



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil et d'Architecture



Faculté des sciences et de la technologie  
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem

N° D'ORDRE : D-LMD...../2019

## THESE

Présentée pour l'obtention du

**DIPLOME DE DOCTORAT 3<sup>ème</sup> cycle**

Spécialité : Génie Civil

Option : Géo-Matériaux et Environnement

Par

**HADJADJ FATIMA ZOHRA**

# Influence des constituants d'un sol sur la résistivité électrique

*Devant le jury composé de :*

<b>Mr. BENDANI Karim</b>	<b>Professeur</b>	<b>Président</b>	<b>Université de Mostaganem</b>
<b>Mme. BOUROKBA Souad Amel</b>	<b>MC-A</b>	<b>Examinatrice</b>	<b>Université d'Oran USTO</b>
<b>Mr. SARDOU Miloud</b>	<b>MC-A</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de Mostaganem</b>
<b>Mme. LAREDJ Nadia</b>	<b>Professeur</b>	<b>Directrice de thèse</b>	<b>Université de Mostaganem</b>
<b>Mr. MISSOUM Hanifi</b>	<b>Professeur</b>	<b>Co-Directeur de thèse</b>	<b>Université de Mostaganem</b>

Année Universitaire: 2018/2019

# Remerciements

Ce travail de thèse a été effectué au sein du Laboratoire de Recherche « Construction, Transport et Protection de l'Environnement (LCTPE) » de l'Université de Mostaganem. Ces années de recherche, furent pour moi une réelle expérience scientifique, où de nombreuses personnes très remarquables, ont contribué à l'aboutissement de ce travail. Je veux ici, leur exprimer toute ma gratitude.

J'adresse tout d'abord mes plus vifs remerciements à Madame N. LAREDJ, Professeur au département de Génie Civil de l'Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem et directrice de cette thèse, pour ses encouragements et son aide pour l'aboutissement de ce travail. Je la remercie aussi pour ses conseils, lectures et remarques judicieuses qui m'ont aidé lors de la rédaction de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance à Monsieur H. MISSOUM, Professeur au département de Génie Civil de l'Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem et co-directeur de cette thèse pour toute l'aide qu'il m'a apporté durant toutes les années de recherche, ses conseils judicieux et sa pleine disponibilité.

Je remercie aussi Mr M. MALIKI, Maître de Conférences à l'Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem pour sa grande contribution à l'élaboration de ce travail.

Je remercie aussi vivement tous les membres du Jury de l'intérêt manifesté pour mon travail : Mr. K. BENDANI, Professeur à l'Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem pour son aide durant les années de recherche et de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse. Mes remerciements vont également à Madame S. BOUROKBA Maître de Conférences de l'Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf Oran et Monsieur M. SARDOU, Maître de Conférences de l'Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem qui ont acceptés la lourde tâche d'examiner cette thèse.

Je remercie Mr. A. HACHICHI, Professeur et doyen de la faculté d'architecture et de génie civil de l'Université des Sciences et de la Technologie Med. Boudiaf d'Oran pour toute l'aide qu'il m'a apporté en mettant à ma disposition tous les moyens dont il disposait dans son laboratoire.

Je souhaite également remercier mes amies Mme W. DEKHISSI et Mme R. EZZINE pour l'aide et le soutien qu'elles m'ont apportés au cours des essais expérimentaux.

Je dois exprimer toute ma reconnaissance aux techniciens du laboratoire d'USTO pour leurs patiences et leurs collaborations.

J'adresse un très grand merci à mes chers parents, mes frères, mes sœurs et toute ma proche famille, pour leur soutien et encouragement au cours de toutes ces années, surtout dans les moments difficiles.

Je n'oublie pas de présenter mes vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## Résumé

Durant son histoire géologique, le sol a subi des changements, et altérations à cause des activités anciennes, qui ont modifié ses caractéristiques en proche surface. Au cours du temps, les travaux de terrassement, l'apport des terres et des débris et les possibles déversements des polluants l'ont rendu un milieu hétérogène et complexe à caractériser.

De ce fait, les actuelles techniques ponctuelles d'investigation ne permettent pas de préciser la variabilité spatiale des possibles sources de pollution ou la présence des remblais. Cette incertitude peut engendrer des risques environnementaux importants et des surcoûts pour la caractérisation. Depuis les années 90, plusieurs études ont démontré la sensibilité des méthodes géophysiques notamment électromagnétiques au sens large, à la détection et à l'imagerie des sites. L'intégration de ces techniques aux pratiques conventionnelles permet de mieux spatialiser l'information à l'échelle du site. Néanmoins, l'exploitation des données géophysiques reste actuellement qualitative, l'information géophysique est majoritairement utilisée pour définir des zones polluées et non polluées et guider l'implantation des ouvrages. Parmi les méthodes géophysiques, la résistivité électrique présente une très large gamme de variation selon les géo-matériaux. Leur rapidité de mise en œuvre et leur coût relativement modéré, peut permettre une caractérisation des matériaux hétérogènes sur une surface étendue, ainsi qu'éventuellement une détection des variations latérales à l'échelle du site.

Notre recherche est orientée sur l'utilisation des méthodes électriques. D'une part pour déterminer la variation de la résistivité électrique en fonction des paramètres physico-chimiques du sol tels que la teneur en eau, le degré de saturation, le pH et la concentration de sels, et d'autre part pour étudier l'effet de la salinité sur la résistivité électrique et le comportement physico-chimique et mécanique du sol étudié au cours d'un traitement électrocinétique. Le sol étudié est une argile saline, sodique à forte concentration en sodium  $\text{Na}^+$  provenant de la région d'Ain Nouissy de wilaya de Mostaganem.

Les résultats obtenus seront utilisés afin d'évaluer les propriétés requises pour la caractérisation du sol, ainsi que pour surveiller le comportement du sol in situ en ce qui concerne la concentration en sel pour une utilisation en remédiation du sol.

**Mots clés:** résistivité électrique; teneur en eau; degré de saturation; pH ; sols salins ; traitement électrocinétique,

## Abstract

The soil has undergone in its geological history old activities, which have modified its characteristics in the near surface. Over time, earthworks, the transport of soil and debris, and potential spills of pollutants have created a heterogeneous and complex environment to characterize.

As a result, the current punctual investigation techniques do not make it possible to specify the spatial variability of the possible sources of pollution or the presence of soil newly deposited. This uncertainty can lead to significant environmental risks and additional costs for characterization. Since the 90s, several studies have demonstrated the sensitivity of geophysical methods including broad electromagnetic, detection and site imaging. The integration of these techniques with conventional practices makes it possible to better spatialize information at the site level. Nevertheless, the exploitation of geophysical data is currently qualitative, geophysical information is mainly used to define polluted and unpolluted areas and guide the implementation of structures. Among the geophysical methods, the electrical resistivity presents a very wide range of variation according to the geo-materials. Their speed of implementation and their relatively moderate cost, can allow a characterization of heterogeneous materials on a large surface, as well as possibly a detection of the property variations on the scale of the site.

Our research is oriented on the use of electrical methods. On the one hand to determine the variation of the electrical resistivity according to the physicochemical parameters of the soil such as the water content, the degree of saturation, the pH and the concentration of salts, and on the other hand to study the effect of salinity on the electrical resistivity and the physicochemical and mechanical behavior of the soil studied during electrokinetic treatment. The soil studied is sodium saline clay with a high Na + sodium concentration from the Ain Nouissy Mostaganem region.

The results obtained will be used to evaluate the properties required for soil characterization, as well as to monitor soil behavior in situ with respect to salt concentration for use in soil remediation.

**Key words:** electrical resistivity; water content; degree of saturation; pH; saline soils; electrokinetic treatment,

## الملخص

خضعت التربة في تاريخها الجيولوجي للأنشطة القديمة ، التي عدلت خصائصها في السطح القريب. وبمرور الوقت ، أدت أعمال الحفر ، ومساهمة التربة والحطام ، وانسكابات الملوثات المحتملة إلى خلق بيئة غير متجانسة ومعقدة يمكن وصفها.

نتيجة لذلك ، فإن تقنيات التحقيق الحالية لا تجعل من الممكن تحديد التباين المكاني للمصادر المحتملة للتلوث أو لوجود السدود. يمكن أن يؤدي عدم اليقين هذا إلى مخاطر بيئية كبيرة وتكاليف إضافية للتوصيف. منذ التسعينيات ، أظهرت العديد من الدراسات حساسية الطرق الجيوفيزيائية بما في ذلك المواقع الكهرومغناطيسية والكشف والتصوير. إن دمج هذه التقنيات مع الممارسات التقليدية يجعل من الممكن تحسين المعلومات المكانية على مستوى الموقع. ومع ذلك ، فإن استغلال البيانات الجيوفيزيائية في الوقت الحالي هو نوعي ، وتستخدم المعلومات الجيوفيزيائية أساساً لتحديد المناطق الملوثة وغير الملوثة وتوجيه تنفيذ الهياكل. من بين الطرق الجيوفيزيائية ، تقدم المقاومة الكهربائية نطاقاً واسعاً جداً من الاختلاف وفقاً للمواد الجغرافية. يمكن لسرعة تنفيذها وتكلفتها المعتدلة نسبياً ، أن تسمح بتوصيف المواد غير المتجانسة على سطح كبير ، فضلاً عن احتمال اكتشاف الاختلافات الجانبية في حجم الموقع.

يعتمد بحثنا على استخدام الأساليب الكهربائية من ناحية لتحديد الاختلاف في المقاومة الكهربائية وفقاً للمعاملات الفيزيائية الكيميائية للتربة مثل محتوى الماء ، ودرجة التشبع ، ودرجة الحموضة وتركيز الأملاح ، ومن ناحية أخرى لدراسة تأثير الملوحة على المقاومة الكهربائية والسلوك الفيزيائي والميكانيكي للتربة التي تمت دراستها خلال العلاج الكهربائي. التربة التي تمت دراستها هي تربة ملحية مع تركيز عالي للصوديوم من منطقة عين نويسي مستغانم. سيتم استخدام النتائج التي تم الحصول عليها لتقييم الخصائص المطلوبة لتوصيف التربة ، وكذلك لمراقبة سلوك التربة في الموقع فيما يتعلق بتركيز الملح للاستخدام في معالجة التربة.

**الكلمات المفتاحية:** المقاومة الكهربائية ; محتوى الماء ; درجة التشبع ; درجة الحموضة ; التربة المالحة ; العلاج الكهربائي.

# **Table des Matières**

## Table des Matières

Remerciements	i
Résumé	ii
Abstract	iii
ملخص	iv
Liste des abréviations	vi
Liste des symboles	viii
Liste des figures	xi
Liste des tableaux	xvi
<b>Introduction générale</b>	<b>02</b>
<b>Partie 1 : Étude bibliographique</b>	
<b>Chapitre I : État de l'art sur les argiles et la résistivité électrique des sols</b>	<b>6</b>
I.1. Introduction	6
I.2. Le sol	6
I.2.1. Définition	6
I.2.2. Constituants et propriétés physiques	7
I.2.2.1. La phase solide du sol	7
I.2.2.2. La phase liquide du sol	8
I.2.2.3. La phase gazeuse du sol	9
I.2.3. Les argiles	9
I.2.3.1 Définition	9
I.2.3.2. Structure d'une argile	9
I.2.3.3. Texture d'une argile	10
I.2.3.4. Minéralogie des argiles	11
I.2.3.4.1. Kaolinite	12
I.2.3.4.2. Montmorillonite	13
I.2.3.4.3. Illite	14
I.2.3.5. Propriétés des argiles	15
I.2.3.5.1. Forme et surface spécifique	15
I.2.3.5.2. Capacité d'échange cationique	16

I.2.3.5.3. Double couche électrique	17
I.3. Résistivité électriques des sols	19
I.3.1. Définition	19
I.3.2. Origine de la conductivité électrique des sols :	20
I.3.3. Avantage de la mesure de résistivité	20
I.3.4. Paramètres géotechniques affectant la résistivité électrique	21
I.3.4.1. Teneur en humidité	21
I.3.4.2. La porosité	22
I.3.4.3. Caractéristiques de l'eau des pores	22
I.3.4.4. Fraction argileuse et limites d'Atterberg	23
I.3.4.5. Capacité d'échange de cations et surface spécifique	24
I.3.4.6. Température et viscosité	24
I.3.5. Mesure de la résistivité électrique	25
I.3.5.1. Mesure au laboratoire	25
I.3.5.2. La mesure in situ	27
I.3.6. Conductivité électrique dans un sol argileux	30
I. 3.7. Conclusion	31
<b>Chapitre II : Salinité des sols et traitement électrocinétique</b>	<b>33</b>
II.1. : Introduction	33
II.2. La salinisation des sols	33
II.2.1. Définition	34
II.2.2. Répartition globale de la salinité des sols	35
II.2.3. Processus conduisant à la salinité du sol	36
II.2.4. Caractéristiques des sols affectés par le sel	38
II.2.4.1. Propriétés chimiques et physiques	38
II.2.5. Sols sodiques	39
II.2.6. Évaluation de la sodicité:	40
II.3. Traitement électrocinétique des sols	41
II.3.1. Histoire du traitement électrocinétique	42
II.3.2. Généralité sur le traitement électrocinétique	43
II.3.3. Facteurs influant le traitement électrocinétique des sols	45
II.3.3.1. Niveaux de tension et de courant	45
II.3.3.2. Temps du traitement	46

II.3.3.3. Texture du sol	47
II.3.3.4. Teneur en humidité	48
II.3.3.5. Développement du gradient de pH	48
II.4. Conclusion	49
<b>Partie 2 : Etude expérimentale</b>	
<b>Chapitre III : Identification et caractérisation des sols</b>	53
III.1. Introduction	53
III.2. Localisation et géologie du site	53
III.3. Analyse du sol étudié	54
III.4. Caractérisation des sols	55
III.4.1. paramètres physiques	55
III.4.1.1. Analyse granulométrique (NF P94-057)	55
III.4.1.2. Limites d'Atterberg (NF P94-051)	56
III.4.1.3. Activité des argiles	57
III.4.1.4. Mesure de la surface spécifique par l'essai d'absorption de bleu de méthylène (NF P94-068)	58
III.4.1.5. Teneur en matière organique (NF EN 12879)	59
III.4.2. Caractéristiques chimiques	60
III.4.2.1. Composition chimique	60
III.4.2.2. Teneur en carbonate de Calcium (NF X31-106)	60
III.4.2.3. Concentrations initiales d'ions	61
III.4.3. Caractéristiques minéralogiques	61
III.4.4. Caractéristiques mécaniques	62
III.4.4.1. Essai oedométrique (NF P94-090-1)	62
III.4.4.2. Essai Proctor Normal (NF P94-093)	64
III.4.4.3. Essai de cisaillement (NF P94-071-1)	65
III.4.4.4. Essai de perméabilité à charge variable	66
III.5. Conclusion	69
<b>Chapitre IV : Mesure des paramètres physicochimiques du sol par la conductivité électrique</b>	71
IV.1. Introduction	71
IV.2. Protocole expérimental	71
IV.3. Mesure de la conductivité électrique	72

