



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم
Abdel Hamid Ibn Badis University of Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculty of Sciences and Technology
قسم الهندسة المدنية
Department of Civil Engineering



N° d'ordre: M/GC /2023

Mémoire de Master académique

Filière: Génie Civil

Spécialité : Voies et Ouvrages d'Art

Amélioration du procédé de désalinisation des sols

Présenté par :

BOUCHIBA AICHA

BELMADI MERYEM

Président : MISSOUM Hanifi	Professeur	UMAB Mostaganem
Examineur : MEBROUKI Abdelkader	Professeur	UMAB Mostaganem
Encadrant : LAREDJ Nadia	Professeur	UMAB Mostaganem
Co-Encadrant : MOSTEFA Fouzia	Docteur	UMAB Mostaganem

Année Universitaire : 2022 / 2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Remerciements



REMERCIEMENTS

Nous remercions avant tout ALLAH, le tout puissant, de nous avoir guidé et de nous avoir donné la volonté, la patience et le courage pour terminer ce travail.

Nos remerciements vont d'abord à madame **Laredj Nadia** Professeur à l'université Abdelhamid Ibn Badis -Mostaganem, qui est à l'origine de ce travail et qui nous a soutenu et conseillé tout au long de celui-ci, on lui adresse nos plus sincères remerciements.

Ainsi, nous adressons toute notre gratitude à madame **Mostefa Fouzia** (Docteur à l'université Abdelhamid Ibn Badis -Mostaganem) a qui nous témoignons toute notre reconnaissance pour son soutien.

À monsieur **Missoum Hanif** (Professeur à l'université Abdelhamid Ibn Badis -Mostaganem), qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence de mon jury de thèse.

Nos remerciements les plus respectueux vont à Monsieur **Mebrouki Abdelkader** (Professeur à l'université Abdelhamid Ibn Badis -Mostaganem), qui nous a fait l'honneur de prendre connaissance de ce travail et d'en être examinateur. Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

Nos remerciements les plus respectueux vont à Monsieur **Khalifa Belkacem**, ingénieur de laboratoire, qui nous a prêté main forte pour mener à terme ce travail.

Dédicaces

DÉDICACE

*Au nom de Dieu, le Très Miséricordieux, le Très Miséricordieux
Louange à Dieu Tout-Puissant. Tout d'abord Je remercie Dieu Tout-
Puissant de m'avoir donné la force de survivre, ainsi que le courage de
surmonter toutes Les difficultés.*

Je dédie ce travail

*A mes chers parents qui m'ont appris de belles choses confiance,
Amour Vérité, Patience et Courage-Tu es la lumière de ma vie, ma
mère, la plus belle perle du monde, et tu es mon cher Père Aucune
dévotion ne peut exprime ma respect, mon amour éternel et ma
gratituldé pour les sacrifices que vous m'avez faits pour mon
éducation et mon bien-être. Merci pour tout l'outon et l'amour que
vous m'ave donné depuis mon enfance et j'espère que votre
bénédication sera toujours avec moi . Que cet humble travail soit
l'accomplissement de vos désirs bien articulés, le fruit de vos
innombrables sacrifices, même si je ne vous paierai jamais assez. Que
Dieu Tout- Puissant vous accorde la santé, le bonheur et une longue
vie, et il ne vous décevra jamais.*

*À mes chers frères et sœurs qui n'ont cessé de me conseiller, de
m'encourager et de me soutenir tout au long de mes études.*

*À mes camarades de classe, merci pour les moments inoubliables que
nous avons vécus au cours de notre parcours universitaire.*

*A tous ceux qui occupent une place dans mon cœur, avec qui je
partage des mots de tendresse, d'amour et d'amitié .*

*Pour une si merveilleuse sincérité... Ne jamais oublier, en leur
souhaitant tout le meilleur.*

*Tout le bonheur à tous ceux qui m'ont aidé à franchir l'horizon de ma
vie.*

BOUCHIBA Aïcha

DEDICACES

*Je remercie **ALLAH** le Généreux pour m'avoir guidé vers la lumière de la recherche du savoir et de la science.*

Je dédie ce modeste travail à :

A MON CHÈRE PÈRE : Miloud

Qui ne cesse constamment de m'entourer de son affectation grandissant, de m'enrichir de son expérience, de me prodiguer ses conseils, et qui mon permis de mieux comprendre la vie. Je vous dédie ce travail en témoignage de ma reconnaissance infinie pour les énormes sacrifices consentis à mon éducation.

A MA TRÈS CHÈRE MÈRE : Maghnia

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour

mon instruction et mon bien être. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

A mes frères : Chaaban, Rabah.

A ma chère sœur : yousra, Fatma,

A ma famille de grande jusqu'au petit,

A mon fiancé : Sofiane

A mes chers amis : Aïcha, Chahrazad, Rahma, Anis,

A mes connaissances et à tous qui sont chères à mon coeur.

MERYEM

الملخص

الملخص

تعد ملوحة التربة مشكلة رئيسية في أجزاء كثيرة من العالم ، خاصة في المناطق ذات المناخات القاحلة وشبه القاحلة. ساهمت عدة عوامل في تضخيم هذه الظاهرة مثل تغير المناخ في السنوات الأخيرة وظروف الري. الجزائر من البلدان التي يمثل فيها تملح التربة شكلاً رئيسياً من أشكال تدهور التربة وتهديداً بيئياً رئيسياً. تعتبر معالجة التربة بالحركية الكهربائية تقنية ناشئة أظهرت إمكانات كبيرة للإزالة الفعالة للملوثات العضوية وغير العضوية الموجودة في التربة. في هذا العمل ، نحن مهتمون بشكل خاص بتطبيق عملية الحركية الكهربائية لمعالجة عينات التربة المالحة وتطهيرها من منطقة برجية بولاية مستغانم. لهذا الغرض ، أجريت الاختبارات الكهروكيميائية باستخدام جهاز تجريبي تم تطويره في مختبر LCTPE بجامعة عبد الحميد بن باديس ، مستغانم. تكمن أصالة هذا البحث في استخدام شكلين هندسيين مختلفين للأقطاب الكهربائية. الأول على شكل أنابيب نحاسية، والثاني على شكل ألواح نحاسية. جعلت نتائج الاختبارات المختلفة من الممكن تحليل ودراسة تباين مختلف المعلمات الفيزيائية والكيميائية للتربة مثل: محتوى الماء ، وحدود أتيربيرج ، والتوصيل الكهربائي ، ودرجة الحموضة ، والتدفق الاسموزي ، والتيار الكهربائي. ودرجة الحرارة. يضمن تطبيق هذه العملية انتقال واستخراج الأملاح الموجودة في عينات التربة المعالجة.

الكلمات المفتاحية: الملوحة ، المعالجة الكهربائية ، التوصيل الكهربائي ، حركة الأيونات ، التيار الكهربائي ، الأس الهيدروجيني.

Résumé

Résumé

La salinité des sols est un problème majeur dans des nombreuses régions du monde, en particulier dans les régions à climat aride et semi-aride. Plusieurs facteurs ont contribué à l'amplification de ce phénomène tels que le changement climatique de ces dernières années et les conditions d'irrigation. L'Algérie fait partie des pays où la salinisation des sols représente une forme majeure de dégradation des sols et une menace environnementale majeure. Le traitement des sols par la méthode électrocinétique est une technologie émergente qui a montré un grand potentiel pour l'élimination efficace des polluants organiques et inorganiques présents dans les sols. Dans ce travail, nous nous intéressons particulièrement à l'application du procédé électrocinétique pour traiter et décontaminer des échantillons de sol salins provenant de la région de Bordjia de la wilaya de Mostaganem. A cet effet, des essais électrochimiques ont été effectués en utilisant un dispositif expérimental développé au laboratoire LCTPE de l'université Abdelhamid Ben Badis, Mostaganem. L'originalité de cette recherche est l'utilisation de deux configurations géométriques différentes pour les électrodes. La première est sous forme de tubes en cuivre, et la deuxième sous forme de plaques en cuivre. Les résultats des différents essais ont permis d'analyser et d'étudier la variation des différents paramètres physico-chimiques du sol tels que : la teneur en eau, les limites d'Atterberg, la conductivité électrique, le pH, le flux osmotique, le courant électrique et la température. L'application de ce procédé assure la migration et l'extraction des sels présents dans les échantillons de sol traités.

Mots clés: Salinité, traitement électrocinétique, conductivité électrique, mobilité ionique, courant électrique, pH.

Abstract

Abstract

Soil salinity is a major problem in many parts of the world, especially in regions with arid and semi-arid climates. Several factors have contributed to the amplification of this phenomenon such as climate change in recent years and irrigation conditions. Algeria is one of the countries where soil salinization represents a major form of soil degradation and a major environmental threat. Electro kinetic soil treatment is an emerging technology that has shown great potential for the effective removal of organic and inorganic pollutants present in soils. In this work, we are particularly interested in the application of the electro kinetic process to treat and decontaminate saline soil samples from the Bordjia region in the wilaya of Mostaganem. For this purpose, electrochemical tests were carried out using an experimental device developed at the LCTPE laboratory of t Abdelhamid Benbadis University, Mostaganem. The originality of this research is the use of two different geometric configurations for the electrodes. The first is in the form of copper tubes, and the second in the form of copper plates. The results of the various tests made it possible to analyze and study the variation of the various physic-chemical parameters of the soil such as: water content, Atterberg limits, electrical conductivity, soil pH, osmotic flux, electric current and temperature. The application of this process ensures the migration and extraction of the salts present in the treated soil samples.

Keywords: Salinity, electrokinetic remediation, electrical conductivity, ion mobility, electrical current, pH.

Table des matières

Table des matières

Remerciements

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des symboles

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale..... 01

CHAPITRE I : Salinisation des sols

I.1. Introduction 04

I.2.Définition de la salinisation 04

I. 3.Origine de la salinisation 05

I.4.Les types de salinité 05

I.4.1.La salinité primaire 05

I.4.2.La salinité secondaire..... 06

I.5.La salinisation dans le monde et en Algérie 06

I.5.1.La salinisation dans le monde 06

I.5.2.La salinisation en Algérie 08

I.6.Causes de la salinité des sols 10

I.7.Le problème de la salinité des sols 10

I.8.Effet de la salinité sur les constructions..... 13

I.9.La sodisation 14

I.10.L'alcalinisation 14

I.11.Classification des sols salins 15

I.11.1.Sol salin	15
I.11.2.Sol sodique	15
I.11.3.Sol salin-sodique	15
I.12.Différence entre la sodicité et la salinité	16
I.12.1.Sodicité	17
I.12.2.Salinité	17
I.13.Principes du contrôle de la salinité	17
I.13.1.Le drainage	17
I.13.2.Lixiviation du sol	18
I.13.3.Une alternative	19
I.14.Les grandeurs utilisées pour caractériser les sols salés	20
I.14.1.La conductivité électrique CE	20
I.14.2.Quantité de sodium adsorbé	20
I.14.3.Le pourcentage de sodium échangeable	20
I.14.4.pH du sol	21
I.15.Conclusion	21

Chapitre II : Traitement électrocinétique

II.1.Introduction	23
II.2. Les différents mécanismes liés au traitement électrocinétique	23
II.2.1. L'électrolyse	23
II.2.2. L'électro-osmose	24
II.2.3.L'électrophorèse	25
II.2.4. L'électro-migration	25
II.3. Quelques procédés électrolytiques de décontamination	26
II.3.1.Le Transfert hydraulique	26
II.3.1.1. La définition du terme hydraulique	26

II.3.1.2. Les domaines de l'hydraulique	27
II.3.1.3. Le débit	27
II.3.1.4. La pression.....	28
II.3.2. Le transfert chimique	28
II.3.3. Le transfert électrique.....	28
II.3.3.1. Le courant électrique	28
a)Solution électrolytique	28
b) loi d'ohm.....	28
II.3.3.2. Porteurs de charge	29
II.3.3.3. Conductance	29
a) Définition.....	29
b) Relation entre l'intensité I et la tension V	30
II.3.3. 4. Conductivité.....	30
II.4. Conclusion	31

CHAPITRE III: Localisation et caractérisation du sol étudié

Partie I : Présentation générale du cadre d'étude (pleine de Bordjia)

III.1.Introduction	34
III.2.Localisation générale.....	34
III.3.Climat de la zone de Bordjia	35
III.4.Occupation du sol.....	36
III.5.Prélèvement des échantillons de sols	36

Partie II: Caractéristiques physiques et chimiques des échantillons de sol étudiés

III.1.Introduction	37
--------------------------	----

III.2.Le poids volumique	37
III.2.1.Le poids volumique apparent	39
III.2.2.La teneur en eau	40
III.2.3.L'indice des vides.....	40
III.2.4.Degré de saturation	40
III.2.5.porosité	40
III.3.Les limites D'Atterber	41
III.3.1.1.La limite de liquidité W_L (Méthode de Casa grande :norme NFP 94-051).....	42
III.3.1.2.La limite de plasticité (W_p) NF P94-051	44
III.3.1.3.Indice de plasticité I_p	45
III.4.Analyse granulométrique (NF P94-057)	46
III.4.1.Le tamisage	46
III.4.2.La sédimentométrie	47
III.4.3.La teneur en eau (NF P 94-050)	50
III.5.Valeur au bleu de Méthylène (NF P 94-068)	50
III.6.Détermination du pH du sol	51
III.7.Détermination de la conductivité électrique.....	52
III.8.Résultats de l'identification du sol de Bordjia	53
III.9.Conclusion.....	53

**Chapitre IV : Application du processus électrocinétique pour la
désalinisation du sol**

IV.1.Introduction.....	55
IV.2 .Le dispositif expérimental.....	55
IV.3.Configuration géométrique des électrodes.....	56
IV.4.Préparation des échantillons de sol pour le traitement électrocinétique	57
IV.5.Evolution des propriétés électriques des sols pendant le traitement électrocinétique ..	58

Table des matières

IV.5.1.Variation du courant électrique en fonction du temps.....	58
IV.5.2.Variation du courant en fonction de la configuration des électrodes.....	59
IV.5.3.Variation de température en fonction du temps	60
IV.6.Evolution du flux électro-osmotique.....	61
IV.7.Variation de la conductivité électrique du flux osmotique dans le temps.....	63
IV.8.Variation du ph du flux osmotique dans le temps.....	64
IV.9.Evolution de la tension électrique<.....	65
IV.10.Variation du pH du sol après traitement	66
IV.11.Variation de la conductivité électrique du sol après traitement	67
IV.12.les variations des limites d'Atterberg.....	68
IV.13.Évolution de la teneur en eau	70
IV.14.Conclusion	71
CONCLUSION GENERALE	73
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	76

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I.1	Salinisations des sols	04
Figure I.2	Origine de la salinisation du sol (IPTRID, FAO, CISEAU, 2006)	05
Figure I. 3	Carte des sols salins dans le monde.....	07
Figure I. 4	Répartition des sols salins du Nord de l'Algérie (INSID, 2008).....	09
Figure I. 5	Représentation schématique de la distribution de quelques domaines Pédologiques dans le Nord de l'Algérie (Djili, 2000).....	09
Figure. I.6	Sols salinisés.....	11
Figure. I.7	Terre appauvrie par salinisation	12
Figure .I.8	Affleurement de sel causé par la remontée de la nappe phréatique	12
Figure. I.9	La dégradation de la couche de roulement d'une route en raison de la Remontée d'eau saline	13
Figure. I.10	Corrosion des aciers dans le béton	13
Figure I. 11	Sols salés et sodiques des sebkhas.....	16
Figure.I.12	Paramètres d'un drainage vertical	18
Figure. I.13	Paramètres d'un drainage horizontal	18
Figure. I.14	Facteurs d'équilibre hydrique d'un sol.....	19
Figure .I.15	La (culture en branche) consiste à gérer la profondeur de nappe pour mieux Contrôler la salinité	20

CHAPITRE II

Figure.II.1	Protocole expérimental	23
--------------------	------------------------------	-----------

Figure II.2	Comparaison entre l'écoulement électro osmotique et l'écoulement Hydraulique (Casa grande, 1951)	24
Figure II.3	La perméabilité hydraulique selon la loi de Darcy (Jayasekera, 2007) ...	26
Figure II.4	Les porteurs de charges.....	29
Figure II.5	La capacité qu'a une solution électrolytique à conduire le courant Electrique	31

Chapitre III

Partie I : Présentation général du cadre d'étude (plaine de bordjia)

Figure III.1	Carte de la situation géographique du site d'étude	35
Figure III.2	Localisation géographique de la parcelle d'étude (Mostefa et al.2023)..	35
Figure III.3	Climagramme d'Emberger (Mostefa et al 2023)	36
Figure III.4	Parcelle d'étude : (a) traces de salinité, (b) système de drainage (Mostefa Et al2023).....	37

Partie 2 : Caractéristiques physiques et chimiques des échantillons de sol étudiés.

Figure III.1	Schéma d'un volume élémentaire de sol	38
Figure III.2	Principales étapes de l'essai au Pycnomètre	39
Figure III.3	Schémas des états de consistance des sols fins (limites d'Atterberg)	42
Figure III.4	Coupelle de Casagrande pour la détermination de la limite de liquidité	43
Figure III.5	L'appareil de Casagrande pour la détermination de la limite de liquidité ...	43
Figure III.6	La limite de liquidité (WL) des échantillons.....	44
Figure III.7	Confection des rouleaux pour la Détermination de la limite de Plasticité	44
Figure III.8	Essai de détermination de La limite de plasticité (WP) des Échantillons	45

Figure III.9	Le diagramme de plasticité et de la classification des sols fins (Liang, 2023).....	46
Figure III.10	Tamissage Fraction 80 µm – D max	47
Figure III. 11	La réalisation de l’essai de sédimentométrie.....	48
Figure III.12	Courbe granulométrique du sol étudié	48
Figure III.13	La classification triangulaire des sols fins.....	49
Figure III .14	Séchage des échantillons du sol à l’étuve	50
Figure III.15	La réalisation de l’essai au bleu de méthylène	51
Figure.III.16	l’essai de bleu de méthylène	51
Figure III.17	La mesure du pH du sol.....	52
Figure III.18	Mesure de la conductivité électrique du sol	52

Chapitre IV

Figure IV.1	Cellule expérimentale	55
Figure IV.2	Dispositif expérimental de la cellule électrocinétique avec des électrodes en Plaques de cuivre.....	56
Figure IV.3	Dispositif expérimental de la cellule électrocinétique avec des électrodes en tubes de cuivre.....	57
Figures IV.4	Schémas du dispositif expérimental : (A) coupe, (B) vue en plan (1) plan séparateur perforé, (2) électrodes de mesure en inox (3) point d’évacuation des gaz (4) position de relevé des températures (Mostefa et al. 2023).....	58
Figure IV.5	Variation du courant électrique en fonction du temps	59
Figure IV.6	Corrosion et dégradation des électrodes	59
Figure IV.7	Variation de température des électrodes plaque cuivre en fonction du temps...	60
Figure IV.8	Variation de température des électrodes tube cuivre en fonction du temps ...	60
Figure IV.9	Evolution du flux électro-osmotique des électrodes EPL et ET.....	61

Figure IV.10	A) Fissuration des échantillons de sol cote cathode avec plaque cuivre (EPL) et tube cuivre(ET), B) Trace d'eau (partie superficielle), C) Fissuration des échantillons de sol coté anode avec plaque cuivre et tube cuivre	61
FigureIV.11	Profondeur de la fissure transversale (ET)	62
Figure IV.12	Fissuration du sol ET et EPL après 7 jours	62
Figure IV.13	Fin d'essai avec tube cuivre	62
Figure IV.14	Etat du sol en fin de l'essai (ET) et (EPL).....	63
Figure IV.15	Variation de la conductivité électrique (ET et EPL)	63
Figure .IV.16	Evolution du potentiel hydrogène (pH) avec Tube de cuivre (ET)	64
Figure IV.17	Évolution du potentiel hydrogène (pH) avec plaque de cuivre (EPL) .	65
FigureIV.18	Evolution du voltage avec tube cuivre	66
Figure IV.19	Evolution du voltage avec plaque cuivre.....	66
Figure IV.20	Variation du pH du sol de Bordjia en fonction de la durée de traitement.	67
Figure IV.21	Variation de la conductivité électrique en fonction de la durée de traitement	68
Figure IV.22	La limite de liquidité milieu des échantillons.....	70
Figure IV.23	La limite de liquidité cathode des échantillons	70
Figure IV.24	La limite de liquidité anode des échantillons	70
Figure IV.25	Variation de la teneur en eau le long de la distance de la anode –cathode	70

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tableau I.1	Superficie affectée par la salinité dans le monde (FAO, 2008).....	07
Tableau I.2	les superficies affectées par la salinité dans quelques périmètres de l'Ouest du pays (ONID (ex AGID) 2003).	10
Tableau I.3	Classification de terres salées	16

CHAPITRE II

Tableau II.1	Le coefficient électro-osmotique en fonction des différents types de sol (Asadi et al. 2013).	25
---------------------	---	-----------

CHAPITRE III

Tableau III.1	Propriétés physiques du sol.	39
Tableau III.2	Propriétés physiques du sol.	41
Tableau III.3	Les valeurs des limites de consistance du sol étudié.	45
Tableau III.4	Composition granulométrique des échantillons de sol étudiés.....	49
Tableau III.5	Caractéristiques physiques et chimiques des échantillons de sol de Bordjia	53

CHAPITRE IV

Tableau IV.1	Les conditions initiales du traitement électrocinétique.....	56
Tableau IV.2	Les limites d'Atterberg des échantillons du sol après traitement.	68

Liste des notations

ESP	Le pourcentage du sodium échangeable	%
SAR	Le ratio de sodium adsorbé	
CEC	La capacité d'échange cationique	meq/100g
Qe	Le débit électro osmotique de l'eau.	
ε	La constante diélectrique.	
ζ	Le potentiel.	
ξ	Le potentiel zêta	V/cm
η	La viscosité de l'eau	cm^2/s
ie	La différence de potentiel électrique appliquée	V/cm
A	La section transversale du flux électro osmotique	cm^2
J	Le flux migratoire des espèces ioniques.	
u	La mobilité ionique effective	m^2/Vs
C	La concentration des espèces ioniques.	
ie	Le potentiel électrique	V/cm
Q_h	Le débit hydraulique.	
i_h	Le gradient hydraulique.	
k_h	Le coefficient hydraulique.	
J_i	Le vecteur du flux de diffusion	$\text{mol}/\text{cm}^2/\text{s}$
D_i*	La diffusivité	cm^2/s
ci	La concentration	
V	La tension	V
R	La résistance	Ω
I	Le courant	A
G	La conductance	s
L	Largeur	m
S	Section	m^2

V_a	Volume de l'air.	
V_w	Volume de l'eau.	
V_s	Volume des grains solides.	
V_v	Volume des vides.	
W_w	Poids de l'eau	g
γ_s	Poids volumique spécifique des grain solides	g/m ³
γ_w	Poids volumique spécifique de l'eau 10	kN /m ³
γ_H	Poids volumique apparent du sol humide.	g/m ³
p_h	Poids humide	g/m ³
V_t	Le volume total	m ³
W_s	Le poids du sol sec	g
CE	La conductivité électrique	dS/m
pH	Potentiel Hydrogène	%
W	La teneur en eau	%
W_w	Le poids de l'eau	g
W_s	Le poids du sol sec	g
WL	La limite de liquidité	%
WP	La limite de plasticité	%
IP	L'indice de plasticité	%
S_r	Degré de saturation	%
n	Porosité	
T	La température	C°
ET	Essai tube cuivre	
EPL	Essai plaque cuivre	
e	L'indice de vide	

Introduction générale

Introduction général :

La salinisation des sols est un phénomène préoccupant qui se produit lorsque la concentration des sels dissous dans le sol augmente de manière significative. Cela peut être dû à plusieurs facteurs, tels que l'irrigation excessive avec de l'eau salée, la mauvaise gestion des ressources en eau, l'utilisation de fertilisants contenant des sels ou même des conditions naturelles telles que l'évaporation élevée dans les régions arides. Quelle que soit la cause, la salinisation des sols a des conséquences néfastes sur l'agriculture, l'environnement, les écosystèmes et les structures de génie civil et travaux public. Lorsque la concentration de sels dans le sol dépasse un certain seuil, elle Crée un environnement hostile pour les ouvrages de génie civil et travaux publics. La salinisation des sols est un problème mondial affectant de nombreuses régions, en particulier les régions arides et semi-arides. On estime qu'environ 20 % des terres irriguées dans le monde sont affectées par la salinité. Les sols hétérogènes salins sont connus pour leur faible capacité portante et leur comportement dispersif et sa forte teneur en sels nocifs. En Algérie cette terre elle est répandue, notamment dans les régions du nord de l'Algérie, où règne un climat aride et semi-aride, où les taux de précipitation sont faibles, les températures et les taux d'évaporation sont élevés (Selvakumar et al. 2014 ; Miransari, 2016). Dans ce mémoire de fin d'étude, l'originalité est l'utilisation de deux configurations géométriques différentes pour les électrodes durant le traitement électrocinétique, élaboré préalablement au laboratoire LCTPE de l'université de Mostaganem. Ce procédé de décontamination des sols fins est reconnu comme peu coûteux, appelé électro remédiation ou électro contamination, et peut être appliqué in situ comme au laboratoire. Il permet la mobilisation et le transport des contaminants, tels que les sels, favorisant ainsi leur extraction (López-Vizcaíno et al. 2017).

