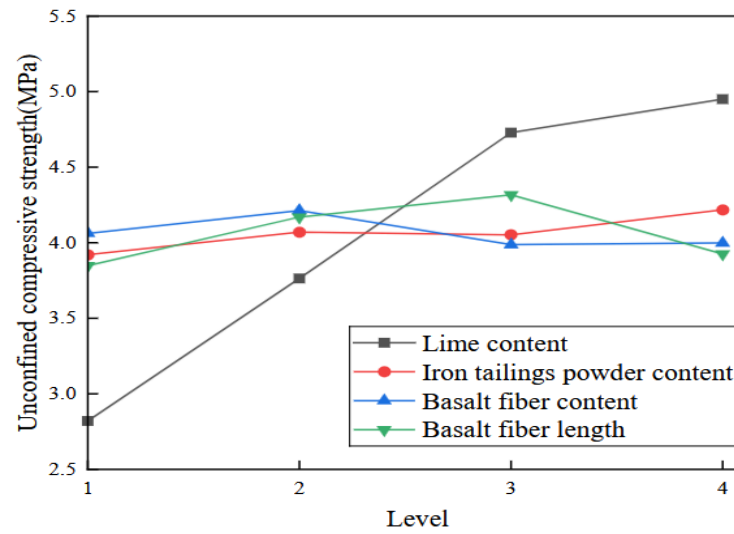


Figure II.4 : Résistance à la compression dans des conditions de durcissement de 28 jours. (Yusong, 2026)

Pour Fattah et Al-Kinani (2024), ils ont ajouté du ciment portland au sol salin à des concentrations respectives de 0, 2, 4, 8 et 10 %, pour tester la résistance à la compression uniaxiale, les résultats obtenus (Figure II.5) montrent que la résistance augmente avec le pourcentage de ciment ordinaire. Cependant, il a été constaté que l'ajout de 8 et 10 % de ciment portland au sol donnait des résultats insatisfaisants en raison d'une absence d'adhérence entre le ciment et le sol.

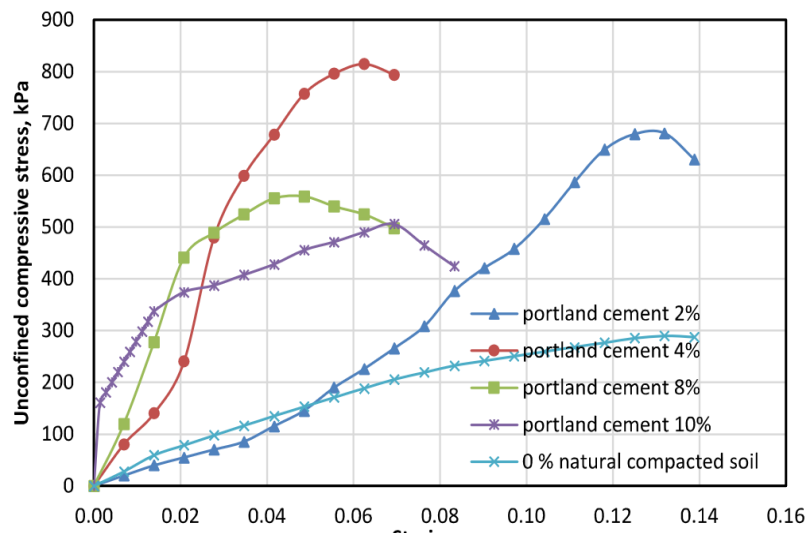


Figure II.5 : Résistance au cisaillement du sol traité avec différents pourcentages de ciment Portland (Fattah et Al-Kinani (2024))

L'étude suivante (Li Wei et al ; 2020) a examiné l'évolution de la résistance à la compression simple des sols salins stabilisés par différents liants (chaux L, ciment C, cendres volantes FA), avec ou sans additif stabilisant SH, avec différents pourcentage (tableau II.1), et en fonction de la durée de cure et après immersion,

Tableau II.1 : Programme de stabilisation et ratio d'ajout de stabilisants
(Li Wei et al ; 2020)

Stabilizing program	Lime (%)	Cement (%)	Fly ash (%)	SH agent (%)
L-S	10	0	0	0
C-L-S	4	6	0	0
FA-L-S	12	0	24	0
SH-L-S	10	0	0	1.5
SH-C-L-S	4	6	0	1.5
SH-FA-L-S	12	0	24	1.5

Note: The stabilizer addition ratio is the rate of stabilizer mass and dry soil mass. S saline soil

Les résultats montrent que la résistance augmente avec le temps de cure avec un ralentissement après 14 jours. L'ajout de SH améliore systématiquement les performances mécaniques (> 300 kPa).

Le ciment présente l'effet stabilisateur le plus efficace en conditions sèches. Après immersion, bien que la résistance diminue pour tous les échantillons, les échantillons contenant l'additif SH conservent un gain de résistance significatif. Le mélange FA-L-S subit la perte de résistance la plus marquée, attribuée à une réaction pouzzolanique incomplète et à une absorption hydrique accrue (Figure II.6).

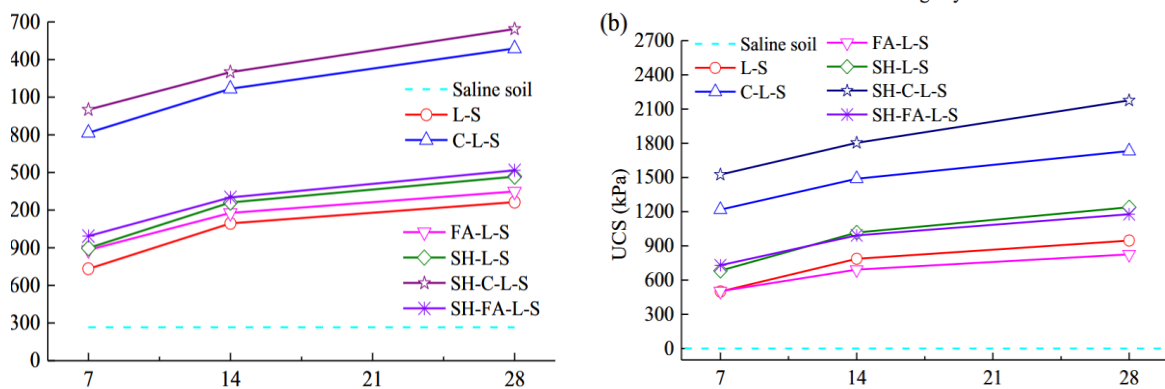


Figure II.6 : Résistance à la compression (UCS) en fonction du nombre de jours de durcissement (a) avant trempage et (b) après trempage (Li Wei et al ; 2020)

II.2.4. Méthode biologique par phyto-désalinisation

C'est une méthode innovante qui a piqué la curiosité ces dernières années en matière de réhabilitation des sols salins. Elle a été conçue en réponse aux contraintes des méthodes traditionnelles en tant que solution alternative. Cette méthode repose sur l'emploi de plantes qui supportent le sel, en particulier les halophytes, qui canalisent une grande quantité de sodium dans leurs racines. (Figure II.7) et (figure II.8)

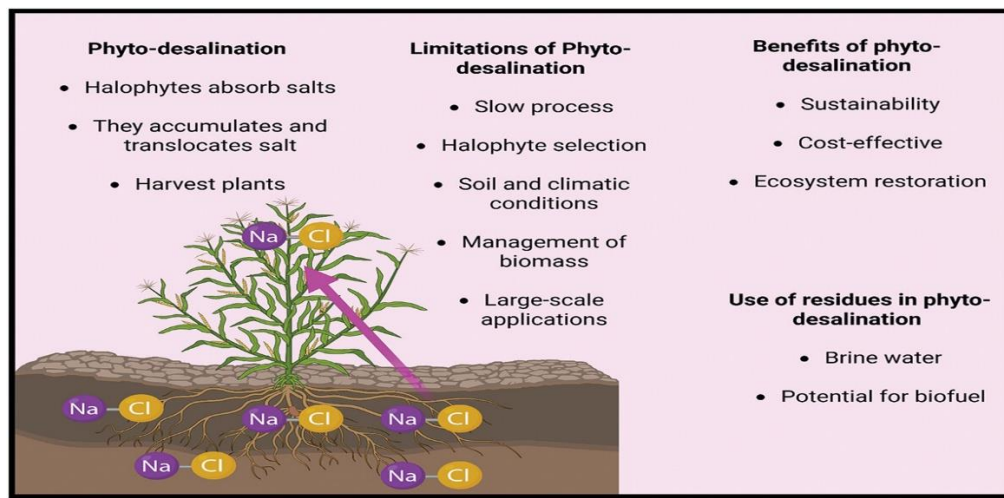


Figure II.7 : Résumé du procédé de phytodésalement, de ses limites, de ses avantages et des utilisations des résidus (Boorboori, et Zhang, 2025)

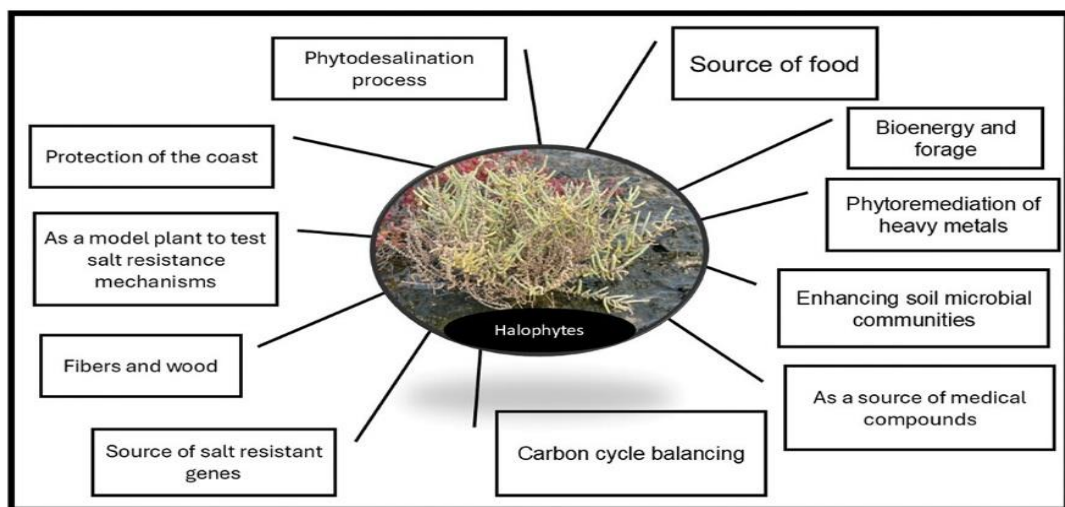


Figure II.8 : Avantages de la culture des halophytes dans un système de phytodésalement (Boorboori, et Zhang, 2025)

Ceci contribue à la réduction de la salinité et/ou l'alcalinité des sols (Ravindran et al, 2007) (figure II.9).

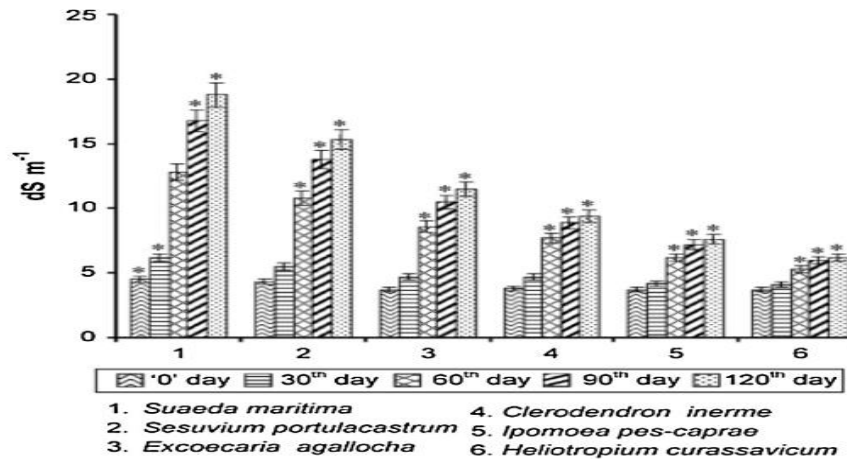


Figure II.9 : Changements C_E chez six halophytes cultivés en milieu naturel sols salins (Ravindran et al, 2007)

Les halophytes possèdent une meilleure adaptation naturelle pour gérer les stress environnementaux, tels que les métaux lourds et autres polluants organiques, comparativement aux plantes sensibles au sel habituellement sélectionnées pour les opérations de phytoremédiation. (Ghnaya et al, 2007).

Les résultats des recherches suggèrent que les halophytes sont meilleur pour la phytoextraction et la phytostabilisation dans les sols salins et pollués par des métaux, ainsi que notamment dans les régions arides et semi-arides (Boorboori, et Zhang, 2025)

II.2.4. Traitement électrocinétique des sols

Le traitement des sols par la technique électrocinétique a fait des progrès considérables ces dernières années, afin de satisfaire le besoin urgent et pressant de réhabilitation des sols contaminés. Le traitement électrocinétique (EK) implique l'injection d'un courant continu de faible intensité à travers des milieux en utilisant des électrodes réparties de manière appropriée. Le courant continu stimule la migration des ions, du fluide interstitiel, de l'électricité, et des particules fines à travers le sol vers les électrodes de charges opposées (Alshawabkeh, 2001).

Le traitement électrocinétique des sols génère quatre phénomènes, un mécanisme causé par les réactions chimiques et trois mécanismes de mouvement générés par le champ électrique appliqué. Ces derniers provoquent le mouvement des particules chargées, des solutés et des

fluides interstitiels à travers le support poreux vers les électrodes (Acar et Alshawabkeh, 1993 ; Mitchell, 1993) (figure II.10)

Il s'agit de :

- l'électrolyse (réactions chimiques associées au champ électrique),
- l'électro-osmose (transport du fluide interstitiel sous un gradient électrique),
- l'électrophorèse (transport de particules chargées, généralement des colloïdes particules d'argile et particules organiques sous un gradient électrique)
- l'électromigration (transport d'espèces ioniques sous un gradient électrique)

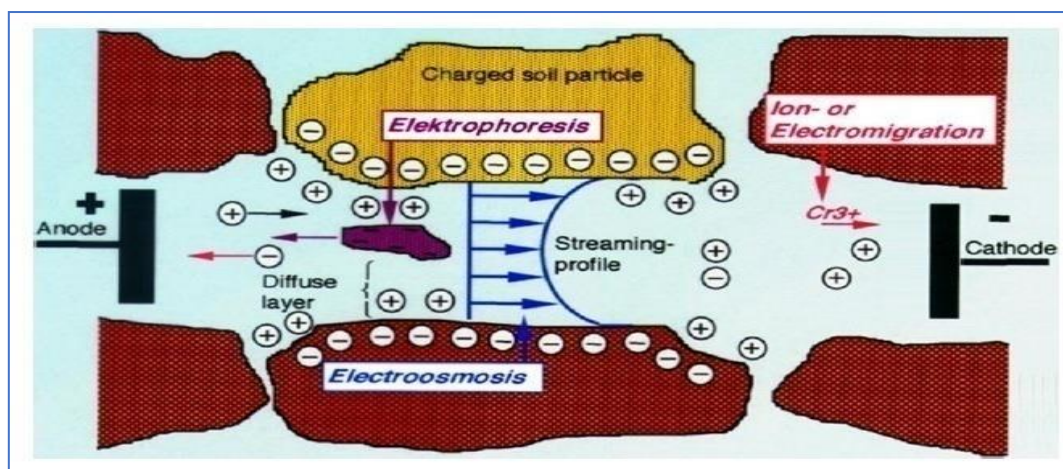


Figure II.10 : Les mécanismes de transport dans le traitement électrocinétique (Mosavat, 2012)

Les flux simultanés de fluides, d'électricité et des espèces chimiques dans le sol créent respectivement un gradient hydraulique, électrique et chimique (de concentration) dont l'amplitude modifie les vitesses d'écoulement et migration des différentes espèces. En conséquence de la migration des espèces à travers les milieux poreux, de nombreuses propriétés minéralogiques fondamentales du sol sont modifiées et affectent ensuite les caractéristiques physiques du sol (Jayasekera, 2008).