IV.4. Résultats et discussion	73
IV.4.1. Mesure des propriétés physiques d'argile par la conductivité électrique	73
IV.4.1.1 Variation de la teneur en eau	73
IV.4.1.2 Variation du degré de saturation	75
IV.4.1.3. Variation de la porosité	76
IV.4.2. Mesure des propriétés chimiques d'argile par la conductivité électrique	77
IV.4.2.1. Variation de la salinité du sol	78
IV.4.2.2. Variation de la mesure du pH	78
IV.5. Conclusion	80
<b>Chapitre V : Détermination des paramètres géotechniques du sol après traitement électrique</b>	<b>82</b>
V.1. Introduction	82
V.2. Protocole expérimental	82
V.2.1 Préparation des échantillons	82
V.2.2. Dispositif expérimental	83
V.2.3. Les électrodes	84
V.2.4. Procédure du traitement électrocinétique	84
V.3. Mesure des propriétés physico-chimiques du sol par méthode électrocinétique	85
V.4. Variation des paramètres physiques à la fin du traitement électrocinétique	86
V.4.1. Variation de la teneur en eau	86
V.4.2. Variation du degré de saturation	87
V.4.3. Variation de la Porosité	89
V.5. Variation du pH sous différentes tensions appliquées à la fin du traitement électrocinétique	90
V.6. Détermination des paramètres mécaniques du sol après le traitement électrocinétique	92
V.6.1. Évaluation des caractéristiques de compressibilité	92
V.6.2. Effet du traitement électrocinétique sur les caractéristiques de compressibilité	93
V.6.2.1. Courbes de compressibilité et pression de pré-consolidation ( $\sigma'_{pc}$ )	94
V.6.2.2. Coefficient de compressibilité (Cc)	98
V.6.2.3. Coefficient de gonflement (Cg)	100
V.6.2.4. Coefficient de consolidation (Cv)	100
V.7. Conclusion	101

*Table des Matières*

---

<b>Conclusion générale</b>	104
<b>perspectives</b>	105
<b>Références bibliographiques</b>	107
<b>Annexes</b>	

# Liste des tableaux

## Liste des tableaux

### Chapitre I : État de l'art sur les argiles et la résistivité électrique des sols

Tableau I.1. Formules chimiques des minéraux argileux (Yang, 2002).....	15
Tableau I.2: Surface spécifique des particules argileuses (Bultel, 2001).....	16
Tableau I.3 : Capacité d'échange cationique des particules argileuses (Hafsi, 1993).....	17
Tableau I.4. Mobilité ionique des ions à 25°C (Santamarina et al. 2002).....	23

### Chapitre II : Salinité des sols et traitement électrocinétique

Tableau II.1 : Classification des sols salins et sodiques. (US Salinity Laboratory Staff, 1954).....	38
--	----

### Chapitre III : Identification des sols

Tableau III.1. Activité de différents minéraux.....	57
Tableau III.2 : Paramètres tirés de l'essai au bleu de méthylène.....	58
Tableau III.3 valeur de bleu de quelques sols.....	58
Tableau III.4 : Surface spécifique totale de quelques argiles (Lautrin, 1987).....	59
Tableau III.5 : Types de sols en fonction du pourcentage en matières organiques (Liang, 2012).....	59
Tableau III.6 : Analyse chimique du sol étudié.....	60
Tableau III.7 : Teneur en CaCO <sub>3</sub> de quelques sols (cité par Bourokba, 2011).....	60
Tableau III.8 : Concentration des ions de l'argile d'Ain Nouissy.....	61
Tableau III.9. Paramètres oedométriques de l'argile étudiée.....	63
Tableau III.10: Classification selon le rapport $C_c / (1 + e_0)$ (Philipponnat et Hubert 1997).....	64
Tableau III.11 : Ordre de grandeur de perméabilité (Sanglerat, 1988).....	67
Tableau III.12. Paramètres d'identification du sol d'Ain Nouissy.....	68

### Chapitre V : Détermination des paramètres géotechniques du sol après traitement électrocinétique

Tableau V.1 : Variation de la contrainte de pré-consolidation après le traitement électrocinétique.....	98
Tableau V.2 : Variation du coefficient de compressibilité après le traitement électrocinétique.....	99
Tableau V.3 : Variation du coefficient de gonflement après le traitement électrocinétique.....	100
Tableau V.4 : Variation du coefficient de consolidation après le traitement électrocinétique.....	101

# Liste des figures

## Liste des figures

### Chapitre I : État de l'art sur les argiles et la résistivité électrique des sols

Figure I.1 : Volume (%) des constituants solides du sol (fraction minérale et organique) et de l'espace poral (occupé par l'air et l'eau). (Aude Locatelli, 2013).....	7
Figure I.2 : Triangle des textures minérales des sols (USDA, 1975).....	8
Figure I.3: Représentation schématique de l'organisation texturale d'une argile (Touret, 1988).....	10
Figure I.4 : Photographies MEB de texture matricielle (a; Argile Verte de Romainville) et texture agrégée (b ; Argile de Bavent) (Vincent et al., 2009).....	11
Figure I.5 : Élément tétraédrique (Luckham et al, 1999).....	12
Figure I.6 : Élément octaédrique (Luckham et al, 1999).....	12
Figure I.7 : Structure du cristal de kaolinite ( <a href="http://pubs.usgs.gov">http://pubs.usgs.gov</a> ).....	13
Figure I.8 : Structure du cristal de montmorillonite ( <a href="http://pubs.usgs.gov">http://pubs.usgs.gov</a> ).....	14
Figure I.9 : Structure du cristal illite ( <a href="http://pubs.usgs.gov">http://pubs.usgs.gov</a> ).....	15
Figure I.10 : Forme des particules argileuses (Velde, 1995).....	16
Figure I.11 : Représentation schématique de la double couche électrique et de l'évolution du potentiel électrique en fonction de la distance à particule.....	17
Figure I.12 : Schéma des constituants de la double couche ionique.....	18
Figure I.13 : Représentation schématique de la chute du potentiel de surface et de la contraction de la double couche électrique, dues à une augmentation de la force ionique, (Luckham et al, 1999).....	19
Figure I.14 : Relation entre l'humidité du sol et la résistivité électrique (Pozdnyakov, 2006).....	22
Figure I.15 : Variation de la résistivité électrique avec les limites d'Atterberg Abu Hassanein et al. (1996).....	24
Figure I.16: Système de mesure de la résistivité électrique à deux électrodes (Kibiria, 2014).....	26
Figure I.17: Système de mesure de la résistivité électrique à quatre électrodes (Kibiria, 2014).....	27
Figure I.18 : Flux de courant et lignes équipotentiels dues à une source ponctuelle (Kibiria, 2014).....	27

Figure I.19 : Mesure à quatre électrodes de la résistivité in situ (Kibiria, 2014) .....	28
Figure I.20 : Configuration de Schlumberger.....	29
Figure I.21 : Configuration de Wenner.....	29
Figure I.22 : Emplacement des doubles couches diffuses, des couches renforcées et des ions précipités dans les argiles ( <a href="http://geophysics.geoscienceworld.org">http://geophysics.geoscienceworld.org</a> ).....	31
<b>Chapitre II : Salinité des sols et traitement électrocinétique</b>	
Figure II.1. Corrosion des armatures due à la salinisation des sols.....	34
Figure II.2. Forte concentration en sels à la surface des sols.....	34
Figure II.3. Fissuration du sol due à l'évaporation des eaux salées.....	34
Figure II.4. Dégradation des plantes due à la salinisation des sols.....	34
Figure II. 5 : Répartition des sols salins en Algérie (INSID, 2008).....	36
Figure II. 6 : Formation de terres salines par trois processus différents (Rengasamy, 2006a).....	37
Figure II.7: Schéma de principe de la technique du traitement électrocinétique (Iyer, 2001).....	44
<b>Chapitre III : Identification et caractérisation du sol étudié</b>	
Figure III.1 : Photo satellitaire de la zone d'étude d'Ain Nouissy (Mostaganem).....	53
Figure III.2 : Localisation du site d'Ain nouissy Mostaganem.....	54
Figure III.3 : Extraction manuel du sol d'Ain Nuissy.....	54
Figure III.4. Echantillons d'argile avant et après broyage.....	55
Figure III.5 : Courbe granulométrique du sol étudié.....	56
Figure III.6 : Echantillon dans la boîte de Casagrande.....	56
Figure III.7 : Courbe limite d'Atterberg et classification du sol étudié.....	57
Figure III.8 : Analyse diffractométrique du sol d'Ain Nouissy.....	61
Figure III.9 : Appareil oedométrique.....	62
Figure III.10 : Courbe de compressibilité de l'argile d'Ain nouissy.....	63
Figure III.11 : Appareil de compactage.....	64
Figure III.12 : Courbe de compactage à OPN.....	65
Figure III.13 : Schéma de la boîte de cisaillement direct.....	66
Figure III.14 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte appliquée.....	66
Figure III.15 : Schéma d'un perméamètre à charge variable.....	67

Figure III.16 perméamètre à charge variable.....	67
--	----

**Chapitre IV : Mesure des paramètres physicochimiques du sol par la conductivité**

**électrique**

Figure IV.1 : Cellule expérimentale.....	72
Figure IV.2 : Mesure de la conductivité électrique.....	73
Figure IV.3 : Variation de la résistivité électrique en fonction de la teneur en eau.....	74
Figure IV.4 : Variation de la résistivité électrique en fonction du degré de saturation.....	75
Figure IV.5 : Variation de la résistivité électrique en fonction de la porosité.....	77
Figure IV.6 : Variation de la résistivité électrique en fonction de la salinité d'argile.....	78
Figure IV.7 : Mesure du pH d'argile.....	79
Figure IV.8 : Variation de la résistivité électrique en fonction du pH.....	79

**Chapitre V : Détermination des paramètres géotechniques du sol après traitement**

**électrocinétique**

Figure V.1 Modèle du dispositif expérimental .....	83
Figure V.2 : Schéma descriptif du dispositif de traitement électrocinétique .....	85
Figure V.3 : Variation de la résistivité électrique en fonction de la teneur en eau à la fin du traitement électrocinétique.....	86
Figure V.4 : Variation de la résistivité électrique en fonction du degré de saturation à la fin du traitement électrocinétique.....	88
Figure V.5 : Variation de la résistivité électrique en fonction de la porosité à la fin du traitement électrocinétique.....	90
Figure V.6 : Variation de la résistivité électrique en fonction du pH à la fin du traitement électrocinétique.....	91
Figure V.7 : Prélèvement des échantillons à des distances normalisées.....	92
Figure V.8 : Moule oedométrique.....	93
Figure V.9 : Courbes de compressibilité des échantillons de sol naturels à la fin du traitement électrocinétique à 15, 30 et 45 V.....	94
Figure V.10 : Courbes de compressibilité des échantillons de sol salins avec du NaCl à la fin du traitement électrocinétique à 15, 30 et 45 V.....	95
Figure V.11 : Courbes de compressibilité des échantillons de sol salins avec du KCl à la fin du traitement électrocinétique à 15, 30 et 45 V.....	96
Figure V.12 : Courbes de compressibilité des échantillons de sol salins avec du MgCl <sub>2</sub> à	

la fin du traitement électrocinétique à 15, 30 et 45 V.....	97
---	----

# Liste des abréviations

## Liste des abréviations

AC	Courant alternatif
CE	Conductivité électrique
CEC	Capacité d'échange cationique
DC	Courant continu
DDL	Double couche diffuse
DRX	Diffraction des rayons X
ESP	Pourcentage du sodium échangeable
FAO	Food and Agriculture Organisation
OPN	Optimum proctor normal
SAR	Teneur relative en sodium
SOCO	Sustainable Agriculture and soil conservation
TCE	Trichloroéthane
UNESCO	Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture
USAEC	United States Army Environmental Center
USEPA	United States Environmental Protection Agency
USDA	United States Department of Agriculture
USSL	United States Salinity Laboratory

# Liste des symboles

## Liste des symboles

A (m <sup>2</sup> )	Aire
AC	Activité
CaCO <sub>3</sub> (%)	Teneur en carbonate de calcium
Cc	Coefficient de compressibilité
Cg	Coefficient de gonflement
Cu (kPa)	Cohésion non drainé
Cv	Coefficient de consolidation
e	Charge de l'électron
E (V/m)	Champ électrique
F2 (%)	Pourcentage d'éléments inférieurs à 2 μm
IP (%)	Indice de plasticité
k	Épaisseur de la double couche électrique
K (m/s)	Coefficient de perméabilité
MO (%)	Teneur en matière organique
n	Porosité
R (Ω)	Résistance électrique
R <sub>h</sub>	Rayon de Stokes des ions hydratés
Sr (%)	Degré de saturation
SST (m <sup>2</sup> /g)	surface spécifique totale
T (°C)	Température
t <sub>90</sub>	Temps de consolidation correspondant à la consolidation à 90 %
v (m/s)	Vitesse de l'ion
VBS	Valeur du bleu
WL (%)	Limite de liquidité
W <sub>p</sub> (%)	Limite de plasticité
z	valence de l'ion
γ <sub>a</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Poids volumique sec
γ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Poids volumique des grains solides
γ <sub>w</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Poids volumique de l'eau
ζ	Potentiel zêta
η (Pa.s)	viscosité

$\rho$ ( $\Omega.m$ )	Résistivité électrique
$\rho_{15.5}$ ( $\Omega.m$ )	Résistivité corrigée à 15.5 °C
$\sigma$ ( $S.m^{-1}$ )	Conductivité électrique
$\sigma'_{pc}$ (Mpa)	Contrainte de préconsolidation
$\tau$ (Mpa)	Contrainte de cisaillement
$\phi$	Angle de frottement interne
$\psi_x$	Valeur du potentiel à une distance x
$\omega$ (%)	Teneur en eau
$\omega_{opt}$ (%)	Teneur en eau optimale

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

Le sol, composante essentielle de tous les écosystèmes terrestres, est reconnu pour être à l'origine des 2/3 de la production primaire exploitée pour l'humanité, pour sa nourriture, son habitation et son énergie. En génie civil, le sol constitue le support des ouvrages d'habitations, souterrains et travaux publics ect. C'est pourquoi depuis très longtemps de nombre travaux cherchent à collecter, quantifier, et modéliser ces propriétés.

Les méthodes géophysiques se développent de plus en plus, en particulier en imagerie du sol et sous-sol et pourrait être une alternative intéressantes dans l'estimation spatialisée des constituants du sol. Actuellement, les mesures électriques peuvent être obtenues in situ, elles sont fiables, économiques, rapides et non destructives. Cependant, les tests expérimentaux conventionnels en laboratoire peuvent être très coûteux et prendre plus de temps lorsque l'on utilise un grand nombre des échantillons de sols (Hazreek et al, 2015). Compte tenu de ses caractéristiques attrayantes, de nombreuses applications ont été développées pour les mesures électriques dans une grande variété de domaines scientifiques et techniques.