Cette technologie, relativement nouvelle, est une technique efficace, écologique, durable et rentable, permettant le transport et la mobilité des ions dans le sol, en appliquant un potentiel électrique entre les électrodes. Plusieurs phénomènes peuvent être générés dans le système sol-électrodes, telles que l'électro-migration, l'électro-osmose, l'électrophorèse et l'électrolyse de l'eau. L'électro-osmose est le mouvement du fluide poreux contenant des espèces ioniques et non ioniques dissoutes par rapport à la masse stationnaire du sol, principalement vers la cathode (Faisal et al, 2018 ; Ait Ahmed et al., 2016 ; Bahemmat et al., 2015 ; Malekzadeh et al., 2016). Par ailleurs, l'électro migration est le transport des espèces chimiques chargées sous un gradient électrique.

Ce mémoire de fin d'étude est basé sur l'utilisation des échantillons de sol salins à grain fin prélevé à la région de Bordjia (wilaya de Mostaganem).

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres ;

L'introduction décrit brièvement le problème de la salinité des sols et son impact négatif sur les activités agricoles, la construction et les infrastructures de génie civil. Les deux premiers chapitres de notre manuscrit sont consacrés à une étude bibliographique. Le premier portant sur la généralité et la salinité des sols, et le second consacré à la description du traitement électrocinétique des sols contaminés. Les chapitres qui suivent traitent de l'étude expérimentale et se compose de deux chapitres. Le chapitre trois présente le cadre d'étude de la zone de prélèvement des échantillons de sol étudiés, décrivant par la suite les essais de caractérisation physiques et chimiques. Dans le dernier chapitre, une description de la cellule de traitement électrocinétique est détaillée, et les résultats obtenus des paramètres étudiés, tels que ; le courant électrique, la température, la conductivité électrique, les limites d'Atterberg et la teneur en eau sont présentés. A la fin de ce mémoire d'étude, une conclusion générale est exposée.

Chapitre I : Salinisation des sols

SALINISATION DES SOLS

I.1. Introduction :

La salinisation est un processus de dégradation des sols considéré comme étant une source dévastatrice, engendrant des dégâts et des désordres importants, en terme environnemental ainsi qu'en matière de construction d'ouvrages et d'édifices en génie civil. Avec le changement climatique et la prédominance de l'aridité, cette menace entraîne une destruction de la matrice du sol, diminuant ainsi la portance du sol et la végétation. Chaque jour, des milliers d'hectares sont perdus à cause de ce fléau. Cela a provoqué une inquiétude énorme au niveau national ainsi qu'à l'échelle internationale, suscitant un besoin urgent pour y faire face à ce danger qui se prolifère avec des taux très alarmants.

- ✓ En Afrique, près de 40 Million hectares sont affectés par la salinisation, soit près de 2% de la surface totale (IPTRID, 2006).
- ✓ En Algérie, plus de 20% des sols irrigués sont concernés par des problèmes de salinité (DOUAOUI et HARTANI, 2008).



FigureI.1.Salinisation des sols.

I.2.Définition de la salinisation :

La salinisation est le phénomène d'accumulation dans le sol de sels solubles dans l'eau (potassium, magnésium, calcium, chlore, sulfates, carbonates et bicarbonates). La forte concentration de sels nocifs entraîne également une augmentation de la pression environnementale, ce qui provoque des effets toxiques sur les niveaux du sol et les structures

existantes, les plantes, les animaux, et les humains. Par conséquent, il y a un déclin de l'économie et de la prospérité sociale. La salinité du sol peut être déterminée en mesurant la conductivité électrique, dont l'unité de mesure est le Siemens/mètre (S/m). Les sols salins sont définis par un taux de salinité qui est égale ou supérieur à 4 ds/m.

I. 3. Origine de la salinisation :

La salinité des sols a des sources très variées. Elle résulte de l'altération des roches mères contenant des minéraux nécessaires à la formation des sels solubles (minéraux sodiques, potassiques, magnésiens, de produits de l'hydrothermalisme riches en soufre et en chlore), ou de la dissolution des évaporites (IRD, 2008). L'océan peut être une source principale de la salinité, notamment dans les zones côtières (Kloppmann et al. 2011) où le matériau de base est constitué de dépôts marins anciens. Les eaux salées des nappes phréatiques ou artésiennes peuvent aboutir à la salinité par une remontée de la nappe (Ben Hassine, 2005).

La salinité peut être provoquée en conditions anthropiques par l'irrigation par des eaux salées. Ce type de salinité du sol est la conséquence de la mauvaise combinaison d'une forte évaporation et d'un apport inadapté d'eau d'irrigation chargée en sels dissous (Boualla et al. 2012).

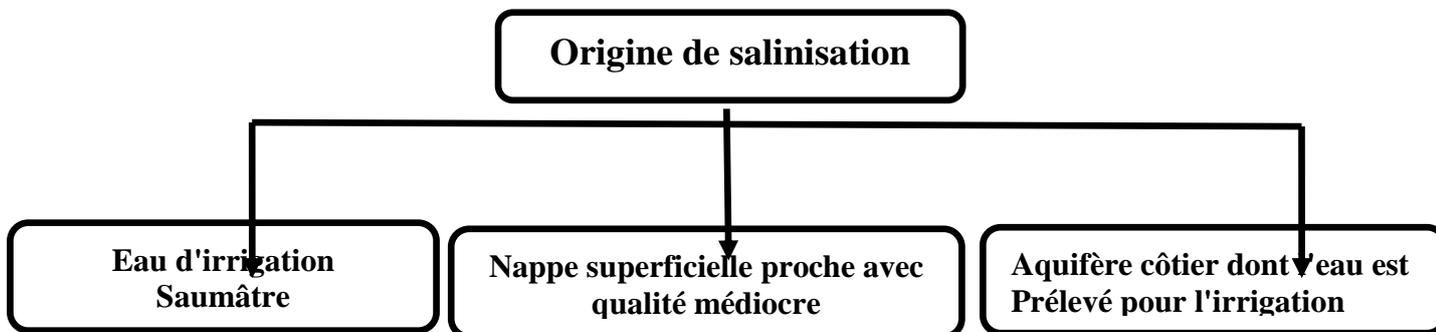


Figure I.2. Origine de la salinisation du sol (IPTRID, FAO, CISEAU, 2006).

I.4. Les types de salinité :

I.4.1. La salinité primaire :

Près de 80% des terres salinisées ont une origine naturelle « édaphique », cette dernière est causée par l'altération des roches contenant dans leur structure mère des sels. On qualifie alors la salinisation de « primaire ». Dans ce cas, celle-ci est due à la formation des sels pendant l'altération des roches ou à des apports naturels externes :

- Remontée d'une nappe phréatique salée près de la zone racinaire (Mermoud, 2006).
- Changement climatique et températures plus élevées.
- Dans les régions côtières, intrusion de l'eau salée ou submersion des terres basses.
- Inondation périodique par de l'eau de mauvaise qualité. Enrichie davantage le sol par des sels de différentes natures.

I.4.2. La salinité secondaire :

Près de 20% des terres salinisées ont une origine humaine ou anthropique ; sont qualifiées de «secondaires», liées fréquemment à des pratiques agricoles inadéquates. Dû principalement à l'irrigation des terres avec une eau de mauvaise qualité (eau saline), un lessivage insuffisant et un drainage défaillant (Anonyme, 2006 et Le goupil, 1974), ou bien présence d'une nappe phréatique salée proche de la surface (Duchaufour, 1983 ; Cherbuy, 1991 ; Girard et al, 2005). D'après les récentes statistiques, la moitié des sols salins sont apparus suite à une irrigation inadéquate. Cette pratique arbitraire et non contrôlée modifie le bilan hydrique du sol, générant par conséquent un apport d'eau additionnel. Dans ce cas, le sol avait déjà formé et avait acquis une personnalité pédologique. Par exemple, si une partie d'une plaine littorale est envahie par la mer, bien que le contact soit direct, la salinisation reste secondaire. Il en est de même d'un sol alluvial qui se sale sous l'effet de la remontée d'une nappe chlorurée (Abbani et Abde-Lali ,2005 ; Mermoud, 2006).

I.5. La salinisation dans le monde et en Algérie :

I.5.1.La salinisation dans le monde :

A l'échelle mondiale, les sols salés occupent des surfaces étendues et constituent une grande ampleur pour l'agriculture. Leurs distributions géographiques se superposent presque entièrement à celle des zones arides et semi arides et des zones côtières (Durand, 1983 ; FAO, 2005). La surface affectée par la salinité dans le monde est évaluée à 954,8 millions d'hectares (Tableau 1), soit 23 % des terres cultivées (FAO, 2008).WRI (2002) propose un classement des zones arides basé sur les valeurs du rapport ratio précipitation annuelle/évapotranspiration potentielle moyenne annuelle (Figure 3), le monde est de ce fait, divisé en :

- Zone hyper aride couvrant environs 11 millions de Kilomètres carrés, soit 8% des terres totales et elle correspond principalement au désert du Sahara.

- Zones arides, semi-arides et subhumides sèches qui couvrent près de 954,8 millions d'hectares carrés principalement concentrés en Asie et Afrique.

Tableau I.1. Superficie affectée par la salinité dans le monde (FAO, 2008).

Région	Superficie (millions d'hectares)
Afrique	80,5
Europe	50,8
Amérique du Nord	15,7
Amérique du Sud	129,2
Australie	357,3
Mexique et Amérique Centre	2
Asie du SudEst	20
Asie du centre et du Nord	211,7
Asie du sud	87,6
Total	954,8

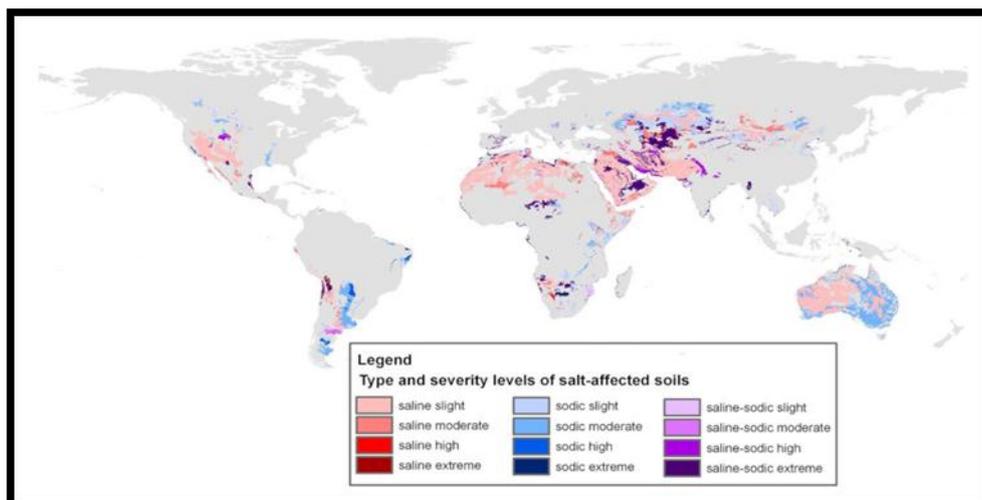


Figure I. 3. Carte des sols salins dans le monde.

I.5.2. La salinisation en Algérie :

En Algérie, les sols salés occupent de grandes étendues (Halitim, 1985). Selon Le Houerou (1993), les sols salés occupent de vastes superficies (3.2 millions d'hectares de la superficie totale). Près de 10-15 % de terres irriguées sont concernées par ces problèmes. Bien que le problème d'alcalinisation, selon Daoud et Halitim (1994) ne se pose plus, on estime que les terres salinisées seront difficilement récupérables. La plupart de ces sols sont situés, en région aride et semi-aride, mais aussi sous bioclimat subhumide (Halitim, 1973). Selon Djili (2000), les sols salés sont localisés plus au Nord qu'au Sud Algérien, et s'expriment mieux entre les isohyètes 450 mm qui semblent être la limite supérieure des sols fortement sodiques (Figure.5).

Selon l'INSID (2008), la salinité est observée dans les plaines et vallées de l'Ouest du pays (Mina, Cheliff, Habra Sig, Maghnia), dans les hautes plaines de l'Est (Constantine, Sétif, Bordj Bou Arreridj, Oum El Bouagui), aux abords des Chotts et de Sebkhass (Chott Chergui, Chott Gharbi, Chott Hodna, Chott Melghir, Sebkhass d'Oran, de Benziane, Zemmoul, Zahrez Gharbi et Chergui, etc..) et dans le grand Sud (dans les Oasis, le long des oueds, etc.) (Figure.4).

Les sels les plus fréquents, dans les régions arides et semi- arides, sont surtout les chlorures, les sulfates de sodium, les sulfates de magnésium et à un moindre degré les carbonates de sodium (Halitim, 1988). Selon Aubert (1975), les sols salés d'Algérie sont caractérisés, en général, par une conductivité électrique supérieure à 7dS/m et un pourcentage de sodium échangeable (ESP) qui varie de 5 à 60 % de la CEC.

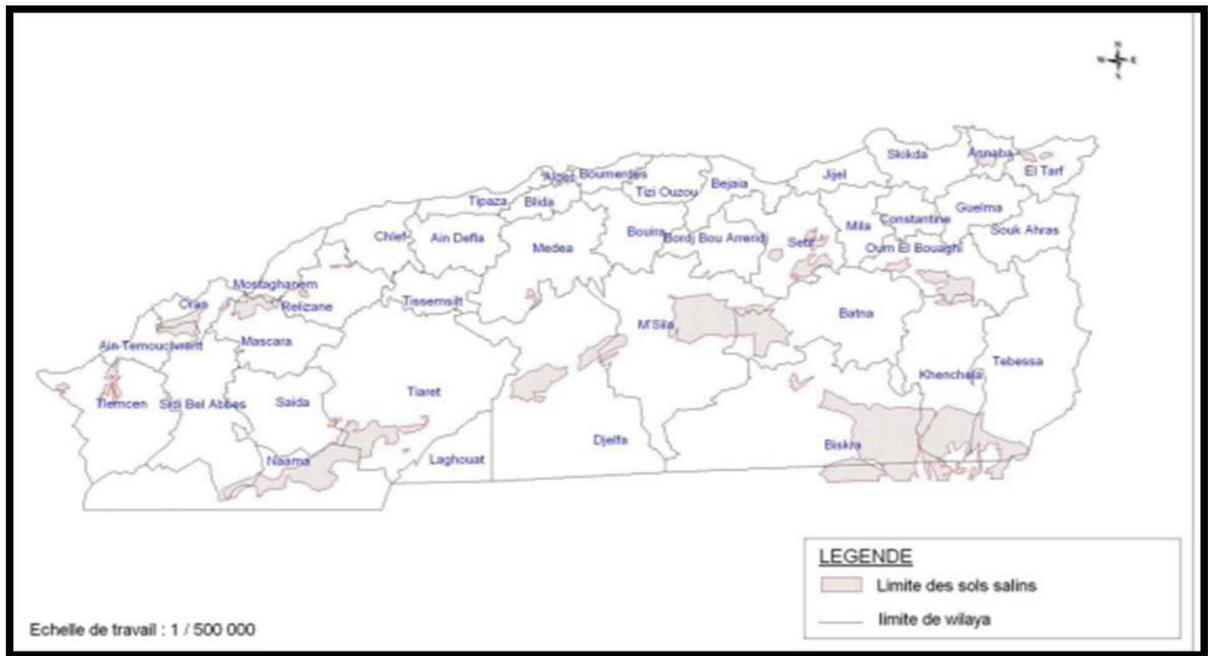


Figure I. 4. Répartition des sols salins du Nord de l’Algérie (INSID, 2008).

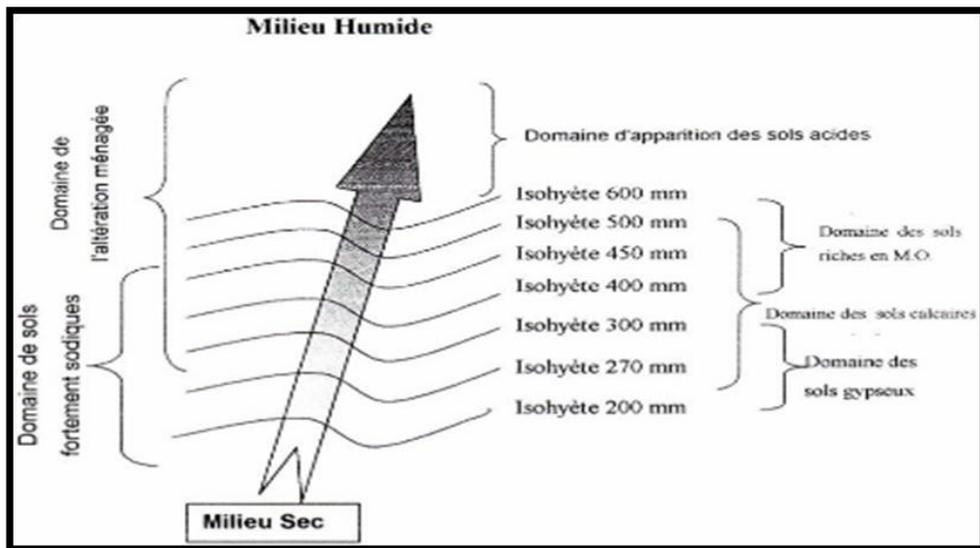


Figure I. 5. Représentation schématique de la distribution de quelques domaines pédologiques dans le Nord de l’Algérie (Djili, 2000).

Tableau I.2. les superficies affectées par la salinité dans quelques périmètres de l'Ouest du pays (ONID (ex AGID) 2003).

Périmètres irrigués	Superficies irrigables	Superficies affectées	Pourcentage %
Haut Cheliff	20200	6400	32
Moyen Cheliff	21800	8700	40
Bas Cheliff	22500	15000	67
Mina	9600	4190	44
Habra	19600	8100	41
Sig	8600	3200	37

I.6. Causes de la salinité des sols :

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

- Remontée de la nappe souterraine à proximité de la surface et transport de sels par remontées capillaires.
- Présence d'un aquifère côtier salin.
- L'irrigation avec de l'eau saline.
- L'évaporation et les rares pluies dans les régions semi-arides et arides accentuent la salinisation des périmètres irrigués.

I.7. Le problème de la salinité des sols :

Dans les sols salinisés, la concentration en sels de sodium, calcium, magnésium, potassium est importante ; le plus courant est le chlorure de sodium (NaCl, notre sel de table) : cependant la concentration en ions Cl⁻ pose généralement moins de problème car ils sont facilement lessivés même avec de faibles quantités d'eau. Les ions dont le sodium sont normalement fixés par le complexe argilo-humique dans un sol sain. Dans un sol dégradé ou en région aride, le complexe argilo-humique est rapidement saturé, les ions positifs passent en solution et précipitent si l'évaporation est intense. On a ainsi fréquemment des dépôts

superficiels de carbonate de sodium (l'ion carbonate provient du gaz carbonique dissous dans l'eau) responsables de la couleur blanche des sols sodiques et de leur pH alcalin. Suivant l'ampleur du problème, on peut distinguer des sols salinisés, sodiques et éventuellement sodiques alcalins. Selon une étude de l'université des Nations unies, environ 62 000 000 ha sont affectées, soit 20 % des terres irriguées à travers le monde, et ce chiffre était déjà de 45 000 000 ha au début des années 1990. Pour la seule plaine Indo-Gangétique, qui abrite plus de 10% de la population mondiale, La saturation des sols en sels est un trait commun aux terres irriguées des régions arides et semi-arides et un problème environnemental qui entraîne la baisse de rendement critique des cultures³.

Les problèmes sont fréquemment associés à un niveau de nappe trop élevé, dû à une infiltration naturelle insuffisante. Le mauvais drainage vient d'un débit insuffisant de l'aquifère, par exemple dans une dépression du relief où se trouve un point bas de la nappe.

Dans le monde, le principal facteur de saturation des sols en sels est le manque de pluie : les sols salins sont majoritairement présents dans les régions arides et semi-arides du globe.



Figure. I.6. Sols salinisés.

Comme cité dans le paragraphe précédent, la principale cause de salinisation artificielle est l'irrigation des terres. L'eau d'irrigation puisée dans les rivières ou la nappe, aussi douce soit-elle, contient des sels minéraux qui finissent piégés dans le sol après évaporation.



Figure. I.7. Terre appauvrie par salinisation.

La cause secondaire de la salinisation est la saturation en eau des terres. Puisque le taux d'absorption maximum est d'environ 70%, et qu'il ne dépasse jamais pratiquement 60%. Cela signifie donc qu'au moins 30%, et souvent plus de 40% d'eau s'évapore ou est stockée dans le sous-sol, ce qui peut altérer considérablement l'hydrologie originale des aquifères locaux. Beaucoup d'aquifères ne peuvent évacuer de telles quantités d'eau, de sorte que le niveau de la nappe monte au point d'affleurer en surface. La saturation s'accompagne de trois problèmes :

- La hauteur de la nappe et le déficit d'oxygénation de l'horizon racinaire réduit le rendement de la plupart des cultures.
- Elle provoque l'accumulation de sels charriés par l'eau d'irrigation, puisque la circulation d'eau est ralentie.
- la stratification verticale de la nappe piège les sels dissous dans le sol ce qui aggrave la salinisation.