Récemment, la technique électrocinétique a été utilisée pour éliminer les sels des sols salins (Keraouti et al., 2024 ; Bessaim et al, 2020, Hadj et al, 2022). (Figure II.11)

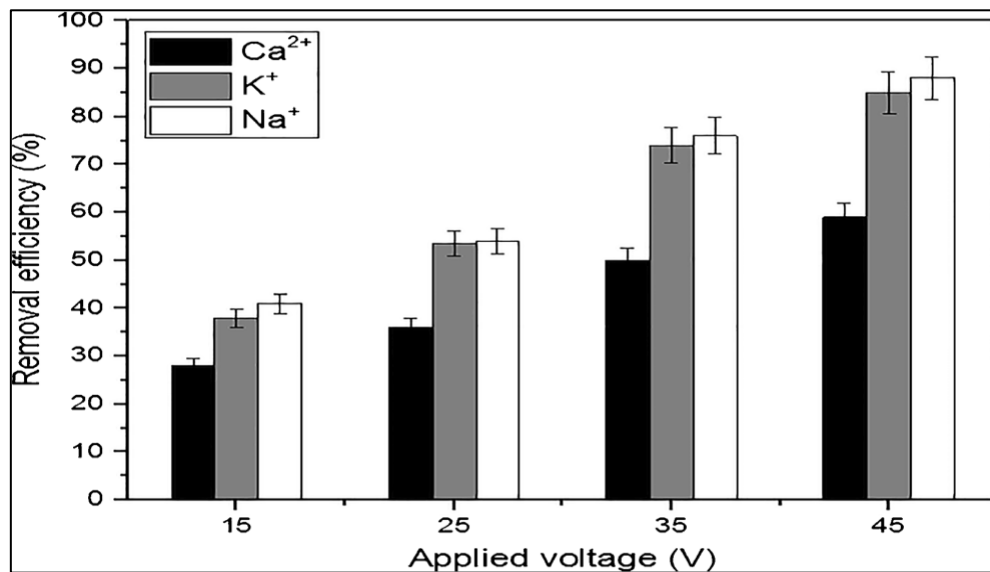


Figure II.11 : Effet de la tension électrique sur l'élimination des sels en fin du traitement (Bessaim et al, 2020)

II.3. Conclusion

Pour relever au défi et menace de la salinisation, des méthodes de traitement ont été mises au point, comme les approches hydrologiques (drainage), le traitement phyto-désalinisation qui est une technique économique, rapide et respectueuse de l'environnement, l'électrocinétique est une technique prometteuse et peu coûteuse, mais difficilement applicable pour de grande surface.

Les méthodes chimiques, enrichies par l'utilisation des amendements tels que les gypses et la chaux occupent une place centrale en raison de leur efficacité à améliorer rapidement les propriétés physico-chimiques et géotechniques des sols salins.

Malgré les résultats prometteurs obtenus, le ciment est plus utilisé pour la stabilisation des sols faibles (ex : sol gonflant) que les sols salins. En effet la remédiation des sols salins semble être très complexe. La complexité réside dans le fait que ce type de pollution est réparti sur de grandes surfaces ainsi que sa variation spatio-temporelle, à cet effet, l'ajout de ciment demeurera très coûteux.

En l'occurrence et pour rester dans le même contexte de l'utilisation de ciment, nous allons dans ce travail d'étudier la possibilité de valorisation d'un ciment expiré, qui peut représenter une voie prometteuse, économiquement et écologiquement.



Chapitre III : Identification du sol et protocoles d'essai

Chapitre III : Identification du sol et protocoles d'essai

III.1. Localisation géographique

La plaine des Bordjia est un espace situé dans le coin sud-ouest de la wilaya de Mostaganem. Au nord, elle est bordée par le plateau de Mostaganem qui s'élève au-dessus, au sud, le canal Tinn agit comme une séparation entre la plaine et les zones humides et salées de l'Habra, et au nord-ouest, la plaine Mactaâ la sépare du golfe d'Arzew (figure III.1). Elle couvre une superficie de 23.897 hectares et est essentiellement plate. Son altitude varie entre 40 et 50 mètres, ce qui crée des variations de relief très faibles avec des pentes qui sont généralement de moins de 3% (Bneder, 2015).



Figure III.1 : Localisation de la plaine des Bordjias.

III.2. Facteurs de salinisation des sols de la plaine des Bordjias

Les recherches sur la formation des sols dans la région des Bordjias réalisées par Bneder (2015), l'agence ANRH (1978, 1999) et G. E (2013) ont révélé deux types principaux, ceux riches en calcaire et ceux avec des caractéristiques halomorphes, que l'on trouve surtout au sud du canal de l'Oued Tinn et au sud de Sirat et Fornaka (figure III.2).

La composition du sol dans la région des Bordjias est l'un des éléments majeurs provoquant une salinisation initiale des terres. L'origine des sels dans le sol vient de dépôts fluviaux et de la présence géologique de sels dans les bassins, comme la marne du polycène et l'argile helvétique, entre autres.

Durant l'hiver, lorsque les pluies sont les plus fortes, les grandes masses de sel sont décapées et érodées, et la géomorphologie plate favorise la création de dépressions qui retiennent l'eau venant des collines et des bassins alentours. Les eaux de pluie transportent des sédiments salins vers ces zones déprimées, les amenant à s'accumuler sur l'ensemble de la surface et donnant au terrain l'apparence d'un marécage. La figure-(III.3) montre l'étendue de la zone sujette à l'inondation.

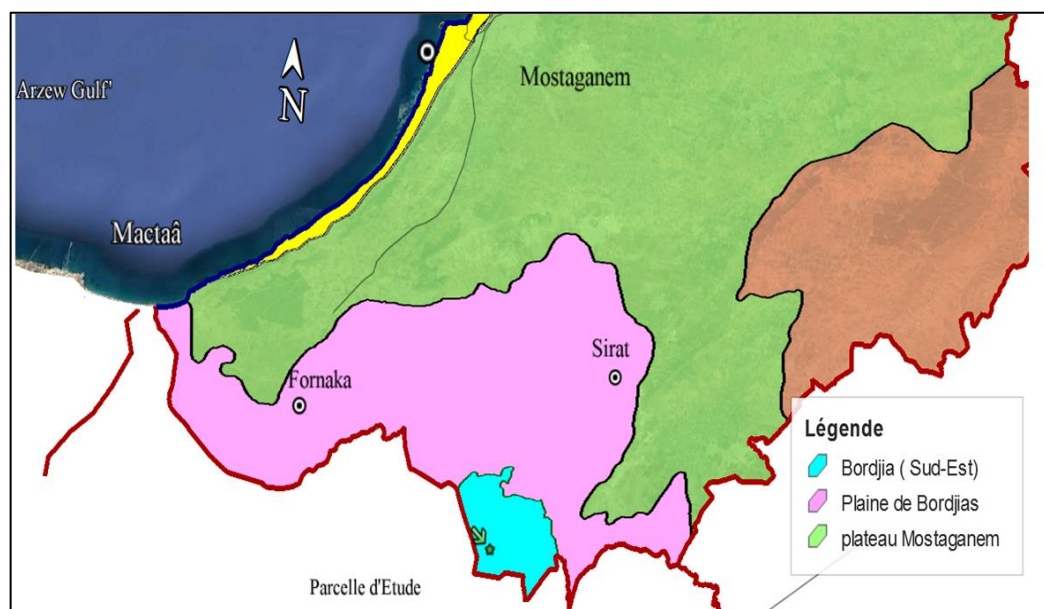


Figure III.2 : Localisation de Bordjias Sud-Est et parcelle d'étude.



Figure III.3 : Zones inondées de la plaine des Bordjias.

III.3. Caractéristiques géotechniques

III.3.1. Propriétés physiques

Les propriétés physiques du sol concernent la mesure des valeurs intrinsèques telles que les masses volumiques (NF P 94-054), la teneur en eau par étuvage (NF P 94-050), le degré de saturation, la porosité et l'indice des vides sont présentés dans le tableau (III.1).

III.3.2. Analyse granulométrique (NF P94-057)

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la répartition des grains de sol suivant leur dimension. Elle a été effectuée par tamisage pour les éléments supérieurs à 80 μm , d'après le calcul du pourcentage du refus cumulé récupéré de 3,8 %, il ressort que le sol présente une texture fine, cela nous oriente à compléter l'analyse par l'essai de sédimentométrie.

III.3.3. Analyse par sédimentometrie (NF P94-057)

Pour les fractions inférieure 80 μm , l'analyse a été faite par sédimentation, où une quantité de 80 g de sol a été imbibée en ajoutant une solution à 5% d'hexamèretaphosphate de sodium, le mélange est laissé pendant 16 heures, après quoi, il est agité pendant 5 minutes en utilisant un agitateur électrique, ensuite la solution est mise dans une éprouvette cylindrique en verre de 2 litre contenant de l'eau distillée. La lecture se fait par immersion d'un densimètre gradué. (Figure III.4).

La granulométrie est exprimée par une courbe granulométrique qui donne la dimension moyenne des grains exprimée sous forme pourcentage du poids total du matériau elle est tracée en diagramme semi logarithmique (figure III.5). Le calcul a donné les pourcentages suivants : 8,5% sable, 40,7% limon et 50,8% argile (figure III.6).



Figure III.4 : Essai de sédimentométrie.

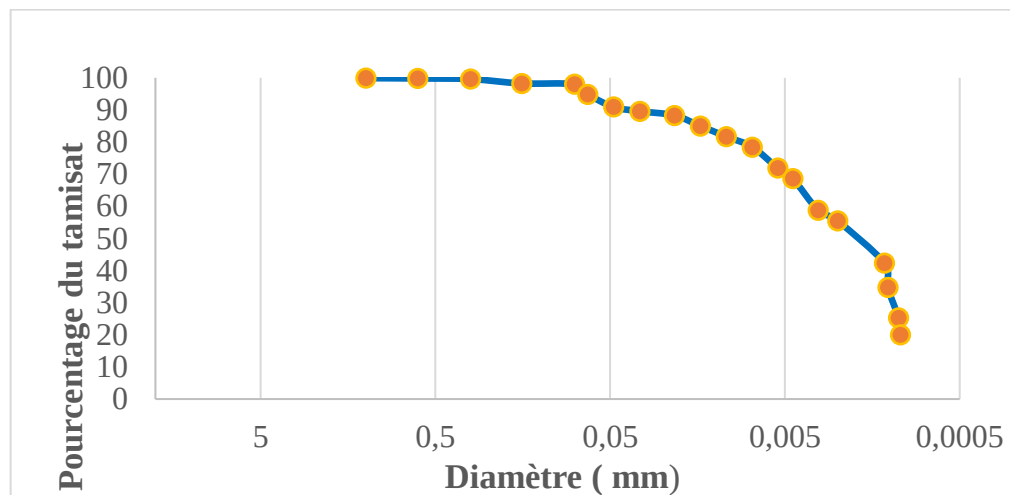


Figure III.5 : Courbe granulométrique d'échantillon de sol étudié.

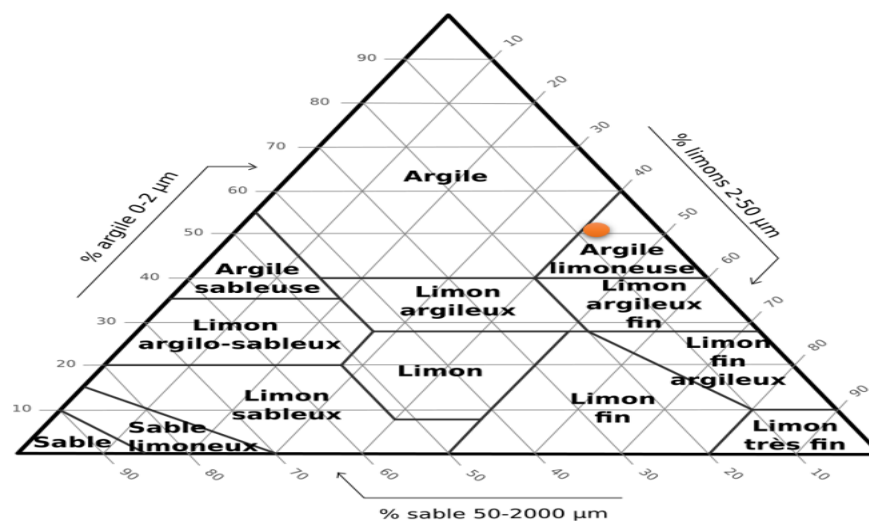


Figure III.6 : Classification du sol en fonction du triangle de texture

III.3.4. Les limites d'Atterberg (NF P94-051)

Cet essai permet de prévoir le comportement des sols pendant les opérations de terrassement, en particulier sous l'action des variations de teneur en eau. Il consiste à faire varier la teneur en eau d'une fraction de sol en observant sa consistance. Il existe deux limites dites d'Atterberg : la limite de liquidité et la limite de plasticité.

III.3.4.1. Limite de liquidité W_L

La limite de liquidité et la teneur en eau ($W\%$) qui correspond à une fermeture du sol humidifié après 25 coups (chocs) appliqués par un appareil dit appareil conforme aux spécifications qui porte le nom de Casagrande.

III.3.4.2. Limite de plasticité (W_P)

La limite de plasticité est la teneur en eau (exprimée en %) du sol en forme de rouleau qui se brise en petits tronçons de 10 à 20mm de longueur au moment où son diamètre atteint 3mm. À partir des limites d'Atterberg, on peut calculer : l'indice de plasticité (I_p).