L'utilisation de la résistivité électrique a été appliquée à divers domaines tels que l'exploration géotechnique, environnementale, agricole, souterraine et des ressources souterraines (Dobecki et al, 1985 ; Suzuki et al, 2001 ; Spitzer et al, 2003 ; Hazreek et al, 2015 ; Gingine et al, 2016; Mostafa et al, 2017 et Cai et al, 2017). Le climat humide des dernières années a augmenté le taux de la salinité des sols. Les sols sodiques ont des niveaux excessifs de sodium adsorbé sur les sites d'échange de cations, ainsi que la sodicité du sol provoque la dégradation de la structure du sol. Ce processus s'appelle la dispersion du sol. Les forces qui maintiennent l'ensemble des particules d'argile sont affaiblies lorsqu'un excès de sodium est adsorbé par les charges négatives (Seelig et al, 2000). Dans les sols sodiques, les concentrations plus élevées de sels fournissent des cations en excès qui favorisent la floculation en se déplaçant près des particules chargées négativement. Ces types de sols présentent une rigidité et une résistance élevées au cisaillement dans des conditions naturelles, mais ils changent radicalement face à l'action de l'eau, ce qui peut engendrer d'énormes dégâts sur les travaux de génie civil. En outre, les sels peuvent agir sur les structures en tant qu'agents corrosifs très nocifs. (Wang et al, 2012). Le sol à grains fins est caractérisé par plusieurs facteurs, notamment la densité, la porosité, la structure, la granulométrie, la quantité et le type des minéraux argileux, les propriétés plastiques et la quantité et le type des minéraux contenus dans l'eau interstitielle (Abbasi et al, 2011). La modification de ses

caractéristiques par la présence des sels dans le sol, peut provoquer des dégâts et des menaces au niveau des structures construites sur le sol (Ajam et al, 2015). Les méthodes électriques sont utilisées non seulement pour la prospection de formations géologiques et d'aquifères (Keller et Frischknecht, 1966 ; Mac Neill, 1980) mais peuvent également être utilisées pour caractériser les sols affectés par le sel. La détermination des propriétés chimiques des sols par l'utilisation de la résistivité électrique a un effet important sur l'identification d'un comportement chimico-mécanique de certains sols salins pour la fondation de structures. (Murad et al, 2012). Des chercheurs ont tenté de limiter la conductivité électrique aux propriétés géotechniques (Bai et al, 2013 ; Sudha et al, 2009 ; Hassan et Toll, 2015). (Archie, 1942) a proposé une relation empirique entre la conductivité électrique et les propriétés du sol, basée sur les mesures en laboratoire des échantillons de sol sableux propres. Cependant, la loi d'Archie ne s'applique qu'aux sols rocheux ou sableux saturés. (Kolay et al, 2016) ont mené une étude sur la relation entre la résistivité électrique et la teneur en eau d'un kaolin mélangé à divers pourcentages de sable. (Gingine et al, 2016) ont présenté une étude expérimentale dans laquelle la résistivité électrique a été mesurée sur différents spécimens de kaolin mélangés avec différents teneur en eau. Néanmoins, la plupart de ces études concernent les types de sols spécifiques et ne sont pas applicables aux sols naturels.

Le but principal de cette recherche est d'étudier la relation entre la résistivité électrique et les constituants des sols salins par le biais des paramètres physico-chimiques et mécaniques. Le sol étudié est une argile saline, provenant de la région d'Ain Nouissy, Mostaganem (ouest de l'Algérie).

La première partie de notre manuscrit est consacrée à une étude bibliographique, composée de deux chapitres. Le premier chapitre traite des généralités sur les sols argileux et la mesure de la résistivité électrique. Le deuxième chapitre est consacré à la salinisation des sols et le traitement électrocinétique.

La deuxième partie a pour objet l'étude expérimentale. Elle est composée de trois chapitres. Un chapitre d'identification du sol étudié, un autre chapitre est destiné pour la caractérisation physicochimique du sol par la mesure de la conductivité électrique et le dernier chapitre a pour but la détermination des paramètres géotechniques du sol en fonction de la résistivité électrique au cours d'un traitement électrocinétique.

A la fin de cette thèse de recherche, une conclusion générale présente une synthèse des résultats de ce travail et des perspectives de recherche qu'il génère.

# **Partie 1 : Étude bibliographique**

**Chapitre I : État de l'art sur les argiles et la résistivité électrique des sols**

**Chapitre II : Salinité des sols et traitement électrocinétique.**

## **Chapitre I :**

### **État de l'art sur les argiles et la résistivité électrique des sols**

## **Chapitre I : État de l'art sur les argiles et la résistivité électrique des sols**

### **I.1. Introduction**

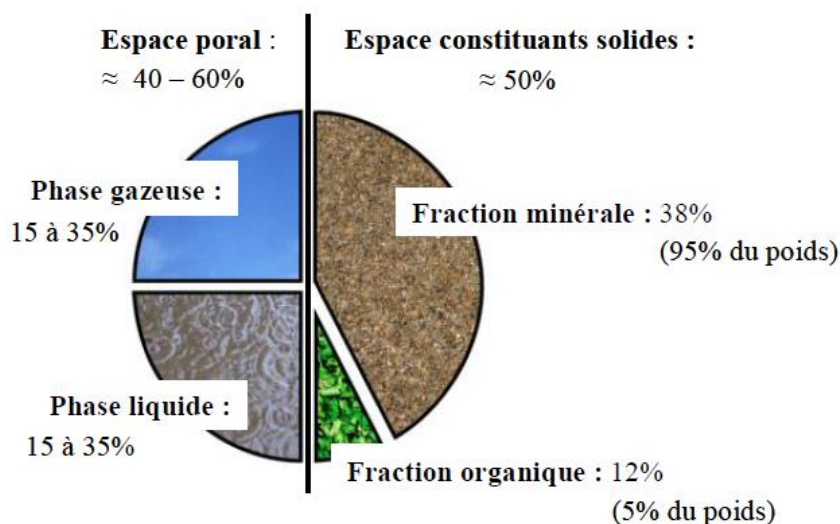
Le sol est un composant majeur de tout l'écosystème terrestre. Il est caractérisé par sa nature minéralogique mais également par la présence de nombreux constituants. Le sol argileux est une catégorie de sols extrait d'un ensemble d'espèces minérales, une famille de roches, ou encore une classe granulométrique.

La caractérisation des sols par les mesures électriques peuvent être obtenues in situ. Ces méthodes sont fiables, économiques, rapides et non destructives. Compte tenu de ces avantages, de nombreuses applications ont été développées pour les mesures électriques dans une grande variété de domaines scientifiques et techniques.

### **I.2. Le sol**

#### **I.2.1. Définition**

Le sol est la couche externe de la croûte terrestre caractérisée par sa structure solide et sa nature minérale mais également par la présence de nombreux êtres vivants. La formation des sols est liée à la transformation de la roche mère sous l'effet des facteurs climatiques mais aussi sous l'effet des organismes vivants (micro-organismes, plantes et animaux). Il est le siège d'un échange intense de matière et d'énergie entre l'air, l'eau et les roches. Le sol, occupe une position clé dans la biosphère continentale car il contribue de manière primordiale aux cycles biogéochimiques des éléments majeurs et des éléments traces. Le sol est donc un écosystème complexe, un bioréacteur et un filtre indispensable à la vie sur terre. Il possède des propriétés physiques caractérisées par sa texture et sa structure, des propriétés chimiques influencées par la nature des matériaux qui le composent et des propriétés biologiques liées à la présence de très nombreux micro-organismes mais aussi organismes végétaux (racines des plantes supérieures, micro-algues) et animaux (micro et mésofaune du sol). La figure (I.1) représente la distribution des constituants des sols.



**Figure I.1 :** Volume (%) des constituants solides du sol (fraction minérale et organique) et de l'espace poral (occupé par l'air et l'eau). (Aude Locatelli, 2013).

## I.2.2. Constituants et propriétés physiques

Le sol est un milieu triphasique composé d'une phase solide (minérale et organique), d'une phase liquide et d'une phase gazeuse (Robert, 1996).

### I.2.2.1. La phase solide du sol

#### ▪ La fraction minérale

La fraction minérale du sol provient de la dégradation superficielle de la roche mère. D'une part, des processus physiques, imposés par le climat (érosion par le vent, le gel, l'eau), fragmentent la roche mère en morceaux de plus en plus fins, ceci, sans en altérer sa composition minéralogique initiale. D'autre part, des réactions chimiques (dissolution, oxydoréduction, hydrolyse et hydratation) vont transformer la roche mère aboutissant à la formation de minéraux secondaires tels que les argiles, les hydroxydes de fer et les ions. Les principaux constituants minéraux du sol sont l'argile, le limon et le sable. Le sable et le limon sont des constituants chimiquement inertes car ces grains portent peu de charges électriques. En comparaison au sable et au limon, l'argile est l'élément le plus fin mais aussi le plus réactif.

La proportion relative de sable, de limon et d'argile qui constitue le sol définit sa texture. Il existe une douzaine de classes texturales comme représenté dans le diagramme référentiel nommé le triangle des textures (figure I.2) (USDA 1975). La texture du sol est une propriété stable dont l'évolution demande plusieurs milliers d'années en fonction de la roche mère.

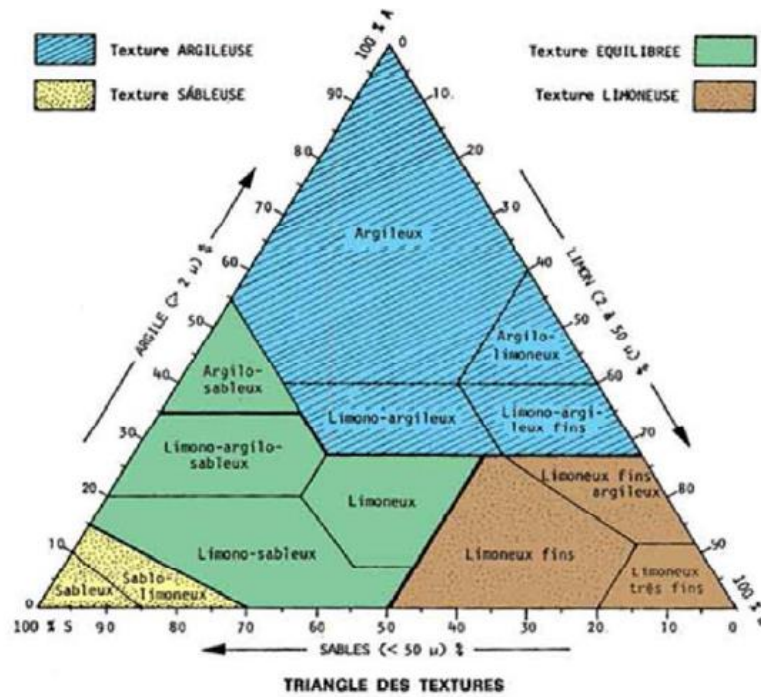


Figure I.2 : Triangle des textures minérales des sols (USDA, 1975).

#### ▪ La fraction organique

La fraction organique du sol regroupe : la matière organique vivante, animale ou végétale, qui englobe la totalité de la biomasse en activité ; les débris d'origine végétale et animale regroupés sous le nom de « matière organique fraîche » ; les composés organiques intermédiaires, appelés « matière organique transitoire », provenant de la transformation de la matière organique fraîche, et l'humus qui forme les horizons organiques superficiels et qui résulte de la décomposition des autres fractions de la matière organique (Calvet, 2003).

#### I.2.2.2. La phase liquide du sol

La phase liquide du sol n'est pas de l'eau pure mais une solution dont la composition est complexe et variable. Elle est désignée par solution du sol. L'eau peut être adsorbée sur les particules qui composent le sol (argile, matière organique), ou peut circuler dans les porosités du sol. Elle contient de nombreuses substances dissoutes telles que les ions et les molécules organiques et minérales. Leur concentration dans la solution du sol dépend de phénomènes de dissolution, de désorption, de précipitation et d'adsorption (Calvet, 2003; Gobat et al, 2010). Bien qu'il soit difficile de définir la composition type de la solution du sol, deux grandes catégories de solutés peuvent être retrouvées :

- Les micro-éléments dont la concentration est inférieure à  $10^{-6}$  mol.L<sup>-1</sup>. Ce sont les éléments traces métalliques qui rentrent principalement dans cette catégorie.

- Les macro-éléments dont la concentration dans la solution du sol dépasse  $10^{-6}$  mol.L<sup>-1</sup>. Les éléments les plus fréquents et les espèces chimiques correspondantes sont : C (HCO<sup>3-</sup>), N (NO<sup>3-</sup>), Na (Na<sup>+</sup>), Mg (Mg<sup>2+</sup>), Si (Si(OH)<sub>4</sub>), S (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), Cl (Cl<sup>-</sup>), K (K<sup>+</sup>), Ca (Ca<sup>2+</sup>) et O<sub>2</sub>.

La solution du sol est principalement une solution d'électrolytes, généralement une solution peu concentrée dont la molarité totale est souvent de l'ordre de  $10^{-3}$  à  $10^{-5}$  mol/L<sup>-1</sup>. Elle contient des ions H<sup>+</sup> et OH<sup>-</sup> dont les concentrations déterminent le pH du sol (Calvet, 2003; Essington, 2015 et Gobat et al, 2010).

### **I.2.2.3. La phase gazeuse du sol**

Un mélange de gaz et de vapeur d'eau forme l'atmosphère du sol qui occupe les pores non remplis par la phase liquide.

## **I.2.3. Les argiles**

### **I.2.3.1. Définitions**

Le terme « argiles » regroupe différentes catégories de matériaux naturels : un ensemble d'espèces minérales, une famille de roches, une catégorie de sols ou encore une classe granulométrique. Une grande diversité de matériaux avec des compositions, des propriétés physico-chimiques et des comportements mécaniques variés est contenue sous ce terme général (Homand et Duffaut, 2000 ; Millot, 1964 ; Meunier, 2005 ; Velde, 2013 et Sparks, 2003).