Figure .I.8.Affleurement de sel causé par la remontée de la nappe phréatique.

I.8.Effet de la salinité sur les constructions :

Dans les sols salins, la présence excessive de sels solubles neutres floccule la fraction argileuse, mais les maintient stable, alors que dans les sols alcalins, un excès en sodium échangeable favorise la dispersion de l'argile et rend la structure du sol instable tels que la fissuration des murs et la distorsion des ouvertures (Geo-Enviro, 2001). Dans le domaine routier, ces changements volumétriques provoquent un décollement interne entre les différentes couches. Cela est suivi par une fissuration de la surface de bitume et une rupture complète de la route comme le montre la Figure (II.4). Le résultat final est une défaillance prématurée de la route, un entretien plus fréquent et coûteux ou une combinaison des deux. De surcroît, la forte salinité engendre des dégâts irréparables sur les éléments porteurs en béton armé, comme l'illustre.



Figure. I.9. La dégradation de la couche de roulement d'une route en raison de la remontée d'eau saline.



Figure. I.10. Corrosion des aciers dans le béton.

I.9. La sodisation :

Le processus de sodisation se produit lorsque le complexe organo-minéral d'échange est progressivement saturé par l'ion Na^+ (horizon sodique). Les agrégats deviennent instables à partir d'un certain seuil et la dégradation des propriétés physique du sol est potentielle ; Ce dernier remplace les ions présents sur le complexe absorbant des particules argileuses. La capacité d'échanger des ions est appelée la capacité d'échange cationique (CEC). La sodisation est mesurée au moyen d'une grandeur appelée le pourcentage du sodium échangeable (ESP). Ce dernier est déterminé selon la formule suivante (Richards, 1954):

$$\text{ESP}(\%) = \frac{\text{Na}^+}{\text{CEC}} \times 100 \quad (\text{I.1})$$

Plus la proportion de sodium dans le total des actions échangeables est grande et plus le sol est sodique. On détermine la sodisation par le pourcentage de sodium échangeable ESP (Ex changeable Sodium Parentage) par rapport à la capacité d'échange des cations (CEC).

$$\text{ESP} = 100 * \text{Na échangeable (en meq/l)} / \text{CEC (en meq/l)}.$$

Si cette valeur est supérieure à 15%, on parle d'un sol sodique. Ce pourcentage est en étroite relation avec un paramètre utilisé par l'école de Riverside, aux USA, qui est le SAR (Sodium Absorption Ratio) de l'extrait de la pâte saturée. La structure du sol devient dispersée, affectant par conséquent la porosité, la perméabilité et la portance du sol (Boutelli, 2012). La faible perméabilité conduit à un mauvais transport d'eau et de nutriments dans le sol ce qui occasionne une perte de la productivité. Outre la perte de productivité, la sodicité entraîne plusieurs problèmes environnementaux et structurels avec des dommages aux bâtiments, aux routes et autres infrastructures.

I.10. L'alcalinisation :

Une alcalinisation est un processus sol à complexe saturé en sodium se transforme physiquement suite aux réactions d'échange entre l'ion Na^+ et les protons au moment d'une humectation (Montoroi, 2005). Pour devenir plus alcalin. Le mot englobe les termes de sodisation avec le sodium (soude) et d'alcalisation. Le processus réduit la quantité d'acide dans une solution. L'alcalinisation se traduit par une augmentation du pH du sol suite à l'accumulation de bases faibles. Un processus de sodication peut exister préalablement. Une mesure de l'adsorption du sodium (taux de sodium adsorbé) permet de connaître l'état du processus.

I.11. Classification des sols salins :**I.11.1.Sol salin :**

- Haute concentration en sels solubles dans le sol.
- Cristallisent parfois en surface, ce qui donne une croûte blanche sur le sol.
- Humidité persistante plusieurs jours après les pluies.
- Mauvais développement des plantes : mauvaise germination, feuilles brûlées,...

I.11.2.Sol sodique:

- Sodium prédominant parmi les sels.
- En conséquence, le sol est alcalin (pH entre 8 et 10).
- Déstructuration des argiles et de la matière organique, ce qui crée parfois une couche brune en surface et rend les sols asphyxiants.
- Humidité persistante plusieurs jours après les pluies.
- Toxicité du sodium.

I.11.3.Sol salin-sodique :

- Forte concentration de sels solubles où le sodium est majoritaire.
- pH généralement inférieur à 8,5.

Ces sols risquent de devenir sodiques.

Tableau I. 3. Classification de terres salées.

Conductivité électrique de l'extrait saturé (mmho/cm à 25°C)	<4	>4	<4	>4
Saturation du sodium (Na) du complexe absorbant (%)	<15	<15	>15	>15
Nomenclature américaine	Sol non salé non alcalin = Sol non salé non sodique	Sol salé non alcalin = Sol salé non sodique	Sol alcalin non salé = Sol sodique non salé	Sol Salé alcalin = Sol Salé Sodique

I.12. Différence entre la sodicité et la salinité :

Les sols salins contiennent des quantités excessives de sel soluble, tandis que les sols sodiques contiennent de grandes quantités de sodium échangeable dans le sol lui-même.

**Figure I. 11.** Sols salés et sodiques des sebkhas.

I.12.1.Sodicité :

- Quantité relative de sodium échangeable dans le sol par rapport aux autres cations échangeables (calcium et magnésium).
- La charge positive des cations est équilibrée par la charge négative sur les feuilles de clay ou la double couche de plaques-jour.

I.12.2.Salinité :

- Quantité de sels libres dans la solution de sol bulk, en dehors de la double couche d'argile.
- Calcium, sodium, magnésium, potassium, chlorure, sulfate, carbonate, bicarbonate.
- Charge positive des cations équilibrés par la charge négative des anions dans la solution du sol.

I.13.Principes du contrôle de la salinité

Le drainage est la principale méthode de contrôle de la salinité des sols. Le principe est de ne drainer qu'une petite partie de l'eau d'irrigation (entre 10 to 20 %, celle qui a proprement lessivé le sol¹³).

Dans les zones irriguées où la salinité est stable, la teneur en sels minéraux de l'eau drainée est en principe 5 à 10 fois supérieure à celle de l'eau d'irrigation. Les rejets en sels minéraux équilibrent les apports et il n'y a pas d'accumulation.

Le relargage de sel sera très supérieur à l'apport de sels, si bien qu'avec le même débit de drainage, la des salinisations est plus rapide.

Dans les régions à fort contraste saison sèche humide, le drainage peut n'être activé qu'en saison humide, et interrompu à la saison sèche. Cette pratique épargne l'eau d'irrigation.

I.13.1.Le drainage :

Le drainage pour le contrôle de la salinité est le plus souvent un drainage horizontal quoiqu'on ait parfois recours à des drains verticaux .Le drainage, conçu pour évacuer l'eau chargée, abaisse par là aussi le niveau de nappe ; aussi, afin de réduire le coût du dispositif, l'action sur la nappe doit être réduite au minimum. Dans bien des cas, une nappe réduite en moyenne saisonnière à 60 cm est convenable. Cela signifie qu'elle peut ponctuellement

descendre en-dessous de 60 cm (disons 20 cm juste après irrigation ou un orage), et qu'en d'autres occasions, elle dépassera 80 cm. Les fluctuations de nappe fait « respirer » le sol en favorisant l'émission de dioxyde de carbone (CO₂) par les racines et la fixation d'oxygène.

Les valeurs avancées ci-dessus à propos de la profondeur optimale de la nappe ne sont qu'indicatives : dans certains cas, une nappe encore plus réduite est requise, alors que dans d'autres cas il faut la prévoir plus profonde.

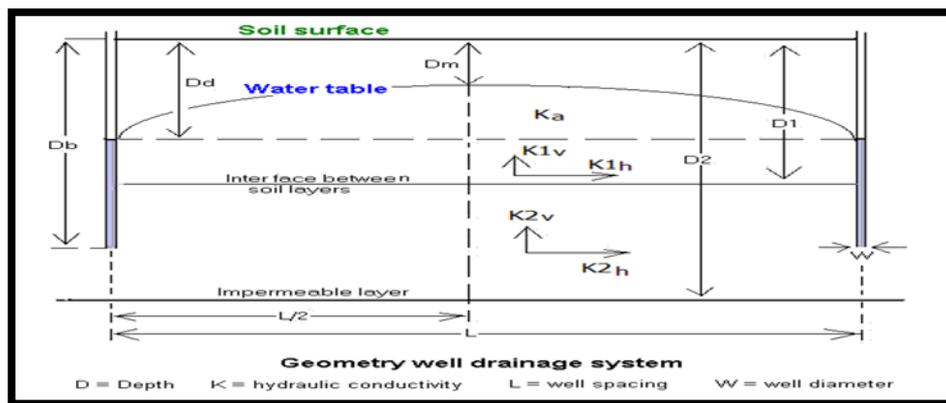


Figure.I.12.Paramètres d'un drainage vertical.

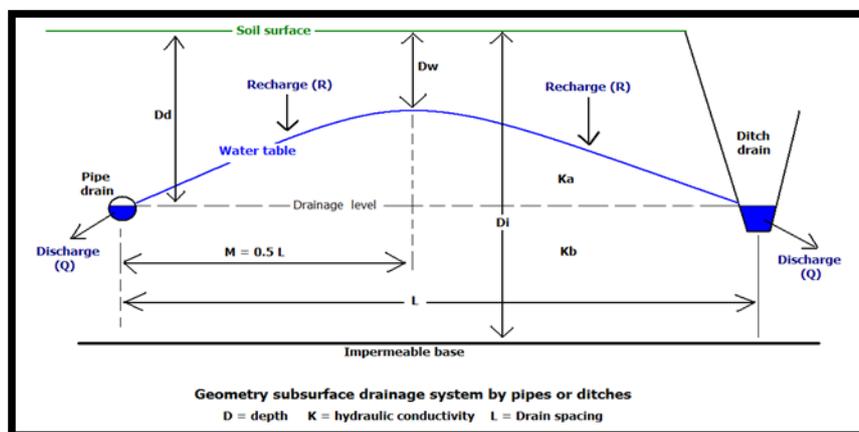


Figure. I.13. Paramètres d'un drainage horizontal.

I.13.2 Lixiviation du sol :

La zone vadose du sous-sol saturé est principalement soumise à quatre facteurs hydrologiques :

- Infiltration des eaux de pluie et d'irrigation (Irr) dans le sol depuis la surface (Inf).

- $Inf = Pluie + Irr.$
- Évapotranspiration de l'eau par les plantes directement dans l'atmosphère via la surface (Evap).
- Percolation de l'eau depuis la zone non saturée du sol dans la nappe (Perc).
- Remontée capillaire de la nappe vers la zone non saturée (Cap).

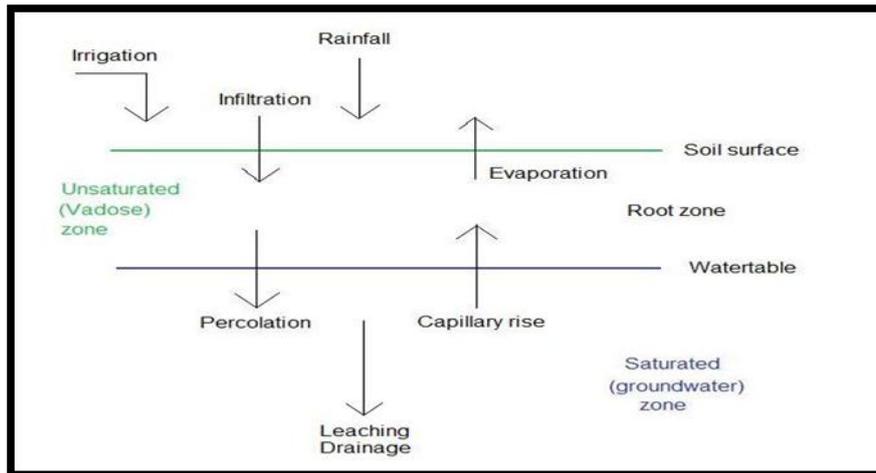


Figure. I.14. Facteurs d'équilibre hydrique d'un sol.

I.13.3. Une alternative :

Par apport d'eau aux parcelles irriguées, la nappe s'élève localement ce qui crée un gradient hydraulique vers les bandes non-irriguées. Cet écoulement agit comme un drainage superficiel des parcelles directement irriguées, sans toutefois assécher la nappe ; le lessivage du sol est possible, et on peut ramener la salinité à un niveau acceptable. Sur les parcelles non irriguées (sacrificielles), le sol reste sec ; l'eau interstitielle y remonte par capillarité et s'évapore, reléguant sa charge minérale dans les terrains. Néanmoins, ces parcelles sont appréciées du bétail qui peut y brouter les mauvaises herbes et des herbes résistantes. Par ailleurs, il est envisageable de planter des essences d'arbre résistantes à la salinisation comme le Casuarina, Eucalyptus ou l'atriplex, qui ont des racines profondes (la salinité du sous-sol, parce qu'il est saturé, est moindre que celle du sol en surface). Il est ainsi possible de combattre l'érosion éolienne. On peut aussi récolter l'engrais des parcelles non irriguées.

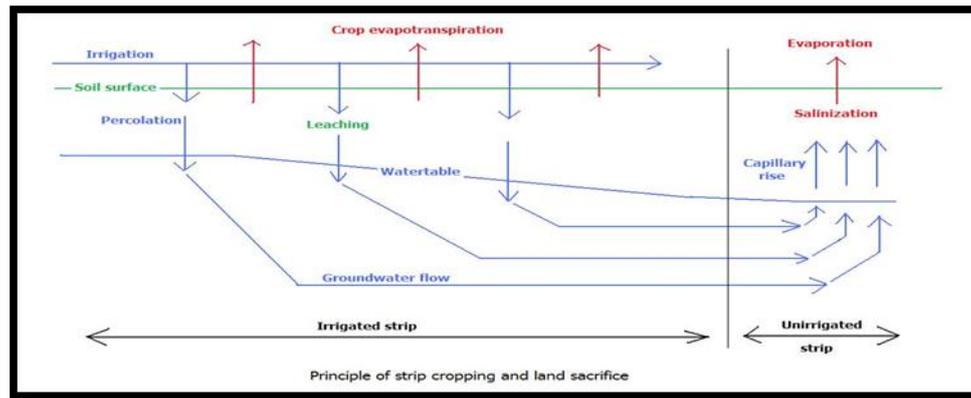


Figure .I.15.La (culture en branche) consiste à gérer la profondeur de nappe pour mieux contrôler la salinité.

I.14.Les grandeurs utilisées pour caractériser les sols salés :

I.14.1.La conductivité électrique CE :

La présence d'ions en solution est à l'origine d'une conductivité électrique ; c'est pourquoi cette propriété est utilisée pour caractériser les sols. Plus la quantité des sels dissous est grande et plus la CE de la pâte saturée est grande (Calvet, 2003) .Généralement, la CE s'exprime en ds/m à 25 °C.

I.14.2.Quantité de sodium adsorbé :

Il représente le taux de sodium adsorbable par rapport aux autres cations (Ca^{++} et Mg^{++}), il s'agit d'un paramètre fondamental pour la détermination du niveau d'alcalinisation de la solution du sol.

La relation entre les trois cations est proposée par le laboratoire de Riverside (**Rihacrd**s, 1954), et s'exprime comme suit :

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{++}] + [Mg^{++}]}{2} \text{ :még/l}}} \quad (I.2)$$

I.14.3.Le pourcentage de sodium échangeable :

Représente le pourcentage de sodium présent sur le complexe d'échange, l'E.S.P est en fonction de la C.E.C.

$$1. \text{ESP} = [\text{Na}^+]/\text{CEC} \times 100 \quad ([\text{Na}^+], \text{CEC} : \text{exprimé en meq} / 100\text{g})$$

Les pédologues ont établi une corrélation entre l'ESP et le SAR exprimée par la Formule

$$2. \text{ESP} = 100(0,0126 + 0,01475) \text{SAR} \sqrt{1 + (0,0126 + 0,01475) \text{SAR}}$$

I.14.4. pH du sol :

Est une notion permettant de façon précise de désigner la réaction du sol. Il augmente en corrélation avec le rapport $\text{Na}^+ / \text{C.E.C}$ (Duchaufour, 1977).

I.15. Conclusion :

La salinisation est un phénomène inquiétant à l'échelle mondiale et nationale et problème que l'on rencontré assez fréquemment en zone aride et semi-aride: ce problème est souvent lié à la mauvaise qualité et au mauvais emploi de l'eau d'irrigation, ainsi qu'à un drainage insuffisant. Ce fléau est dû à différentes facteurs, à savoir le paramètre naturel et humain. Cette menace affecte bon nombre de surfaces entraînant ainsi un énorme préjudice, avec une destruction de la structure, de la portance, de l'environnement ainsi que de la productivité agriculture. A cet égard, il est primordial de faire appel à des techniques et méthodes de traitement afin de faire face à ce dilemme. Plusieurs méthodes ont été mises en place. Cependant, ces processus conventionnels. Les études et expérimentations réalisées par exemple en Tunisie (28) au en Algérie(16) montrent que la salinité des sols, aussi bien que l'emploi d'eau salée en irrigation ne constituent pas des problèmes insolubles pour autant que l'on puisse intervenir préventivement et curativement en contre eux.

Chapitre II : Traitement électrocinétique.

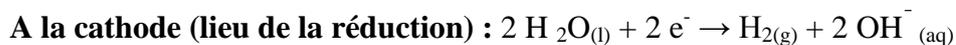
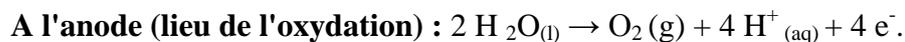
II.1.Introduction :

Le développement de l'électricité comme source d'énergie et son aspect non polluant, a poussé les chercheurs à développer des techniques et méthodes de traitement de la salinité, qui est une cause majeure de la dégradation des sols. Le technique de traitement électrocinétique s'est révélée être une technique innovante, moins couteuse et respectueuse de l'environnement.

II.2. Les différents mécanismes liés au traitement électrocinétique :

II.2.1. L'électrolyse :

Une électrolyse est une opération chimique dont le but est de décomposer différentes matières. Par exemple, lorsqu'une solution contient une matière, on va y ajouter un solvant afin que ses ions soit décomposables. On plonge alors ce mélange dans un bain auquel sont intégrés une anode et une cathode, faisant alors passer un courant dans le bain. Le rôle La soude en se dissociant apporte des ions qui permettent le passage d'un courant important et le démarrage de l'électrolyse. Voici les équations des réactions ayant lieu aux électrodes :



Suite à ces réactions, il y a formation d'un milieu acide au niveau de l'anode et d'un milieu alcalin au niveau de la cathode.

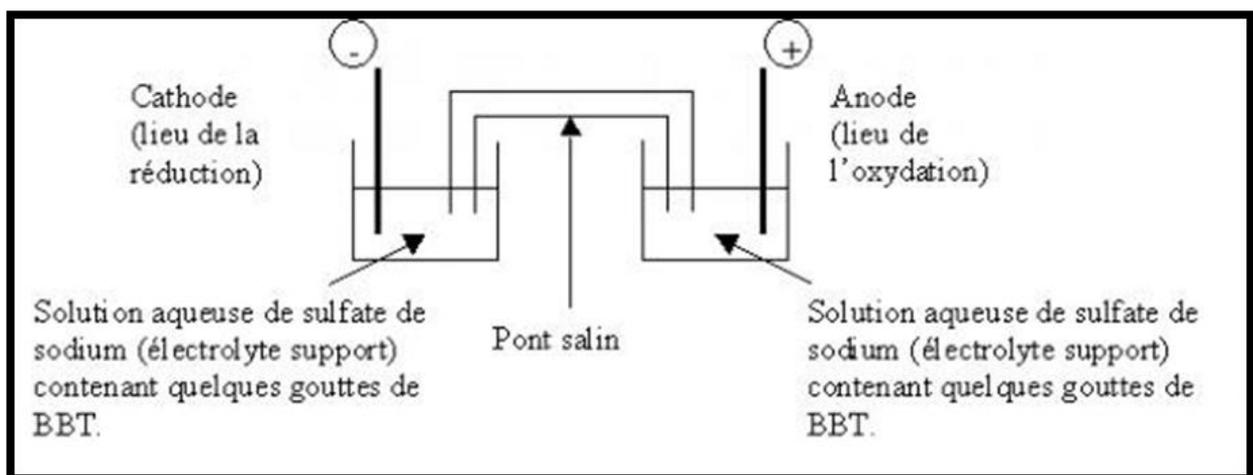


Figure.II.1. Protocole expérimental.

II.2.2. L'électro-osmose :

L'électro-osmose est un phénomène qui résulte du mouvement d'un fluide (qui peut être de l'eau déminéralisée, un électrolyte ou un liquide organique) lorsqu'un champ électrique transversal est appliqué dans la couche diffuse. Le champ électrique génère la force de Coulomb qui met en mouvement des charges libres dans la couche diffuse. Le mouvement de ces charges, à travers des liaisons visqueuses, emprisonne le liquide. L'électro osmose est le transfert d'un liquide à travers une membrane microporeuse sous l'action d'un champ électrique. C'est le phénomène inverse du potentiel d'écoulement, dans lequel le mouvement du fluide à travers une membrane provoque une différence de tension des deux côtés de la membrane. L'électro-osmose est un phénomène parasite en électrodialyse, qui se traduit par une migration de l'eau entraînant une dilution des solutions.

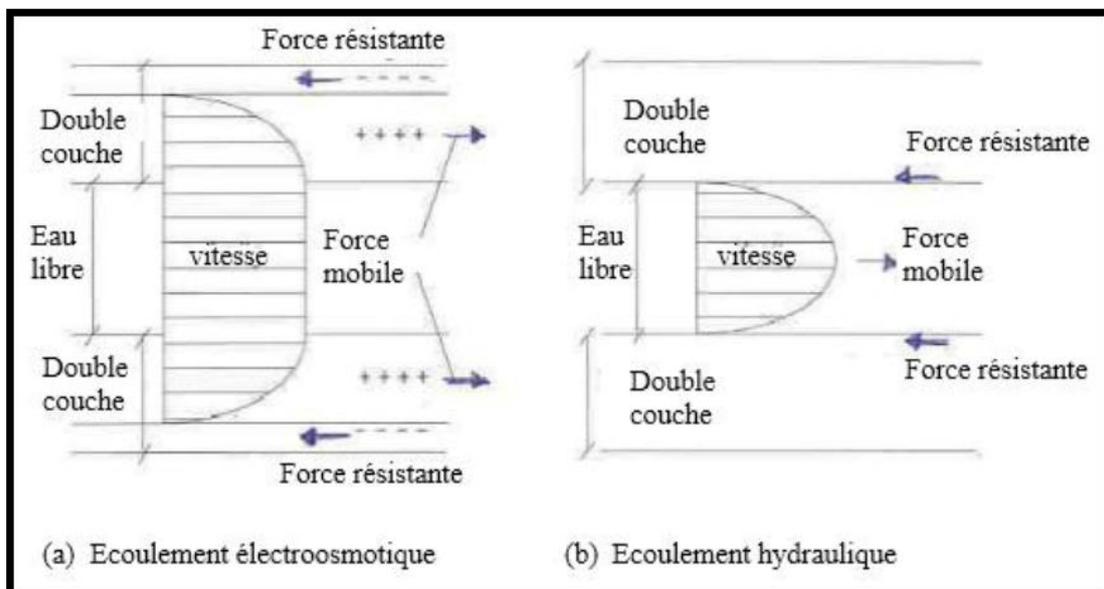


Figure II.2. Comparaison entre l'écoulement électro osmotique et l'écoulement hydraulique (Casa grande, 1951).