➤ Indice de plasticité (I_p) :

Il est égal à la différence entre la limite de plasticité et la limite de liquidité, il représente l'étendue du domaine de plasticité du sol. Il s'exprime donc la relation :

$$I_p = W_L - W_P \quad (III.1)$$

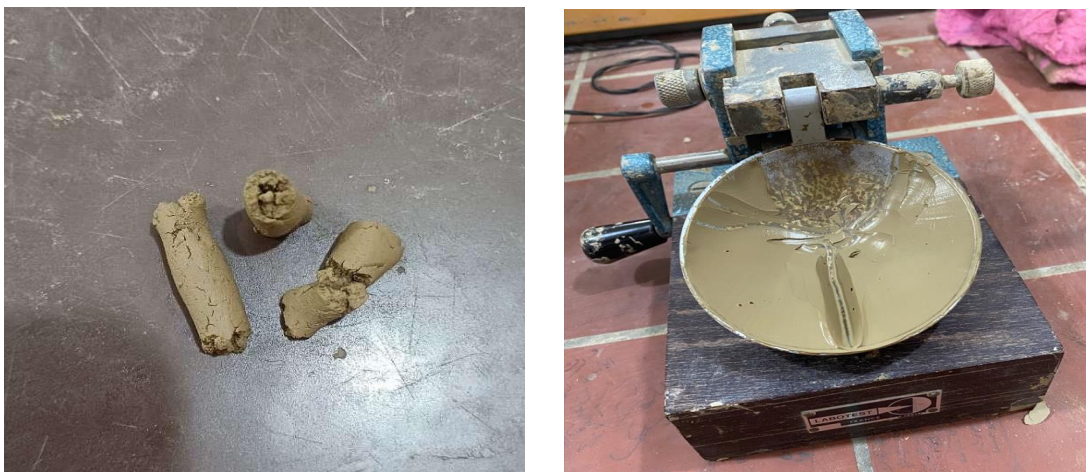


Figure III.7 : Essais des limites de plasticité et de liquidité.

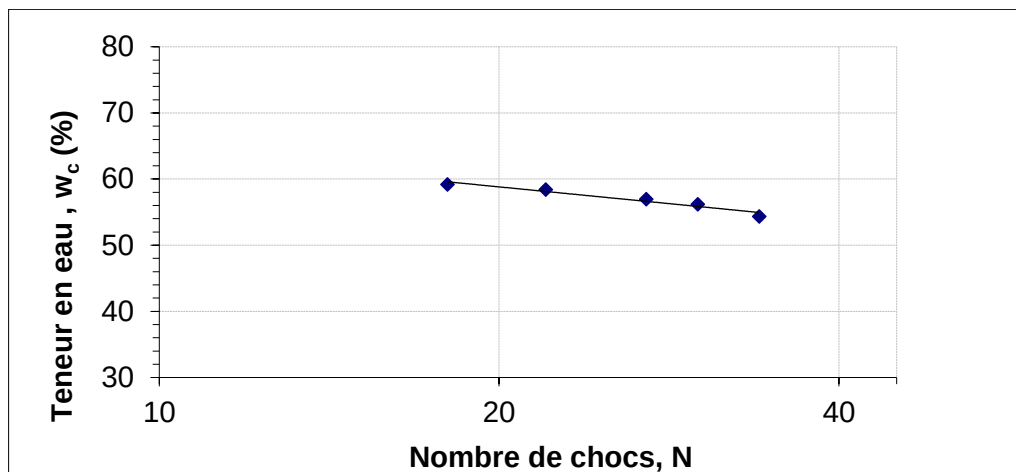


Figure III.8 : résultats de limite de liquidité du sol naturel.

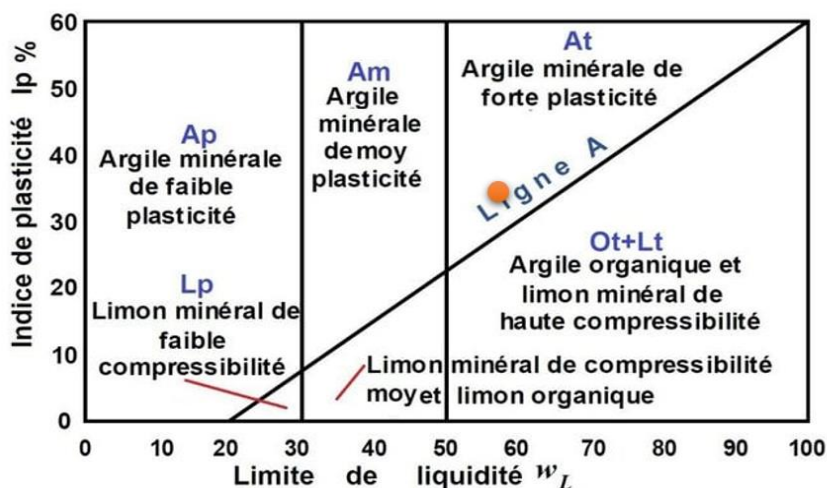


Figure III.9 : Classification des sols fins, diagramme de plasticité.

III.3.5. Valeur en bleu du sol (VBS) et surface spécifique

Le principe de l'essai consiste à maintenir en permanence sous agitation un mélange puis à introduire des quantités croissantes de bleu de méthylène par doses successives (Figure III.10), jusqu'à ce que les particules argileuses en soient saturées. Il apparaît alors un excès qui marque la fin de l'essai et qui est détecté par le test de la tâche. Ce dernier consiste à former avec une goutte de la suspension sur du papier filtre normalisé, une tache qui est un dépôt de sol coloré en bleu, entouré d'une zone humide incolore. L'excès de bleu se traduit par l'apparition dans cette zone d'une auréole d'un bleu clair. Le test est alors positif.

La surface spécifique totale d'un sol est déduite de l'essai au bleu de méthylène. Cette surface spécifique est liée directement à la quantité de bleu de méthylène absorbée par la fraction argileuse. Elle est donnée par la formule (V.2) (Santamarina et al. 2002) M.

$$SST = \left[\frac{V_{BM}}{M_{SOL}} \right] \left[m_{BM} \frac{A_v}{373,91} A_{BM} \right] \left(\frac{m^2}{g} \right) \quad (III.2)$$

Tels que : SST : surface active (spécifique) totale (m^2/g)

VBM : volume de bleu de méthylène utilisé (cm^3), **Msol** : masse de matériau sec(g).

m_{BM}, teneur en bleu de la solution de bleu de méthylène (g/mL) ; **A_v**, nombre d'Avogadro (6.02×10^{23} mol);, aire couverte par une molécule de bleu de méthylène ($130 \text{ \AA}^2$), et le poids moléculaire du bleu de méthylène (373,91).

III.3.6. Activité des argiles (NF P94-068)

L'activité d'une argile est définie par Skempton, (1953) comme le rapport de son indice de plasticité (IP) au pourcentage des particules de diamètres inférieurs à $2\mu m$.

$$A_c = I_p / \% \text{ argiles } (2\mu m) \quad (III.3)$$

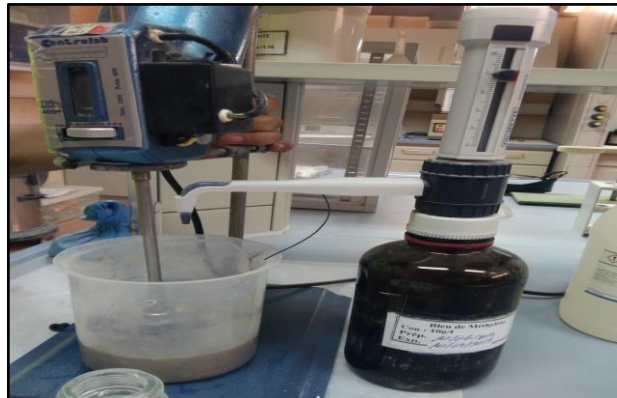


Figure III.10 : Essai de bleu méthylène

Les résultats obtenus indiquent que la valeur de bleu de méthylène (VBS), de la surface spécifique (SS) et de l'indice d'activité (A_c) sont de 5,25 %, $109,88 \text{ m}^2 / g$ et 1,1 respectivement, identifiant le sol comme un sol argileux de texture fine présentant une activité normale (Casagrande ,1948 et Mitchell, 1976).

Les valeurs de l'activité du sol étudié, comparées à celle données par les classifications de Skempton, (1953) et Mitchell (1976), confirment que le sol est un mélange de deux types d'argile, à savoir la kaolinite et illite. En effet, les sols à texture fine ont une rétention

d'humidité élevée et ont généralement une perméabilité plus faible, ce qui explique la teneur en eau in-situ de 28,12 %. Le tableau III.1 résumé des résultats obtenus

Tableau III.1 : Propriétés physiques du sol.

Propriétés physique	Symbole	Unité	Valeur
La teneur en eau à l'état	W	%	28,12
Poids volumique des grains solides	ρ_s	g/cm^3	2,47
Poids volumique sec	ρ_d	g/cm^3	1,44
Degré de saturation	S	%	
L'indice de vide	e		0,71
Porosité	n		0,41
Perméabilité	K	g/cm^3	3×10^{-4}
VBS		%	5,25
Surface spécifique	SSt		109,88
Limite de liquidité	W _l	%	57,19
Limite de plasticité	W _p	%	23,33
Indice de plasticité	I _p	%	33,87
Activité argileuse	Ac	%	1,1
Argile		%	50,8
Limon		%	40,7
Sable		%	8,5

III.3.7. Identification pédologique

III.3.7.1. Dosage de carbonates CaCO₃ (NF ISO 10693)

Le dosage du calcaire total (en %) a été réalisé à l'aide de l'appareil de mesure « calcimètre Bernard ».

L'essai consiste à déterminer le volume de gaz carbonique dégagé après attaque par l'acide chlorhydrique d'un demi-gramme de matériau sec :

$$CaCO_3(\%) = \frac{\text{Volume du CO}_2 \text{ dégagé par 0,5g d'échantillon}}{\text{Volume du CO}_2 \text{ dégagé par 0,5g de CaCO}_3 \text{ pur}} \quad (III.4)$$

Tableau III.2 : Teneur en CaCO₃ de quelques sols.

CaCO ₃ (%)	Dénomination
0-10	Argile ou limon.
10-30	Argile calcaire.
30-70	Marne.
70-90	Calcaire argileux

III.3.7.2. Potentiel d'hydrogène pH (NF X 31-103)

Le principe est la mise en équilibre ionique d'une certaine masse de solide avec un volume donné d'eau déminéralisée. Le ratio de la masse de l'échantillon sur la masse d'eau, est fixé à 1/5 (g/g). La mesure du pH se fait dans la suspension aqueuse à l'équilibre (après 60 minutes d'agitation à $20 \pm 2^\circ\text{C}$, suivie de 2 heures de repos).

III.3.7.3. La conductivité électrique à l'extrait dilué Ce1/5 (NF X 31- 113) (norme ISO : 11265)

La conductivité électrique du sol est essentiellement liée à la quantité des ions dans l'eau interstitielle, de leur charge et de leur mobilité électrique. La conductivité est une mesure qui donne une indication approximative de la concentration des ions solubles présents dans l'échantillon.

Le rapport du mélange sol/eau est égal à (1/5). La mesure est assurée par un conductimètre multi-gammes de modèles Hanna. Le mélange est effectué pendant 30 minutes on mesure après filtration la conductivité de la solution.

III.3.7.4. Matière organique (MO)

La détermination de la matière organique du sol a été réalisée par la méthode dérivée de la norme ISO 14235 « la méthode de Walkley-Black ». Les résultats sont exprimés en fonction de C% (Walkey et Black ,1934). Le taux des matières organiques dans le sol est évalué après oxydation de l'échantillon au bichromate de potassium en milieu acide sulfurique. Le dosage de l'oxydant résiduel est effectué par le sel de Mohr ((NH₄)₂SO₄, FeSO₄, 6H₂O) en présence de diphénylamine comme indicateur de fin du dosage.



Figure III.11 : Essai de détermination de la matière organique

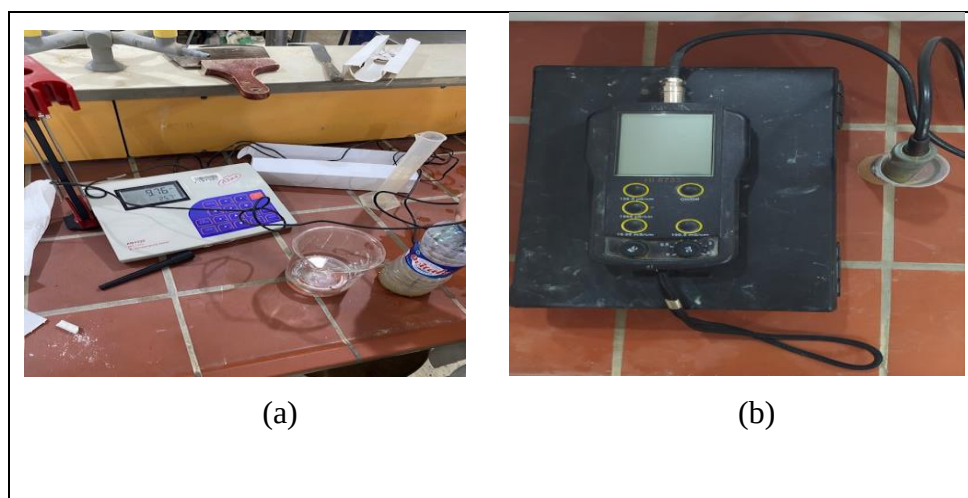


Figure III.12 : Essai de détermination (a) potentiel d'hydrogène pH, (b) conductivité électrique

III.3.7.5. Capacité d'échange Cationique (CEC) (AFNOR NF X31-130)

Elle est déterminée, en utilisant la méthode de percolation à l'acétate d'ammonium. Une quantité de sol est introduite dans une colonne en verre et mise en contact avec la solution de lixiviation ($\text{NH}_4\text{CH}_3\text{COO}$, 1.0 M, pH 7). Le premier lixiviat récupéré servira à quantifier les actions échangeables. Par la suite, le sol est rincé en utilisant un solvant aprotique (l'éthanol, dans notre cas) jusqu'à absence de réaction, en présence du réactif de Nessler. Le passage d'une solution de chlorure de sodium (NaCl 0.5 M) à travers l'échantillon permet alors la libération des ions d'ammonium dans un second lixiviat. Leur dosage s'effectue par spectrophotométrie UV – visible (Jasco V-530) à la longueur d'onde 630 nm en milieu alcalin et en présence de nitroprussiate de sodium (Rodier, 1984). La quantité des ions ammonium est alors convertie en milliéquivalents par 100 g de sol. La quantification des alcalins et alcalino-terreux échangeables, recueillis dans le premier filtrat, est effectuée par spectrométrie d'émission à flamme.