Les argiles peuvent se présenter globalement sous deux formes structurales : les roches et les sols argileux. Leur caractéristique commune est la proportion, plus ou moins importante, des minéraux argileux qu'ils contiennent ; cependant, on les différencie par :

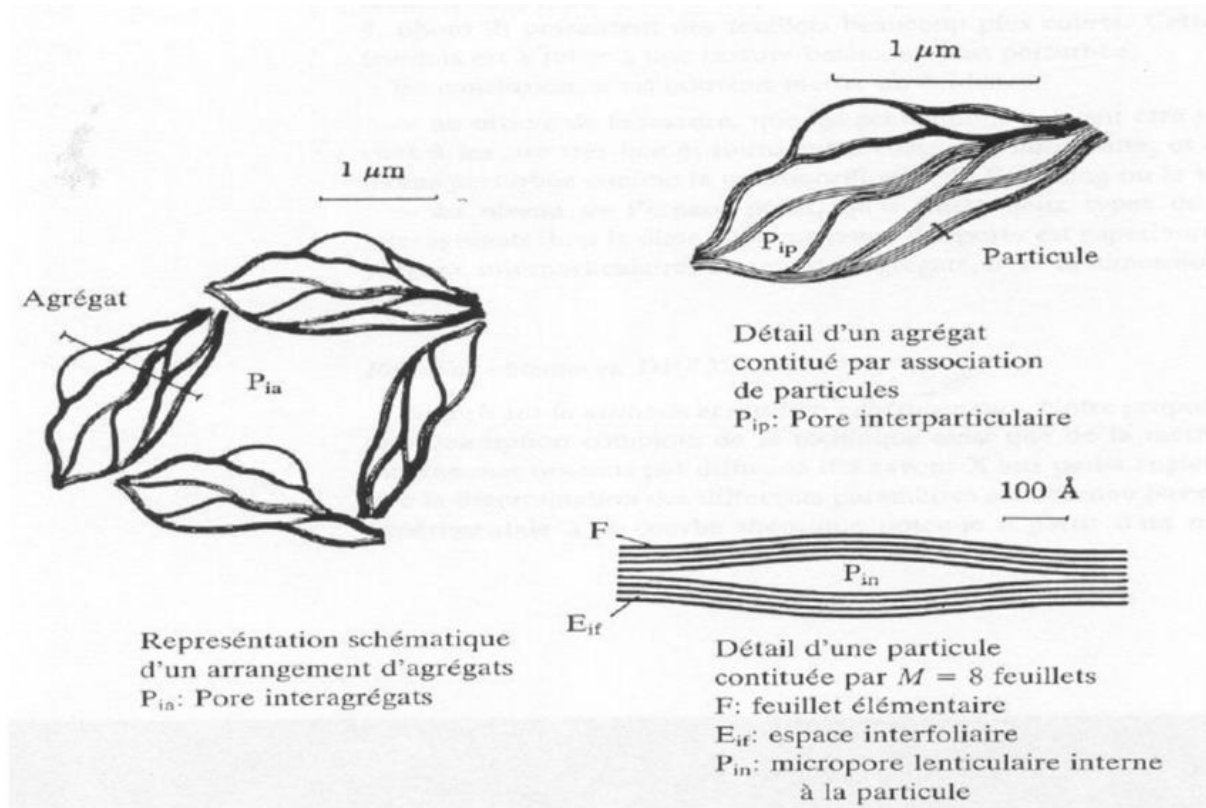
- Le niveau de consolidation subie au cours de leur histoire géologique. Elles sont consolidées et indurées en ce qui concerne les roches (Osipov et Sokolov, 1978).
- L'absence ou la faible valeur de la cohésion pour les sols argileux. On considère en général qu'un sol argileux est constitué de plus de 30 % d'éléments fins dont la taille est inférieure à 2  $\mu$ m (Lambe et Withman, 1969).

### **I.2.3.2. Structure d'une argile**

Les minéraux argileux sont des phyllosilicates hydratés de petite taille. Quel que soit le domaine concerné, la structure cristalline des argiles est importante car elle conditionne les

propriétés physiques du minéral (Caillère et Hénin, 1959). Les minéraux argileux sont donc principalement des phyllosilicates, qui sont donc constitués par un empilement de feuillets. La Figure (I.3) précise la terminologie utilisée pour définir la structure des argiles. On distingue trois niveaux d'organisation :

1. les feuillets, tétraédriques ou octaédriques ;
2. les particules, qui correspondent à des combinaisons ou agencements de feuillets ;
3. les agrégats, qui résultent de l'association de plusieurs particules.



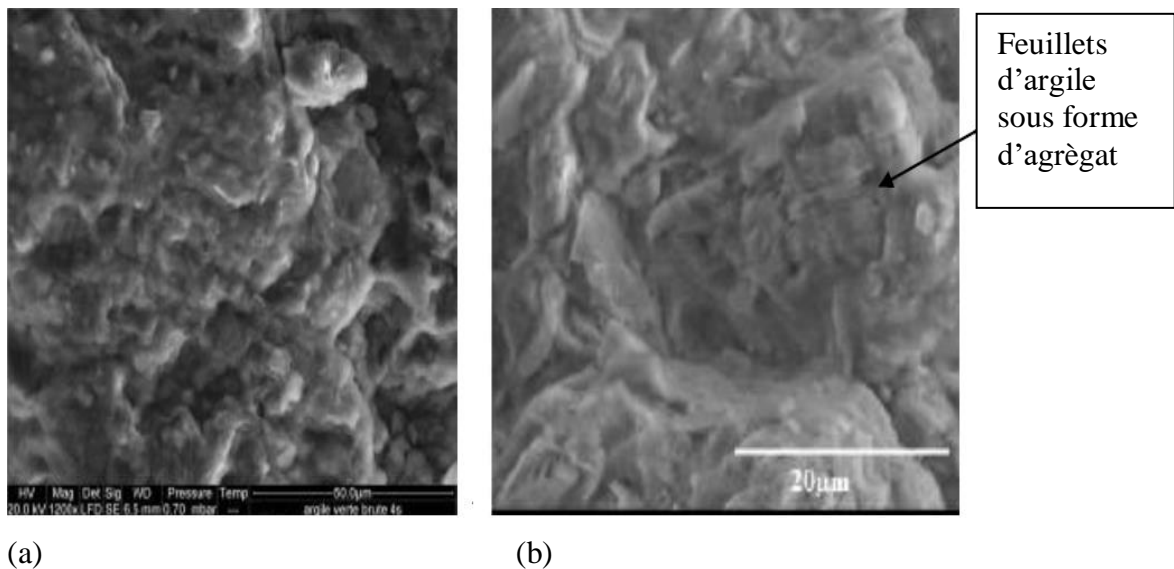
**Figure I.3:** Représentation schématique de l'organisation texturale d'une argile (Touret, 1988)

### I.2.3.3. Texture d'une argile

Tout comme la structure cristalline des argiles, la texture est un paramètre important, car il conditionne les propriétés physiques du minéral (Caillère et Hénin, 1959). La texture concerne l'assemblage des minéraux sous forme d'agrégats ainsi que l'arrangement ou distribution spatiale de ces agrégats (Audiguier, 1979). Aubouin et al, (1968) définissent la texture comme « la forme, la dimension et la disposition d'un certain nombre de minéraux naturellement groupés en une population au sein de la roche ». Cette organisation peut faire l'objet de différentes classifications (Van Olphen, 1963 ; Collins et Mc Gown, 1974 et Sergejev et al, 1978). Ces classifications sont valables pour les sols argileux. Gens et Alonso (1992) ont établi une classification pour les sols gonflants, à partir des travaux de Collins et

Mc Gown (1974). Cette classification se base sur l'organisation des particules élémentaires argileuses :

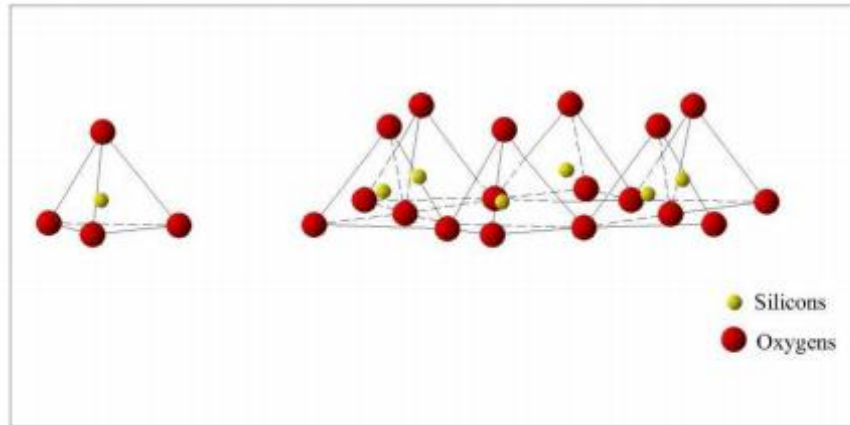
- Texture « matricielle »: texture dont la base est une pâte homogène avec les particules élémentaires disséminées dans cette pâte. Cette texture est caractéristique des sols naturels ou des sols compactés du côté humide de l'optimum Proctor (figure I.4 a).
- Texture « agrégée » ou « compactée »: texture compactée avec les particules élémentaires assemblées sous forme de mottes ou d'agrégats. Cette texture est caractéristique des sols compactés, du côté sec de l'optimum Proctor (figure I.4 b).



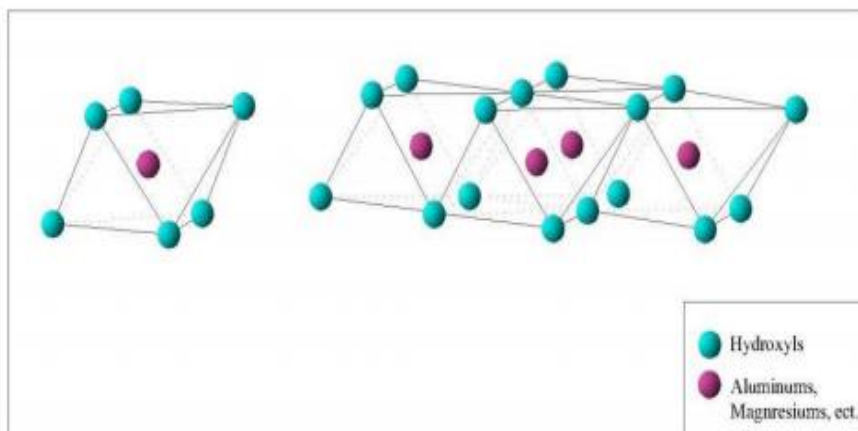
**Figure I.4** : Photographies MEB de texture matricielle (a; Argile Verte de Romainville) et texture agrégée (b ; Argile de Bavent) (Vincent et al, 2009)

#### I.2.3.4. Minéralogie des argiles

Les minéraux argileux sont une structure cristalline en forme de feuille, constituée d'aluminosilicates hydratés et d'ions métalliques. Il existe deux unités cristallines fondamentales de minéraux argileux, à savoir tétraédrique et octaédrique. Une unité tétraédrique appartient à quatre silicium renfermant de l'oxygène, tandis qu'une unité octaédrique est composée de six atomes d'oxygène ou d'hydroxyles situés aux angles des ions aluminium, magnésium, fer ou autres. Les schémas de base des unités tétraédriques et octaédriques sont présentés aux figures (I.5) et (I.6), respectivement.



**Figure I.5 :** Elément tétraédrique (Luckham et al, 1999)



**Figure I.6 :** Elément octaédrique (Luckham et al, 1999)

Sur la base de la disposition des piles, de la liaison, de la substitution isomorphe et de la présence d'ions métalliques, différents minéraux argileux peuvent être constitués. Certains des minéraux argileux courants sont la kaolinite, la montmorillonite, l'illite, la muscovite, etc. (Mitchell et Soga, 2005). Cependant, à des fins d'ingénierie, la kaolinite, la montmorillonite et l'illite revêtent une importance particulière dans le domaine de l'ingénierie géotechnique (Holtz et Kovacs, 1981).

#### **I.2.3.4.1. Kaolinite**

La kaolinite est connue comme un minéral 1:1 car sa structure cristalline consiste en une feuille tétraédrique et une feuille octaédrique. Les couches de base successives sont liées ensemble par liaison hydrogène entre les hydroxyles de la feuille octaédrique et l'oxygène de la feuille tétraédrique. En raison de cette liaison hydrogène, un grand cristal de kaolinite est développé. L'épaisseur de la couche cristalline de base est de 0,72 nm. Un schéma de la structure cristalline de la kaolinite est présenté dans la figure (I.7).

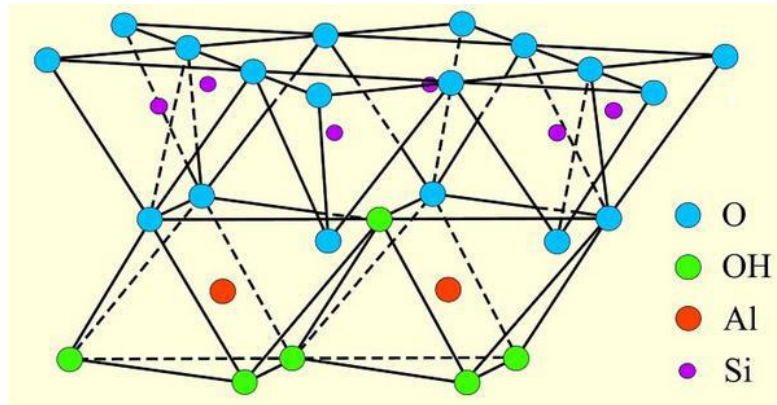


Figure I.7 : Structure du cristal de kaolinite (<http://pubs.usgs.gov>)

Comme la liaison hydrogène est très forte, l'hydratation ne peut pas se produire dans le cristal de kaolinite. Toutefois, une charge négative nette peut être développée dans la structure en raison de liaisons et substitution d'ions. En règle générale, les groupes hydroxyle exposés peuvent être remplacés par des ions échangeables et  $\text{Al}^{3+}$  peut remplacer le  $\text{Si}^{4+}$ . De plus, la présence d'un ion divalent peut provoquer une substitution d'ion divalent à  $\text{Al}^{3+}$ . Les plages de capacité d'échange de cations dans la kaolinite sont comprises entre 3 et 15 méq/100 g. La morphologie de surface du minéral de kaolinite est caractérisée par des plaques hexagonales à six côtés. La dimension latérale et l'épaisseur des plaques sont respectivement comprises entre 0,1 et 0,4  $\mu\text{m}$  et entre 0,05 et 2  $\mu\text{m}$ . En raison de la structure cristalline et de la morphologie, la surface spécifique typique de la kaolinite varie de 10 à 20  $\text{m}^2/\text{gm}$ .

#### I.2.3.4.2. Montmorillonite

L'unité de base de la montmorillonite était constituée de deux feuilles de silice et d'une feuille d'alumine. Ce minéral est appelé minéral 2:1, la distance entre les cellules unitaires étant d'environ 0,96 nm. Le dessus des feuilles de silice est lié par la force de Van der Waals et il existe un déficit net en charge négative dans la feuille octaédrique. Par conséquent, l'eau et les ions échangeables peuvent entrer et briser la couche. L'unité structurale de la montmorillonite est présentée dans la figure (I.8). En raison de la séparation et de l'hydratation des couches, le minéral de montmorillonite est caractérisé par un comportement gonflant. En plus de cela, les minéraux de montmorillonite montrent une substitution isomorphe importante pour  $\text{Si}^{4+}$  et  $\text{Al}^{3+}$  par les cations disponibles.