Le flux électro osmotique sous un potentiel électrique est donné par l'équation suivante.

$$Q_e = \frac{\varepsilon \zeta}{4\pi\eta} i_e A \quad (\text{II.1})$$

Q_e : le débit électro osmotique de l'eau.

ε : est la constante diélectrique.

ζ : est le potentiel.

Zêta : (V/cm).

η : est la viscosité de l'eau (cm^2/s).

i_e : est la différence de potentiel électrique appliquée (V/cm).

A : c'est la section transversale du flux électro osmotique (cm^2).

Cette relation est exprimée comme suit :

$$Q_e = K_e i_e A \quad (\text{II.2})$$

Tableau II.1. Le coefficient électro-osmotique en fonction des différents types de sol (Asadi et al. 2013).

Les types de sol	$K_e (\text{cm}^2/\text{Vs}) \times 10^{-5}$
Kaolinite	5.7
Argile limoneuse	5.0
Montmorillonite sodique	2.0 jusqu'à 12
Argile de London	5.8
Argile bleu de Boston	5.1
Tourbe	1.57

II.2.3.L'électrophorèse :

L'électrophorèse est une technique de séparation de particules chargées électriquement par migration différentielle sous l'action d'un champ électrique. En fonction des caractéristiques de la molécule (taille et géométrie, charge électrique) et du support choisi, la vitesse de migration et la distance parcourue dans la matrice diffère, ce qui permet de séparer les ions et de les localiser.

II.2.4. L'électro-migration :

Lorsqu'on applique un courant électrique continu à une solution ionique, les ions vont se déplacer vers l'anode ou la cathode selon qu'ils sont chargés négativement ou positivement.

Dans le cas général, SI nous considérons une suspension de particules chargées, nous parlerons d'électrophorèse.

Le flux migratoire de ces ions est déterminé au moyen de la formule proposée par Acar et Alshawabkeh, 1993, comme suit :

$$J = u c i_e \quad (\text{II. 3})$$

J : Le flux migratoire des espèces ioniques.

u : La mobilité ionique effective (m^2/Vs).

C : La concentration des espèces ioniques.

i_e : Le potentiel électrique (V/cm).

II.3. Quelques procédés électrolytiques de décontamination :

II.3.1. Le Transfert hydraulique :

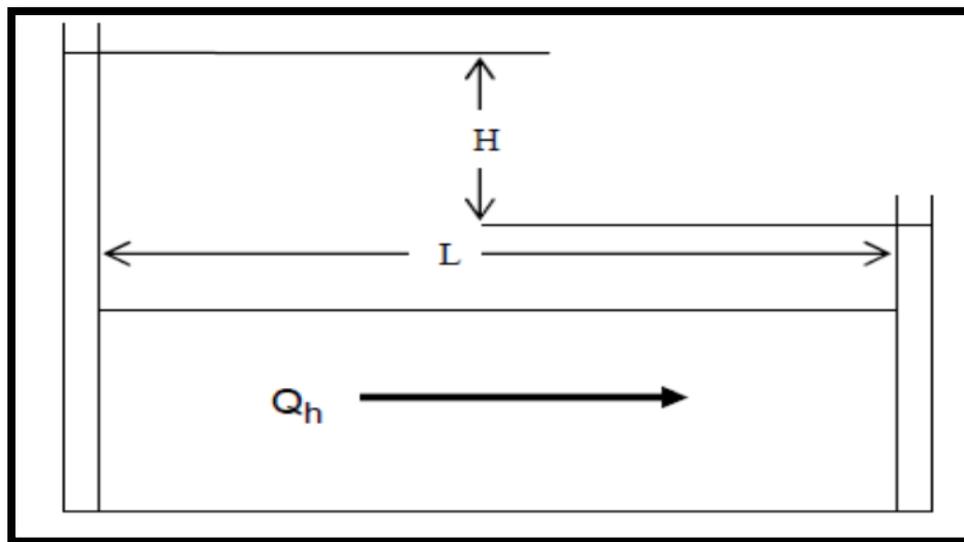


Figure II.3. La perméabilité hydraulique selon la loi de Darcy (Jayasekera, 2007).

II.3.1.1. La définition du terme hydraulique :

Le terme “hydraulique” peut être un adjectif exprimant tout ce qui est relatif au liquide et l’eau en règle générale. Il peut s’agir de son écoulement, de son mouvement ou de sa circulation. Le terme “hydraulique” peut également définir la science qui étudie la mécanique des fluides. Il peut s’agir de technologies utilisant des liquides sous pression comme pour le

fonctionnement de machines hydrauliques par exemple, ou des aspects techniques de l'hydraulique urbain entre autres.

II.3.1.2. Les domaines de l'hydraulique :

Voici quelques domaines dans lesquels l'hydraulique est au cœur des études et des technologies :

- L'énergie hydraulique définit l'énergie qui est créée grâce au mouvement de l'eau.
- L'hydraulique fluviale définit les études des cours d'eau naturels ou artificiels.
- L'architecture hydraulique définit le travail de conception et de construction d'ouvrages permettant de maîtriser l'eau, que ce soit le stockage, la distribution, l'évacuation, l'adduction ou même le franchissement.
- L'hydraulique urbaine permet d'analyser et de concevoir des réseaux de distribution d'eau potable mais également d'évacuation des eaux pluviales ou usées en milieu urbain. Le terme "assainissement" est alors couramment employé.
- Les machines hydrauliques utilisent l'énergie hydraulique pour leur fonctionnement. C'est le cas, par exemple, de certains engins de chantier.

II.3.1.3. Le débit :

Afin de mesurer le débit de l'eau, exprimé en mètre cube par seconde (m³/s) ou par la lettre Q_h à l'international, il est possible d'utiliser un débitmètre. En effet, cet appareil permet de mesurer le débit d'un fluide, qu'il soit liquide ou gazeux, dans une section constante, comme une canalisation par exemple. Le débit hydraulique peut être calculé comme suit :

$$Q_h = k_h i_h A \quad (\text{II.4})$$

Avec :

Q_h : Le débit hydraulique.

i_h : le gradient hydraulique.

k_h : le coefficient hydraulique.

A: la section transversale.

II.3.1.4. La pression :

L'unité de mesure pour exprimer la pression hydraulique dans le Système International est le pascal (Pa). Une pression de 1 Pa équivaut à une force de 1 newton exercée sur une surface d'un mètre carré. Quand il s'agit de pression hydraulique, l'unité de mesure employée également est le bar, qui correspond à 100 000 Pa ou 100 kilo newtons par mètre carré. La pression de l'eau définit donc l'intensité de la force qu'elle exerce par unité de surface.

II.3.2. Le transfert chimique :

En présence d'une réaction chimique, les choses sont plus complexes, le transfert de matière peut même se trouver accéléré, la migration des espèces est assurée par la diffusion régit par la loi de Fick (Mitchell et Soga, 2005 ; Mosavat, 2014). Et définit cette la diffusion comme étant un mouvement d'espèces chimiques d'un milieu plus concentré vers un milieu moins concentré, avec des amplitudes liées au gradient de concentration, comme l'indique l'équation suivante :

$$J_i = D_i^* \tilde{N} c_i \quad (\text{II.5})$$

Avec :

J_i : le vecteur du flux de diffusion (mol/cm²/s).

D_i^* : la diffusivité (cm²/s).

c_i : la concentration.

II.3.3. Le transfert électrique :

Une des méthodes expérimentales permettant de déterminer la concentration d'une solution ionique est de mesurer la conductance d'une portion de cette solution. La conductance d'une portion de solution électrolytique est reliée à la conductivité de la solution.

II.3.3.1. Le courant électrique :

a) Solution électrolytique :

Une solution électrolytique est une solution contenant des ions ; elle est obtenue par dissolution d'un soluté, appelé électrolyte, dans un solvant (généralement l'eau). Elle a la propriété de conduire le courant électrique.

b) loi d'ohm :

La tension V aux bornes de deux électrodes plongeant dans une solution électrolytique est égale au produit de la résistance R de la portion de solution et de l'intensité I qui la traverse.

$$V=R \times I \quad (\text{II.6})$$

V : en volt(v).

R : en ohm(Ω).

I : en ampère(A).

II.3.3.2. Porteurs de charge :

Le courant électrique résulte du mouvement des porteurs de charges.

Les porteurs de charges sont :

- Les électrons dans les métaux (circuit électrique...).
- Les ions dans les solutions électrolytiques (les ions cuivre Cu^{2+} et sulfate SO_4^{2-} dans la solution aqueuse de sulfate de cuivre).

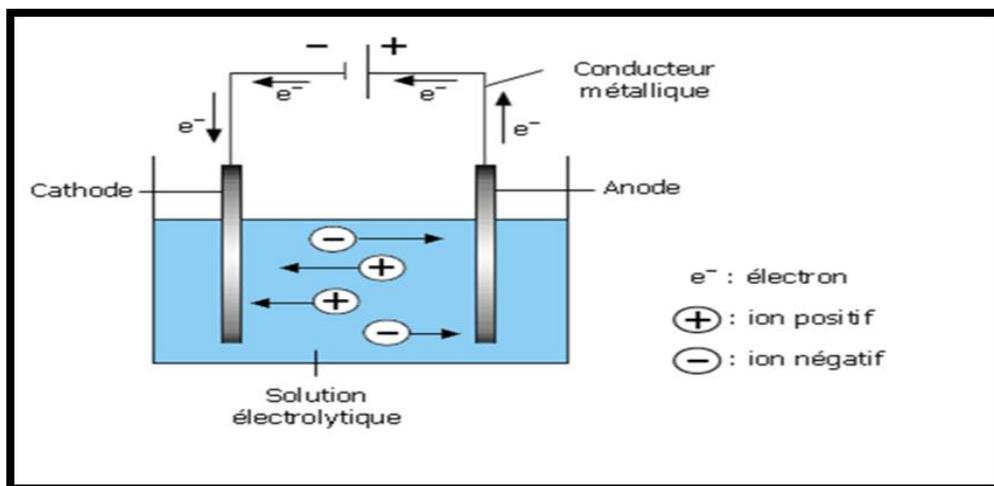


Figure II.4. Les porteurs de charges.

II.3.3.3. Conductance :**a) Définition :**

La conductance ; notée G , d'une portion de solution électrolytique est égale à l'inverse de sa résistance R .

L'unité de la conductance est le siemens(s).de la définition, il vient :

$$G=1 / R \quad (II.7)$$

G: en siemens (s).

R: en ohm(Ω).

b) Relation entre l'intensité I et la tension V :

La loi d'ohm devient :

$$V = R \times I = I / G \quad (II.8)$$

Alors :

$$I = G \times U \quad (II.9)$$

I: en ampère (A).

G: en siemens (s).

V: en volt(v).

II.3.3. 4. Conductivité :

La conductance G est définie sur portion de solution ; caractérisée par une largeur L(m) et une section S(m²) .

G dépend de L et de S, G est proportionnelle a $\frac{S}{L}$:

$$G = \sigma \times \frac{S}{L} \quad (II.10)$$

G : en (s).

S : en (m²).

σ : en (s.m⁻¹).

Le coefficient de proportionnalité σ (sigma) représente la conductivité de la solution électrolytique.

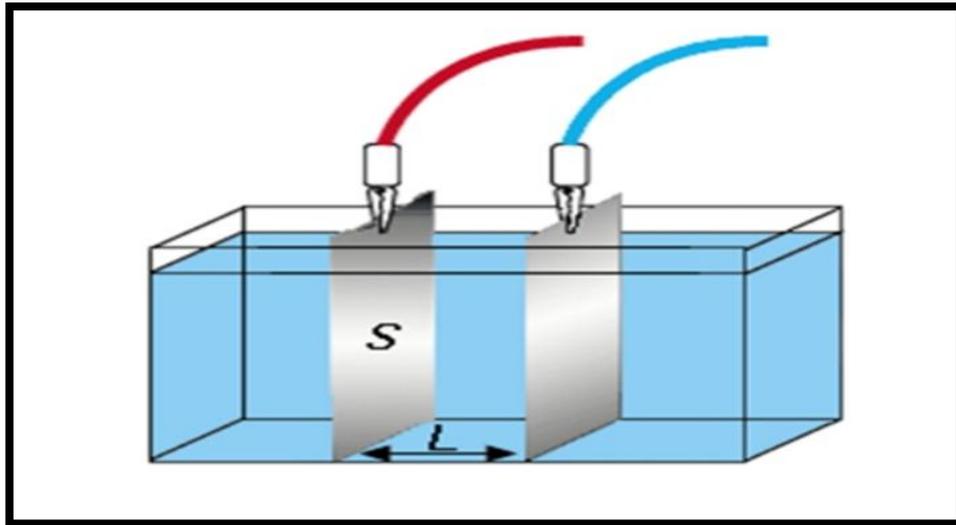


Figure II.5. La capacité qu'a une solution électrolytique à conduire le courant électrique.

II.4. Conclusion :

Parmi les techniques innovantes et économiques de traitement des sols figure la technique de traitement électrocinétique. Dans ce chapitre, les différents mécanismes impliqués dans le passage d'un courant électrique sur une électrode ont été exposés. L'application de ce procédé nécessite la connaissance des voies d'accès à différentes propriétés des capacités de mesures, conducteurs de solutions et les données physiques et chimiques liées aux différents milieux électrolytiques tels que l'eau ou le solvants .

Chapitre III : Localisation et caractérisation du sol étudié

Partie Expérimentale

Partie I : Présentation générale du cadre d'étude (pleine de Bordjia).

III.1.Introduction :

La salinité des sols est une véritable préoccupation environnementale qui touche plusieurs régions dans le monde. Cette menace affecte de nombreuses terres, et par conséquent toute construction ou activité agricole sur de tels sols sera menacée. Dans notre étude, les échantillons de sols étudiés proviennent de la région de Bordjia appartenant à la wilaya de Mostaganem. Cette zone est grandement affectée par le phénomène de salinisation des sols.

III.2.Localisation générale :

Dans la wilaya de Mostaganem, il existe de nombreuses terres qui se caractérisent par une forte salinité du sol. Parmi ces zones, nous nous sommes appuyés sur le choix d'une parcelle de terre dans laquelle le pourcentage de salinité est le plus élevé. La situation géographique de cette zone d'étude est limitée par les coordonnées longitude/latitude (WGS 1984) entre latitude $35^{\circ}41'54.97''$ N à $35^{\circ}41'56.37''$ N et longitude : $0^{\circ} 6'41.12''$ E à $0^{\circ} 6'42.77''$ E. Cette aire géographique est située dans la partie sud-ouest de la wilaya Mostaganem, bordée au nord par le plateau de Mostaganem sur lequel elle s'étend topographiquement, et au sud par le canal de Tin, qui forme une barrière entre la plaine et les marécages. Les marais salants de Hābra et au nord-ouest se trouvent la plaine de Maqtaa qui les sépare du golfe d'Arzew (fig.I.1). Elle s'étend sur une superficie de 23 897 hectares, culminant à des altitudes d'environ 40-50m donnant un très faible dénivelé avec des pentes globalement inférieures à 3% (BNEDER, 2015).

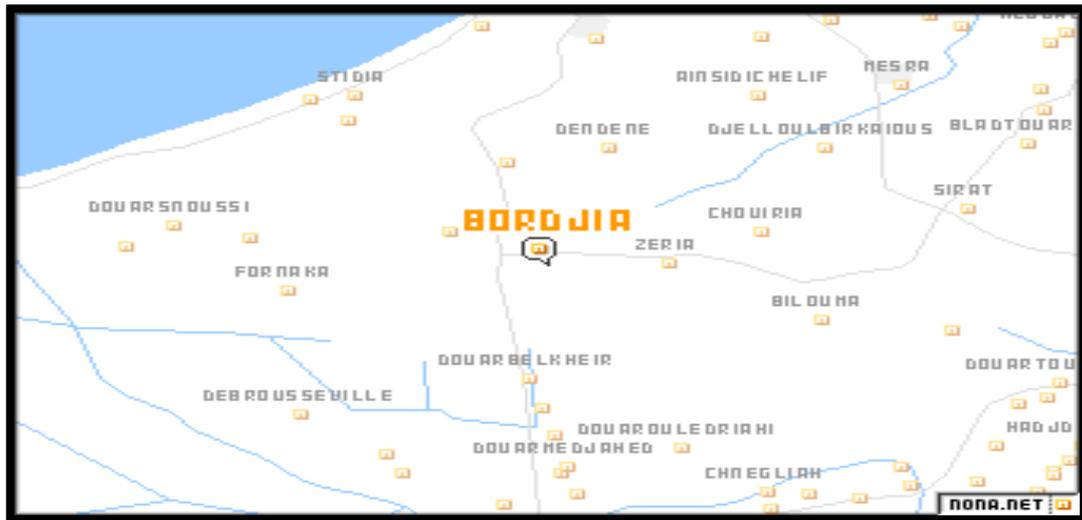


Figure III.1. Carte de la situation géographique du site d'étude (Plaine de Bordjia)

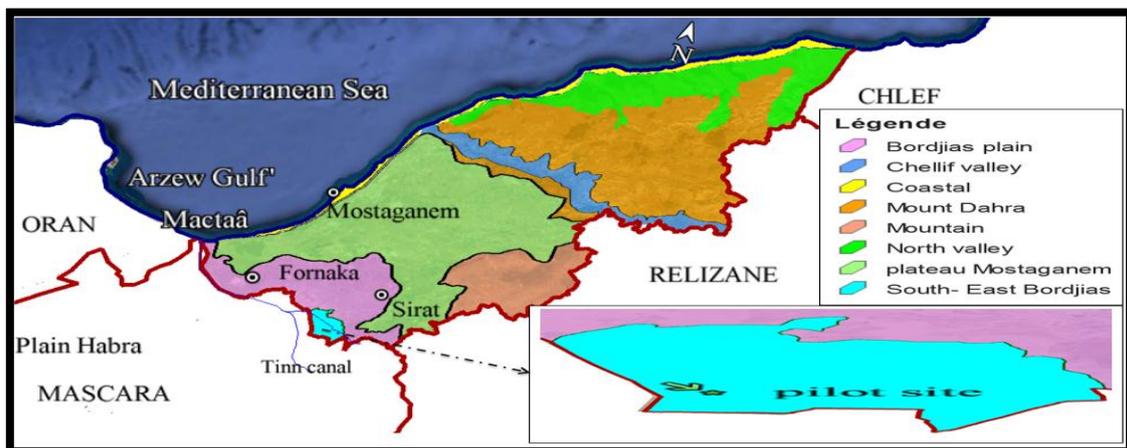


Figure III.2. Localisation géographique de la parcelle d'étude (Mostefa et al. 2023).

III.3. Climat de la zone de Bordjia :

La zone de Bordjia connaît un climat de steppe. La synthèse environnementale et la combinaison des données climatologiques recueillies auprès de l'Office national de la météorologie (ONM), ainsi que des travaux de Senouci et Trache (2014) et du BNEDER [2015], nous ont permis d'examiner les facteurs cruciaux, tels que les précipitations et la température, qui ont affecté le bilan hydrologique pour la fourniture d'aquifères semi-captifs dans la plaine de Bordjia. Les précipitations annuelles sont restées à un niveau bas, présentant quatre périodes de variation interannuelles, y compris celles dites assez humides (1997-1986), moins humides (1987-1996), humides (1997-2006) et (2007-2019). Les perturbations et faiblesses des précipitations moyennes saisonnières et mensuelles rendent le climat

imprévisible. Les mois les plus humides sont janvier et février, les plus secs sont juillet et août (Senouci et Trache, 2014). Ce comportement pluviométrique s'oppose à une très forte évapotranspiration supérieure à 100 mm pendant six (06) mois de l'année (BNEDER, 2015). Ce phénomène est associé à une augmentation de la température annuelle de l'air avec des températures maximales moyennes dépassant 25°C pendant la saison chaude, ce qui laisse la surface ascendante de salinité sans drainage efficace. L'indice de sécheresse climatique, le Climagramme d'emberger (Fettouch, 2016), caractérisent le climat méditerranéen semi-aride ; la période sèche dure de mi-avril à mi-septembre.

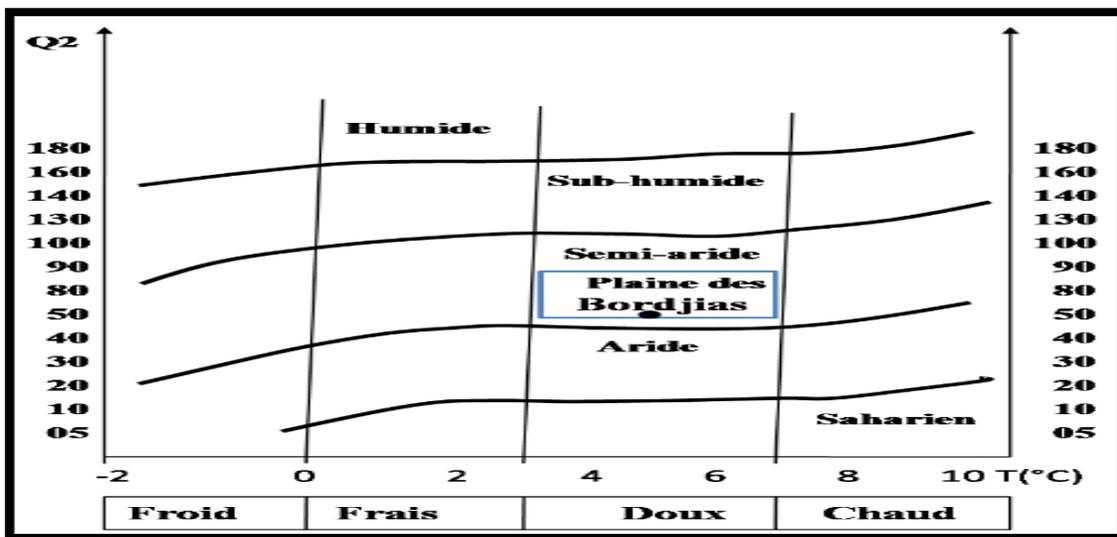


Figure III.3. Climagramme d'emberger (Mostefa et al 2023).

III.4. Occupation du sol :

Les sols de la zone Bordjia sont, soit occupés par l'agriculture, soit abandonnés pour être occupés par la végétation halophyte. Le site est occupé par un plan d'eau salé et une bande périphérique formée par une prairie composée de plantes halophytes. Les terrains voisins, à vocation agricole, sont surtout exploités par une agriculture maraîchère. À l'échelle du bassin versant, on note l'existence de terrains incultes érodés, de terrains céréaliers et des formations forestières composées de forêts naturelles.

III.5. Prélèvement des échantillons de sols :

Les échantillons de sol ont été prélevés à deux profondeurs au niveau de quatre points espacés de 40 m : profondeur I (0,50-1,5m) notée PII (A1, B1, C1, D1). Les échantillons de sol ont été prélevés, codés et mis dans des sacs en plastique hermétiques.