III.3.7.6. Le dosage des anions solubles

Le calcul se fait à partir de l'extrait de la pâte saturée du sol

III.3.7.7. Le dosage des bases échangeables

Le dosage des cations a été effectué la photospectrométrie à flamme (Van et al ,1999) (figure III.12). La solution a été saturée par une solution d'acétate d'ammonium 1N ajusté à pH=7, le dosage se fait par titration de Ca^{2+} et Mg^{2+} avec l'éthylène diamine tétra-acétique en présence de la soude (NaOH), du cyanure de potassium (KCN) et du murexide



Figure III.13 : Le spectrophotomètre à flamme pour la détermination des sels

- Les résultats relatifs à l'analyse pédagogique sont représentés dans le tableau (III.3)

Tableau III.3 : dosage des anions solubles et bases échangeables

Bases échangeables (meq/100g)				Anions solubles (meq/l)		
Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	HCO^{-3}	Sulfate (SO^{-2}_4)
26,055	1,55	16,21	11,105	94	0,475	103,79

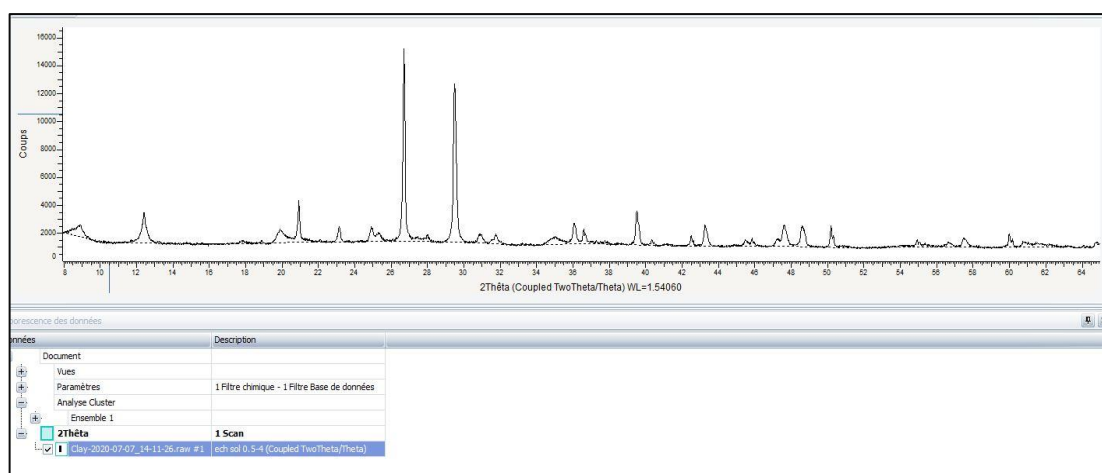
Tableau III.4 : Propriétés pédologiques.

Propriétés	Unité	Valeur
pH		8
La conductivité (Ce)	ms/cm	7,9
Teneur en Calcaire totale	%	24,19
Matière organiques	%	1,69
SAR		34,13
CEC		12,66
EPS		32,92

III.3.7.8. Minéralogie par diffraction des rayons X et composition chimique

L'analyse chimique élémentaire (Fluorescence X) et DRX des échantillons du sol de Bordjias a été réalisée au Laboratoire Lafarge de Sig.

La courbe DRX des deux échantillons de sols étudiés, est représentée dans la figure (III.13). L'analyse par DRX des échantillons, montre l'existence de pics correspondants aux minéraux, tels que : la kaolinite, la calcite, le quartz et l'illite. La composition chimique et minéralogique quantitative moyenne des prélèvements est indiquée dans les tableaux (III.4) et (III.5) l'analyse a révélé que les fractions argileuses dominantes sont principalement la kaolinite (5,86 %) et l'illite (29,74 %).



Figures III.14 : Diagramme DRX du sol étudié.

Tableau III.5 : Composition minéralogique du sol en pourcentage.

Minéral	Pourcentage
Dolomite	4,73
Quartz	22,83
Illite	29,74
Kaolinite	5,86
Chlorite	1,92
Pyrophyllite	7,71
Albite	2,08
Microline	1,85
Diaspore	0,36
Topaz	0,16

Tableau III.6 : Composition chimique du sol en pourcentage.

Oxydes	Pourcentage
SiO ₂	39,89
Al ₂ O ₃	11,72
Fe ₂ O ₃	4,68
CaO	18,19
MgO	2,19
P ₂ O ₅	0,19
SO ₃	0,71
K ₂ O	1,07
Na ₂ O	1,14
Perte au feu	19,8

III.4. Détermination des performances mécanique

III.4.1. Essai Proctor (NF P 94-093)

Il s'agit de déterminer la teneur en eau optimale conduisant à une force portante maximale pour un sol donné, selon des conditions de compactage précises. On compacte des échantillons de sol dans un moule normalisé, en adoptant diverses valeurs.

Pour chaque essai, on détermine la masse volumique apparente de teneur en eau correspondante. (Figure III.14). Puis les résultats sont portés sur un graphique et la courbe joignant au mieux les points obtenus passe par un maximum qui correspond à l'optimum Proctor. Le résultat illustré par la (Figure III.15) montre que le sol a atteint sa capacité portante maximale de 1,62 g/cm³ pour une teneur en eau optimum W_{opt} de 25,59.

Le sol présente une forte sensibilité à l'eau autour de l'optimum Proctor. C'est l'une caractéristique des sols argileux.

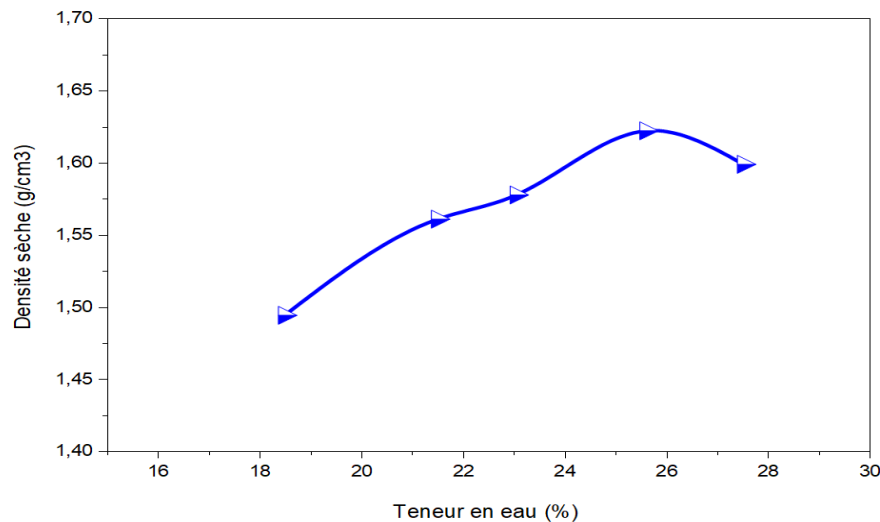


Figure III.15 : Essai Proctor du sol naturel.

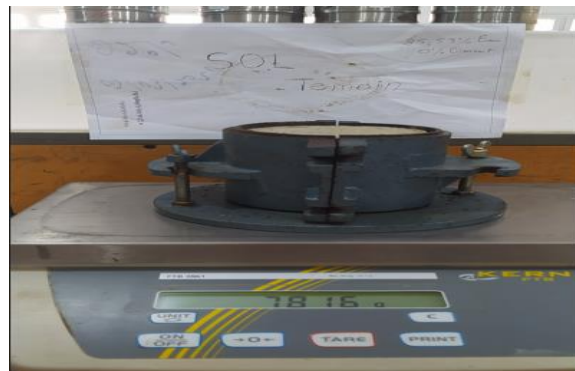


Figure III.16 : Essai Proctor échantillon confectionné.

III.4.2. Essai de compressibilité et consolidation à l'œdomètre (NF P 94-090-1)

L'essai s'est effectué conformément à la norme, sur un sol remanié. Au plan quantitatif, le programme expérimental a comporté trois essais de compressibilité permettant de déterminer les paramètres de compressibilité et de consolidation des sols étudiés

➤ Principe de l'essai :

L'essai s'effectue sur plusieurs éprouvettes provenant d'un même échantillon et prélevé sensiblement au même niveau. Chaque éprouvette de sol est placée dans une enceinte cylindrique rigide (bague) et un dispositif pour appliquer un effort axial vertical maintenu sur l'éprouvette. L'essai consiste à appliquer à chaque éprouvette une contrainte verticale différente

après chaque consolidation et à mesurer la variation de la hauteur lorsqu'elle est mise en présence d'eau.



Figure III.17 : Appareil Œdométrique pour essai de consolidation.

➤ Mode opératoire :

1. Préparer les échantillons.
2. Mettre les échantillons ainsi préparés entre deux pierres poreuses.
3. Porter à saturation à l'aide du dispositif de l'œdomètre.
4. Appliquer le chargement de l'échantillon par paliers de contraintes à l'aide du piston de l'œdomètre.
5. Effectuer la lecture du comparateur lorsque le tassement est stabilisé (Consolidation)

➤ Les paramètres initiaux

La section œdométrique S : est la section transversale de l'enceinte œdométrique avec un rayon R , telle que $S = R^2 \times \pi$

1. Hauteur initiale h_0 : est la hauteur de l'enceinte
2. Le poids sec (P_s) : le poids sec est le poids de l'échantillon œdométrique après passage à l'étuve, le poids sec de l'échantillon nous aide pour calculer le poids spécifique du sol (γ_d) tel que :

$$\gamma_d = \frac{P_s}{S \times h_p} \quad (III.5)$$

Et pour calculer la hauteur pleine h_p tel que :

$$h_p = \frac{P_s}{\gamma_s} \quad (III.6)$$

3. Indice de vide initiale e_0 : est l'indice du vide de l'échantillon à $T = 0s$ et $P = 0$ tel que :

$$e_0 = \frac{h_0}{hp-1} \quad (\text{III.7})$$

4. Contrainte effective de pré consolidation « σ_{pc} » : qui correspond à la contrainte effective verticale maximale supportée par l'échantillon au cours de son histoire Courbe(e- log σ).
5. Indice de compressibilité « C_c » : qui représente la pente de la droite (e- log σ_v') pour le cas du chargement, il est donc défini par :

$$C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta(\log \sigma_v')} \quad (\text{III.8})$$

6. Indice de gonflement « C_g » : qui représente la pente de la droite (e - log σ_v') pour le cas du déchargement et il a la même expression que C_c .

$$C_s = \frac{\Delta e}{\Delta(\log \sigma_v')} \quad (\text{III.9})$$

7. Coefficient de compressibilité « a_v »

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta(\sigma_v')} \quad (\text{III.10})$$

8. Coefficient de compressibilité volumique

$$m_v = \frac{av}{1+e_0} \quad (\text{III.11})$$

9. Module œdométrique

$$E_{oed} = \frac{1}{mv} \quad (\text{III.12})$$

➤ Traçage des courbes

La courbe de compressibilité du sol gonflant est représentée dans la figure suivante (III.17), c'est à partir du graphe que les paramètres de compressibilité, la consolidation et gonflement sont calculés, et sont essentiels pour la classification des sols.

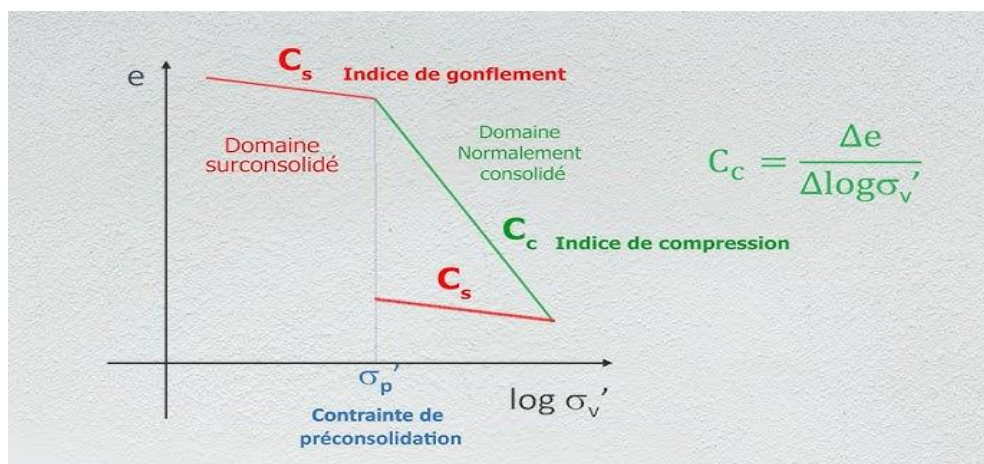


Figure III.18 : schéma de la courbe de compressibilité.

➤ Préparation des échantillons

Il est à noter que l'essai a été effectué sur des échantillons remaniés, préparés par broyage puis compactage quasi statique à la densité et à la teneur en d'optimum Proctor calculés.

Les échantillons du sol naturel (SN) ont été préparé par mélange du sol à la teneur en eau et densité optimum de Proctor soit $w\%$: 25,59% et la densité sèche égale à $1,62 \text{ g/cm}^3$. L'échantillon est ensuite prélevé en enfonçant une cellule, puis lissé et arasé aux niveaux supérieur et inférieur en comblant les vides éventuels. A partir de la courbe, on peut déterminer les coefficients de gonflement et de compressibilité du sol.

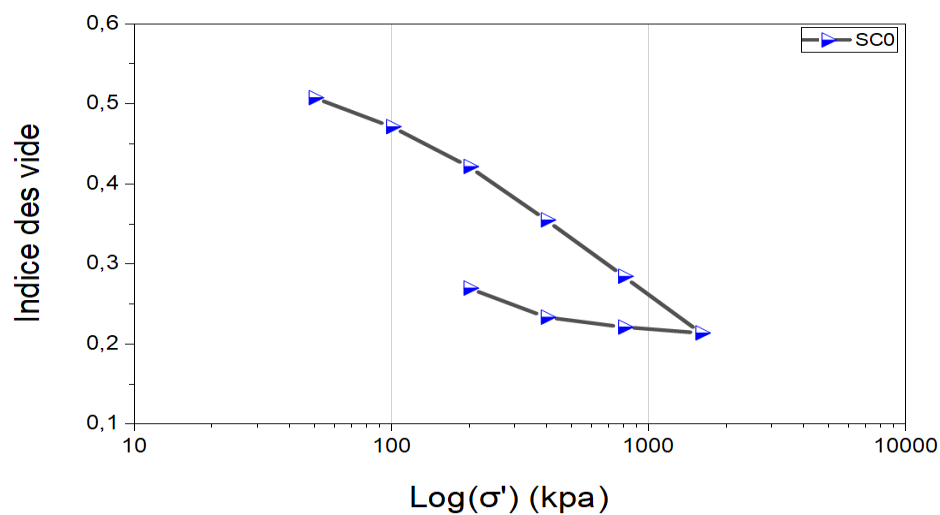


Figure III.19 : Courbe de compressibilité du sol naturel.

Tableau III.7 : résultats d'essai de compressibilité du sol naturel.

Cc	Cs	e ₀	σ _v (kpa)	C _c / (1+ e ₀)	Classement
0,221	0,0246	0,5644	60,1	0,141	Moyennement à assez fortement compressible

Il existe plusieurs abaques qui nous permettent de classer le degré de compressibilité du sol.

Tableau III.8 : Classification de sol selon l'indice de compressibilité

$C_c < 0.020$	Sol incompressible
$0.020 < C_c < 0.050$	Sol très peu compressible
$0.050 < C_c < 0.100$	Sol compressible
$0.100 < C_c < 0.200$	Sol moyennement compressible
$0.200 < C_c < 0.300$	Sol assez fortement compressible
$0.300 < C_c < 0.500$	Sol très compressible
$C_c > 0.500$	Sol extrêmement compressible

Tableau III.9 : Classement des sols selon leurs indices de compressibilités et indices des vides, donné par Philipponnat et Hubert (1997)

$C_c / (1 + e_0) < 0,015$	sol incompressible
$0.015 < C_c / (1 + e_0) < 0,05$	sol peu compressible
$0.05 < C_c / (1 + e_0) < 0,2$	sol moyennement compressible
$C_c / (1 + e_0) > 0,2$	sol très compressible

III.4.3. Essai de compression simple

Les essais de compression simple ont été effectués sur éprouvettes prismatiques (4x4x16 cm³), Les échantillons ont été préparés à l'optimum Proctor et conservés pendant 1h comme pour l'essai Proctor avant de les mettre dans le moule prismatique.