Selon la littérature,  $\text{Al}^{3+}$  peut remplacer jusqu'à 15% de  $\text{Si}^{4+}$  dans la feuille tétraédrique (Mitchell et Soga, 2005). Le déficit de charge global résultant de la substitution d'ions varie de 0,5 à 1,2 par cellule. Les plages typiques de capacité d'échange de cations de la montmorillonite sont comprises entre 80 et 150 méq/100 g.

La morphologie de surface du minéral de montmorillonite est caractérisée par des flocons équi-dimensionnels et peut apparaître sous forme de films minces. En outre, une contrainte directionnelle peut provoquer une substitution importante de  $\text{Fe}^{3+}$  et / ou de  $\text{Mg}^{2+}$  par  $\text{Al}^{4+}$ , ce qui peut entraîner une structure en forme d'aiguille dans la montmorillonite. En raison de la configuration inhérente et de la grande activité de surface, la surface spécifique (hors zone intercouche) de la montmorillonite peut varier de 700 à 840  $\text{m}^2/\text{gm}$ .

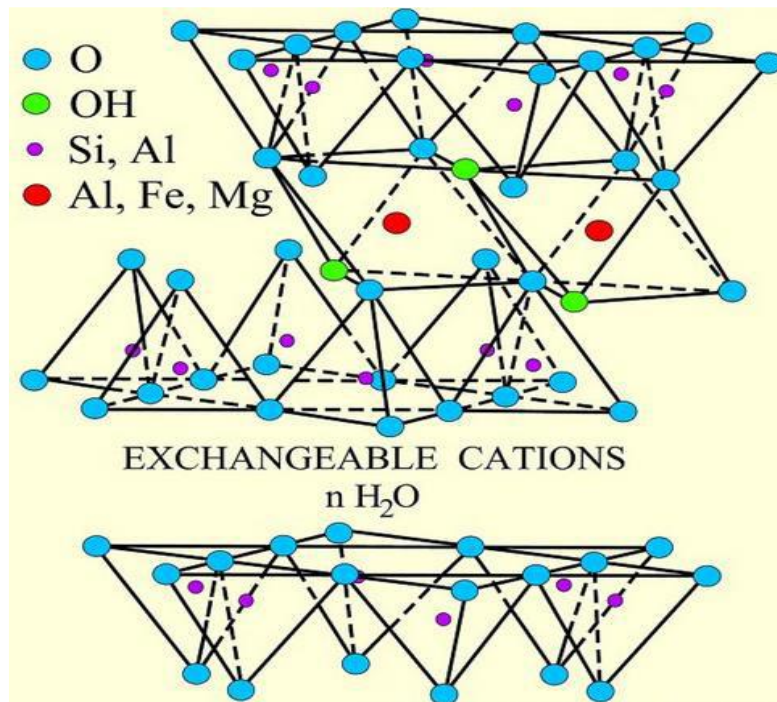


Figure I.8 : Structure du cristal de montmorillonite (<http://pubs.usgs.gov>)

#### I.2.3.4.3. Illite

Le minéral Illite est composée de deux feuilles de silice et d'une feuille d'alumine. Il est appelé minéral 2:1. La configuration de base de l'unité est similaire à celle de la montmorillonite; cependant, les couches de base sont liées par du potassium. Les diamètres d'ouverture hexagonale dans la feuille de silice sont exactement similaires au rayon ionique du potassium ( $\text{K}^+$ ). Par conséquent, la présence de potassium ( $\text{K}^+$ ) rend la liaison entre les couches très forte. Le schéma de la structure d'illite est présenté dans la figure (I.9). La carence globale en charge concerne principalement les feuilles de silice et se situe entre 1,3 et 1,5 unité par cellule. La charge supplémentaire est compensée par des ions potassium ( $\text{K}^+$ ) non échangeables. La capacité d'échange cationique typique de la montmorillonite est comprise entre 10 et 40 méq/100 g.

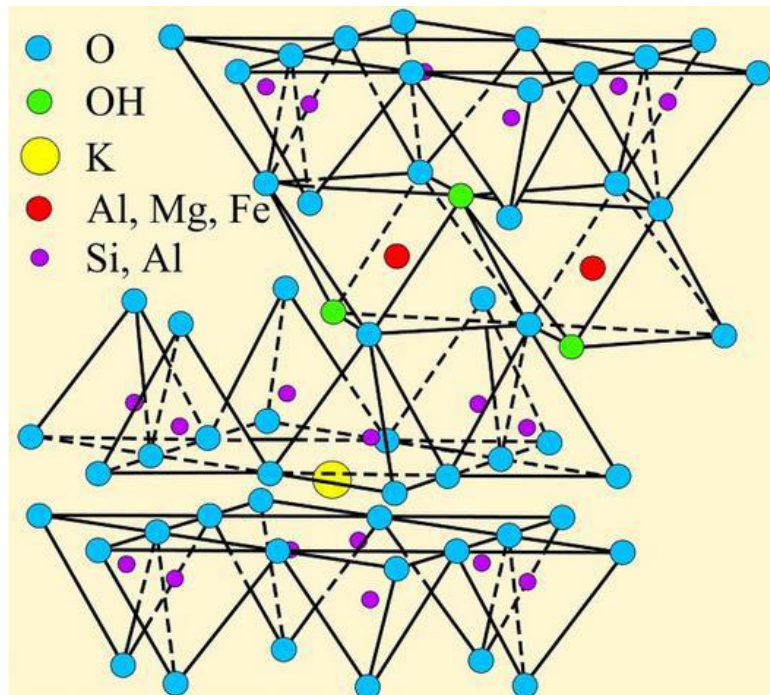


Figure I.9 : Structure du cristal illite (<http://pubs.usgs.gov>)

La morphologie de l'illite en tissu se caractérise par des petites particules feuilletées hexagonales bien cristallisées. Selon Mitchell et Soga (2005), la surface de ce minéral varie de 65 à 100 m<sup>2</sup>/gm. La formule chimique typique des minéraux argileux est présentée dans le tableau (I.1).

Tableau I.1. Formules chimiques des minéraux argileux (Yang, 2002)

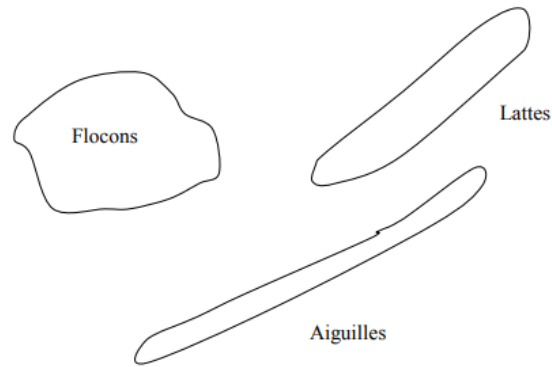
Minérales d'Argile	Type de couche	Formule chimique typique
Kaolinite	1 : 1	[Si <sub>4</sub> ]Al <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub> . n H <sub>2</sub> O (n= 0 ou 4)
Montmorillonite	2 : 1	M <sub>x</sub> [Si <sub>8</sub> ]Al <sub>3.2</sub> Fe <sub>0.2</sub> Mg <sub>0.6</sub> O <sub>20</sub> (OH) <sub>4</sub>
Illite	2 : 1	M <sub>x</sub> [Si <sub>6.8</sub> Al <sub>1.2</sub> ]Al <sub>3</sub> Fe <sub>0.25</sub> Mg <sub>0.75</sub> O <sub>20</sub> (OH) <sub>4</sub>

### I.2.3.5. Propriétés des argiles

#### I.2.3.5.1. Forme et surface spécifique

Les argiles se présentent sous trois formes (figure I.10) :

- En flocons, caractérisés par une même dimension dans les deux directions et une épaisseur équivalente à 1/20<sup>ème</sup> de la longueur.
- En latte, avec une dimension plus longue, épaisseur toujours équivalente à 1/20<sup>ème</sup> de la longueur.
- En aiguilles, deux dimensions identiques et la 3<sup>ème</sup> beaucoup plus grande (assez rare).



**Figure I.10** : Forme des particules argileuses (Velde, 2013)

La taille fine des argiles leur confère une surface spécifique importante par rapport au volume des particules. Les particules d'argiles présentent des surfaces spécifiques très importantes et peuvent de ce fait attirer un grand nombre de molécules d'eau et d'ions, et exercer entre elles d'importantes forces d'interactions. Ces forces influent amplement sur le comportement mécanique des argiles. L'intensité de la charge électrique est liée à la surface spécifique de la particule. Dans le cas des argiles, cette surface varie entre 10 à 20 m<sup>2</sup>/g et peut atteindre 800 m<sup>2</sup>/g dans le cas de la montmorillonite sodique. Le tableau (I.2) indique les valeurs caractéristiques des surfaces des grandes familles argileuses.

**Tableau I.2:** Surface spécifique des particules argileuses (Bultel, 2001)

Nom	Type	Nombre de feuillets par particule	Diamètre d'une particule (µm)	Épaisseur d'une particule (µm)	Surface spécifique en m <sup>2</sup> /g
<b>Kaolinite</b>	1 :1	100-200	0.1-4	1-10	10-20
<b>Montmorillonite</b>	2 :1	1	0.1	0.001	700-840
<b>Illite</b>	2 :1	1-10	0.1-1	0.003-0.01	65-100
<b>Chlorite</b>	2 :1 :1	1	0.1	0.005	800

#### I.2.3.5.2. Capacité d'échange cationique

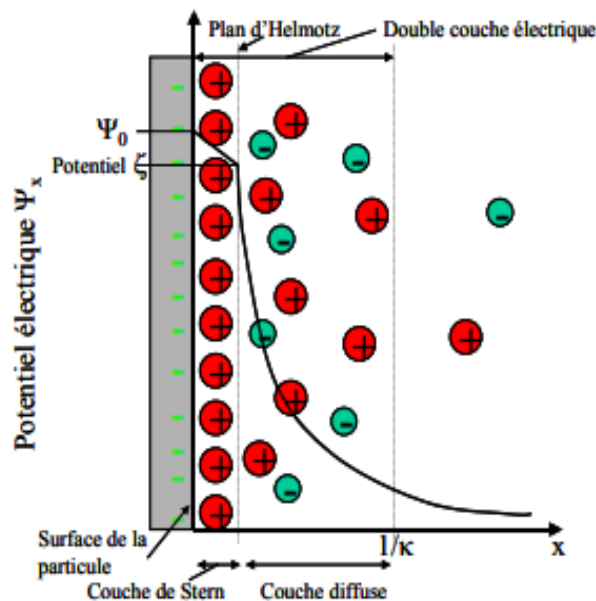
Les liaisons entre les particules des sols formant les minéraux argileux sont influencés par la magnitude de la charge négative résiduelle des minéraux (dues aux substitutions isomorphiques) dans le réseau cristallin, de la concentration et de la distribution des cations disponibles pour équilibrer cette charge. La capacité d'échange représente donc, la charge (sous forme de cations attirés à la surface de la particule) nécessaire pour l'électro-neutralité. La capacité d'échange cationique est exprimée en milliéquivalents par 100g d'argile. Le tableau (I.3) indique les valeurs caractéristiques du CEC des grandes familles argileuses.

**Tableau I.3** : Capacité d'échange cationique des particules argileuses (Hafsi, 1993)

Argiles	CEC (meq/100gr)
Montmorillonite $\text{Na}^+$	150
Montmorillonite $\text{Ca}^{2+}$	80
Illite	10-40
Kaolinite	3-15
Élément non argileux	-

### I.3.5.3. Double couche électrique

La population des cations attirés par la surface pour rétablir l'électroneutralisation au voisinage de celle-ci peut être séparée en deux couches. Une couche de cations immobiles liées à la surface, appelée couche de Stern, et une couche de cations mobiles au voisinage de la surface appelée couche diffuse. La limite entre la couche de Stern et le couche diffuse est appelée plan d'Helmholtz ou plan de cisaillement. L'ensemble de ces deux couches constitue la double couche électrique de la particule en suspension. La concentration en ions positifs est donc importante au voisinage de la surface et décroît progressivement lorsqu'on s'éloigne de la particule. Au voisinage de la surface, il y a également un déficit en anions, repoussés de la surface par les forces électrostatiques. Cette différence de concentration entre anions et cations crée un potentiel électrique (Rinaldi et Cuestas, 2002). Nous avons présenté schématiquement l'évolution de la concentration en ions, et celle du potentiel électrique, en fonction de la distance à la surface de la particule sur les figures (I.11 et I.12)



**Figure I.11** : Représentation schématique de la double couche électrique et de l'évolution du potentiel électrique en fonction de la distance des particules

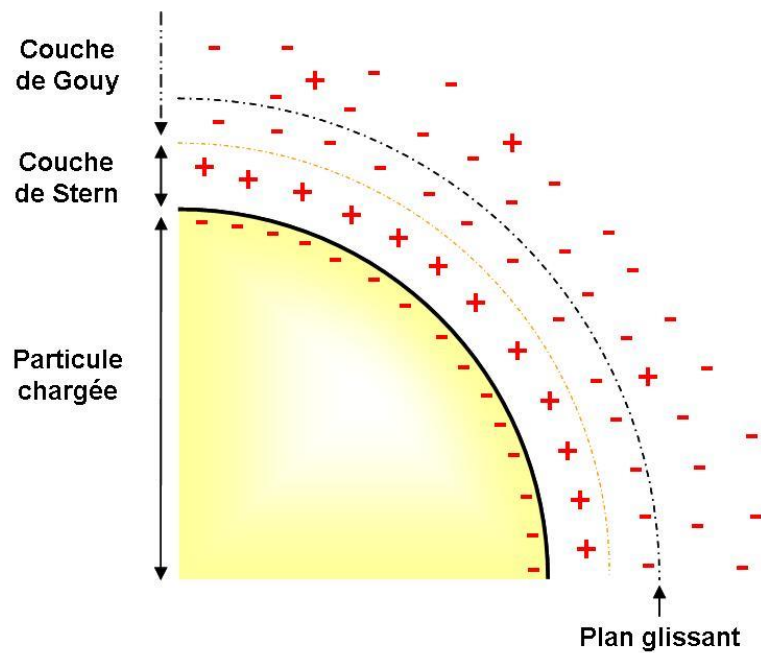


Figure I.12 : Schéma des constituants de la double couche ionique

Le potentiel électrique vaut  $\psi_0$  à la surface de la particule et décroît linéairement dans la couche de Stern. La valeur du potentiel au plan d'Helmholtz est le potentiel zêta  $\zeta$ . C'est la seule valeur accessible expérimentalement. Au-delà du plan d'Helmholtz, le potentiel électrique décroît exponentiellement selon la théorie de Gouy-Chapman (Équation I.1). A une distance infinie du feuillet, le potentiel s'annule puisque l'électro-neutralité est respectée dans la solution.