Figure III.4.Parcelle d'étude : (a) traces de salinité, (b) système de drainage (Mostefa et al2023).

Partie II: Caractéristiques physiques et chimiques des échantillons de sol étudiés.

III.1. Introduction :

Les échantillons de sol prélevés ont été transportés au laboratoire. Des essais ont été effectués afin de déterminer leurs caractéristiques physiques et chimiques.

III.2. Le poids volumique :

Le poids volumique du sol représente la somme des poids des particules solides et de l'eau d'un volume unité de sol. C'est une grandeur physique qui caractérise le poids d'un matériau par unité de volume de celui-ci.

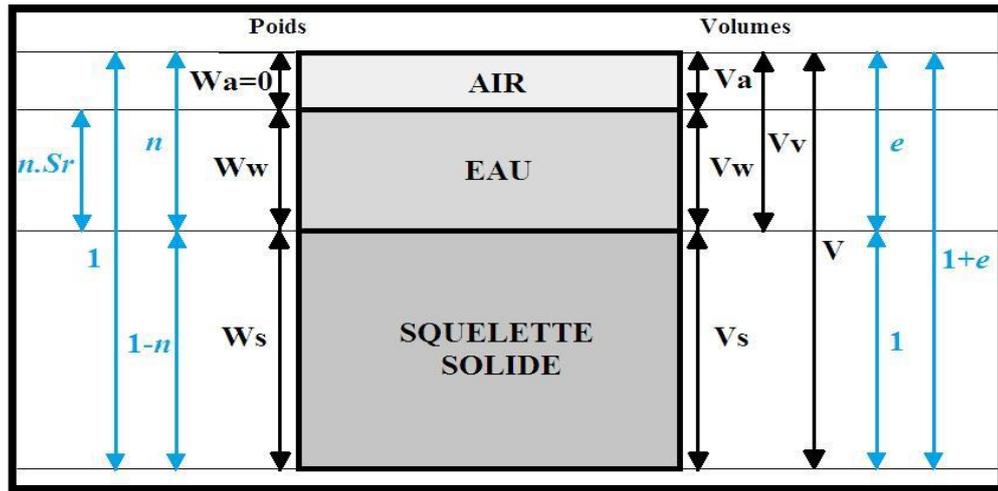


Figure III.1. Schéma d'un volume élémentaire de sol.

Les notations suivantes sont utilisées :

V_a : volume de l'air.

V_w : volume de l'eau.

V_s : volume des grains solides.

V_v : volume des vides.

W_w : poids de l'eau.

W_s : poids des grains solides.

Le poids total du sol :

$$W = W_w + W_s. \quad (\text{III.1})$$

$W_a=0$, on considère que le poids de l'air est nul.

Le volume total du sol :

$$V = V_v + V_s = (V_a + V_w) + V_s. \quad (\text{III.2})$$

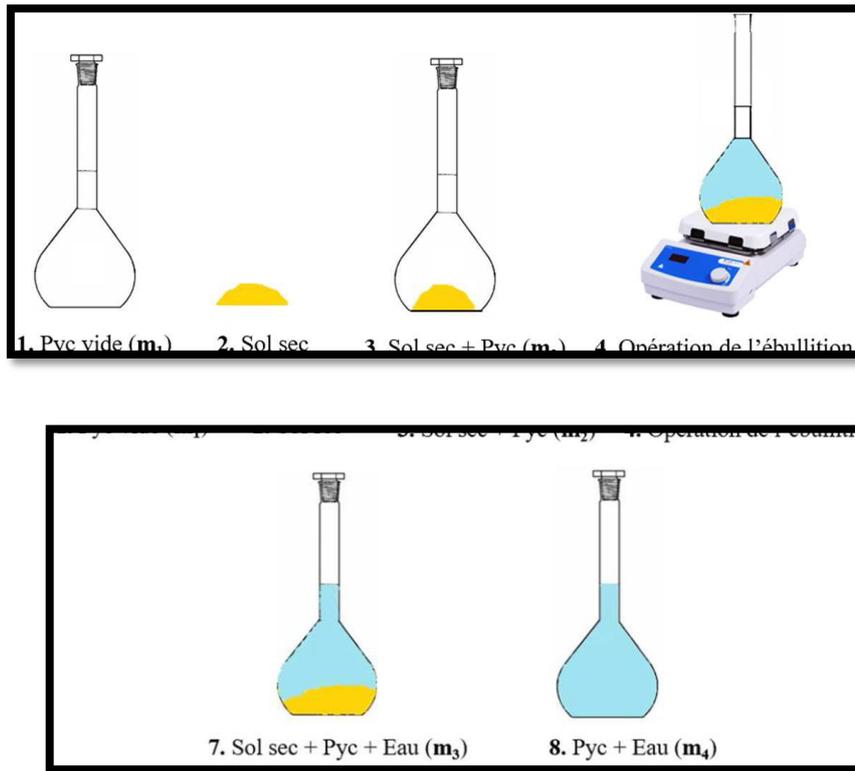


Figure III.2. Principales étapes de l'essai au Pycnomètre.

γ_s : poids volumique spécifique des grain solides.

$$\gamma_s = m / v \quad \Rightarrow \quad V = \frac{(m1+m2)-m3}{\gamma_{eau}} \quad (III.3)$$

γ_w : poids volumique spécifique de l'eau (10kN /m³).

Tableau III.1. Propriétés physiques du sol.

Propriétés physique	symbole	unité	essai 1	essai 2
Volume	V	cm ³	4,03	3,75
les poids volumiques spécifique	γ_s	g/cm ³	2,48	2,66
Moyen	2,57			

III.2.1. Le poids volumique apparent :

Le poids volumique apparent du sol sec est noté γ_d , il est calculé par la relation suivante :

$$\gamma_d = \gamma_H / (1+w\%) \quad (\text{III.4})$$

Avec :

W% : teneur eau l'état nature.

γ_H : la masse volumique humide.

γ_H : poids volumique apparent du sol humide.

$$\gamma_H = p_h / V_t \quad (\text{III.5})$$

Avec :

p_h : poids humide.

V_t : le volume total.

Les résultats obtenus par les essais sont regroupés dans le tableau (II.5).

III.2.2. La teneur en eau :

La teneur en eau d'un sol humide notée W% est exprimée en pourcentage, c'est le rapport entre le poids (ou masse) d'eau contenue et le poids du sol après séchage. Un sol sec aura donc une teneur en eau nulle.

$$W (\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (\text{III.6})$$

III.2.3.L'indice des vides:

L'indice des vides noté e est le rapport exprimé en pourcentage entre le volume des vides et le volume solide.

$$e = V_w / V_s \quad (\text{III.7})$$

III.2.4. Degré de saturation :

Le degré de saturation noté S_r est le rapport entre le volume d'eau et le volume des vides dans un sol. C'est un paramètre sans dimension qui est souvent exprimé en pourcentage.

$$S_r = V_w / V_v \quad (\text{III.8})$$

III.2.5. porosité :

La porosité notée n est un rapport de volume exprimé en pourcentage. C'est le rapport entre le volume des vides et le volume total d'un sol, elle exprime le pourcentage de vide dans

un sol.

Les caractéristiques physiques sont représentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.2. Propriétés physiques du sol.

Propriétés physique	symboles	unité	résultats
Poids volumique des grains solides	ρ_s	g/m^3	2.57
Poids volumique sec	ρ_d	g/m^3	0,99
Degré de saturation	S_r	%	91.64
L'indice de vide	e	/	0.79
Porosité	n	/	0.44
La teneur en eau à l'état	w	%	25

III.3. Les limites D'Atterberg :

Dans le domaine des sols fins, les grains deviennent des pâtes liées entre elles par des forces de cohésion résultant de l'adsorption d'eau. La consistance d'un sol fin remanié peut être analysée selon quatre états spécifiques au fur et à mesure que la teneur en eau diminue.

Un état liquide: Le sol a une consistance très faible. Il a l'aspect d'un fluide et tend à se niveler suivant une surface horizontale. Les grains sont indépendants les uns des autres et glissent facilement les uns sur les autres.

Un état plastique : Les grains sont plus rapprochés mettant en commun leurs couches d'eau adsorbées. Le sol a une consistance plus importante. Il ne tend plus à se niveler. Soumis à de faibles contraintes il se déforme largement sans se rompre. Il garde sa déformation après suppression des contraintes. Les grains restent attachés les uns aux autres sans s'éloigner.

Un état solide (avec retrait): Les distances inter-granulaires sont encore plus petites. Le sol retrouve sa forme initiale après suppression des contraintes (petites déformation élastiques).

Un état solide (sans retrait) : les particules arrivent au contact en quelques points en chassant l'eau adsorbée. Les frottements internes sont alors importants. Le sol ne change plus de volume quand sa teneur en eau diminue.

La transition d'un état à l'autre est très progressive. Néanmoins, on utilise de façon pratique les limites établies par Atterberg. Ces limites sont d'une importance fondamentale en géotechnique car elles indiquent la sensibilité d'un sol aux modifications de sa teneur en eau:

Limite de liquidité W_L : Elle sépare l'état liquide de l'état plastique .

Limite de plasticité W_P : Elle sépare l'état plastique de l'état solide.

Limite de retrait W_S : Elle sépare l'état solide avec retrait de l'état solide sans retrait. W_S , W_L et W_P sont déterminées en laboratoire sur la fraction du sol (mortier) passant au tamis d'ouverture égale à 0,40 mm (méthode de la coupelle de Casa grande, cône de pénétration, du rouleau et appareil de retrait).

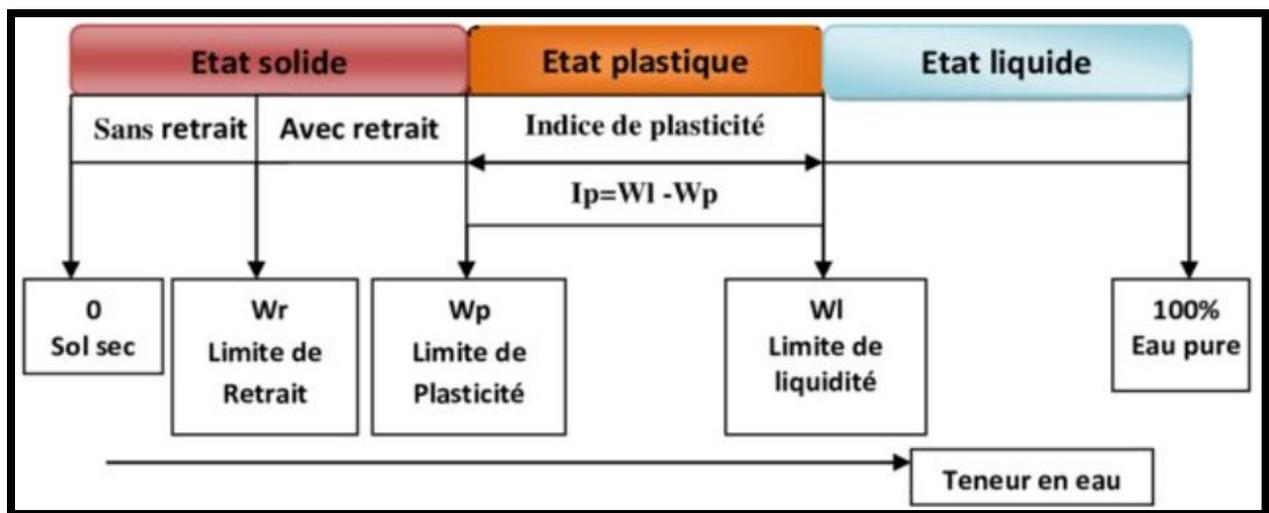


Figure III.3. Schémas des états de consistance des sols fins (limites d'Atterberg).

III.3.1.1. La limite de liquidité W_L (Méthode de Casa grande : norme NF P 94-051)

Pour déterminer la limite de liquidité, on étend sur une coupelle une couche du matériau dans laquelle on trace une rainure au moyen d'un instrument en forme de V. On imprime à la coupelle des chocs semblables en comptant le nombre de chocs nécessaires pour fermer la rainure sur 1 cm, (Fig.III.4). On mesure alors la teneur en eau de la pâte.

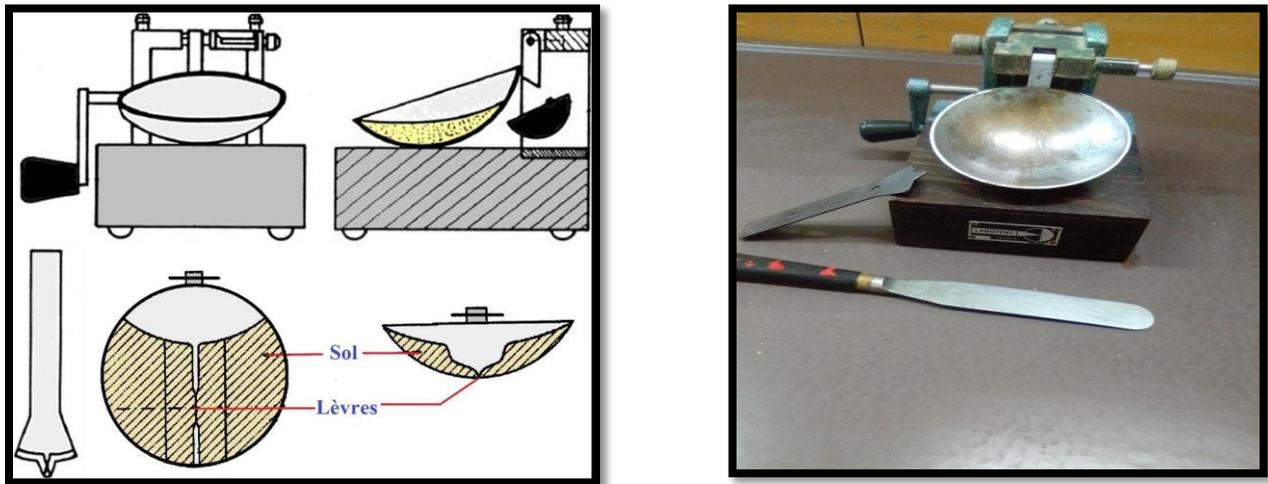


Figure III.4. Coupelle de Casagrande pour la détermination de la limite de liquidité.



Figure III.5. L'appareil de Casagrande pour la détermination de la limite de liquidité.

La relation entre le nombre d'impacts N et la teneur en eau w (%) est une droite dans le repère semi-logarithmique. Après cinq essais qui doivent être déroulés périodiquement entre 15 et 35, la droite la plus représentative est alors tracée à partir du point expérimental. La limite de liquidité est la coupure d'eau correspondant à 25 fermetures de choc.

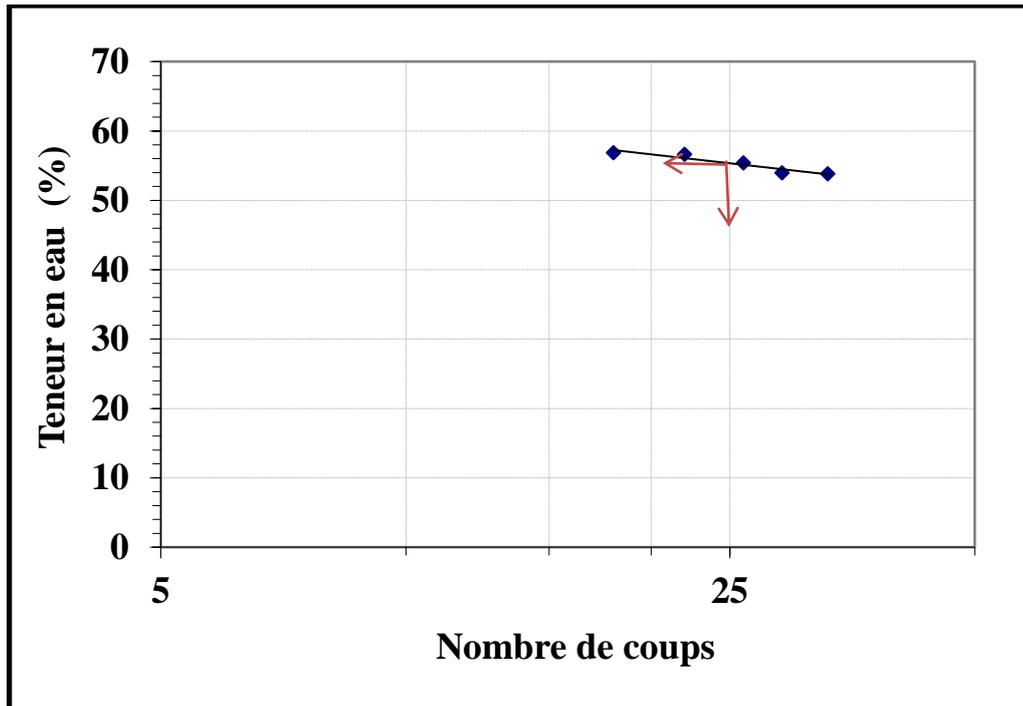


Figure III.6. La limite de liquidité (W_L) des échantillons.

III.3.1.2. La limite de plasticité (W_p) NF P94-051 :

Pour déterminer la limite de plasticité, on roule l'échantillon en forme de cylindre qu'on amincit progressivement (figure III.7). La limite de plasticité est la teneur en eau du cylindre qui se brise (casse) en petits tronçons de 1 à 2 cm de long au moment où son diamètre atteint 3mm. Il faut donc réaliser des rouleaux de 3 mm de diamètre sans pouvoir faire de rouleaux plus fins. On exécute en général deux essais pour déterminer cette limite.

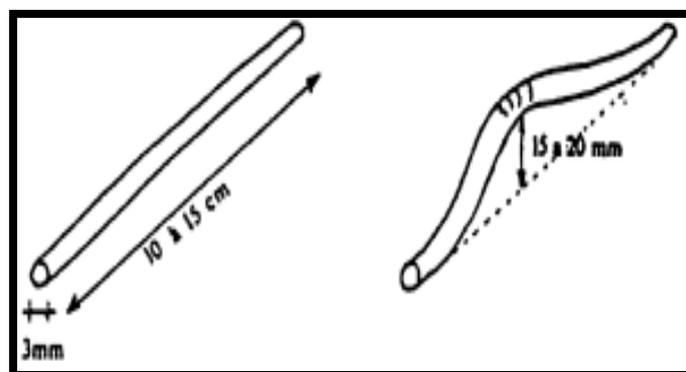


Figure III.7 : Confection des rouleaux pour la détermination de la limite de plasticité.



Figure III.8. Essai de détermination de La limite de plasticité (W_P) des échantillons de sol au laboratoire.

III.3.1.3. Indice de plasticité I_p :

L'indice de plasticité I_P est le paramètre le plus couramment utilisé pour caractériser l'argilosité des sols. Il permet de mesurer l'étendue du domaine de plasticité du sol (où on peut travailler le sol). Il s'exprime par la relation suivante :

$$I_P = W_L - W_P \quad (\text{III.9})$$

La plasticité d'un sol (c'est-à-dire sa faculté de devenir très déformable en absorbant de l'eau) est appréciée par le couple (W_L , I_P) qui dépendent de la nature et de la quantité des minéraux argileux contenus dans le sol. C'est ainsi que Casagrande a défini un diagramme dit "Abaque de plasticité de Casagrande" qui permet de classer les sols fins.

Les valeurs des limites de consistance du sol de Bordjia sont illustrées dans le tableau récapitulatif suivant :

Tableau III.3. Les valeurs des limites de consistance du sol étudié.

Les limites d'atterberg	W_L (%)	W_P (%)	I_P (%)
Sol étudié	55,06	21,42	33,64

Selon le schéma de classification de la plasticité des sols, les échantillons de la zone bordjia sont classés comme argile à faible plasticité, comme le montre la Figure III.9.

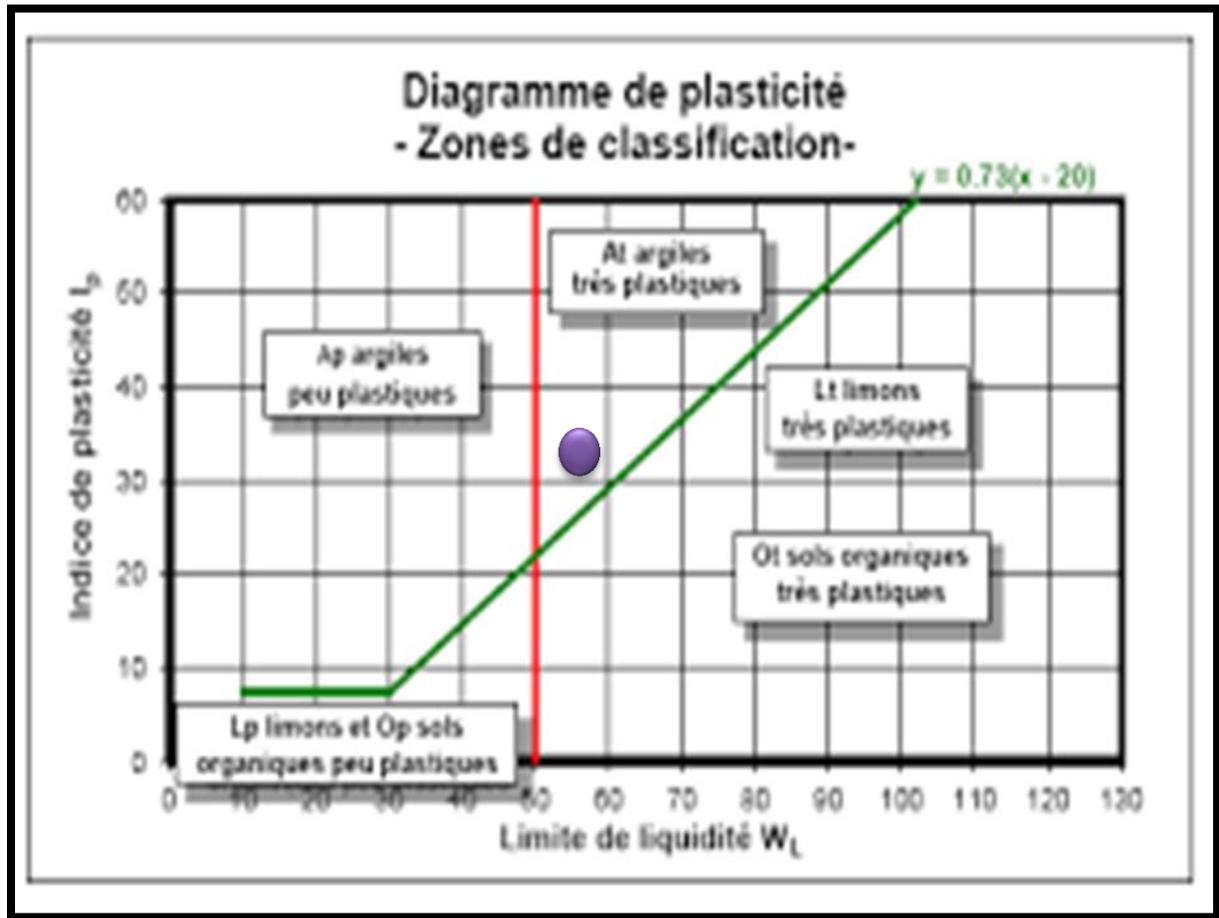


Figure III.9. Le diagramme de plasticité et de la classification des sols fins (Liang, 2023).