➤ Compactage des mélanges

Le compactage des éprouvettes est du type statique à simple effet. L'opération est conduite jusqu'à l'affichage sur l'écran de la lecture de la pression voulue. Dans cette étude on a appliqué contraintes de compactage 1 MPa. Le démoulage se fait directement après le compactage.

Les éprouvettes ont été conservées dans une étuve à 25 C° jusqu'au moment de l'essai de compression. Aux différents instants voulus après traitement, les éprouvettes ont été mises sur un système de compression simple avec une vitesse de mise en charge statistique. Pour chaque mesure, on a testé deux éprouvettes, la moyenne a été prise pour présenter les caractéristiques en compression simple des sols préparés.

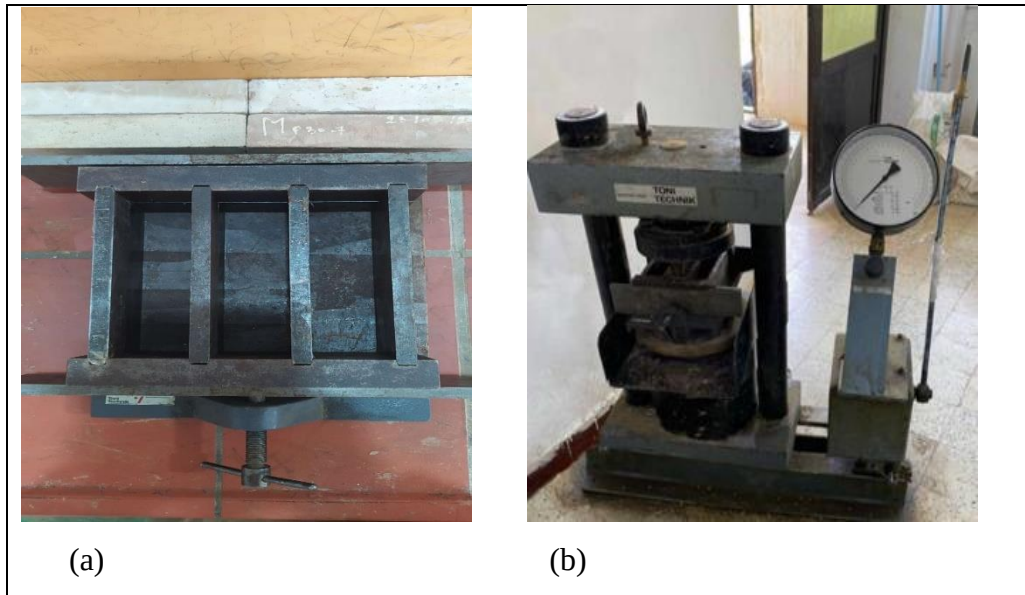


Figure III.20 : Matériel pour l'essai de résistance à la compression (a) moule de compression
(b) presse d'essai de compression.

III.4.3 Résistance à la compression EN 12390-3

L'essai consiste à rompre entre les plateaux d'une presse hydraulique de capacité 3000KN.

Une vitesse constante (0.5KN/S) des éprouvettes prismatiques. Celles-ci doivent être bien centrée entre les plateaux, afin d'éviter l'apparition des moments dus à l'excentricité de la charge de compression. On calcule la résistance à la compression par la relation :

$$R_c = \frac{F}{S} \quad (\text{III.13})$$

Avec :

R_c : Résistances a la compression (MPa) ; F : La charge de rupture (N) ; S : Section de l'éprouvette (mm^2)



Figure III.21 : Essai à la compression.

III.4.4. Mesure des pertes de masse

Il s'agit de suivre l'évolution des variations pondérales des éprouvettes, le suivi continu des éprouvettes des différents mélanges est effectué jusqu' à 28 jours.

Les pesées sont réalisées à l'aide d'une balance électronique à affichage digital possédant une précision relative de 1 %. Les pertes en poids constatées correspondent à l'évaporation de l'eau libre par suite de la différence d'hygrométrie entre les éprouvettes confectionnées et le milieu extérieur.

La perte en masse est calculée par la formule suivante :

$$\text{Perte en masse relative} = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (\text{III.14})$$

Où M_i et M_f sont respectivement, les masses de l'éprouvette après démoulage, exprimée en Kg.



Figure III.22 : Eprouvettes cylindriques durant le suivi de la perte de masse.

III.5. Conclusion

Ce chapitre a permis de caractériser le sol de la plaine des Bordjias (Mostaganem), identifié comme un sol salin sodique, fin et plastique sensible à forte sensibilité à l'eau. L'analyse minéralogique et pédologique révèlent un sol dominé par l'illite et la kaolinite, avec une forte teneur en sels et sodicité importante ($CE = 7,9 \text{ mS/cm}$, $SAR = 34,13$, $ESP = 32,92$ et $pH = 8$)

Sur le plan mécanique, le sol présente une moyennement à assez forte compressibilité indiquant un risque de tassement sous charge.

Ces résultats confirment la nécessité de traiter ce sol (notamment par ajout de liant tel que le ciment, pour améliorer ses propriétés géotechniques et réduire les risques liés à sa salinité et à sa compressibilité.

Chapitre IV : Résultats et Analyses

Chapitre IV : Résultats et Analyses

VI.1. Introduction

Le but dans ce chapitre est de présenter et analyser les résultats obtenus après le traitement du sol salin par la méthode chimique. Dans ce contexte nous avons choisis comme liant hydraulique l'ajout du ciment expiré à différents pourcentage et d'étudier son effet sur les propriétés mécaniques (Compactage, compression simple et consolidation).

VI.2. Définition générale du ciment

En génie civil, le ciment est une poudre minérale fine qui agit comme un liant hydraulique. En présence d'eau, il forme une pâte plastique capable d'agglomérer des granulats pour créer du béton ou du mortier. Il durcit progressivement pour former une structure solide et résistante, même sous l'eau.

VI.2.1. Ciment expiré

Le ciment est un produit qui réagit à l'humidité de l'air. Quand il est conservé pendant une durée prolongée dans des conditions inadéquates (humidité, exposition à l'air...), il subit une hydratation partielle involontaire, même sans l'ajout d'eau, ce qui provoque l'apparition de grumeaux et une diminution progressive de sa réactivité.

Le ciment utilisé est un CPJ-CEM II/B 42.5 N nommé « Matine» à base de calcaire fabriqué par la cimenterie LAFARGE. Ce ciment a été stocké depuis 2021 dans le laboratoire LCTPE.

- **Préparation du ciment expiré pour essais**

Pour pouvoir l'utiliser, le ciment a été tamisé à 80 µm pour atteindre une finesse proche de celle d'un ciment neuf. Des essais de base d'identification ont été réalisés pour déterminer ces propriétés physiques, les résultats obtenus ont été comparés à ceux d'un ciment neuf de même classe (annexe 1) (tableau VI.1)

Tableau VI.1 : Comparaison des propriétés physiques du ciment

Propriétés	Ciment expiré	Ciment neuf (norme NA 442)
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,42	3,10 – 3,15
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,15	1,2
Consistance (%)	20,5	26,5 ± 2
Finesse (cm ² /g)	3619,58	3700 – 5200

On remarque que le ciment a perdu de ces propriétés normalisées initiales, notamment sa consistance et finesse. Lorsqu'il absorbe l'humidité, le ciment entame son processus d'hydratation et forme des grumeaux par l'agglomération de ces particules (grains), ces grumeaux peuvent être brisés et devenir fins, mais lorsque la durée de stockage augmente, ils deviennent plus rigides et très difficile à briser (ETHE et al ; 2018, GUERZOU.T, 2024) aussi la diminution de la masse volumique absolue suggère que les particules sont plus légères (Meddah et al ; 2022).

VI.3. Procédé de préparation du sol pour traitement

La préparation des échantillons s'est faite par la substitution en masse du sol naturel par le ciment expiré avec 8 et 12 %, les échantillons sont notés suivant le tableau (IV.2) :

Tableau IV.2 : Notation des mélanges préparés.

<i>Symbole</i>	<i>SC0</i>	<i>SC8</i>	<i>SC12</i>
Mélange	Sol non traité	Sol traité avec 8% ciment	Sol traité avec 12% ciment

Les échantillons prélevés de sol ont d'abord été séchés à l'étuve à 120 °C, puis calibrés, pulvérisés et tamisés à travers un tamis n° 14 (1,2 mm) conformément aux recommandations de la norme AASHTO M 145 (1991).

➤ Pour les essais de Proctor normal, les échantillons ont été confectionnés conformément à la norme ASTM D698, les mélanges de sol humide et de ciment sont préparés et stockés dans des sacs plastiques une heure (1 h) avant leur utilisation. Le ciment a été soigneusement mélangé aux échantillons à raison de 8 et 12 % en poids, puis agité vigoureusement jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène et humide, sans grumeaux.

➤ Les échantillons de sol destinés pour l'essai de compressibilité avec l'œdomètre sont issus d'échantillons préparés pour l'essai Proctor, chacun étant mélangé à sa quantité d'eau optimale et de densité sèche. Les échantillons composés d'un mélange sol-ciment ont été testés dans des œdomètres standard après 24 heures de durcissement dans la cellule. Avant le démarrage de l'essai, les échantillons ont été pesés et placés dans l'œdomètre pour l'essai de consolidation.

IV.4. Evolution des propriétés mécaniques du sol traité

IV.4.1. Influence des teneurs en ciment sur les paramètres de compactage

Des essais Proctor normale ont été réalisés pour chaque mélange sol-ciment avec des teneurs en eau progressives, le but est de déterminer la teneur en eau optimale correspondante. Le tableau (VI.3) résume les valeurs optimales obtenues, tandis que la figure (IV.1) illustre l'évolution des essais compactage pour chaque concentration sol-ciment.

Tableau IV.3 : Résultats pour essai Proctor

	Ciment (%)	$W_{opt}(\%)$	$\rho_{OPT} (g/cm^3)$
SC0	0	25,59	1,62
SC8	8	22,63	1,64
SC12	12	19,32	1,70

On constate que l'ajout de ciment augmente la densité sèche optimale et diminue la teneur en eau optimale (W_{OPT}). L'augmentation ρ_{OPT} s'explique par le regroupement des particules d'argile provoqué par la floculation et l'agrégation. L'ampleur de ces changements est proportionnelle à la quantité de ciment introduite, plus cette quantité est élevée, plus la teneur

en eau optimale se déplace vers des niveaux d'humidité plus faible et plus la densité sèche optimale est augmentée. Ainsi, la teneur en eau a diminué de 25,59 % à 19,32 % et la densité est passée de 1,62 à 1,70 g/cm³.

Ceci peut être expliqué par le fait qu'une plus grande quantité de ciment entraîne la formation d'avantage de produits d'hydratation et par conséquent une plus grande consommation d'eau. La formation accrue de produits d'hydratation dans l'échantillon améliore sa structure. Cela conclut qu'une quantité élevée de ciment absorbe plus d'eau dans les pores capillaires, réduisant par conséquent la teneur en humidité du mélange.

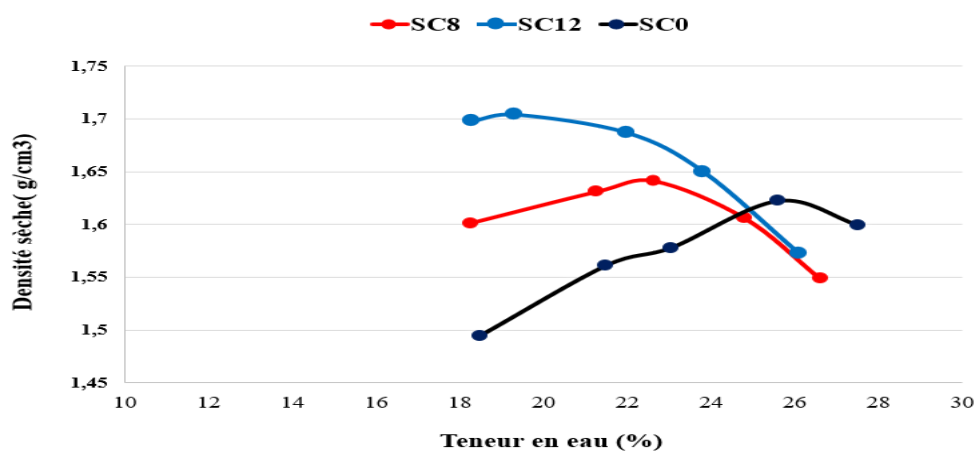


Figure IV.1 : Influence de l'addition du ciment sur le compactage.

. En d'autres termes, un taux élevé de ciment réduit l'indice des vides et renforce l'interaction entre les particules d'argile (Chen Z, 2024)

D'autre part suivant (Okagbue et al. (2007) l'agglomération du ciment autour des grains de sol, qui entraîne une augmentation de la taille des particules fines, pourrait également expliquer la réduction de la teneur en eau optimale. En effet, l'ajout de ciment modifie la distribution granulométrique du sol en augmentant la taille des particules fines et en réduisant ainsi leur affinité pour l'eau. (Figure IV.2).

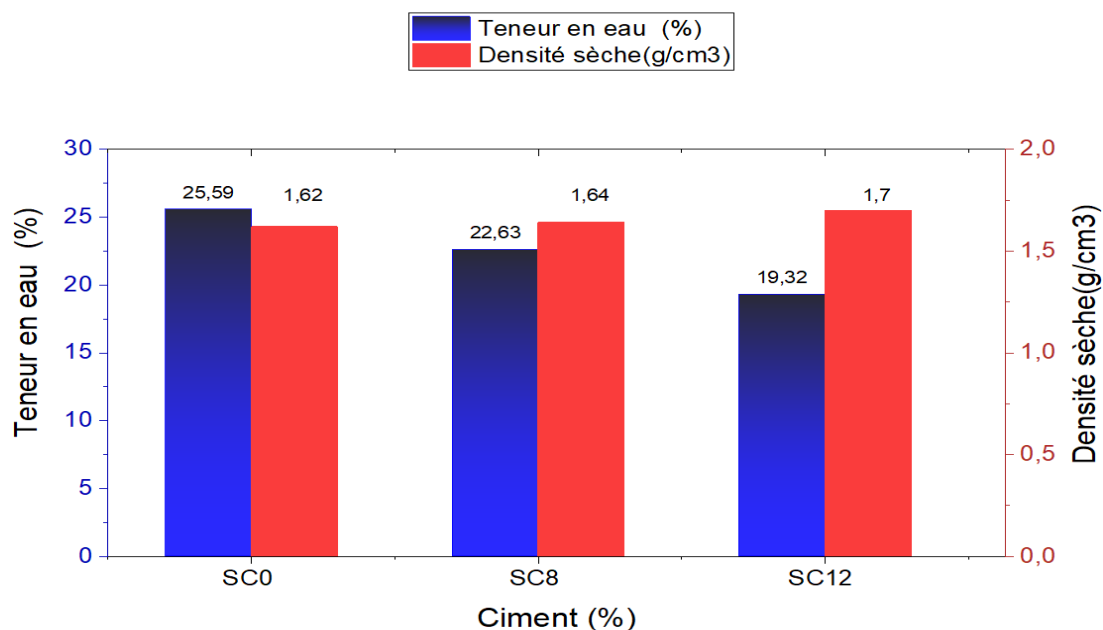


Figure IV.2 : Histogramme de relation entre $W_{opt}(\%)$, densité sèche et pourcentage en ciment.