L'épaisseur de la double couche électrique est régie principalement par la concentration en électrolyte de la solution et par valence des ions présents. Plus la force ionique est élevée, plus la double couche sera comprimée. Cette double couche offre aux particules argileuses leur stabilité en dégageant un effet répulsif lorsque deux particules s'approchent l'une de l'autre. On comprend donc que l'augmentation de la concentration en électrolyte aura tendance à précipiter la floculation de la suspension en réduisant l'épaisseur de la double couche électrique garante de la stabilité des particules. Ce phénomène est schématisé sur la figure (I.13)

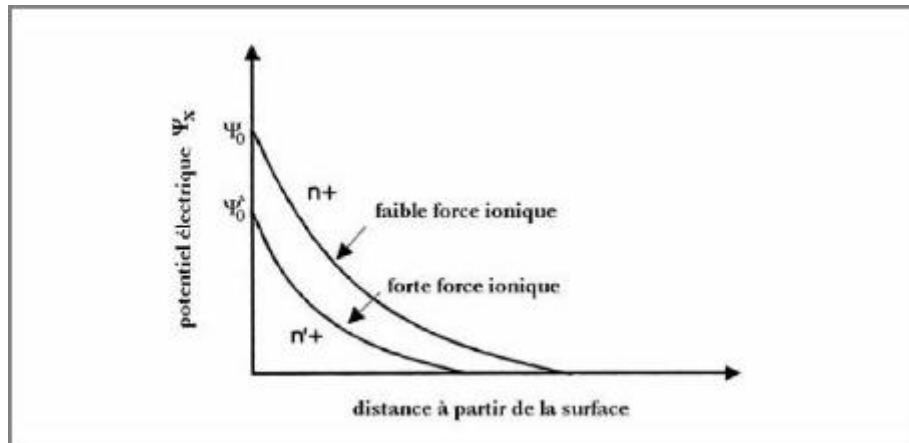
$$\psi_x = \zeta \cdot \exp[-k(x)] \quad (\text{I.1})$$

Avec :

$\psi_x$  : Valeur du potentiel à une distance  $x$

$\zeta$  : Potentiel zêta

$k$  : Épaisseur de la double couche électrique



**Figure I.13** : Représentation schématique de la chute du potentiel de surface et de la contraction de la double couche électrique, dues à une augmentation de la force ionique (Luckham et al, 1999).

### I.3. Résistivité électriques des sols

#### I.3.1. Définition

La résistivité électrique est un paramètre important dans le domaine géophysique. Elle représente la capacité du sol à s'opposer au passage d'un courant injecté. Les principaux avantages de la résistivité électrique sont basés sur sa grande sensibilité aux faibles variations électriques du sous-sol, sa vitesse d'acquisition des mesures et son caractère non destructif.

La résistivité électrique  $\rho$  d'un milieu est la propriété physique qui détermine la capacité de ce milieu à s'opposer au passage d'un courant électrique. La résistivité est la résistance ohmique d'un cylindre de section A et de longueur unitaire L (Chapellier, 2000).

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (\text{I.2})$$

Où  $\rho$  est la résistivité électrique du matériau exprimée en ( $\Omega \cdot m$ ), A est l'aire de la section transversale des plaques conductrices ( $m^2$ ), L est la distance de séparation entre les deux plaques conductrices (m) et R est la résistance électrique ( $\Omega$ )

La résistivité électrique représente l'inverse de la conductivité électrique  $\sigma$  (capacité du milieu à laisser passer un courant électrique) qui est exprimée en Siemens. Dans les sols, le passage du courant se fait selon un mode dit électrolytique; ce sont les ions contenus dans l'eau du milieu qui transportent les charges. On parle de conductivité électrolytique volumique quand les déplacements de charges s'effectuent dans l'eau interstitielle et de conductivité électrolytique surfacique lorsque les déplacements sont liés aux ions présents à la surface des particules solides (Cousin et al, 2012).

### **I.3.2. Origine de la conductivité électrique des sols :**

Le sol est un milieu hétérogène triphasique. Le courant peut être, en théorie, conduit par chacune des 3 phases (gazeuse, liquide, solide). Cependant, la phase gazeuse est un très bon isolant. La conduction du courant a lieu dans les phases liquides et solides, et ce, grâce aux phénomènes suivants :

- La phase liquide conduit le courant par l'intermédiaire des ions et des complexes ioniques qui s'y trouvent. Il s'agit d'une conduction électrolytique. La valeur de la conductivité dépend de la nature des ions présents (en raison de leur différence de mobilité électrique) et de leurs concentrations.
- La phase solide, qui est l'ensemble des constituants du sol, est isolante dans le cas de matériaux électriquement neutres et isolants (cas du sable pur, composition chimique  $\text{SiO}_2$ ), ou conductrice dans le cas contraire. Des déficits de charge à la surface des minéraux, et notamment des minéraux argileux, conduisent à l'adsorption d'ions sur ces surfaces qui sont à l'origine d'une conduction dite de surface. Les électrons libres, qui se trouvent en surface des constituants métalliques du sol, assurent quant à eux la propagation d'un courant électrique de nature électronique. (Sebastien Schneider, 2008).

### **I.3.3. Avantages de la mesure de résistivité**

La profondeur d'investigation d'une prospection électrique s'étend de quelques centimètres à plusieurs kilomètres de profondeur ce qui en fait une méthode utilisée dans divers domaines des sciences de la Terre : en recherche minière, en construction de bâtiment, en hydrogéologie, etc.

Cette grandeur physique est d'une part très liée à la teneur en argile qui présente un intérêt tout particulier pour les pédologues et montre d'autre part une gamme de variation extrêmement étendue (plusieurs décades) selon les matériaux géologiques. La méthode électrique est en outre une méthode fiable, robuste, non destructive et peu, voire non influencée, par les éléments extérieurs lors de la prospection (contrairement à la méthode électromagnétique). Sa mise en œuvre s'appuie sur un large choix de dispositifs dont les configurations et parfois même la mécanisation permettent de prospecter des surfaces importantes rapidement ou encore d'investiguer plusieurs profondeurs (investigation par commutation d'électrode par exemple). (Buvat, 2012)

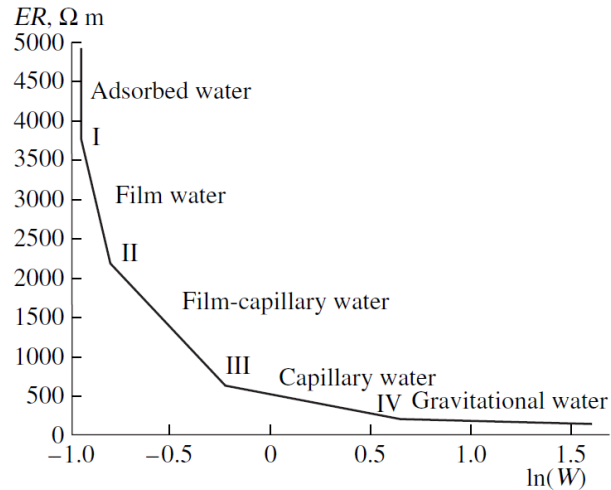
### **I.3.4. Paramètres géotechniques affectant la résistivité électrique**

Plusieurs facteurs peuvent affecter la résistivité électrique du sol. La teneur en humidité est identifiée comme l'un des principaux facteurs de modification de la résistivité du sol (Mc Carter, 1984). L'effet du degré de saturation (Abu-Hassanein et al, 1996), du contenu organique (Ekwue et Bartholomew, 2011), de la composition de l'eau dans les pores (Kalinski et Kelly, 1993) et de la formation géologique (Giao et al, 2003) sont également importants. En raison de l'interaction de l'humidité avec la charge de surface des particules d'argile, la teneur en ions a un effet significatif sur la conductivité électrique des sols argileux (Fukue et al, 1999 et Yang, 2002). Une discussion détaillée sur les facteurs d'influence de la résistivité électrique est présentée dans les sous-sections suivantes.

#### **I.3.4.1. Teneur en humidité**

Le comportement technique des sols argileux est fortement influencé par la présence d'humidité. En raison de leur activité de surface élevée, les particules d'argile sont facilement hydratées par l'eau et entourées de plusieurs couches de films d'humidité. L'eau adjacente à la structure cristalline du sol argileux est connue sous le nom d'eau adsorbée. La conductivité électrique est due au déplacement des ions dans l'eau interstitielle. Lorsque la teneur en humidité augmente du temps de séchage à l'air à saturation totale, les ions adsorbés dans les particules solides sont précipités dans l'eau interstitielle. Les charges électriques libres entraînent une réduction de la résistivité électrique sous l'application d'un champ électrique. Pozdnyakov (2006) a divisé la résistivité électrique par rapport au logarithme népérien de la courbe de teneur en humidité en divers segments, comme le montre la figure (I.14). Les segments de la courbe ont été désignés comme eau adsorbée, eau filmée, eau capillaire filmée, eau capillaire l'eau et l'eau gravitationnelle. Selon l'auteur, la résistivité électrique a diminué rapidement avec l'augmentation de la teneur en humidité dans la zone d'eau d'adsorption. Bien que les ions des molécules d'eau soient immobiles dans la zone d'eau adsorbée, l'eau dipolaire crée un chemin conducteur pour le courant électrique. Par conséquent, la résistivité électrique a sensiblement diminué avec l'augmentation de l'humidité dans la zone d'adsorption. Cependant, le taux de réduction a diminué dans la zone d'eau en film en raison de l'augmentation de la force de Van der Waals. Lorsque l'épaisseur maximale possible du film d'eau a été développée, l'eau des pores passe du film à la fissure. La force d'attraction moléculaire est supérieure à la force capillaire dans la zone d'eau capillaire en film. Par conséquent, la résistivité électrique a diminué de manière moins spectaculaire dans la zone

d'eau capillaire et capillaire du film. Dans la zone d'eau gravitationnelle, la mobilité des charges électriques devient indépendante du mouvement des ions molécules d'eau et la résistivité électrique est presque indépendante de la teneur en eau.



**Figure I.14 :** Relation entre l'humidité du sol et la résistivité électrique (Pozdnyakov, 2006)

### I.3.4.2. La porosité

La porosité  $n$  d'un matériau est définie par le rapport du volume des vides sur le volume total d'un échantillon.

Lorsque la porosité diminue et que la taille des pores diminuent et la longueur des capillaires qui relient les pores augmente. La longueur effective  $L$  du trajet parcouru par le courant électrique est ainsi augmentée et la section transversale effective  $A$  est diminuée, puisque les pores sont d'une taille plus petite. (Chapellier, 2000)

### I.3.4.3. Caractéristiques de l'eau des pores

La conductivité électrique dans un milieu poreux dépend de la mobilité des ions présents dans le fluide interstitiel. L'hydratation des sels précipités conduit à la formation d'électrolytes dans l'eau interstitielle des sols argileux. Les cations et les anions hydratés se déplacent vers la cathode et l'anode sous le champ électrique appliqué. Le mouvement des ions atteint une vitesse limite lorsque le champ électrique appliqué et les interactions de charge (force de traînée visqueuse) sont en équilibre (Santamarina et al, 2001). La mobilité des ions est définie comme la vitesse terminale d'un ion soumis à un champ électrique unitaire et se présente sous la forme d'une équation d'Einsten-Nernst, présentée ci-dessous:

$$u = \frac{V(\text{ion})}{E} = \frac{ze}{6\pi\eta \cdot R_h} \quad (\text{I.3})$$

Tels que,  $v(\text{ion})$  est la vitesse de l'ion (m/s),  $E$  est le champ électrique (V/m),  $z$  est la valence de l'ion,  $\eta$  est la viscosité de la solution (Pa.s),  $e$  est la charge de l'électron ( $1,602 \times 10^{-19}$  C) et  $R_h$  est le rayon de Stokes des ions hydratés. Un résumé de la mobilité ionique de différents ions est présenté dans le tableau (I.4).

**Tableau I.4.** Mobilité ionique des ions à 25°C (Santamarina et al. 2002)

Cation	Mobilité ionique	Anion	Mobilité ionique
H <sup>+</sup>	$36.2 \times 10^{-8}$	OH <sup>-</sup>	$20.5 \times 10^{-8}$
K <sup>+</sup>	$7.6 \times 10^{-8}$	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	$8.3 \times 10^{-8}$
Ba <sup>2+</sup>	$6.6 \times 10^{-8}$	I <sup>-</sup>	$8.2 \times 10^{-8}$
Al <sup>3+</sup>	$6.5 \times 10^{-8}$	Br <sup>-</sup>	$8.1 \times 10^{-8}$
Ca <sup>2+</sup>	$6.2 \times 10^{-8}$	Cl <sup>-</sup>	$7.9 \times 10^{-8}$
Mg <sup>2+</sup>	$5.5 \times 10^{-8}$	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	$7.4 \times 10^{-8}$
Na <sup>+</sup>	$5.2 \times 10^{-8}$	F <sup>-</sup>	$5.7 \times 10^{-8}$
Li <sup>+</sup>	$4.0 \times 10^{-8}$	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	$4.6 \times 10^{-8}$

La conductivité électrique est affectée par les ions présents dans le sol en raison de la mobilité ionique variée. Différents ions tels que H<sup>+</sup>, OH<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> sont présents dans le sol. Ils n'affectent pas la conductivité de la même manière en raison de la différence de mobilité des ions.

#### I.3.4.5. Fraction argileuse et limites d'Atterberg

Abu Hassanein et al, (1996) ont évalué la variation de la résistivité électrique avec les limites d'Atterberg des échantillons de sol. Les échantillons ont été compactés à des teneurs optimales en humidité et à des poids d'unités sèches en utilisant la méthode Proctor normal. Il a été observé que les sols présentant une WL et un IP plus élevés avaient une résistivité inférieure à celle présentée dans la figure (I.15). Cependant, l'échantillon de sol avec 47% de fraction grossière a montré une résistivité élevée. La variation de la résistivité avec l'augmentation de WL et d'IP a été expliquée à l'aide de la minéralogie des échantillons. Les échantillons d'argile à teneur en smectite (WL et IP élevés) sont plus actifs et présentent une conductivité de surface plus élevée.

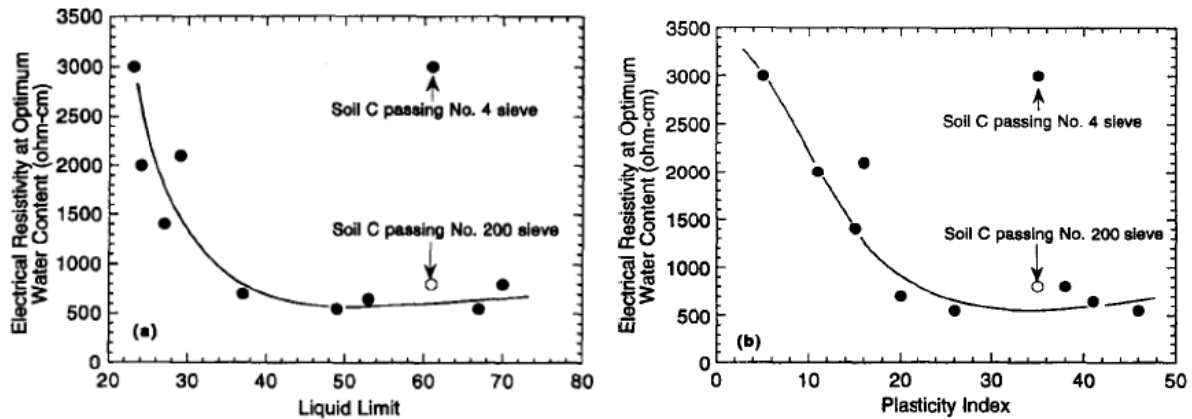


Figure I.15 : Variation de la résistivité électrique avec les limites d'Atterberg. (Abu Hassanein et al, 1996)

La fraction d'argile est également une indication de la présence d'une charge de surface d'un échantillon de sol. L'activité de surface et l'affinité pour l'eau augmentent avec l'augmentation de la fraction d'argile. Par conséquent, la résistivité électrique varie avec la fraction d'argile.