III. 4. Analyse granulométrique (NF P94-057) :

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la répartition dimensionnelle en poids des particules qui composent notre sol étudié. Cela a été fait par criblage sous-marin pour les éléments supérieurs à 80 μm et sédimentation pour les éléments inférieurs à 80 μm .

III.4.1. Le tamisage :

Le tamisage peut être effectué à sec ou sous l'eau ; le tamisage à sec ne convient qu'aux matériaux en poudre. Une fois que le sol contient des éléments limoneux ou argileux, il doit être tamisé sous l'eau. Les échantillons sélectionnés pour le tamisage ne doivent en aucun cas

être broyés avant l'opération de tamisage. Même s'il est cuit dès la sortie du four, il ne faut jamais le faire au pilon ou au broyeur à billes, auquel cas il sera tamisé sous l'eau.



Figure III.10. Tamisage Fraction $80 \mu\text{m} - D_{\text{max}}$.

III.4.2. La sédimentométrie :

Lorsque la dimension des particules est inférieure à $80 \mu\text{m}$, le tamisage n'est plus possible car les forces interparticulaire (force de cohésion) sont trop importantes et les grains tendent à s'agglomérer. On a alors recours à la sédimentométrie. Cette méthode est basée sur la loi de Stokes qui exprime la vitesse limite de chute d'une particule sphérique dans un liquide visqueux en fonction du diamètre de la particule.

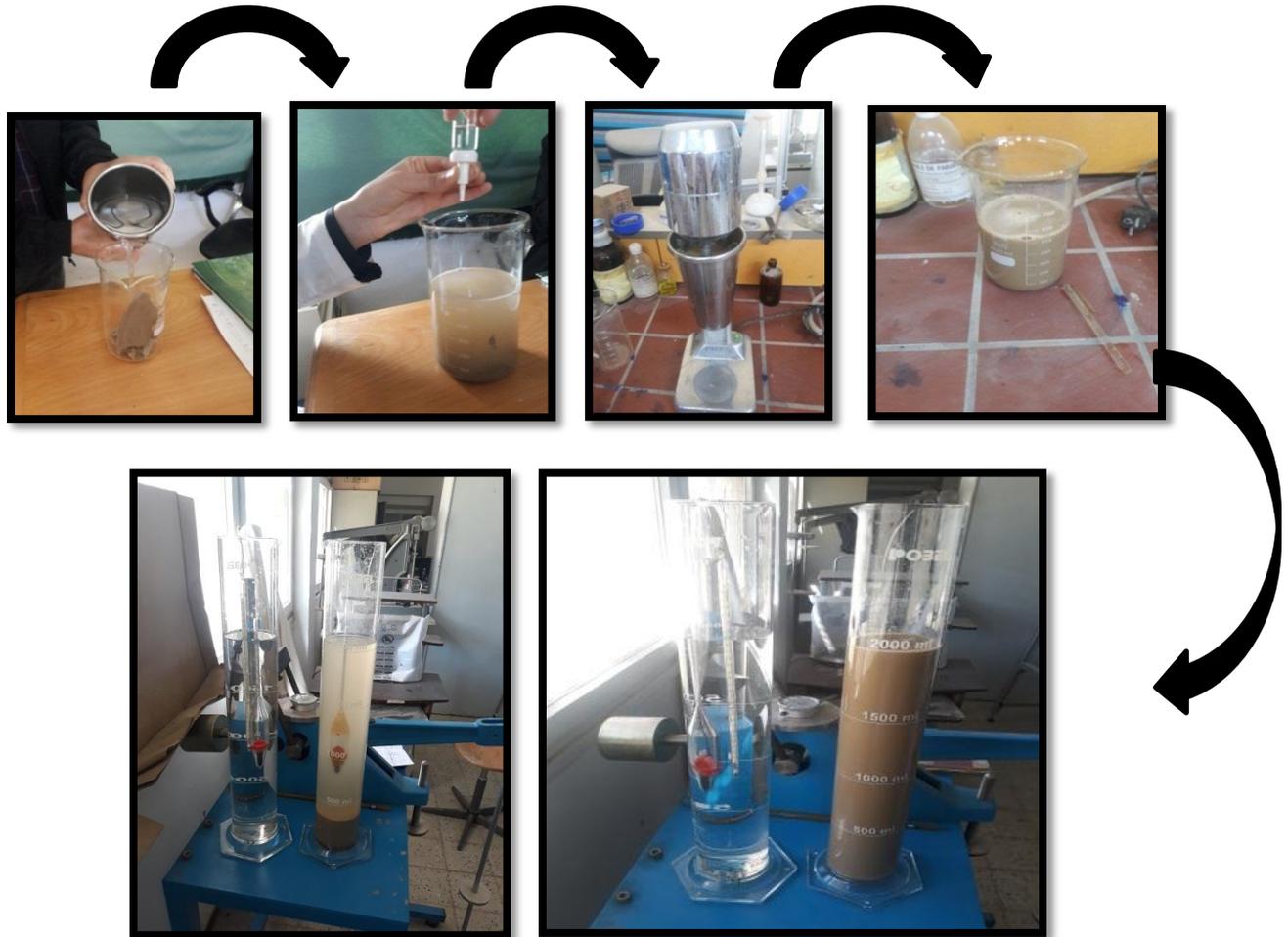


Figure III.11. La réalisation de l'essai de sédimentométrie.

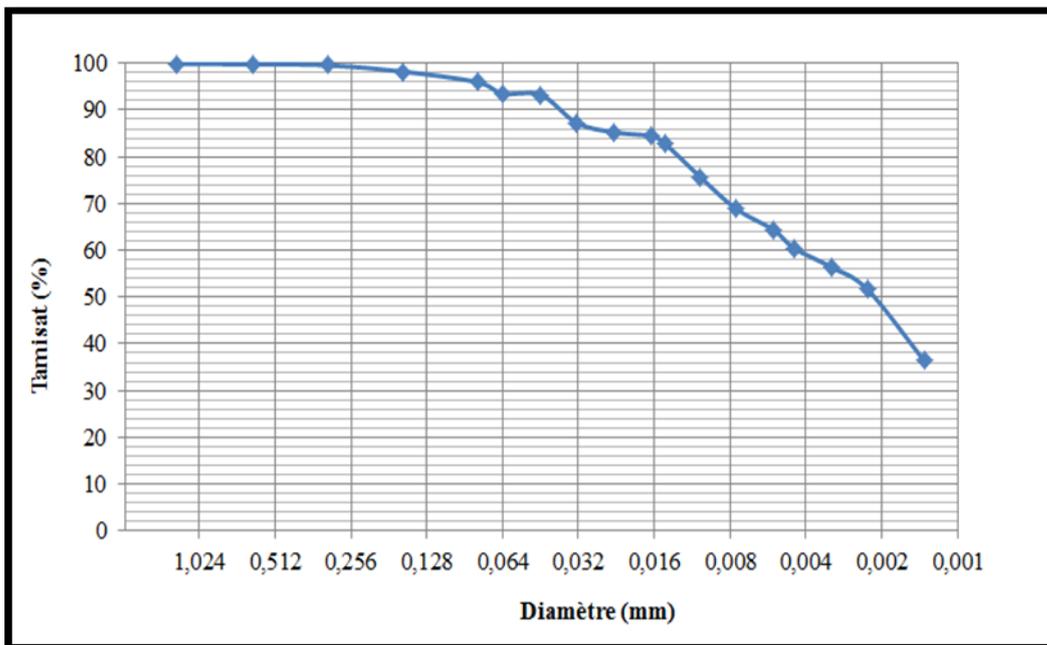
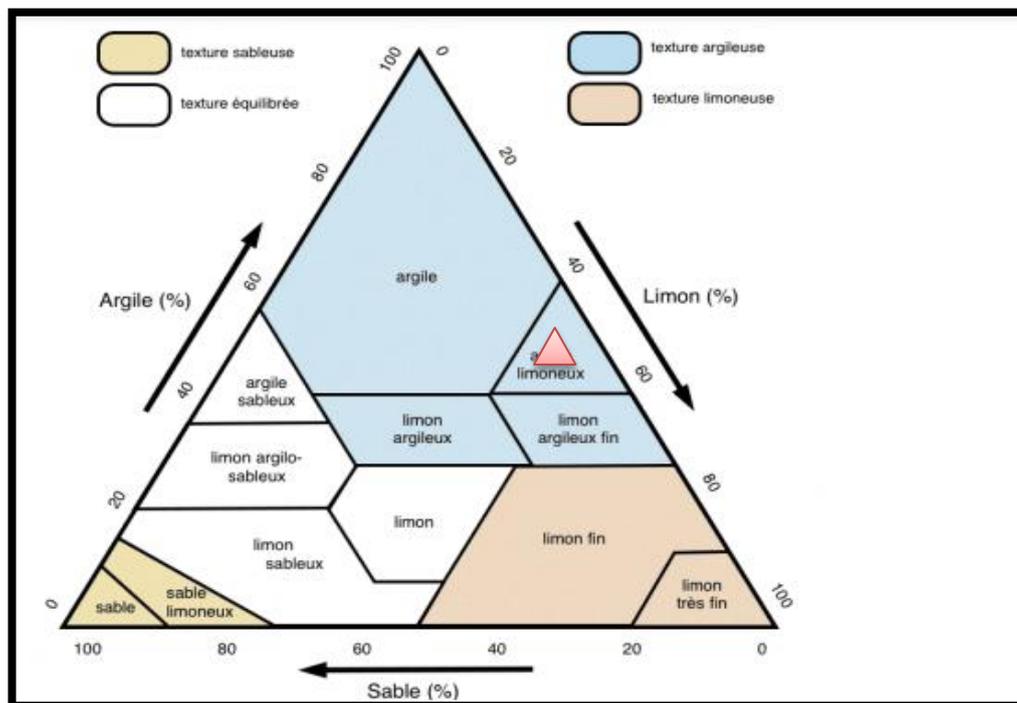


Figure III.12. Courbe granulométrique du sol étudié.

Tableau III.4. Composition granulométrique des échantillons de sol étudiés.

Composants du sol	Pourcentage
Argile %	47,8
Limon %	43,7
sable %	8,5

La courbe de mesure de granularité et le tableau III.4 résument les données granulométriques. Le sol de la région de Bordjia est composé de 47,8 % de particules appartenant à la fraction argileuse, 43,7 % à la fraction limoneuse et 8,7 % à la fraction sableuse.

**Figure III.13.** La classification triangulaire des sols fins.

Par conséquent, la classification triangulaire des sols fins est argile limoneux.

III.4.3. La teneur en eau (NF P 94-050) :

La teneur en eau est mesurée selon la norme NF P 94-050. L'échantillon de sol est pesé d'abord, puis séché dans une étuve à $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ jusqu'à ce que la masse soit constante, comme le montre la figure III.14.

La différence entre le poids initial et celui après séchage exprime la teneur en eau de l'échantillon initial, dont la formule est la suivante :

$$w (\%) = (W_w / W_s) \times 100 \quad (\text{III.10})$$

Avec :

W_w : le poids d'eau.

W_s : le poids du sol sec.



Figure III .14. Séchage des échantillons du sol à l'étuve.

III.5. Valeur au bleu de Méthylène (NF P 94-068) :

L'essai au bleu fait partie des tests d'identification et de classification des sols. Son but est de déterminer la quantité de particules d'argile présentes dans un échantillon de matériau. En d'autres termes, il caractérise la teneur en argile du matériau (déterminant la propreté du sol) et sachant quel type d'argile il contient.

Le test consistait à doser une solution de bleu de méthylène (10 g/L) dans une suspension de terre agitée par un mélangeur. Après chaque ajout, une goutte de la suspension a été déposée sur du papier filtre pour vérifier l'activité d'adsorption de l'échantillon. Lorsqu'un halo bleu clair constant apparaît à la périphérie de la macula, l'amplitude de la

couleur bleue de la matrice est enregistrée, afin de tenir compte du VBS. Ce dernier est exprimé en grammes de bleu pour 100 grammes de matière sèche.

Le VBS de notre échantillon du site de Bordjia a été mesuré à 4,50%, selon la valeur du bleu de méthylène, le sol de Bordjia est un sol limoneux argileux.



Figure III.15. La réalisation de l'essai au bleu de méthylène.

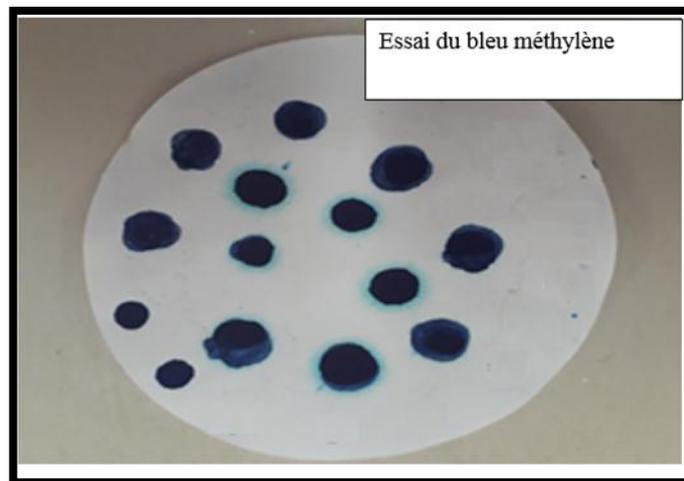


Figure III.16. L'essai au bleu de méthylène.

III.6. Détermination du pH du sol:

Le pH d'une suspension aqueuse est mesuré à l'équilibre. Le résultat obtenu pour le sol de Bordjia est de 8. Ce nombre de base est attribué à sa richesse en sels. Cette mesure a été assurée par un pH-mètre de laboratoire.



Figure III.17. La mesure du pH du sol.

III.7 Détermination de la conductivité électrique :

La conductivité électrique (CE) est une mesure qui donne une indication approximative de la concentration des sels solubles présents dans un échantillon. Nous nous appuyons sur NF X 31-113 pour le définir. La mesure de la conductivité électrique (CE) est cruciale dans ce cas sol salé. Ce paramètre donne une indication de la concentration des sels solubles présents dans l'échantillon de sol. Cette mesure a été réalisée conformément à la norme NF X31-113. L'échelle est alimentée par une échelle de conductance, 7ms/cm.



Figure III.18. Mesure de la conductivité électrique du sol.

III.8. Résultats de l'identification du sol de Bordjia :

Les essais ont été effectués sur les échantillons de sol prélevés. Les différentes propriétés physiques et chimiques sont regroupées dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.5.Caractéristiques physiques et chimiques des échantillons de sol de Bordjia.

Propriétés physique et chimique	Symboles	unité	Résultats
Poids volumique des grains solides	ρ_s	g/m^3	2.57
Poids volumique sec	γ_d	g/m^3	0,99
pois volumique apparent du sol humide.	γ_h	g/m^3	1,63
Degré de saturation	S_r	%	91.64
L'indice de vide	e	/	0.79
Porosité	n	/	0.44
La teneur en eau à l'état	W	%	25
limite liquidité	W_L	%	55,06
limite plasticité	W_p	%	21,42
l'indice plasticité	I_p	%	33,64
pH	pH	/	8
Conductivité électrique	CE	ms/cm	7,7

III.9.Conclusion :

D'après les analyses physico-chimiques des essais d'identification qui ont été effectuées sur les échantillons de sol provenant de la zone de Bordjia, on peut conclure que le sol étudié est argileux, peu plastique et pauvre en matière organique.

**Chapitre IV : Application du processus électrocinétique
pour la désalinisation du sol.**

Application du processus électrocinétique pour la désalinisation du sol

IV.1.Introduction:

Le montage expérimental pour le traitement électrocinétique des échantillons de sol a été développé au laboratoire de l'université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem. Il se compose d'unités rectangulaires en verre transparent pour assurer une bonne visibilité des différents changements qui se produisent pendant le traitement. Les électrodes en cuivre ont été largement utilisées dans les travaux antérieurs en raison de leur conductivité élevée et de leur faible coût. Les performances et l'efficacité du traitement électrochimique pour des géométries différentes des électrodes ont été évaluées.

IV.2. Le dispositif expérimental :

Le dispositif cinétique a été développé pour effectuer des tests sur des échantillons de sol salins de la région de Bordjia. Ce dispositif est constitué d'un bac rectangulaire divisé en trois parties. Une partie centrale dont les dimensions sont 40cm de longueur ; 20 cm de hauteur et 16 cm de largeur. Les deux autres compartiments sont réservés à l'écoulement et à la collecte des solutions d'électrolyte. Le compartiment central est séparé des autres compartiments par deux plaques de verre perforées recouvertes de papier filtre afin d'empêcher le mouvement des particules fines du sol vers les électrodes. Les pastilles sont numérotées de V1 à V5 de l'anode (à gauche) à la cathode (à droite). La chambre est recouverte d'une plaque de plexiglas, avec des événements pour permettre l'évacuation des gaz dégagés lors du processus d'une part et pour mesurer la température d'autre part. Un voltmètre et un ampèremètre sont connectés au circuit pour surveiller les paramètres du dispositif. Le flux électro-osmotique est récupéré en sortie de la chambre catholyte.



Figure IV.1. Cellule expérimentale.

Pour les électrodes, on a utilisé deux configurations différentes (tubes et plaques en cuivre) avec un voltage appliqué de 20V durant 07 jours (tables IV.1).

Tableau IV.1. Les conditions initiales du traitement électrocinétique.

N° d'essais	Tension appliquée (V)	Durée (jours)	Solution utilisée
1 plaque de cuivre (EPL)	20V	7	Eau distillée
2 Tubes de cuivre (ET)	20V	7	Eau distillée

IV.3. Configuration géométrique des électrodes :

Dans cette étude, deux configurations géométriques ont été utilisées pour former des électrodes. La première expérience utilisant des plaques de cuivre d'une largeur de 9,5 cm et 24cm la hauteur. Dans la deuxième expérience, on a utilisé des tubes de cuivre de 24 cm de hauteur avec un diamètre égal à 1,4 cm. Ces électrodes sont connectées au circuit de tension et le courant électrique est ajusté afin de fournir la tension requise.



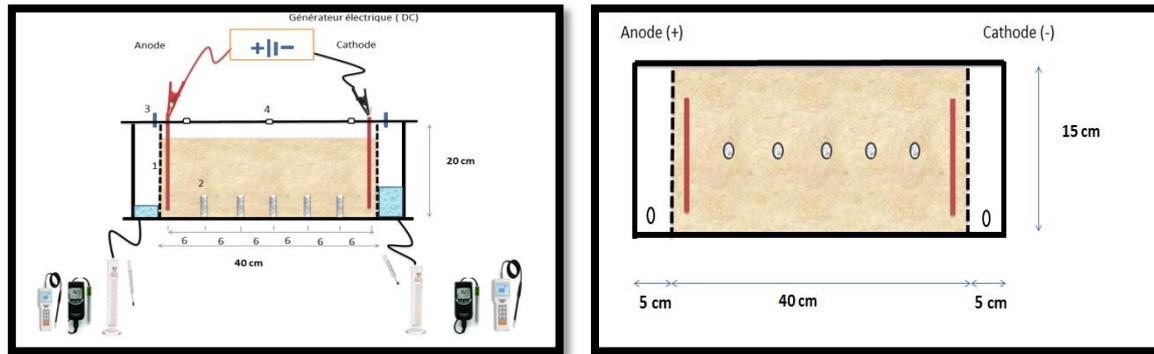
Figure IV.2. Dispositif expérimental de la cellule électrocinétique avec des électrodes en Plaques de cuivre.



Figure IV.3. Dispositif expérimental de la cellule électrocinétique avec des électrodes en tubes de cuivre.

IV.4. Préparation des échantillons de sol pour le traitement électrocinétique :

Des échantillons de sol provenant de quatre points de la région de Bordjia ont été mélangés pour obtenir des échantillons de sol à haute salinité. Dans cette étude, 11,16 kg de sol sec et 6,7 litres d'eau distillée ont été mélangés progressivement pour rendre le mélange homogène. Les échantillons salins ont été mélangés à la main, puis laissés dans un récipient hermétique pendant 24 h, puis le papier filtre a été collé à la plaque de verre perforée avant remplissage. Après ce processus, le sol est placé dans le réservoir de traitement couche par couche, chaque couche mesure 2 cm, puis il est nivelé pour éliminer les bulles d'air dans le sol. A noter que le sol salin est mélangé à de l'eau distillée pour obtenir un taux d'humidité de 60%. La teneur en eau doit être suffisamment élevée pour permettre l'électrophorèse, mais pour de meilleurs résultats, la teneur en eau doit être inférieure à la saturation pour éviter l'effet de précipitation.



Figures IV.4. Schémas du dispositif expérimental : (A) coupe, (B) vue en plan (1) plan séparateur perforé, (2) électrodes de mesure en inox (3) point d'évacuation des gaz (4) position de relevé des températures (Mostefa et al. 2023).

IV.5. Evolution des propriétés électriques des sols pendant le traitement électrocinétique :

IV.5.1. Variation du courant électrique en fonction du temps :

La variation de l'amplitude du courant avec le temps est représentée sur la figure (IV.5). On peut observer que pour tous les tests l'intensité du courant augmente initialement puis diminue jusqu'à ce que le processus s'arrête. Le courant électrique traversant le bac d'essai est étroitement lié à la concentration des ions de sel mobiles présents dans la matrice du sol. Par conséquent, il constitue un paramètre clé représentant la quantité d'électro-migration des ions. Pour les deux essais, le courant de sortie maximum était de 63,15 mA (EPL) après 5 heures ; 74,7 mA (ET) après 23 heures. Il a progressivement diminué jusqu'à une valeur minimale de 2,8 pour mA (EPL) au 145 heures de traitement, et 10,95 mA après 149 heures pour (ET). Dans le traitement électrocinétique, le courant est induit par la tension appliquée, mais la différence est due à l'utilisation de deux configurations géométriques distinctes des électrodes.

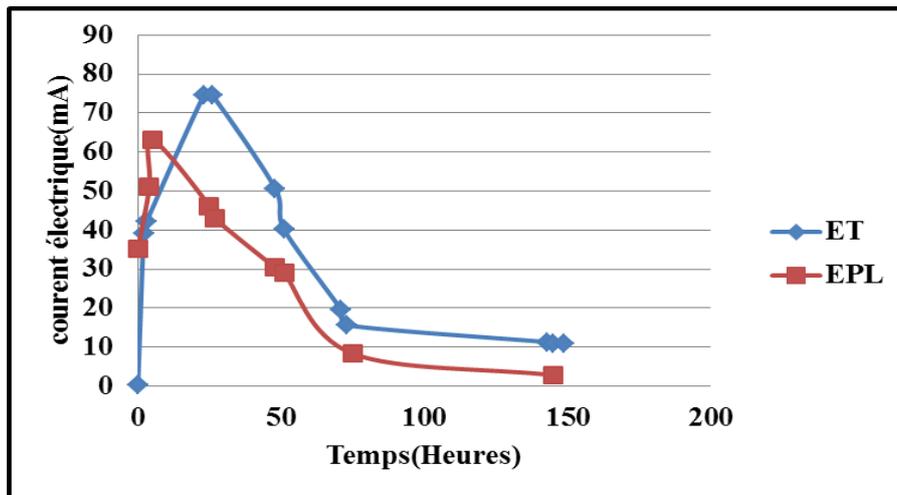


Figure IV.5. Variation du courant électrique en fonction du temps.