IV.4.2. Effet sur les paramètres de consolidation et compressibilités

Les courbes de compressibilité des échantillons de sol salin non traité et traités au ciment expiré, exprimées en fonction de l'indice des vides et du logarithme de la contrainte verticale effective (relation $e-\log \sigma_v'$), sont présentées dans la figure (IV.3).

Par l'analyse du graphique (il est possible d'identifier les indices de gonflement, de compressibilité ainsi que la pression de consolidation des sols. Les résultats de l'essai de compressibilités pour le sol traité à différents pourcentages du ciment sont représentés sur le tableau (IV.4) suivant :

Tableau IV.4 : résultats d'essai de compressibilité

	SC0	SC8	SC12
Indice de Compressibilité (C_c)	0,221	0,021	0,0161
Indice de Gonflement (C_s)	0,0246	0,013	0,005
Indice des vides (e_0)	0,5644	0,5106	0,442
Pression de pré consolidation σ_v' (kpa)	60,1	360,2	401,5

La figure (IV.3) montre une diminution des paramètres avec l'augmentation de la teneur en ciment. Une forte diminution de l'indice de compressibilité (C_c) lorsque la teneur en ciment passe de 8 à 12 %. Le passage de 8% à 12% par rapport à 0 % n'apporte qu'une amélioration marginale de 2,2% sur C_c . Aussi le potentiel de gonflement diminue fortement avec le dosage en ciment, ce qui est excellent pour un sol salin (risque de gonflement dû aux sels) (Keren et Ben-Hur (2003)).

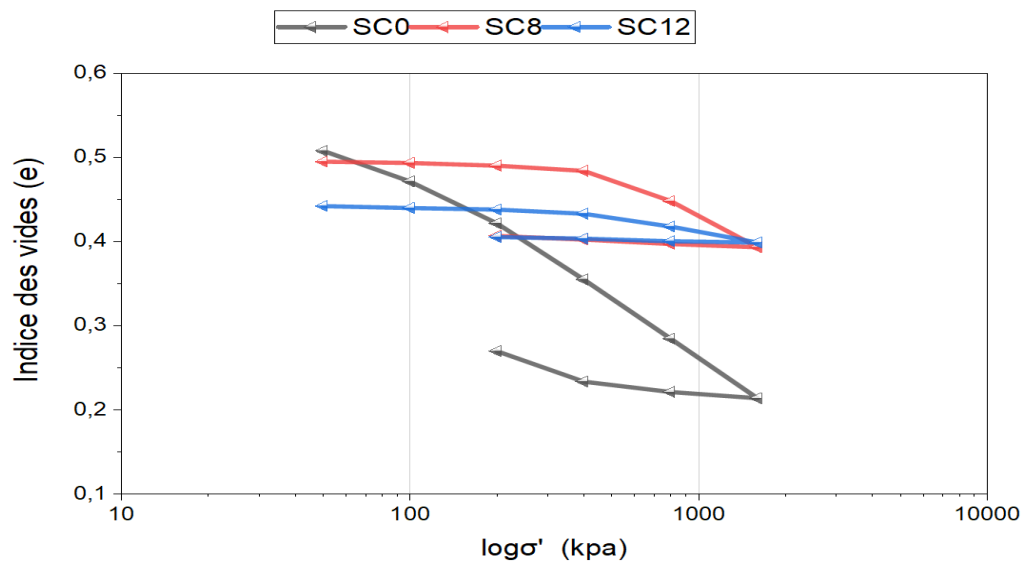


Figure IV.3 : Courbe de compressibilité œdométrique.

La diminution significative de l'indice peut être attribuée à la réaction pouzzolanique entre le ciment et l'argile, qui a produit des gels de ciment C-S-H et C-A-H, conférant une résistance aux charges externes. On peut en conclure que l'augmentation de la teneur en ciment réduit la compressibilité du sol stabilisé (Subramaniam, Sreenadh et Banerjee, 2016).

Le tableau (IV.4) montre l'effet de la teneur en ciment sur la pression de pré consolidation (σ_v'). Une augmentation indique une meilleure capacité du sol à retenir la pression appliquée sans tassement important, entraînant une diminution de l'indice des vides (Dafalla et Mutaz 2012).

Le gain pour la contrainte de pré-consolidation entre SC8 (360 kPa) et SC12 (401,5 kPa) n'est que de 11 %. À 8 %, les grains de ciment hydraté ont créé un squelette rigide à l'intérieur de la matrice argileuse saline. À 12 %, le dosage est très important rendant la matrice encore plus

rigide (une matrice trop cimentée) qui bloque totalement le réarrangement des particules de sol sous la charge.

En comparaison avec le sol non traité, le sol traité au ciment expiré présente une compressibilité moindre. Il y a une réduction directe de l'indice de compressibilité, accompagné d'une même dynamique de réduction pour l'indice de gonflement et les vides. Selon les calculs donnés au tableau (IV.5), le sol est considéré comme un sol très peu compressible selon la classification de Philipponnat et Hubert (1997)

Tableau IV.5 : Classement des sols traités

Paramètres	SC0	SC8	SC12
C_c	0,221	0,021	0,0161
e_0	0,564	0,5106	0,442
$C_c/(1+e_0)$	0,141	0,014	0,011
Classification	Moyennement à assez forte compressibilité		Sol très peu compressible

En effet, la chaux libérée durant l'hydratation s'échange avec les cations adsorbés du minéral argileux permettant aux particules d'argile de se rapprocher les unes des autres, entraînant une floculation/agglomération des particules d'argile transformant le sol en un matériau plus granulaire (Khattab ,2002 ; Bourokba et al ,2015).

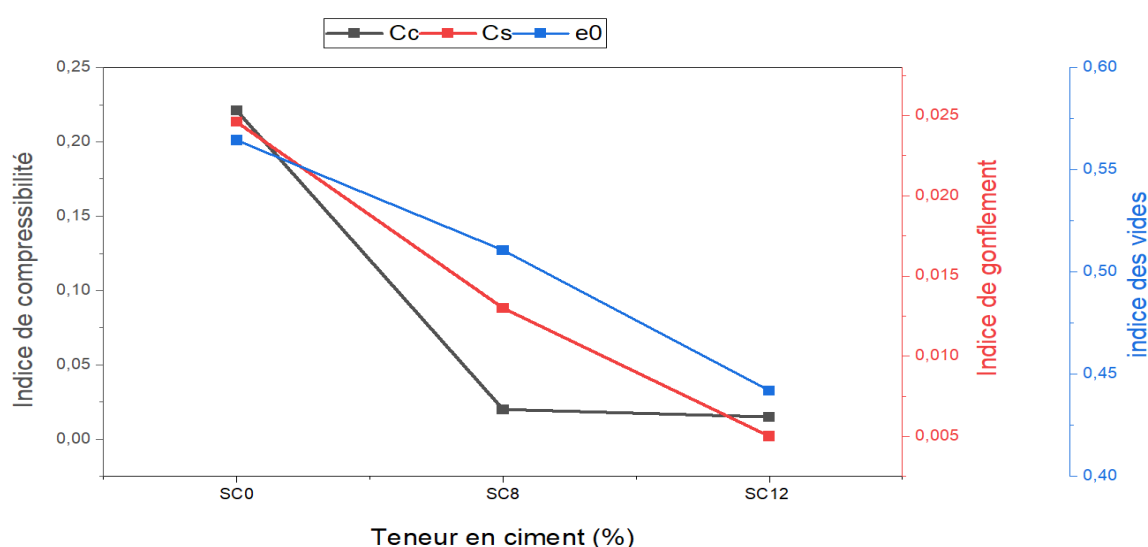


Figure IV.4 : Evolution des indices de compressibilité, gonflement et des vides.

IV.4.3. Evolution des paramètres de compressibilité des sols traités

Pour comprendre encore plus l'influence du ciment sur du sol salin, les paramètres de compressibilité ont été calculés et sont représentées au tableau (IV.6) le calcul s'est fait à titre indicatif entre le chargement initial et final. Ces derniers présentent en générale une tendance de réduction avérée avec l'ajout de ciment.

On remarque que le coefficient m_v plus il faible, plus le sol est rigide et moins il se déforme sous chargement. La conséquence directe de ces réductions de la compressibilité est une augmentation considérable du module œdométrique (E_{oed}), qui est une mesure directe de la rigidité du sol pendant la consolidation.

Cette augmentation de la rigidité est l'avantage principal de la stabilisation. Elle signifie que pour une même contrainte appliquée, le sol traité subira des déformations verticales beaucoup plus faibles.

Une analyse comparative révèle que la majorité de cette amélioration est obtenue en passant de 0 % à 8 % de ciment. La réduction de a_v pour SC0 - SC8 et SC0-SC12 varie de 65,38% et 85,28 % respectivement. Alors m_v varie de que le passage de SC0 et SC12, la réduction varie de 64,15 et 84,03 %. En effet l'ajout des 4 % supplémentaires (de 8 % à 12 %) n'apporte qu'une réduction marginale de 20 % de la valeur déjà atteinte à 8 %.

Tableau IV.6 : évolution des paramètres de compressibilité des sols traités

Echantillon	SC0	SC8	SC12
Coefficient de compressibilité (a_v) (kpa^{-1})	$1,9 \times 10^{-4}$	$6,57 \times 10^{-5}$	$2,79 \times 10^{-5}$
Coefficient de compressibilité volumique (m_v) (kpa^{-1})	$1,2 \times 10^{-4}$	$4,35 \times 10^{-5}$	$1,94 \times 10^{-5}$
Module œdométrique (E_{oed}) (kpa)	$8,25 \times 10^{+3}$	$2,30 \times 10^{+4}$	$5,17 \times 10^{+4}$

IV.4.4. Résistance à la compression simple

Les essais de compression simples (figure IV.5) montrent que le traitement au ciment expiré améliore significativement la résistance mécanique par rapport à l'échantillon témoin qui présente une valeur de 5,053 Mpa à 28 jours. Alors que les échantillons SC8 et SC12 atteignent respectivement 8,632 et 7,558 Mpa. Cette amélioration est principalement liée aux réactions d'hydratation du ciment qui entraînent la formation de composés cimentaires tels que les hydrates de silicate de calcium (CSH) et les hydrates d'aluminate de calcium (CAH).

Toutefois, la cinétique de résistance, similaire pour les trois échantillons jusqu'aux 21 jours, diverge par la suite, la progression de SC12 ralenti, tandis que le SC8 affiche un gain notable à 28 jours.

Par contre, les pertes de performances mécaniques pour des sols salins traités au ciment non expiré, ont été observées à long terme (Xing et al. 2009), et s'expliquent par la présence des sels notamment Mg^{2+} , Cl^{-} et SO_4^{2-} , qui perturbe la formation continue de CAH et de CSH, (Monsif et al. 2021). En effet, les ions sulfate réagissent chimiquement avec les produits d'hydratation tels que le CAH, le CASH et la portlandite, formant ainsi l'ettringite et la thaumasite responsables de la dégradation de la matrice cimentaire (Puppala et al. 2004).

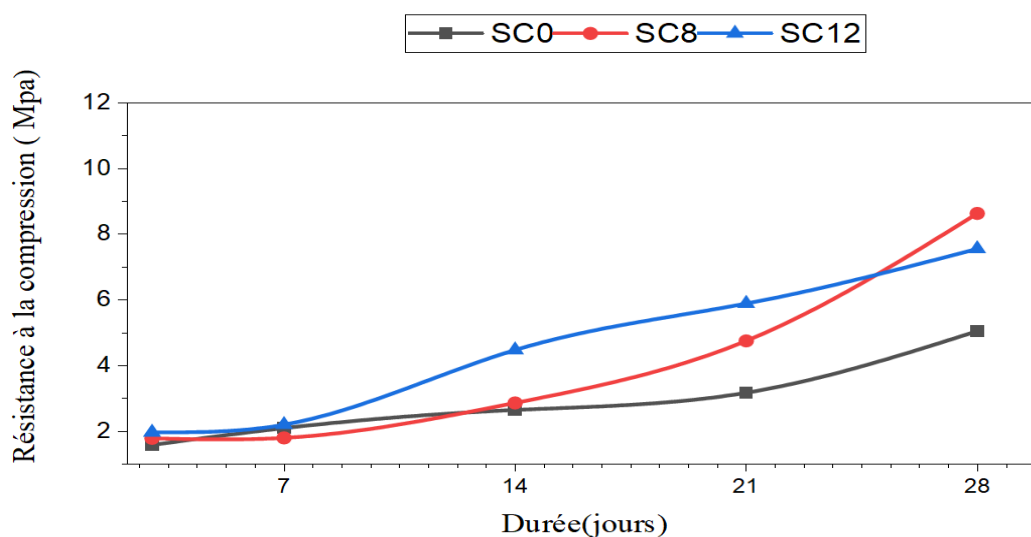


Figure IV.5 : Evolution des résistances à la compression en fonction du temps

Dans ce cas d'étude, l'observation a été enregistrée à court terme pour un dosage de 12 %, ce qui indique que le ciment expiré, une fois exposé à l'humidité peut contenir des produits d'hydratation notamment de la portlandite. En plus de la production des éttringites et thaumasite, cette dernière a probablement réagi avec les sels. La réaction chimique entre le

sulfate de magnésium (MgSO_4) et l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) génère de l'hydroxyde de magnésium ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), un produit qui aggrave la perte de résistance mécanique (Chegenizadeh et al. 2020 a).

Ce qui suit indique qu'en comparaison avec un dosage de 8 % de ciment, un dosage de 12 % contenait plus de portlandite avant le test. Par conséquent, pour ce ciment utilisé, on estime que 8 % est le dosage optimal à court terme. Toutefois, pour plus de confirmation il sera très important de suivre l'évolution des résistances à long termes.

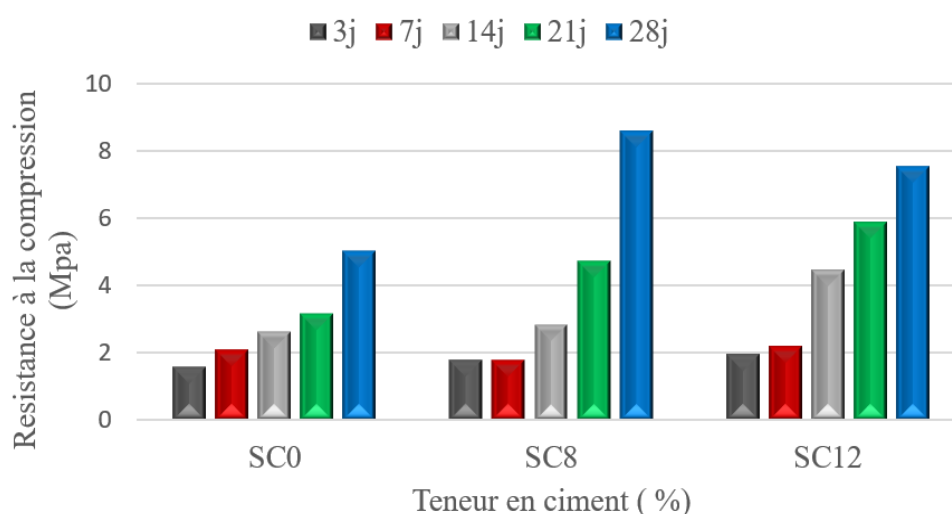


Figure IV.6 : Variation des résistances à la compression en fonction de la teneur en ciment

IV.4.5. Suivi de perte de masse

La perte en masse est un phénomène principalement lié à la cinétique d'évaporation de l'eau et à ses conséquences physico-chimiques directes sur la matrice, lors de la phase de séchage et de cure ambiante (à l'air libre) constaté après le démoulage.