#### I.3.4.5. Capacité d'échange de cations et surface spécifique

La contribution des cations adsorbés est importante pour la résistivité électrique des sols à grains moyens et fins. Il ressort clairement de la littérature que les propriétés physico-chimiques telles que les ions adsorbés, la conductivité de l'eau interstitielle et la charge de surface sont corrélées à la capacité d'échange cationique (CEC) des sols (Friedman, 2005; Tabbagh et Cozenza, 2007; Schwartz et al, 2008). Kibria et Hossain (2012) ont présenté une étude sur les réponses de résistivité électrique d'argiles très plastiques à différentes teneurs en humidité et poids unitaires. Les auteurs ont indiqué que l'effet de la surface spécifique sur la conductivité électrique était important dans un sol à grain fin. Selon l'étude, les sols ayant une surface spécifique élevée ont besoin d'une grande quantité d'humidité pour la formation d'un film d'eau.

#### I.3.4.6. Température et viscosité

Les variations de résistivité électrique de l'électrolyte en fonction de la concentration des minéraux et de la température sont importantes. La viscosité du fluide varie en fonction de la température. Une augmentation de la température diminue la viscosité de l'eau. Les ions contenus dans l'eau deviennent alors plus mobiles. Cette augmentation de la mobilité des ions

augmente leur vitesse de déplacement sous une différence de potentiel et il s'ensuit une augmentation de la conductivité électrique (Chapellier, 2000)

### **I.3.5. Mesure de la résistivité électrique**

#### **I.3.5.1. Mesure au laboratoire**

Les propriétés électriques peuvent être étudiées en laboratoire en courant continu (DC) ou courant alternatif (AC). Lors de la caractérisation du matériau en courant alternatif, une fréquence comprise entre faible fréquence et micro-ondes peut être utilisée. D'autre part, le principe de fonctionnement de la méthode DC est associé à la loi d'Ohm où la chute de tension aux bornes des électrodes est mesurée sous l'application d'un courant électrique. Sur la base de la configuration des électrodes, les tests de résistivité peuvent être réalisés avec des configurations à deux et quatre électrodes. Une brève description des deux méthodes est présentée ci-dessous :

- **Système à deux électrodes**

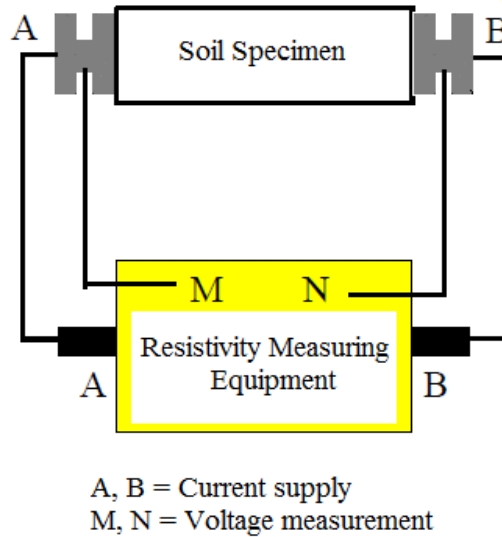
Les mesures à deux électrodes de la résistivité électrique sont décrites dans la méthode d'essai normalisée (ASTM G187-05). Une boîte de l'échantillon du sol à deux électrodes, une source de courant, un équipement de mesure de la résistance et des connexions électriques sont utilisés dans les essais, comme nous montre la figure (II.16). Dans cette méthode, les mêmes électrodes sont utilisées pour l'application actuelle et les mesures de tension. La boîte de l'échantillon du sol à deux électrodes doit être faite d'un matériau isolé et durable pour éviter les courts-circuits pendant les expériences. Deux plaques d'extrémité en métal poli et résistant à la corrosion peuvent être utilisées pour les mesures de courant et de tension. Il est recommandé de corriger la résistivité mesurée à une température 15,5 °C selon la norme (ASTM G187-05), selon l'équation suivante:

$$\rho_{15.5} = \frac{(24.5+T)}{40} \rho_T \quad (I.4)$$

Avec,  $\rho_{15.5}$  est la résistivité corrigée à 15.5 °C,  $\rho_T$  est la résistivité mesurée à température moyenne, T = température au cours de l'expérience.

Santamarina, (2001) a indiqué les erreurs possibles dans les mesures de résistivité à deux électrodes. La conduction électrique dans l'électrode et le câble implique généralement un flux d'électrons; Cependant, le courant est principalement ionique dans le sol. Par conséquent, l'accumulation de charge peut se produire dans l'interface sol-métal. Ce phénomène est appelé polarisation et constitue la principale source d'erreur dans une mesure à deux électrodes. En

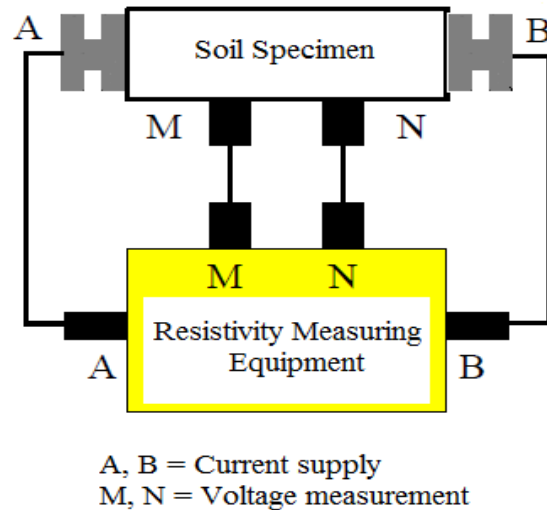
plus de la polarisation, la présence d'un entrefer à l'interface, la présence d'un champ électrique non uniforme et la possibilité d'une réaction chimique peuvent entraîner une erreur supplémentaire dans cette méthode. La configuration d'essai d'un système à deux électrodes est présentée dans la figure (I.16).



**Figure I.16:** Système de mesure de la résistivité électrique à deux électrodes (Kibiria, 2014)

#### ▪ Système à quatre électrodes

Un courant est appliqué en utilisant deux électrodes situées à l'extrémité de la boîte de l'échantillon du sol, la chute de potentiel est mesurée entre deux points de l'échantillon dans un système à quatre électrodes. Cette méthode présente des avantages par rapport aux mesures à deux électrodes, car le potentiel est déterminé dans l'échantillon qui est éloigné du processus de transfert de charge des électrodes de courant. Par conséquent, la polarisation peut être largement évitée en utilisant une méthode de mesure à quatre électrodes. De plus, cette méthode mesure la tension dans l'échantillon; ainsi, le champ électrique réel de l'échantillon peut être rencontré pendant les essais. Comme les électrodes de tension et de courant sont différentes, l'effet possible de la réaction chimique sur la mesure de la résistivité électrique peut ne pas être significatif dans ce cas. La configuration expérimentale des mesures à quatre électrodes est présentée dans la figure (I.17).



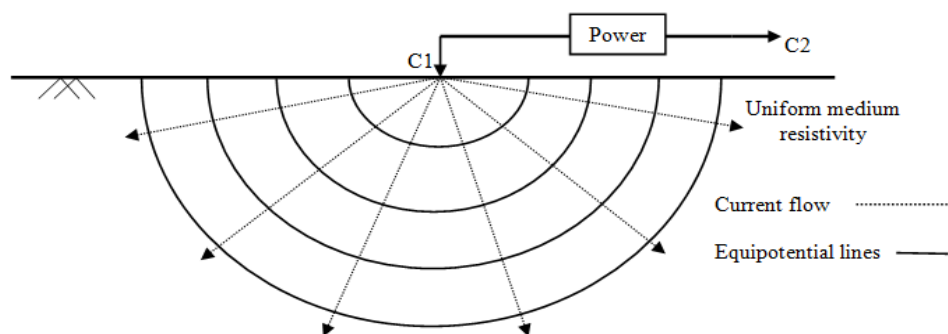
**Figure I.17:** Système de mesure de la résistivité électrique à quatre électrodes (Kibiria, 2014)

### I.3.5.2. La mesure in situ

La mesure de la résistivité électrique a été utilisée dans l'étude de la géologie de surface depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle. Cependant, cette méthode est devenue très populaire ces dernières années avec l'amélioration des méthodes d'essai et du traitement des données. À l'heure actuelle, les mesures géoélectriques sont devenues un outil utile en géophysique, en science des sols, en études hydrogéologiques, en génie de l'environnement et en géotechnique (Santamarina, 2001 et Kibiria, 2014).

Un courant ( $I$ ) est injecté à travers l'électrode de courant  $C1$  dans un demi-espace homogène isotrope de la terre (figure I.18). Le potentiel électrique diminue inversement avec l'augmentation de la distance de la source de courant. La distribution de courant suit une direction radiale vers l'extérieur à travers la zone de coque de  $2\pi r^2$ , perpendiculaire aux lignes équipotentielles. Le potentiel pour une électrode peut être mentionné comme:

$$\phi = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (I.5)$$



**Figure I.18 :** Flux de courant et lignes équipotentielles dues à une source ponctuelle (Kibiria, 2014)

Typiquement, deux électrodes de courant sont utilisées dans un levé de résistivité conventionnel en tant qu'extrémité positive et négative. Dans ce cas, la distribution de potentiel a un motif symétrique autour du plan vertical centré au milieu des électrodes. Le potentiel de configuration à deux électrodes peut être défini comme:

$$\phi = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_{c1}} - \frac{1}{r_{c2}} \right) \quad (\text{I.6})$$

Où,  $r_{c1}$  et  $r_{c2}$  sont les distances du point, mesuré à partir des premières et secondes électrodes de courant.

Selon la figure (I.19), l'équation peut être étendue pour un système à quatre électrodes

$$\phi = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_{c1}} - \frac{1}{r_{c2}} - \frac{1}{r_{c3}} + \frac{1}{r_{c4}} \right) \quad (\text{I.7})$$

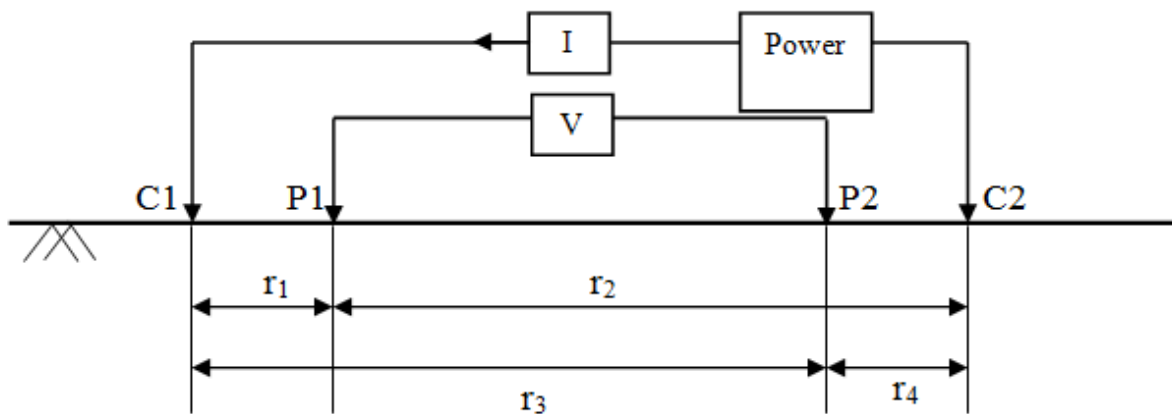


Figure I.19 Mesure à quatre électrodes de la résistivité in situ (Kibiria, 2014)

Bien que les équations présentées ici soient applicables à un milieu isotrope homogène, les relevés de terrain réels sont associés à la sub-surface anisotrope et inhomogène. Par conséquent, une résistivité apparente est calculée à partir du courant mesuré et du potentiel selon l'équation suivante:

$$\rho_a = \frac{k\Delta\phi}{I} \quad (\text{I.8})$$

Où  $k$  est un facteur géométrique qui dépend de l'arrangement des quatre électrodes et peut être exprimé comme:

$$k = \frac{2\pi}{\left( \frac{1}{r_{c1p1}} - \frac{1}{r_{c2p1}} - \frac{1}{r_{c1p2}} + \frac{1}{r_{c2p2}} \right)} \quad (\text{I.9})$$

La résistivité apparente peut être définie comme la résistivité électrique d'un milieu subsurfacique homogène qui fournira la même résistance dans la même configuration d'électrode. Il peut être considéré comme une moyenne pondérée de la résistivité du volume sous la surface sous les quatre électrodes. La résistivité apparente dépend des réseaux d'électrodes, et une modélisation par inversion est nécessaire pour déterminer la résistivité réelle à partir de mesures apparentes (Hossain, 2010 et Loke, 2000). Typiquement, Wenner, Dipole-dipole, Schlumberger, les pôles pôle et dipôle sont utilisés dans le sondage de résistivité à une, deux et trois dimensions. Les principales configurations utilisées dans la tomographie électrique sont la configuration de Schlumberger et la configuration de Wenner.

#### ▪ La configuration Schlumberger

Le schéma de configuration de Schlumberger est présenté dans la figure (I.20). Ce réseau est sensible à la résistivité verticale par rapport à la variation horizontale. La couverture horizontale peut être réduite avec l'augmentation de l'espacement des électrodes (Aizebiokhai, 2005). Ces dernières années, une méthode relativement nouvelle, à savoir la méthode Wenner-Schlumberger, a été utilisée pour le sondage de résistivité.

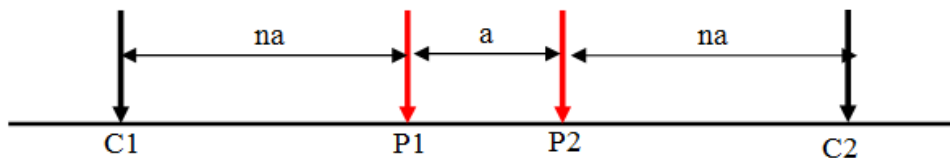


Figure I.20 : Configuration de Schlumberger

#### ▪ La configuration Wenner :

L'utilisation du réseau Wenner est devenue populaire grâce aux recherches approfondies. La matrice est sensible aux changements verticaux par rapport à la variation horizontale de la résistivité. De plus, le réseau de Wenner est préféré pour l'enquête où un bruit important est prévu dans les conditions réelles (Loke, 2000). La configuration des électrodes du réseau alpha Wenner est présentée dans la figure (I.21).