IV.5.2. Variation du courant en fonction de la configuration des électrodes:

La diminution du courant est relativement plus marquée dans le cas de l'essai utilisant des électrodes en plaque que des électrodes en tubes. L'application d'un gradient électrique continue a causé la dissolution des électrodes provoquant ainsi l'apparitions des produits de corrosion indésirables à l'anode en milieu acide. Plus l'ampérage est élevé, plus la corrosion est avancée (Figure IV.6). La chute du courant est plus prononcée avec le plaques par rapport aux tubes durant tout le temps du traitement.



A) Plaque en cuivre avant essai

B) anode en fin d'essai (EPL et ET)

Figure IV.6. corrosion et dégradation des électrodes.

IV.5.3. Variation de température en fonction du temps :

Les courbes des figures (IV.7 et IV.8) représentent la variation de la température de l'échantillon de sol au niveau des électrodes et au milieu du bac de l'essai, en fonctions du temps. On peut noter qu'en utilisant les électrodes de configuration en tubes en cuivre, les températures obtenues sont plus élevées que pour l'essai où les électrodes ont la configuration de plaque. D'autre part, une augmentation de la température est observée dans les premières heures de l'essai, suivie d'une diminution jusqu'à 72. Par la suite, les températures restent presque stables. Cela est dû probablement à l'arrêt du processus électrocinétique à cette période de temps.

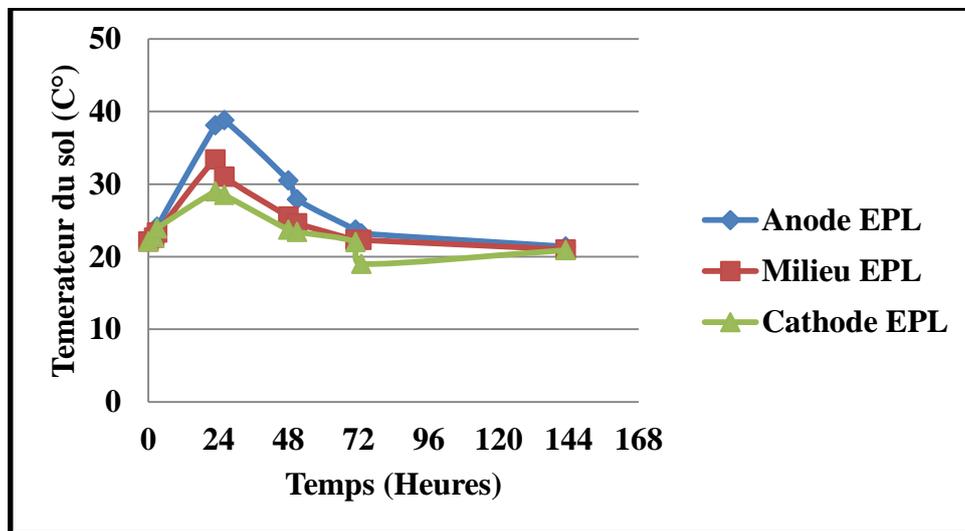


Figure IV.7. Variation de température des électrodes plaque cuivre en fonction du temps.

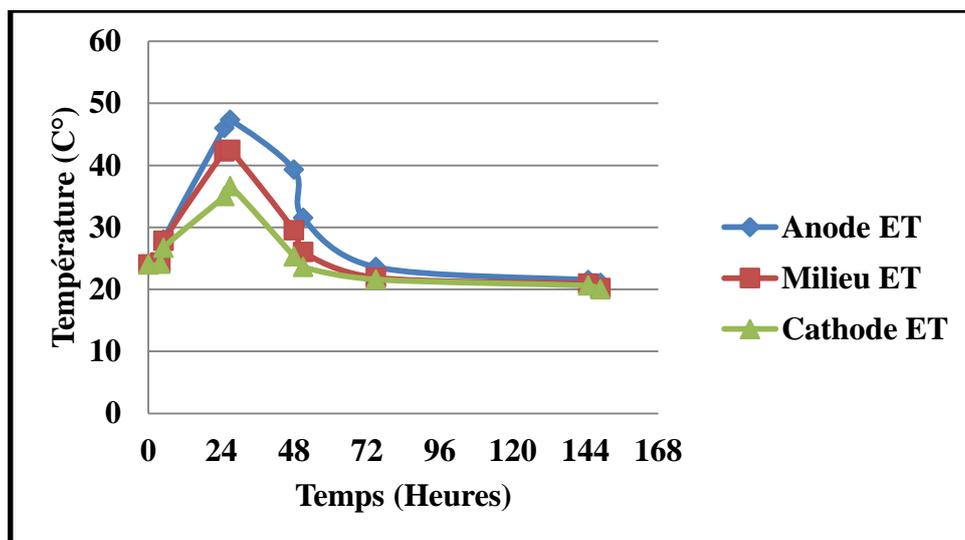


Figure IV.8. Variation de température des électrodes tube cuivre en fonction du temps.

IV.6. Evolution du flux électro-osmotique :

Le flux électro-osmotique résultant est un paramètre clé pour évaluer l'efficacité du transport électrocinétique de la solution. La figure (IV.9) illustre le débit mesuré en fonction du temps. L'évolution drainage/débit est très similaire pour la tension utilisée et pour les deux types d'électrodes. Cependant, le flux électro-osmotique final enregistré pour les plaques est 280 ml contre 410 ml pour les tubes. Cela peut indiquer que la tension d'électrode appliquée a un effet significatif sur les performances des différentes configurations d'électrode.

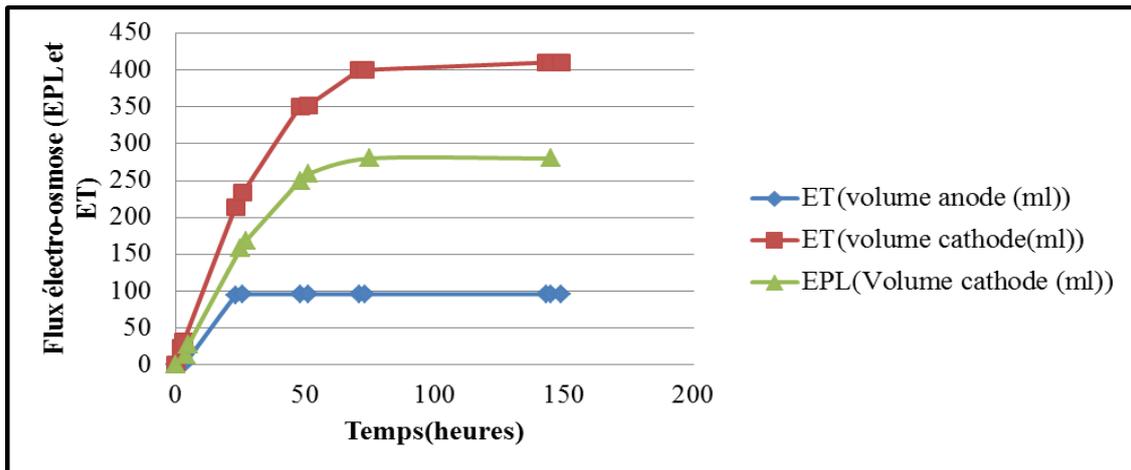


Figure IV.9. Evolution du flux électro-osmotique des électrodes EPL et ET.

Les figures ci-dessous représentent l'état des échantillons de sol après traitement électrocinétique. Le mouvement interstitiel de l'eau de l'anode vers la cathode a rendu le sol autour de l'électrode positive très sec et collant.



Figure IV.10.A) Fissuration des échantillons de sol côté cathode avec plaque cuivre (EPL) et tube cuivre (ET), **B)** Trace d'eau (partie superficielle), **C)** Fissuration des échantillons de sol côté anode avec plaque cuivre et tube cuivre



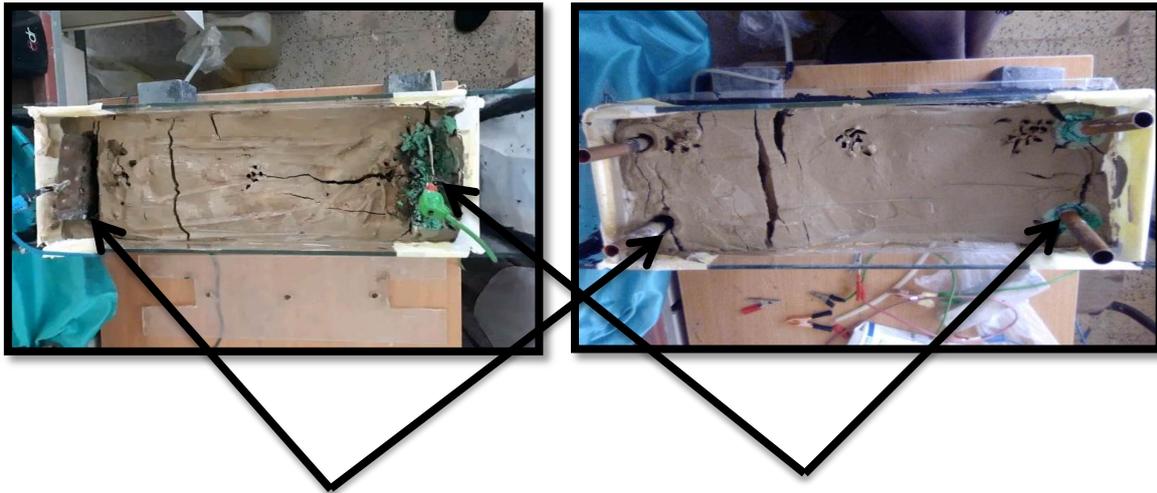
Figure IV.11. Profondeur de la fissure transversale (ET).



Figure IV.12. Fissuration du sol ET et EPL après 7 jours.



Figure IV.13. Fin d'essai avec tube cuivre.



traces de sels

traces de corrosion

Figure IV.14. Etat du sol en fin de l'essai (ET) et (EPL).

IV.7. Variation de la conductivité électrique du flux osmotique dans le temps :

L'évolution de la conductivité du flux électro-osmotique au cours de l'essai est représentée en figure (IV.15). On peut remarquer que pour tous les tests effectués, le changement de conductivité suit la même évolution que le flux électro-osmotique. Le test cathode ET a enregistré la valeur la plus élevée tout au long de son exécution avec une valeur maximale de 77,3 ms/cm, suivi du test Cuivre tube (ET). Le même résultat a été observé pour l'ET, toujours dominé par l'EPL cathodique, avec une valeur de 46,3 ms/cm. Les phénomènes d'électro-osmose et l'électro-migration sont plus élevés lorsque de forts gradients sont appliqués. Pour ET, la migration est plus intense pendant les premières heures que pour EPL ; cela signifie que plus d'ions sont piégés, ce qui entraîne une conductivité accrue.

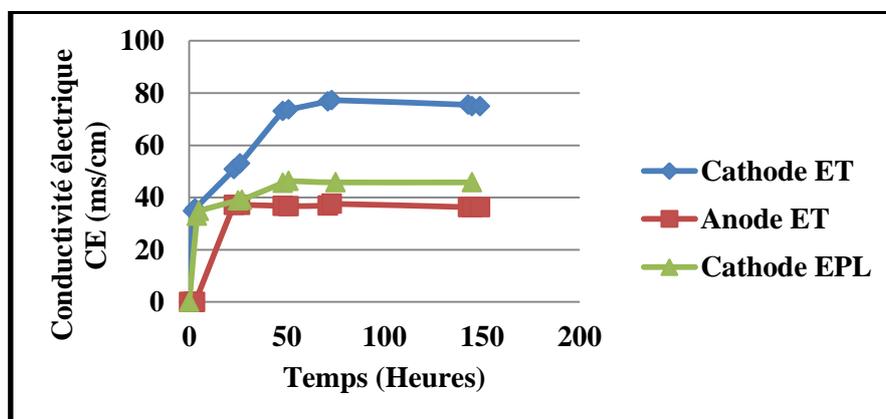


Figure IV.15. Variation de la conductivité électrique (ET et EPL).

IV.8. Variation du pH du flux osmotique dans le temps :

La variation du pH du sol est représentée sur la figure (IV.17). Comme on peut le voir, un gradient de pH s'est développé dû à la création d'un front de base sur la cathode pour une tension de 20v. Le milieu alcalin à la cathode résulte d'une génération des ions OH^- . De plus, après les jours de surveillance, nous suivons l'alcalinité à la cathode. Et cela est dû au fort gradient électrique qui provoque la génération d'ions H^+ et OH^- à une vitesse plus élevée que le front d'acide avance vers la cathode. Comme nous l'avons constaté, la variation du pH dans le sol à la fin du traitement avec tension est illustrée sur la figure (IV.16). Le pH atteint une valeur minimale de 9,05 à la cathode pour la même tension. Il montre la variation du gradient de pH à l'anode et à la cathode avec le temps de traitement sous la tension appliquée. Nous avons constaté que le pH diminue significativement au niveau de la zone anodique, alors qu'une forte augmentation est constatée à la surface de la cathode. Des valeurs de pH extrêmes sont observées durant les 48 premières heures.

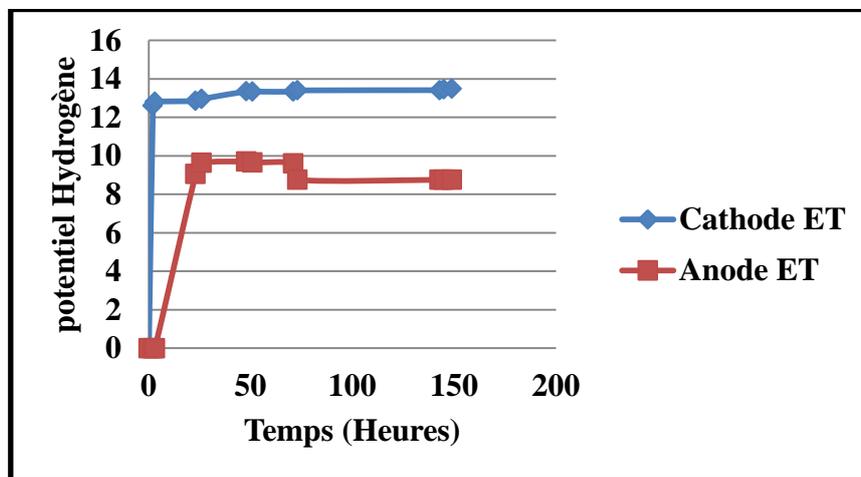
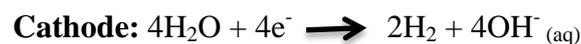
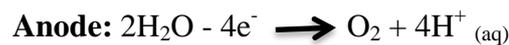


Figure .IV16. Evolution du potentiel hydrogène (pH) avec Tube de cuivre (ET).

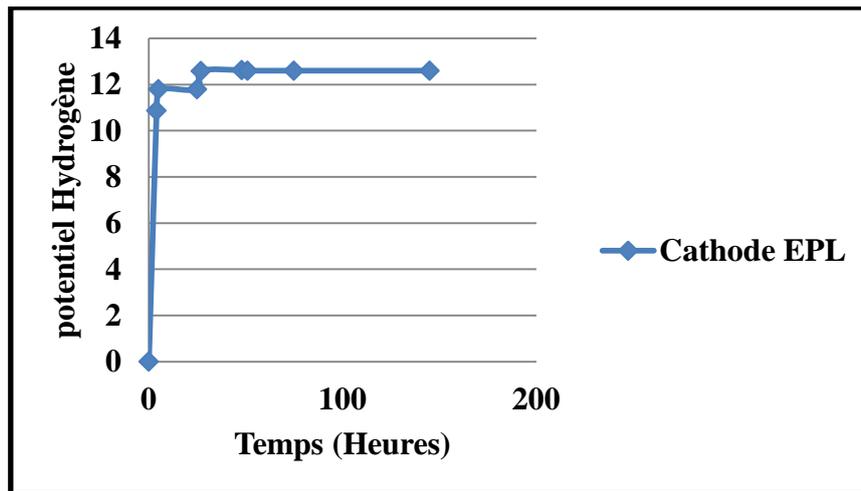


Figure IV.17. Évolution du potentiel hydrogène (pH) avec plaque de cuivre (EPL).

IV.9. Evolution de la tension électrique :

L'évolution de l'amplitude de la tension électrique en fonction du temps est représentée sur les deux figures (IV.18 et IV.19). On constate que pour tous les essais, l'intensité de la tension est initialement élevée puis diminue jusqu'à l'arrêt du processus. Les valeurs maximales sont appliquées peu de temps après le début du traitement électrique pour un test de plaque de cuivre (EPL) le courant maximal atteint 15,75V(V1) et 14,3V(V2) et 11,29V(V3) et 7,57V (V4) et 3,81V(V5) entre 4 à 48 heures et diminue progressivement pour enregistrer la valeur la plus faible en environ (0,12v) dans 5 jours de traitement. La même observation sur le test avec des tubes de cuivre (ET) ou la mesure de courant maximum est de 18,32V(V1) et 16,58V(V2) et 14,71V(V3) et 13,11V(V4) et 11,1V(V5) entre 23 à 26 heures, et après cela il converge vers une valeur stable. On entend par ces mesures que la tension électrique est le résultat de l'intensité du courant électrique appliqué, et cela explique la différence des valeurs obtenues entre les tests EPL et ET.

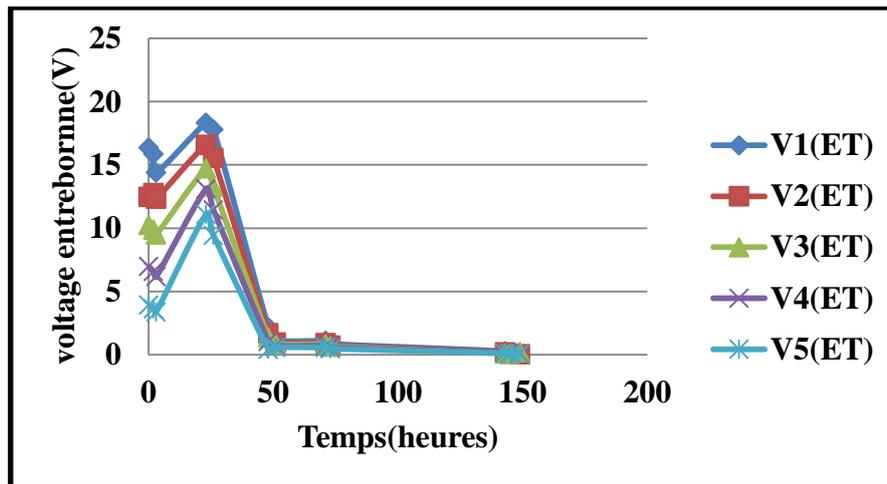


Figure IV.18. Evolution du voltage avec électrodes en tube de cuivre.

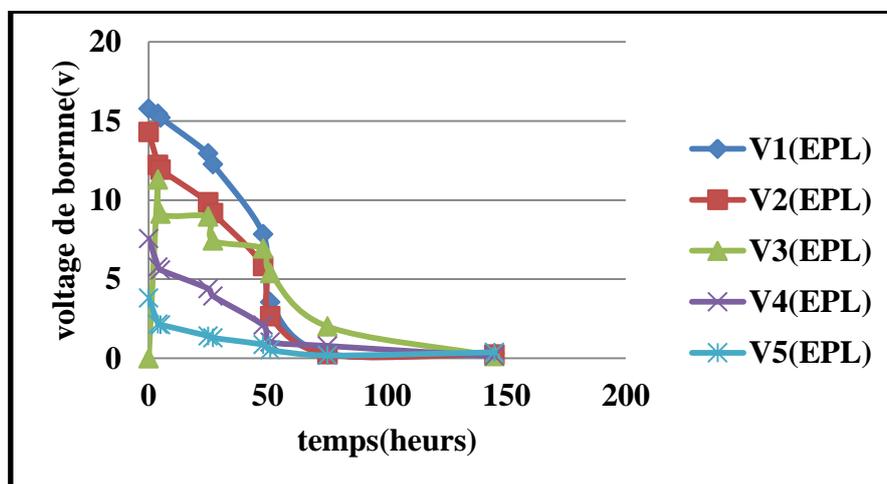


Figure IV.19. Evolution du voltage avec plaque cuivre.

IV.10. Variation du pH du sol après traitement :

La figure (IV.20) montre la variation du pH du sol en fonction du temps. Ainsi, on peut voir que la valeur du pH augmente sur toute la distance entre l'anode et la cathode. Lorsqu'un champ électrique est appliqué, une électrolyse et des ions H^+ et OH^- se produisent. Ils sont générés respectivement à l'anode et à la cathode. Il en résulte un pH plus faible à l'anode et un pH élevé à la cathode. Tendance générale à un pH plus bas à l'anode et à un pH plus élevé à la cathode. Il en résulte un pH plus faible à l'anode et un pH élevé à la cathode. Sur la base des résultats de la modification du pH à l'anode et à la cathode, pendant En appliquant un champ électrique, des réactions chimiques se produisent. A l'anode et à la cathode, la formation d'ions oxygène, H^+ , Le gaz hydrogène est sous forme aqueuse. Par conséquent, la présence de H^+ à l'anode La

valeur du pH diminue et le liquide à côté de l'anode devient acide ; D'autre part, dans la cathode, devient alcaline. Le faible pH près de l'anode permet aux sels de se dissoudre et d'être absorbés conséquent, leur mouvement est généré par les mécanismes de l'électrophorèse (Li et al.2010 ; Peng et al.2013).

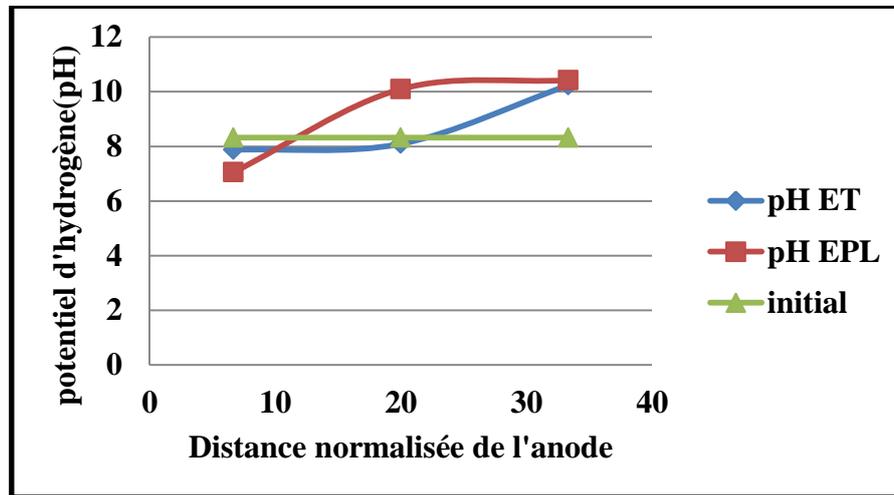


Figure IV.20. Variation du pH du sol de Bordjia en fonction de la durée de traitement.