Le suivi des pertes en masse durant le durcissement (figure IV.7), correspondent donc à l'évaporation de l'eau libre soit l'eau n'ayant pas réagi chimiquement, par suite de la différence d'hygrométrie avec l'ambiance extérieure. L'ajout de ciment expiré modifie fondamentalement la cinétique dessiccation liée plus à l'existence des macro-pores.

Les réactions pozzolaniques avec l'argile et l'hydratation du ciment comblent les gros pores (macropores) pour former des pores beaucoup plus fins. Dans ce cas, il est très possible que la quantité d'eau libre disponible pour s'évaporer diminue, ce qui réduit la perte en masse globale lors du séchage pour les sols traités comparé au sol non traité. (Figure IV.

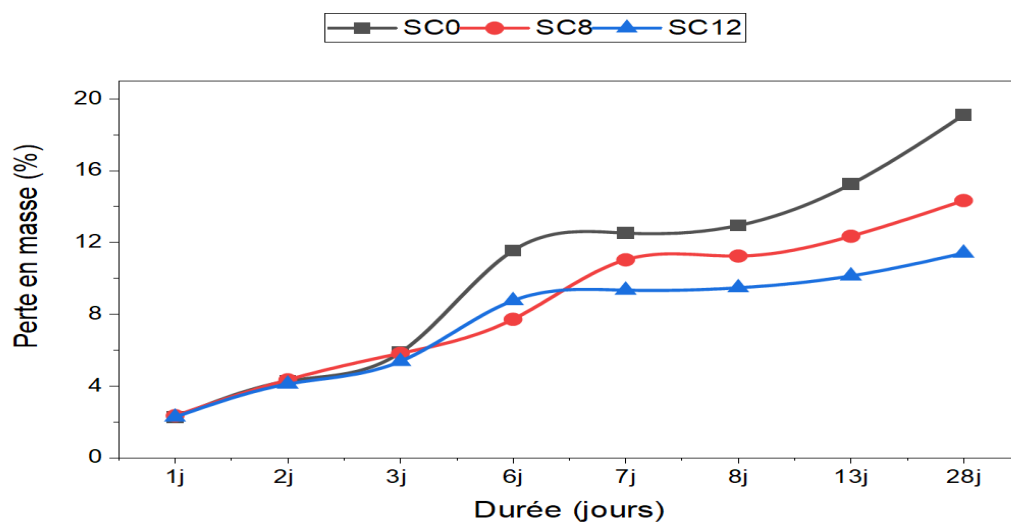


Figure IV.7 : Evolution des pertes en masse en fonction du temps

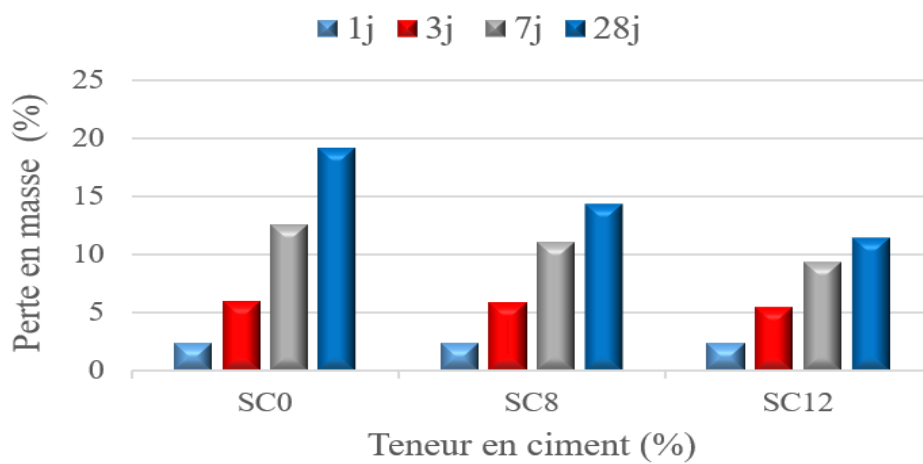


Figure IV.8 : Variation des pertes en masse en fonction de la teneur en ciment

IV.5. Conclusion

Ce chapitre analyse l'efficacité du traitement d'un sol salin par du ciment expiré à des dosages de 8 % et 12 %. Les résultats montrent que l'ajout de ciment améliore significativement les propriétés du sol :

- Il augmente la densité sèche optimale, réduit la teneur en eau optimale
- Transforme le sol en un matériau rigide et très peu compressible.
- Concernant la résistance mécanique, le dosage de 8 % s'avère optimal (atteignant 8,63 MPa), surpassant le dosage de 12 % qui subit probablement une dégradation due aux réactions chimiques entre les sels du sol et l'excès de ciment.
- Moins de perte d'eau : Le traitement au ciment expiré réduit la perte de masse pendant le séchage, ce qui traduit une meilleure stabilité du sol vis -à-vis du retrait

Pour conclure, le recyclage de ce ciment expiré avec un dosage de 8% s'avère être une solution efficace pour l'amélioration du sol salin de la plaine des Bordjias.

Conclusion Générale

De nombreuses techniques visant à améliorer les terrains salins ont été mises en place au cours des dernières décennies ; elles constituent désormais l'outil principal dont l'ingénieur géotechnique s'appuie pour faire face aux enjeux de stabilité ou de déformations qu'il peut rencontrer lors de la conception d'un projet. On peut citer à titre d'exemple la stabilisation mécanique (compactage) ainsi que les méthodes chimiques (ajout de ciment, pouzzolane, chaux, cendres volantes).

La chimie de la stabilisation est la méthode la plus courante, surtout avec l'ajout des liants hydrauliques tel que le ciment, a montré des résultats très encourageants. Cependant, il est à noter que les recommandations sur le dosage de ciment à incorporer pour obtenir une stabilité optimale varient considérablement. Divers facteurs notamment le type de sol, le type de et la teneur en ciment et les propriétés intrinsèques du sol. Le ciment peut nettement transformer les caractéristiques mécaniques et l'impact le plus remarquable dans l'utilisation du ciment se manifeste dans les sols argileux de plasticité modérée à élevée.

La salinisation des sols constitue aujourd'hui un enjeu majeur, particulièrement dans les régions arides et semi-arides telles que l'Algérie. Au-delà de ses impacts environnementaux, elle affecte considérablement les propriétés géotechniques des sols et compromet la durabilité des ouvrages de génie civil.

Le présent travail a porté sur l'étude d'un sol salin-sodique de la plaine des Bordjias (Mostaganem) ainsi que sur l'évaluation de l'efficacité d'un ciment expiré comme agent de stabilisation pour l'amélioration des propriétés mécaniques à court terme.

Les analyses d'identification ont montré que le sol étudié est un sol fin, et fortement salin-sodique, caractérisé par une conductivité électrique élevée (7,9 mS/cm), un SAR de 34,13 et un ESP de 32,92. Sa composition minéralogique est dominée par l'illite et la kaolinite, tandis que ses caractéristiques mécaniques révèlent une sensibilité importante à l'eau et une compressibilité relativement élevée.

Les résultats expérimentaux ont montré que l'ajout de ciment expiré améliore significativement les propriétés mécaniques du sol salin étudié.

- Le compactage mécanique a montré que le ciment expiré augmente la densité sèche optimale du sol avec diminution de la teneur en eau, rendant le sol moins sensible à l'eau, ce qui est très intéressant pour son utilisation dans les travaux routiers.
- La résistance à la compression simple est passée de 5,053 MPa pour le sol naturel à 8,632 MPa pour le mélange de 8 % de ciment expiré. Le dosage de 12 % a également permis une amélioration, avec une résistance de 7,558 MPa. De plus, la formation de gels cimentaires et la liaison entre les particules de sol résultant de ces gels sont les principaux facteurs contribuant à cette résistance.
- Pour l'essai de compressibilité et consolidation, on pense qu'à des niveaux de contrainte plus élevés, les particules du sol salin non traité sont comprimées de manière importante, même à faible degré de contrainte. Tout ajout de ciment, quelle que soit la quantité, assurera une liaison supplémentaire entre les particules, ce qui augmentera la rigidité du sol salin et générera une plus grande résistance à la déformation, qui augmente avec le temps de l'essai. Toutefois, les performances obtenues indiquent que le dosage de 8 % constitue le taux optimal de stabilisation, offrant les meilleurs résultats mécaniques à court terme.
- La perte de masse a diminué en fonction du dosage, ce qui indique que les sols traités peuvent résister au retrait de dessiccation.

L'étude a également montré que l'augmentation de la teneur en ciment au-delà de 8 % n'entraîne pas nécessairement une amélioration proportionnelle des performances. Le dosage de 8 % apparaît comme le plus performant à court terme, tandis que le dosage de 12 % présente une diminution relative des gains mécaniques, probablement liée aux interactions entre les produits d'hydratation du ciment et les sels présents dans le sol.

Ainsi, pour cette étude préliminaire, les résultats obtenus démontrent que la valorisation d'un ciment expiré peut constituer une solution technique, économique et environnementale intéressante pour la stabilisation des sols salins destinés aux travaux de génie civil. Bien que sa date de validité commerciale est expiré, ce matériau conserve une partie importante de ses propriétés liantes, ce qui lui permet de contribuer efficacement à l'augmentation de la résistance mécanique du sol et à la réduction de sa sensibilité aux effets néfastes de la salinité. Cette

approche contribue non seulement à l'amélioration des propriétés mécaniques des sols, mais également à la réutilisation d'un matériau généralement considéré comme un déchet.

➤ Perspectives

Les perspectives de ce travail s'orientent prioritairement vers l'étude de la durabilité à long terme des sols salins traités au ciment expiré.

Bien que les résultats mécaniques immédiats soient encourageants, il est impératif d'analyser le comportement mécanique à long terme.

Des essais de compressibilité œdométriques sur des échantillons vieillis permettraient d'évaluer la stabilité chimique du mélange ciment-sol, et par conséquent comprendre son impact sur la stabilité des ouvrages en environnement agressif.

Par ailleurs, il conviendrait d'optimiser la formulation en variant les taux d'incorporation du ciment expiré. Parallèlement, l'élaboration de liants composites, en associant ce matériau à d'autres ajouts hydrauliques ou pouzzolaniques, permettrait d'enrichir les perspectives de valorisation.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **Acar, Y. B. and Alshawabkeh, A N. (1993)** “Principles of Electrokinetic Remediation,” Environmental Science and Technology, Vol. 27.(13), pp 2638-2647.
- **Adam I., Michot D., Guero Y., Soubega B., Moussa I., Walter C., (2012)** “Detecting soil salinity changes in irrigated Vertisols by electrical resistivity prospection during a desalinization experiment”. Agricultural Water Management 109, pp1-10.
- **Alshawabkeh A.N., (2001).** “Basics and application of electrokinetic remediation. Handouts prepared for a short course”. Federal University of Rio de Janeiro.
- **ANRH (1978)** “Etude agro pédologique de la plaine des Bordjias”. ANRH, Algiers, pp 98
- **ANRH (1999)** “Etude agro pédologique de la plaine des Bordjias”. ANRH, Algiers, pp 115.
- **Berkane.Ibrahim, Houari Boulouar, Youcef Bekhadda, Farid Gacem, Abdelkader Douaoui, Mohamed Larid, Khelloufi Benabdeli (2021)**“Assessment And Mapping Of The Agro-Ecological Risk In The Mina Plain (Northwestern Algeria): Soil Salinity And Irrigation Water Quality” Ekologia (Bratislava) - Journal of the Institute of Landscape Ecology, Slovak Academy of Sciences, 40 (3): 201–211, .doi:10.2478/eko-2021-0022.
- **Bessaim Mohammed Mustapha, Hanifi Missoum, Karim Bendani, Nadia Laredj, Mohamed Said Bekkouche (2020).** “Sodic-saline soil remediation by electrochemical treatment under uncontrolled pH conditions” Arabian Journal of Geosciences.13,pp 199 doi.org/10.1007/s12517-020-5210-6
- **Bneder (2015)** “Etude de faisabilité technico économique de mise en valeur des terres par la concession : Périmètre Bordjia dans les communes de Hassiane et Sirat”. Direction des Services Agricoles, Mostaganem, pp 1-137
- **Boorboori, M. R., & Zhang, H. (2025).** The role of halophytes in phyto-desalination: mechanisms and potential. Environmental Pollutants and Bioavailability, 37(1). <https://doi.org/10.1080/26395940.2025.2552171>).
- **Boorboori, M. R., & Zhang, H. (2025).** The role of halophytes in phyto-desalination: mechanisms and potential. Environmental Pollutants and Bioavailability, 37(1). <https://doi.org/10.1080/26395940.2025.2552171>)
- **Bouhata Rabah, Mahdi Kalla , Hadda Driddi,(2015)** “Cartographie de la variabilité spatiale de la salinité du sol dans de la zone endorhéique de gadaine (Nord-Est Algérien) " Romanian Journal of Geography 2015; 59 (1), pp 63-69;
- **Casagrande A (1948)** “Classification and identification of soils. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 113,pp 901-930.

- **Chegenizadeh A**, Keramatikerman M, Afzal F et al (2020a) An Investigation into Performance of Cement-Stabilized Kaolinite Clay with Recycled Seashells Exposed to Sulphate. Sustainability 12:8367. <https://doi.org/10.3390/su12208367>
- **Chen Z** (2024) Experimental study on the evaluation in thermal-hydraulic-mechanical chemical properties of cement-stabilized clay. PLoS ONE19(11): e0313760. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0313760>
- **Dai, L.**, Senge, M., Ito, K., Onishi, T., Yoshiyama, K., (2015). “Experimental evaluation of irrigation methods for soil desalinization”. Paddy and Water Environment 13, pp 159- 165.
- **Daliakopoulos, I. N.**, 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, pp 727-739. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.177.
- **Douaoui A.**, Hartani T ., Lakehal M. (2006).“ La salinisation dans la plaine du Bas-Cheliff : acquis et perspectives”. Economies d’eau en Systèmes irrigués au Maghreb. Deuxième atelier régional du projet Sirma, Marrakech, Maroc, 29-31.
- **Díaz F. J.**, Sanchez- Hernandez J. C., Notario J. S. (2021). “Effects of irrigation management on arid soils enzyme activities”. Journal of Arid Environments, 185, 104330. doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104330
- **Eishoei, E.**, Nazarnejad, H., Miryaghoubzadeh, M. (2019). “Temporal soil salinity modeling using SaltMod model in the west side of Urmia hyper saline Lake, Iran”. Catena, 176, pp 306- 314. doi.org/10.1016/j.catena.2019.01.017.
- **Ethel Getachew**, Tamene Adugna and Sintayehu Assefa. 2018. “Investigation on the effect of storage time due to moisture absorption of cement on the properties of concrete”, International Journal of Development Research, 08, (01), 18558-18561.
- **Fan X.**, Pedrolí B., Liu G., Liu Q., Liu H., Shu L., (2012). “Soil salinity development in the yellow river delta in relation to groundwater dynamics”. L. Degrad. Dev. 23,pp 175-189. doi.org/10.1002/ldr.1071
- **FAO. (2021).** “L’État des ressources en terres et en eau pour l’alimentation et l’agriculture dans le monde - Des systèmes au bord de la rupture”. Rapport de synthèse 2021. Rome. doi.org/10.4060/cb7654fr
- **Fatahi B.**, Khabbaz H., Basack S. (2011). “Effects of Salinity and Sand Content on Liquid Limit”. Australian Geomechanics, 46(1), pp 67–76.
- **Fattah M.Y.****Al-Kinani A.M.** Geotechnical characteristics of saline soft soils improved by chemical agents, Magazine of Civil Engineering. 2024. 17(7). Article No. 13105 , <https://doi.org/10.34910/mce.131.5>
- **Foncea C.**, P. Acevedo , R. Olguin, (2005). “Geotechnical characterization of saline soils”. Proceeding. 16th International. Conf. Soil Mechanics Geotechnical Eng., 2, pp 503-506.

- **Fu Z.**, Wang P., Sun J., Lu Z., Yang H., Liu J., Xia J., et Li T. **(2020)**. “Composition, seasonal variation, and salinization characteristics of soil salinity in the Chenier Island of the Yellow River Delta”. *Global Ecology and Conservation*, 24, e01318. doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01318.
- **Gabor Nagy**; Andras Kovacs; Zsombor Illes ; Laszlo Nagy, **(2020)** “Geotechnics and Soil Sciences: multidisciplinary investigation of a saline lakebed”. 6th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization. doi.org/10.53243/ISC2020-1
- **GE (2013)**. “ Etude de système de drainage et protection de la zone des Bordjias”. Bureau d’étude et conseil diagnostic eau, sol. Gières, France
- **Gharaibeh M.A.**, Rusan M.J., Eltaif N.I., Shunnar O.F., **(2014)**. “Reclamation of highly calcareous saline-sodic soil using low quality water and phosphogypsum”. *Applied Water Science* 4, pp 223-230.
- **Gorji T.**, Yildirim A., Hamzehpour N., Tanik A., Sertel E. **(2020)**. “Soil salinity analysis of Urmia Lake Basin using Landsat- 8 OLI and Sentinel- 2A based spectral indices and electrical conductivity measurements”. *Ecological Indicators*, 112, 106173.
- **Grismer M. E. (1990)** “Leaching fraction, soil salinity, and drainage efficiency” . *California Agriculture* 44(6), pp 24-26 . doi: 10.3733/ca.v044n06p24
- **Hadjadj Fatima Zohra**, Nadia Laredj ,Mustapha Maliki · Hanifi Missoum **(2022)** “Influence of Electrokinetic Process on Compressibility Behaviour of Salt Affected Soils” *Geotech Geol Eng.* 40, pp 4159-4170 . doi.org/10.1007/s10706-022-02147-0
- **Hammam A. A.**, & Mohamed E. S. **(2020)**. “Mapping soil salinity in the East Nile Delta using several methodological approaches of salinity assessment”. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 23, pp 125-131. doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.11.00250.
- **Hillel, D., (2000)**. “Salinity management for sustainable irrigation. Integrating Science, environment and economics. Environmentally and socially sustainable development”. *Rural Development*. The World Bank, Washington DC 89 p.
- **INSID (Institut National des Sols, de l’Irrigation et du Drainag), (2008)**. “Caractérisation de l’état actuel de la salinité dans le périmètre irrigué de la Mina.
- **Jayasekera, S. (2008)**. “An investigation into modification of the engineering properties of salt affected soils using electrokinetic”, thesis, University Drive, Mount Helen, Australia.
- **Karthick, A.**; Roy, B.; Chattopadhyay, P. A. **(2019)**. “Review on the application of chemical surfactant and surfactant foam for remediation of petroleum oil contaminated soil”. *J. Environ. Manag.* 243, pp 187-205. doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.092.
- **Keren, R.**, et Ben-Hur, M. **(2003)**. “Interaction effects of clay swelling and dispersion and CaCO₃ content on saturated hydraulic conductivity”. *Australian Journal of Soil Research* 41(5), pp 979 - 989. doi.org/10.1071/SR02102.

- **Koulla N, Mohammed A, Santos CAG, Abdelkader D. (2019).** “Spatial modeling of soil salinity using multiple linear regression, ordinary kriging and artificial neural network methods in the Lower Cheliff plain, Algeria”. *Journal Urban Environ Eng* 13, pp 34–41. doi.org/10.4090/juee.2019.v13n1.034041
- **Legros J.P. (2007).** “Les grands sols du monde”. Presses polytechniques et universitaire romandes, 574p.
- **Li Wei ; Shouxi Chai ; Qinglin Guo ; Pei Wang ; Fang Li ; (2020)** Mechanical properties and stabilizing mechanism of stabilized saline soils with four stabilizers. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01885-w>
- **McIntyre, D.S. (1979)** “Exchangeable sodium, subplasticity and hydraulic conductivity of some Australian soils”. *Australian Journal of Soil Research* . 115-120.
- **McRobert J., Houghton N. and Styles E. (2003).** "Salinity impacts and roads: towards a dialogue between climate change and groundwater modellers." *Road and Transport Research* 12(3), pp 45-60.
- **Meddah, A., Chikouche, M. A., Yahia, M., et al. (2022).** The efficiency of recycling expired cement waste in cement manufacturing: a sustainable construction material. *Circular Economy and Sustainability*, 2(3), 1213–1224.
- **Metternicht G., Zinck J. A. (2009).** “Remote sensing of soil salinization: impact on land management”, 374. CRC Press Taylor and Francis Group, New York.
- **Mirzaee S., Ghorbani- Dashtaki, S., & Kerry, R. (2020).** “Comparison of a spatial, spatial and hybrid methods for predicting inter- rill and rill soil sensitivity to erosion at the field scale”. *Catena*, 188, 104439. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104439>.
- **Mitchell JK (1976).** “Fundamentals of soil behavior”. Wiley, New York
- **Monsif MY, Liu J, Gursaud N (2021)** Impact of salinity on strength and microstructure of cement-treated Champlain Sea clay. *Mar Georesources Geotechnol* 39:1360–1372. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2020.1841347>
- **Mosavat N, Oh E, Chai G (2012)** “A Review of Electrokinetic Treatment Technique for Improving the Engineering Characteristics of Low Permeable Problematic Soils”. *Int J Geomate* 2, pp 266–272. <https://doi.org/10.21660/2012.4.3i>
- **Okagbue, C.O., Ocholor, O.H., (2007).** The Potential of Cement-Stabilized Coal-Reject as a Construction Material. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, Vol. 66, PP. 143 151.
- **Peña A., Delgado- Moreno L., Rodríguez- Liébana, J. A. (2020).** “A review of the impact of wastewater on the fate of pesticides in soils: Effect of some soil and solution properties”. *Science of the Total Environment*, 718, 134468– <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134468>.
- **Pla I (2015)** “Advances in the prognosis of soil sodicity under dryland and irrigated conditions”. *International Soil and Water Conservation Research (China)* 2(4):50–63

- **Pouladi** N, Asghar A J, Farzin S , Mohammad A G. **(2019)** “Design and implementation of a hybrid MLP-FFA model for soil salinity prediction”. *Environ Earth Sci* 78:159. doi.org/10.1007/s12665-019-8159-6.
- **Puppala** AJ, Griffin JA, Hoyos LR, Chomtid S (2004) Studies on Sulfate-Resistant Cement Stabilization Methods to Address Sulfate-Induced Soil Heave. *J Geotech Geoenvironmental Eng* 130:391–402. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:4\(391](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:4(391)
- **Qadir** M., Oster J.D., Schubert S., Noble A.D., Sahrawat K.L., **(2007)**. “Phytoremediation of Sodic and Saline-Sodic Soils”. *Advances in Agronomy* 96, pp 197-247.
- **Ramos** T. B., Castanheira N., Oliveira A. R., Paz A. M., Darouich H., Simionesei L., Farzamian M., Goncalves M. C. **(2020)**. “Soil salinity assessment using vegetation indices derived from Sentinel- 2 multispectral data. Application to Leziria Grande, Portugal. *Agricultural Water Management*, 241: 106387. doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106387
- **Ravindran** K. C., Venkatesan K., Balakrishnan V., Chellappan K. P., Balasubramanian, T **(2007)**. “Restoration of saline land by halophytes for Indian soils”. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(10), pp 2661–2664. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.02.005>.
- **Razeghi, H.R., Ghadir, P. & Javadi, A.A.** (2022). Mechanical Strength of Cement-Stabilized Saline Soils. *Sustainability*, 14(20), 13669.
- **Reading** L.P., Baumgartl T., Bristow K.L., Lockington D., **(2012a)**. “Hydraulic conductivity increases in a sodic clay soil in response to gypsum applications: impacts of bulk density and cation exchange”. *Soil Science* 177:165-171.
- **Rengasamy** P. **(2006)**. “World salinization with emphasis on Australia”. *Journal of Experimental Botany*, 57, pp 1017- 1023. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj108>
- **Ritzema** H.P., Kselik, R.A.L., Chanduvi, F.**(1996)**. “Drainage of irrigated lands”. In: *Irrigation Water Management Training Manual*, vol. 9. FAO Rome , 79.
- **Santamarina** J.C, Klein Y.H, Prencke E. **(2002)**. “Spécifie Surface: Détermination and Relevance”. *Canadian Geotechnical Journal*, 39: 233-241.
- **Seifi** M., Ahmadi, A., Neyshabouri, M.- R., Taghizadeh- Mehrjardi, R., Bahrami, H.-A. **(2020)**. “Remote and Vis- NIR spectra sens-ing potential for soil salinization estimation in the eastern coast of Urmia hyper saline lake, Iran. *Remote Sensing Applications”: Society and Environment*, 20, 100398. doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100398.
- **Shabtai** I.A., Shenker, M., Edeto, W.L., Warburg, A., Ben-Hur, M., **(2014)**. “Effects of land use on structure and hydraulic properties of Vertisols containing a sodic horizon in northern Ethiopia”. *Soil and Tillage Reseach* 136: 19-27.
- **Singh** A. **(2018b)**. “Assessment of different strategies for managing the water resources problems of irrigated agriculture”. *Agricultural Water Management*, 208:187-192. doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.021

- **Skempton A.W., (1953).** “The colloidal activity of clays”. Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, 1, : 57-61.
- **Stavi I, Thevs N , Priori S (2021).** “ Soil Salinity and Sodicity in Drylands: A Review of Causes, Effects, Monitoring, and Restoration Measures”. Front. Environ. Sci. 9, 712831. doi: 10.3389/fenvs.2021.712831
- **Subramani T., Elango, L., Damodarasamy, S. R. (2005).** “Groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in Chithar River Basin, Tamil Nadu, India”. Environmental Geology, 47(8): 1099–1110. doi.org/10.1007/s00254-005-1243-0.
- **Subramaniam, P., M. M. Sreenadh, and S. Banerjee. 2016.** “Critical State Parameters of Dredged Chennai Marine Clay Treated with Low Cement Content.” Marine Georesources & Geotechnology 34 (7): 603–616. <https://doi-org.www.snd11.arn.dz/10.1080/1064119X.2015.1053641>.
- **Sun J., Kang, Y., Wan, S., Hu, W., Jiang, S., Zhang, T., (2012).** “Soil salinity management with drip irrigation and its effects on soil hydraulic properties in north China coastal saline soils”. Agricultural Water Management 115, 10-19.
- **Szabolcs I. (1989).** “Salt Affected Soils”; CRC Press: Boca Raton, FL, USA,; 274.
- **USDA (United States Department of Agriculture) (1954)** “Diagnosis and improvement of saline and alkali soils”. USDA Handbook n°60. US GPO, Washington, DC.
- **Walkley A, Black C. (1934).** “An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci 37(1):29–38. doi. org/ 10. 1097/ 00010 694- 19340 1000- 00003.
- **Water Smart.(2003).** “Urban Salinity”, Practice Note 12, Sydney WSUD Capacity building program.
- **Xing, H. F., X. M. Yang, C. Xu, and G. B. Ye. 2009.** Strength characteristics and mechanisms of salt-rich soil-cement. Engineering Geology 103(1–2): 33–38.
- **Yusong Xian 2026** Improvement of mechanical properties of chloride saline soil by lime-iron tailings powder-basalt fiber composite . Journal of Physics: Conference Series 3244 (2026) 012012 . doi:10.1088/1742-6596/3244/1/012012
- **Zaman M, Shabbir Shahid A, Heng L (2018).** “Guidline for salinity assessment, mitigation and adaptation using nuclear and related techniques”. Int Atom Energy Agency. doi. org/ 10. 1007/ 978-3-319- 96190-3.
- **Zhang, X.C., Norton, L.D.,(2002).** “Effect of exchangeable Mg on saturated hydraulic conductivity, disaggregation and clay dispersion of disturbed soils”. Journal of Hydrology 260, pp 194-205.

ANNEXE



50kg

ماتين MATINE

ALGÉRIE

LAFARGE
Construire
des villes meilleures™



Ciment portland au Calcaire

NA442 CEM II/B-L 42,5 N

Matine Ciment gris pour bétons de haute-performance destiné à la construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments

Matine
NA442 CEM II/B-L 42,5 N

Matine est certifié, conforme à la norme Algérienne (NA442 – 2013) et Européenne (EN 197-1)

AVANTAGES PRODUIT



- Une résistance initiale élevée pour vos ouvrages nécessitant un décoffrage rapide
- Favorise la maniabilité du béton et le maintien de sa rhéologie
- Une Classe Vraie qui offre une haute performance au béton.
- Meilleure durabilité du béton.

MEMBRE DE

APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments
- Préfabrication légère
- Béton de haute performance



FORMULATION CONSEILLÉE

	Ciment 	Sable (sec) 	Gravillons (sec) 	Eau (litres) 
Dosage pour béton c25/30	X 1 	+  X7	+  X5	+  X4 + 25 L

Remarque: un bidon = 10 Litres

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

• Analyses chimiques

	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	10.0±2
Teneur en sulfates (SO3) (%)	2.5±0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	Max 5%
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	< 0,1

• Temps de prise à 20° (NA 230)

	Valeur
Début de prise (min)	150±30
Fin de prise (min)	230±50

• Composition minéralogique du Clinker (Bogue)

	Valeur
C3S (%)	60±3
C3A (%)	8±2

• Résistance à la compression

	Valeur
2 jours (MPa)	≥ 10.0
28 jours (MPa)	≥ 42.5

• Propriétés physiques

	Valeur
Consistance Normale (%)	26.5±2.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm²/g) (NA231)	3 700 - 5 200
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1 000
Expansion (mm)	≤ 3.0

CONSIGNES DE SÉCURITÉ

1- PROTÉGEZ VOTRE PEAU : Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.

2- MANUTENTION : levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.

MEMBRE DE



Conditionnement:



LAFARGE ALGÉRIE

Bureau n°02, 16ème étage, tour Geneva,
les Pins maritimes, Mohammadia, Alger.
tél: + 213 (0) 21 98 54 54
Fax: + 213 (0) 23 92 42 94
www.lafargealgerie.com

LAFARGE
لافارج