V.11. Variation de la conductivité électrique du sol après traitement :

La conductivité électrique est proportionnelle aux ions chargés. La figure (IV.21) montre l'anisotropie CE après traitement par procédé électrocinétique. Des valeurs CE plus élevées sont enregistrées du côté de l'anode, ce qui signifie que les ions ont été transportés et agrégés. Il existe un paramètre principal CE, qui indique l'accumulation de sels dans l'échantillon de sol. Pour la région anodique, l'augmentation des valeurs de conductivité électrique est principalement due à la génération d'ions H^+ lors de l'électrolyse du fluide interstitiel, qui sont conducteurs et mobiles en solution. De plus, le pH acide dans cette région permet la dissolution, la dissolution et l'absorption des minéraux. Cela conduit à une augmentation de la conductivité électrique.

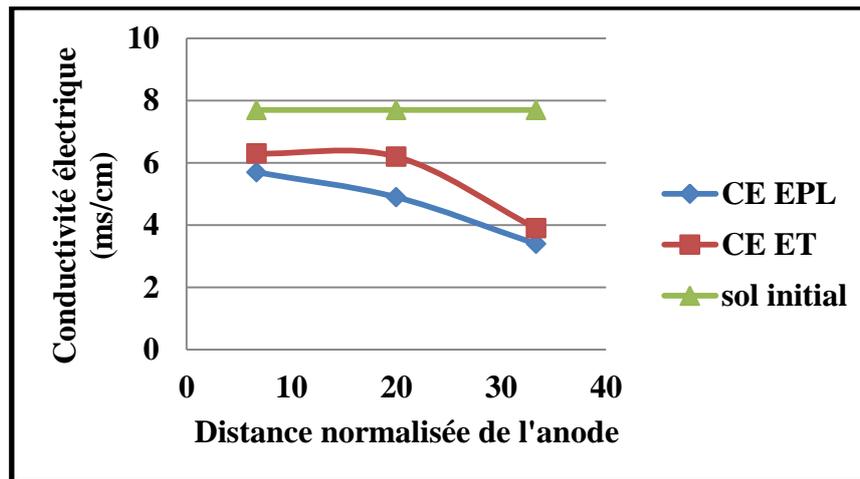


Figure IV.21. Variation de la conductivité électrique en fonction de la durée de traitement.

IV.12. les variations des limites d'Atterberg :

Les limites d'Atterberg sont des constantes physiques classiques qui précisent le seuil entre le sol de l'état liquide à l'état plastique (limite de liquide W_L), le passage du sol de l'état plastique à l'état solide (limite de plasticité W_p). La plasticité (I_p) du sol semble être un paramètre pertinent pour sélectionner les modifications chimiques qui se produisent dans le sol lors du traitement électrochimique (Mosavat, 2014). Les résultats sont représentés dans le tableau IV.2. Comme la montre les figures ci-dessous, la plasticité du sol a diminué de manière significative près de la zone de l'anode. Ceci est encore plus prononcé à l'extension de tension 20V, où la valeur de plasticité atteint 34.

Tableau IV.2. Les limites d'Atterberg des échantillons du sol après traitement.

Tension appliqué(V)	Anode			Milieu			Cathode		
	W_L %	W_p %	I_p %	W_L %	W_p %	I_p %	W_L %	W_p %	I_p %
20V	57,83	23,19	34,64	59,61	21,38	37,77	74,83	26,74	47,09

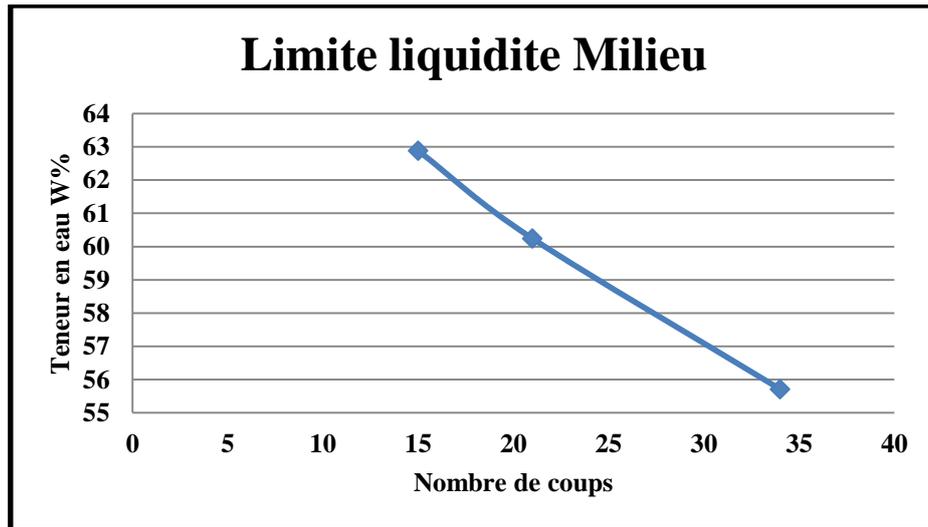


Figure IV.22. La limite de liquidité milieu des échantillons.

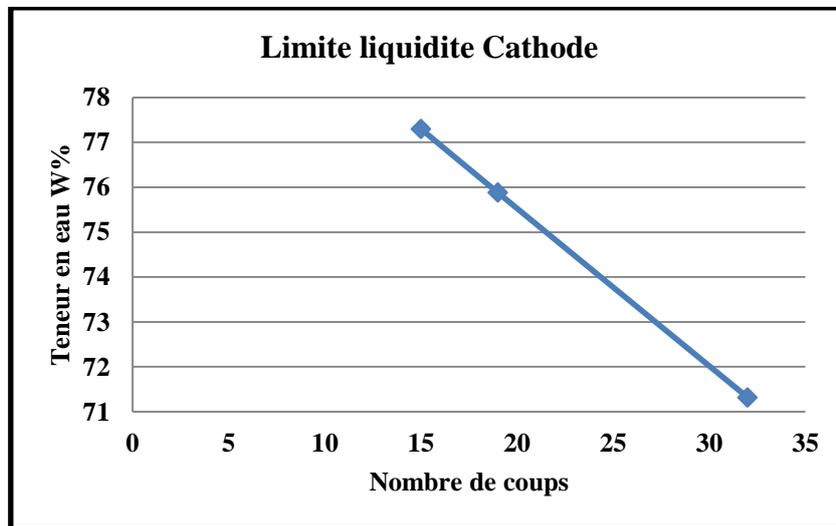


Figure IV.23. La limite de liquidité cathode des échantillons.

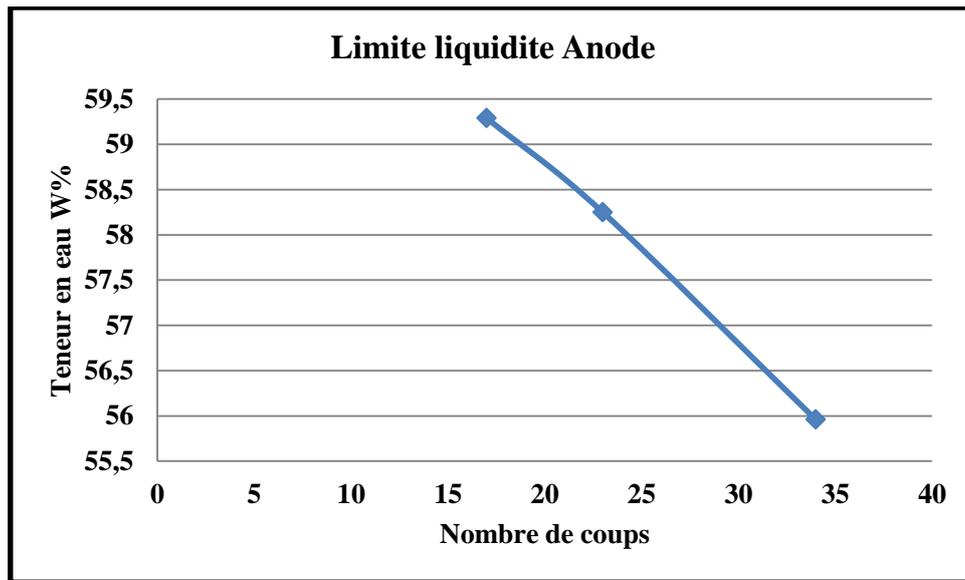


Figure IV.24. La limite de liquidité anode des échantillons.

IV.13. Évolution de la teneur en eau :

La figure (IV.25) représentée ci-dessous montre l'évolution de la teneur en eau le long de l'échantillon de sol dans le bac d'essai, avec une tension appliquée de 20 V. On peut noter que la teneur en eau côté anode est inférieure à celle du côté cathode. Par conséquent, la zone sèche se retrouve côté anode et celle humide côté cathode. Les mêmes observations ont été rapportées par plusieurs chercheurs (Peng et al., 2015 ; Klouche F., 2019 ; Bessaim M., 2019). Cela peut être expliqué par le fait que durant le traitement électrocinétique, le mouvement de l'eau s'effectue par le processus électro-osmose de l'anode vers la cathode. L'allure des courbes est la même quel que soit la configuration géométrique des électrodes utilisées.

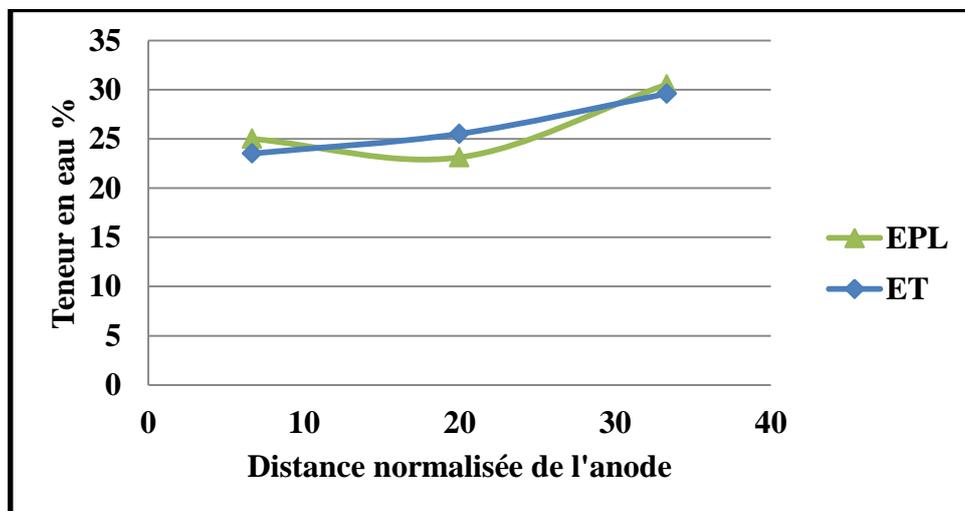


Figure IV.25. Variation de la teneur en eau le long de la distance de la anode –cathode.

IV.14 .Conclusion:

Le traitement électro-osmotique vise à améliorer et à traiter les sols fins contaminés. Dans ce chapitre, le traitement électrocinétique a été appliqué sur un échantillon de sol salin provenant de la région de Bordjia. Un dispositif expérimental électrocinétique a été élaboré au laboratoire de génie civil de l'université de Mostaganem. Deux configurations géométriques différentes ont été utilisées pour les électrodes. La première sous forme de plaque en cuivre et la deuxième sous forme de tube. Une tension de 20 V a été appliquée durant le traitement électrocinétique. Les résultats obtenus représentant la variation de plusieurs paramètres ont été présentés et analysés dans ce chapitre.

Conclusion générale

Conclusion général :

L'optimisation du processus de désalinisation des sols est d'une importance cruciale pour résoudre le problème de salinité à l'échelle mondiale. Les développements technologiques dans ce domaine offrent des perspectives prometteuses pour lutter contre la salinité excessive des sols et restaurer les paramètres physico-chimiques des sols.

Pour répondre à ce dilemme, plusieurs études ont été menées dans le but de pouvoir fournir des solutions efficaces et à moindre coût pour répondre aux principaux enjeux et exigences contemporains. L'étude menée dans le cadre de ce mémoire de fin d'étude, au sein du laboratoire de génie civil de l'Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, contribue à l'application de traitement électrocinétique aux échantillons de sol collectés à la région de Bordjia (Mostaganem), connue pour sa forte salinité. Le traitement électrochimique des sols vise à réduire la salinité, en extrayant les ions de sels, afin de réduire les effets néfastes qu'ils peuvent engendrer sur la composition et les propriétés géotechniques du sol.

Le choix de ce site a été motivé en raison de son extension vers des zones à risque, Les résultats obtenus ont permis de dégager les conclusions suivantes :

- Les analyses granulométriques des échantillons de sol testés indiquent qu'ils se composent de 8,5% de sable, de 43,7% limon et 47,8% de argile. Ces valeurs indiquent que le sol présente une granulométrie fine.
- La limite de liquidité étant de 55,06%, limite de plasticité 21,42% et l'indice de plasticité (IP) vaut 33,64 %
- La valeur du bleu de méthylène (VBS) est de 4,50.

Dans cette étude, un accent particulier a été mis sur l'utilisation de deux configurations géométriques différentes constituant les électrodes. La première est composée de plaques en cuivre et la seconde sous forme de tubes de cuivre. L'expérimentation a été réalisée par l'application d'un gradient de potentiel électrique de 20 V durant sept jours. Les paramètres considérés dans cette étude sont : la tension, le courant électrique, la température, le flux électro-osmotique, le pH, la conductivité électrique, les limites d'Atterberg et la teneur en eau. La variation de ces paramètres a été comparée et analysée durant cette étude pour les deux configurations géométriques constituant les électrodes. D'autres configurations, ainsi que l'utilisation de matériaux autre que le cuivre pour les électrodes peut être envisagée comme perspectives à ce travail. Malgré que plusieurs chercheurs se soient intéressés à la caractérisation des sols salés, il demeure qu'il reste toujours des zones d'ombre non illustrés.

Pour la majorité des études, on remarque une concentration sur la méthodologie de détermination des caractéristiques, physiques et chimiques, de ces sols riches en sels.

Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abbani, B, et Abde-Lali, Y, (2005) : Contribution à l'étude de la qualité des eaux phréatiques sur l'état de dégradation de la palmeraie cuvette de Ouargla. Thèse ING, Eco, ITAS.Ouargla.p141.

Ait Ahmed O, Derriche Z, Kameche M, Bahmani A, Souli H, Dubujet P, Fleureau JM (2016) Electro-remediation of lead contaminated kaolinite: An electrokinetic treatment. Chemical Engineering and Processing 100: 37–48

Aubert, G, (1975) : Les sols sodiques en Afrique du nord. Annuaire de l'I.N.A. Alger, 6 (1),p p. 185-195.

Anonyme, B, (2006) : Conférence électronique sur la salinisation: Extension de la salinisation et Stratégies de prévention et réhabilitation. Organisée et coordonnée par: IPTRID du 6 février Au 6 Mars 2006, 20 p.

Antipolis, S, (2003) : Extension de la salinisation et Stratégies de prévention et réhabilitation. Conférence électronique sur la salinisation : Organisée et coordonnée par: IPTRID du 6 février au 6 Mars 2006, 20 p.

Afshin Asadi, Bujang B, K, Huat, Haslinda Nahazanan, Hamed A. Keykhah (2013): Theory of Electro osmosis in Soil. International Journal of Electrochemical science, 8 (1016 - 1025).

Bessaim, M, M. (2019) : Traitement électrochimique des sols hétérogènes. Thèse de doctorat. Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem.

Boualla , N, Benziane A., Derriche Z. (2012) : Origine de la salinisation des sols de la plaine de M'léta (bordure sud du bassin sebkha Oran). Journal of Applied Biosciences, vol. 53, pp 3787-3796.

Bahemmat, M.; Farahbakhsh, M.; Shabani, F.: Compositional and metabolic quotient analysis of heavy metal contaminated soil after electroremediation. Environ. Earth Sci. 74, 116 4639–4648 (2015).

Ben Hassine, H, (2005) : Effets de la nappe phréatique sur la salinisation des sols de cinq périmètres irrigués en Tunisie. Étude et Gestion des Sols, Vol.12, pp 281-300.

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-

Calvet, R, (2003). Le sol, propriété et fonction, phénomènes physiques et chimiques. Tome 2. Ed. France. Agricola, 511 p.

Casagrande, A, (1951). Electro-osmotic stabilization of soils. Transactions of Boston Society of Civil Engineers, 39, 51-83.

Cherbuy, B, (1991). Les sols salés et leur réhabilitation. Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie Rennes. 124p.

Douaoui, A, Hartani, T, (2008). Impact de l'irrigation par les eaux souterraines sur la dégradation des sols de la plaine du Bas-Cheliff. Scientific Commons. Vol. 2, no3, p. 9

Du chaufour, p, (1983). Pédogenèse et classification. Masson 2è édition -Paris –France 491 p, pp 208, 483.

DURAND JH., (1983). Les sols irrigables, Agence de coopération culturelle et technique. P.U. France, 190 p.

Djili ,K , (2000). Contribution à la connaissance des sols du Nord de l'Algérie : Création d'une banque de données informatisée et l'utilisation d'un système d'information géographique pour la spatialisation et la vectorisation des données pédologique. Thèse de doctorat, INA, Alger, 384 p.

Duchaufour, Ph, (1977). Pédologie : sol, végétation, environnement. Ed Masson. Paris, 350p.

Estabragh, A,R,M. Naseh, A.A. Javadi,(2014). Improvement of clay soil by electro-osmosis technique, Applied Clay Science, Volume 95

Fettouch, D, (2016). Impacts des systèmes agroforestiers sur les propriétés physico-chimiques, hydriques et la fertilité des sols en milieux semi-arides, cas de la plaine des Bordjias (Mesra, Mostaganem). Dissertation. University of Mostaganem, Mostaganem.

FAO, (2005). Utilisation des engrais par culture en Algérie. FAO. Rome pp 61.

FAO, (2008). Annuaire statistique de la FAO.

Faisal, A.A.H., Sulaymon, A.H., Khaliefa, Q.M (2018). A review of permeable reactive barrier as passive sustainable technology for groundwater remediation. Int J Environ Sci Technol 15:1123–1138

Girard Michal-Claude. Christian walter, et jean-claude Rémy,jacques Berthelin , (2005). Sols et Environnement, 2ème édition, Editions DUNOD.

Hadjadj F, Z, (2019). Effet d'osmose sur la migration des polluants dans les sols. Thèse de doctorat. Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem.

Halitim, A. (1988). Sols des régions arides d'Algérie. Alger: Opu , Alger.

Halitim A. (1985). Contribution à l'étude des sols des zones arides (Hautes Plaines Steppiques d'Algérie). Morphologie, distribution et rôle des sels dans la genèse et le comportement des sols. Thèse Doct. D'Etat, Université de Rennes, 383 p.

Halitim A. (1973). Etude expérimentale de l'amélioration des sols sodiques d'Algérie en vue de leur mise en culture. Thèse de doctorat, Université de Renne, France.

HOUÉROU. H.-N. (1993). Relation entre la variabilité des précipitations et celle des productions primaires et secondaire en zone aride. In : l'aridité une contrainte au développement. M.col. didactiques pp 197-220.

IPTRID, (2006). Conférence électronique sur la salinisation: Extension de la salinisation et Stratégies de prévention et réhabilitation. En ligne https://www.Agrireseau.net/Agroenvironnement/documents/Salinisation_irrigation.pdf. Programme International pour la Technologie et la Recherche en Irrigation et Drainage, Rome, Italy.

IRD (Institut de recherche et développement France (2008)). Les dossiers thématiques de l'Institut de recherche pour le développement. Les sols sont fragiles: 1er partie Salinisation et sodisation des sols. 2ème partie La dégradation des sols par salinisation ou alcalisation. IRD, Marseille, pp 2

INSID (2008). Caractérisation de l'état actuel de la salinité dans le périmètre de Mina, Relizane.

Jayasekera, S,(2007). Stabilising volume change characteristics of expansive soils using electrokinetics: a laboratory based investigation. In: International conference in geotechnical Engineering, Colombo, Sri Lanka.

Klouche, F. (2019). Effet d'osmose sur la migration des polluants dans les sols. Thèse de doctorat. Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem.

Kloppmann,k, A. Bourhane, S. Schomburgk, F. Asfirane (2011). Méthodologie de diagnostic de L'origine de la salinité des masses d'eau, BRGM, Orléans, 123p.

Raju KP, Desai JN, Chandrasekhar T, Ashok NM (1993). Precursors, arginine, ornithine, or methionine in ameliorating the inhibitory effect of NaCl on wheat plant. Egypt. J Biotechnol 9:328–340.

Lahouel, H, (2014). Contribution à l'étude de l'influence de la salinité sur le rendement des céréales (cas de l'orge) dans la région de Hemadna à Relizane.

López- Vizcaíno, R.; Yustres, A.; León, M.J.; Saez, C.; Cañizares, P.; Rodrigo, M.A.; Navarro, V.: Multiphysics implementation of electrokinetic remediation models for natural Soils and porewaters. Electrochim. Acta 225, 93–104 (2017).

Legoupil Jean-Claude (1974). Agronomie Tropicale. Série 3 : Séminaire "développement rural.

Mitchell J.K et Soga. K (2005). Fundamentals of Soil Behavior. 3rd edition, John Wiley and Sons Inc., New York, USA, 559p.

Mosavat, N., Oh, E., Chai , G. (2014). Electro kinetic treatment of fine grained soils with chemical enhancement solutions. Dissertation/ Thesis, University of Griffith.

Montoroi, J.P(2005). sols et environnement, Dunod, 816p.

Miransari, M. (Ed.), 2016. Abiotic and Biotic Stresses in Soybean Production. Elsevier, Mermoud, A (2006). Cours de physique du sol: Maîtrise de la salinité des sols. Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 23.

Malekzadeh M, Lovisa J, Sivakugan N (2016). An overview of electrokinetic consolidation of soils. *Geotech Geol Eng* 34:759–776.

Memoud, A, (2006). Cours physique du sol, Maîtrise de la salinité des sols, 01p.

Mostefa F. (2023). Traitement des sols fins par la méthode électrochimique. Thèse de doctorat. Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem.

Richards, L.A. (1954). *Diagnosis and Improvement of Saline Alkali Soils*, Agriculture, 160, Handbook 60. US Département of Agriculture, Washington DC.

Senouci M, Trache A (2014). Etude de vulnérabilité aux changements climatiques de la wilaya de Mostaganem. Rapport d'expertise. Direction de l'Environnement de la wilaya de Mostaganem, Mostaganem, pp 1–126.

Selvakumar, G., Kim, K., Hu, S., Sa, T.,(2014). Effect of salinity on plants and the role of arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting rhizobacteria in alleviation of salt stress. In: Ahmad, P., Wani, M. (Eds.), *Physiological Mechanisms and Adaptation Strategies in Plants Under Changing Environment*. Springer, New York. ISBN: 978-1-4614-8590-2, pp.115–144.

Wyn Jones, G. et Gouston, H. (1991). Completely conflicting approaches to salinity, DDU. Bulletin N° 23: 7-9.

Les normes françaises:

NF P 94-051: « Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité à la coupelle-limite de plasticité au rouleau ».

NF P94-057 : « Analyse granulométrique des sols. Méthode par Sédimentation ».

NF P 94-050: « Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux. Méthode par étuvage ».

NF P 94-068 : «Détermination de la valeur de bleu de méthylène »