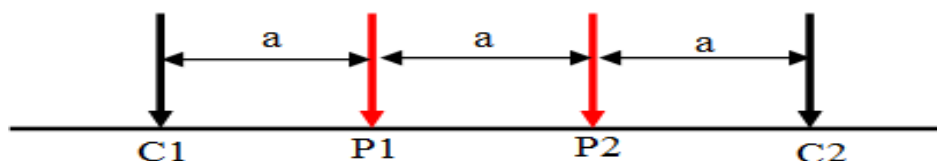
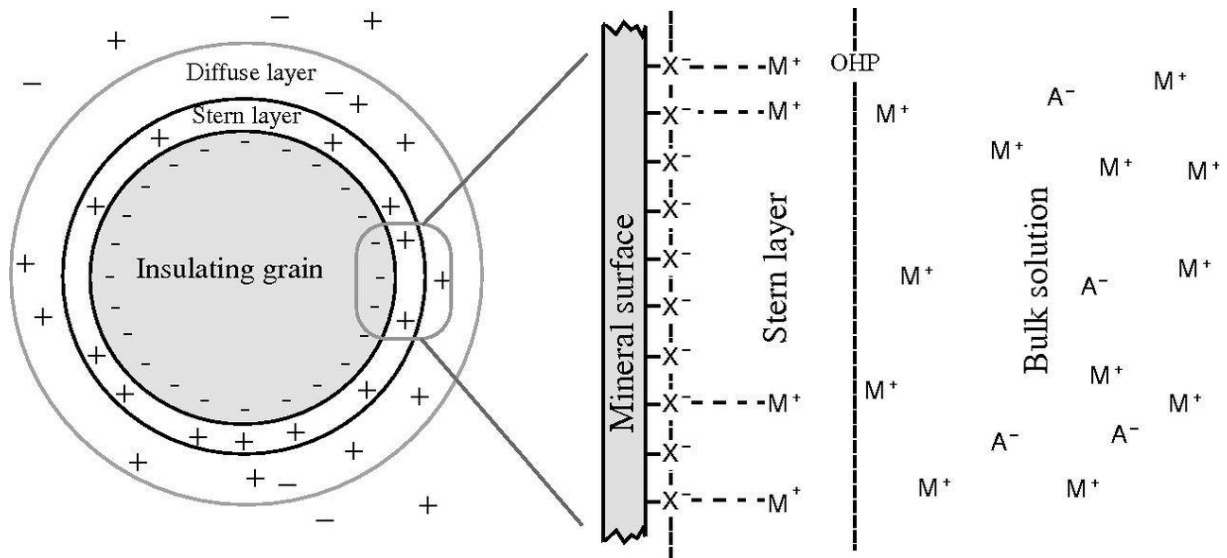


Figure I.21 : Configuration de Wenner

### I.3.6. Conductivité électrique dans un sol argileux

La conduction électrique dans un milieu particulière se produit généralement par le mouvement des ions à travers l'eau des pores électrolytiques dans le vide et la charge de surface (Bryson, 2005). Dans les sols à grains grossiers, la conduction est en grande partie électrolytique et dépend de l'espace des pores interconnectés, du squelette granulaire, de la conductivité électrolytique et du degré de saturation (Santamarina et al, 2001). Cependant, la charge de surface est un paramètre important dans la conduction électrique des sols argileux. Les particules d'argile présentent des déficits de charge dus à la substitution d'ions au niveau de la structure cristalline et à la réaction acide-base des groupes silanol-aluminol (Si-O-H et Al-O-H) avec de l'eau. Les cations adjacents sont attirés par les particules d'argile pour contrebalancer la charge négative nette. La densité de cations est élevée autour de la surface solide; cependant, les cations concentrés essaient de diffuser pour égaliser la concentration dans toute la structure. Les phénomènes de diffusion sont limités par le champ électrique négatif des particules d'argile et les anions sont également éloignés en raison de la force négative des particules. Il en résulte qu'il existe des ions relativement mobiles composés de charges positives et négatives contiguës à la couche adsorbée. La surface chargée et la surface de charge distribuée sont appelées double couche électrique. Le long du plan duquel les contre-ions sont fortement adsorbés avec une charge négative de particules est appelé couche de Stern. Une application du champ électrique externe entraîne la séparation des charges dans la double couche diffuse le long du plan de potentiel  $z$  (Revil et al, 1998; Rinaldi et Cuestas, 2002). Par conséquent, la conduction électrique dans un sol argileux dépend de la conductivité globale du fluide et de la surface. La Figure (I.22) présente schématiquement l'emplacement de la double couche diffuse, de la couche de Stern et des ions précipités dans les argiles. L'interaction de l'eau avec un sol argileux joue également un rôle essentiel dans la conduction électrique. À l'état sec, les cations adsorbés sont étroitement liés par la charge négative des particules d'argile. Après neutralisation des charges négatives nettes de particules d'argile, des excès de cations se forment lorsque le sel précipite. Les sels précipités entrent dans la solution sol-eau en présence d'humidité. Une étude précédente indiquait que les propriétés électriques et thermodynamiques de l'eau adsorbée étaient différentes de celles de l'eau libre (Holtz et Kovacs, 1981). De plus, Revil et al (1998) ont souligné le rôle de la réaction chimique à la surface de l'argile en présence d'eau. Selon l'étude, une surface de particule avec un groupe silanol peut être dissociée en charges positives ou négatives ( $\text{SiOH} \leftrightarrow \text{SiO}^- + \text{H}^+ / \text{SiOH} + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{SiOH}^{2+}$ ) en fonction de la réaction chimique en présence d'eau.



**Figure I.22 :** Emplacement des doubles couches diffuses (DDL), des couches renforcées et des ions précipités dans les argiles (<http://geophysics.geoscienceworld.org>)

### I. 3.7. Conclusion

La conductivité électrique dans un milieu particulière se produit généralement par le mouvement des ions à travers l'eau des pores électrolytiques dans le vide et la charge de surface (Bryson, 2005). Ce chapitre présente une analyse théorique sur les argiles et la résistivité électrique des sols fins. Les différents points présentés sont :

Le sol argileux est une catégorie de sols extrait d'un ensemble d'espèces minérales, une famille de roches, ou encore une classe granulométrique. Il est caractérisé par, la forme et la surface spécifique, la capacité d'échange cationique CEC, la double couche électrique.

La kaolinite, la montmorillonite et l'illite sont les principaux minéraux argileux utilisés dans le domaine de géotechnique.

La résistivité électrique est un paramètre important dans le domaine géophysique. Elle représente la capacité du sol à s'opposer au passage d'un courant injecté.

Plusieurs facteurs peuvent affecter la résistivité électrique du sol. La teneur en humidité est l'un des principaux facteurs de modification de la résistivité du sol. Les effets de la composition de l'eau des pores, de la formation géologique, de la teneur en ions et de la structure ont été substantiels dans la conductivité électrique des sols fins.

Les propriétés électriques peuvent être étudiées en laboratoire avec des configurations à deux et quatre électrodes. En règle générale, les réseaux les plus courants dans la mesure de résistivité électrique in situ sont les configurations de Wenner et de Schlumberger.

## **Chapitre II :**

### **Salinité des sols et traitement électrocinétique**

## Chapitre II : Salinité des sols et traitement électrocinétique

### II.1 : Introduction

La salinisation du sol est la contrainte majeure des terres irriguées particulièrement dans les zones arides et semi-arides (Marlet, 1996 ; Samba, 1998). Les sols argileux, sont particulièrement exposés au processus de salinisation dû à l'irrigation, car ils sont de plus en plus irrigués compte tenu de leur fertilité élevée et de leur forte capacité de rétention en eau (Greve et al, 2010). La gestion de la salinité par les méthodes traditionnelles peut être moins efficaces, plus coûteuses et se limiter à une couche mince de surface du sol. La méthode électrocinétique est devenue l'une des méthodes les plus prometteuses en matière de dépollution, notamment dans les sols peu perméables.

### II.2. La salinisation des sols

La salinisation des sols est un problème environnemental important qui se produit fréquemment dans les régions arides et semi-arides dans des conditions de drainage insuffisantes. L'impact de la salinité des sols ne se limite pas à la croissance des plantes, mais également à la santé humaine ainsi qu'aux structures de génie civil. L'utilisation d'engrais dans les plantes et les légumes provoque plusieurs maladies telles que le cancer de l'intestin, la mortalité infantile, le goitre, les malformations congénitales et l'hypertension (Manokarajah et Ranjan 2005, Cho et al 2010, Choi et al 2012). En outre, les sels en excès altèrent les propriétés physiques et chimiques et entraînent une dégradation de la structure et de la texture du sol (Bois, 2005), telles que la dispersion, la détérioration de la perméabilité, le gonflement, la diminution de la capacité portante du sol et la modification du pH du sol (Quadir et al, 2006). Les sols salins contiennent diverses proportions de cations ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Ca}^{2+}$ ) et d'anions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{4-}$ ,  $\text{CO}_3^{3-}$  et  $\text{HCO}_3^{3-}$ ) qui entraînent différents degrés de salinité. Les sols salins-sodiques sont soumis à une dégradation structurelle grave et présentent de mauvaises réactions sol-eau et sol-air. Le gonflement et la dispersion des agrégats sodiques détruisent la structure du sol et réduisent la porosité et la perméabilité (Rengasamy, 2002b). La situation s'aggrave lorsque le sol contaminé présente une faible perméabilité hydraulique et une composition complexe de sols argileux et à grains fins (Kim et al, 2009; Moghadam et al, 2016; Figueroa et al, 2016; Estabragh et al, 2016; Ng et al, 2015; Masi et Losito, 2015, Li et al, 2014; Jeon et al, 2014, Jamshidi et Khodadadi, 2017). Quelques dégâts causés par la salinisation des sols sont représentés dans les figures (II.1, II.2, II.3 et II.4).



**Figure II.1 :** Corrosion des armatures due à la salinisation des sols



**Figure II.2 :** Forte concentration en sels à la surface des sols



**Figure II.3 :** Fissuration du sol due à l'évaporation des eaux salées



**Figure II.4 :** Dégradation des plantes due à la salinisation des sols

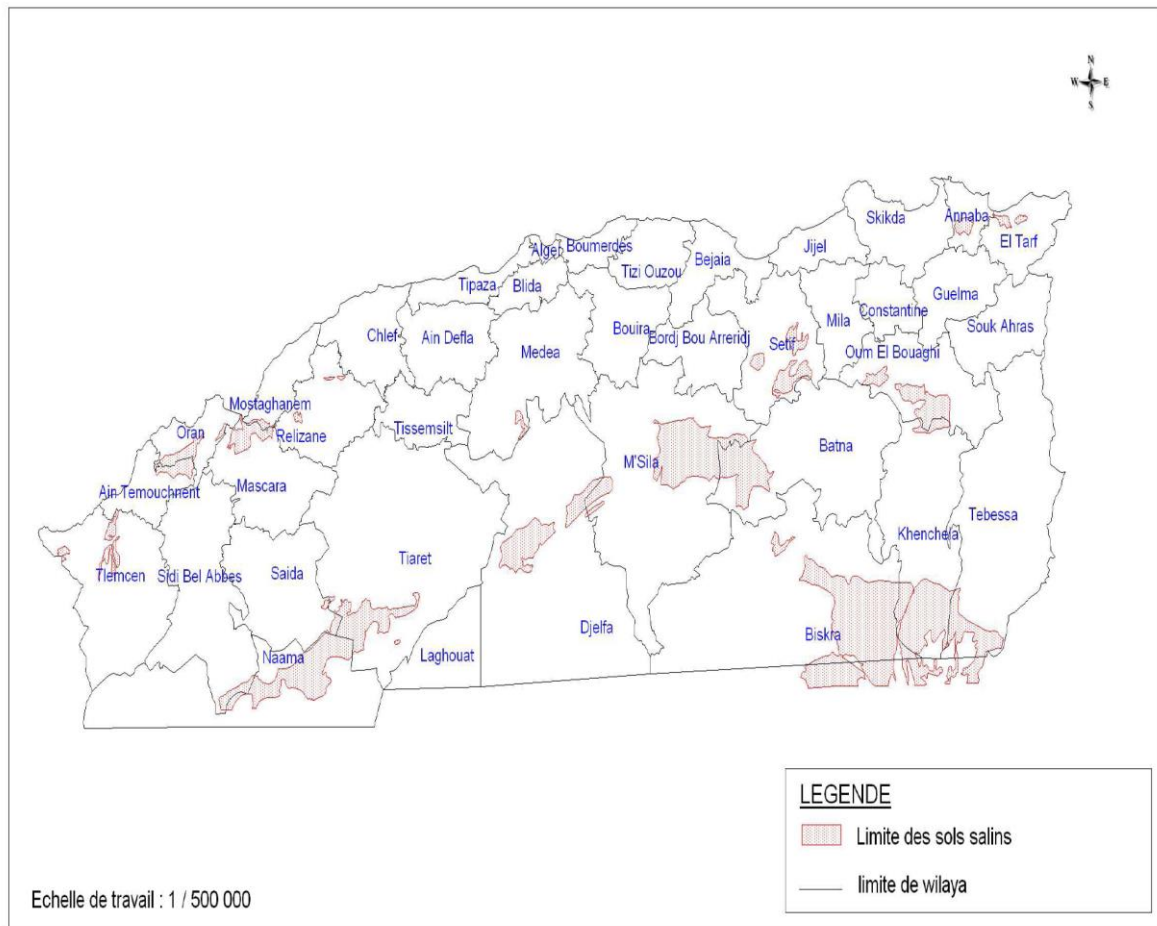
### II.2.1. Définition

La salinisation est l'accumulation de sels hydrosolubles dans le sol. Ces sels sont le potassium, le magnésium, le calcium, le chlorure, le sulfate, le carbonate, le bicarbonate et le sodium. L'accumulation du sodium est aussi appelée sodification. Les sels se dissolvent et se déplacent avec l'eau. Quand l'eau s'évapore, les sels restent (S.O.C.O, 2009). Tout d'abord, la salinisation implique une accumulation de sels par des processus naturels du fait d'une forte teneur en sels du matériau parent ou des nappes souterraines. En second lieu, la salinisation est provoquée par des interventions humaines, telles que des pratiques d'irrigation inappropriées, par exemple avec de l'eau d'irrigation riche en sels et/ou par un drainage insuffisant (S.O.C.O, 2009).

### II.2.2. Répartition globale de la salinité des sols

Les statistiques relatives à l'étendue des zones touchées par le sel varient selon les auteurs, mais les estimations avoisinent en général un milliard d'hectares, soit 7,7% de l'étendue continentale de la Terre (Ghassemi et al, 1995). Outre ces zones naturellement touchées par le sel, environ 77 millions d'hectares ont été salinisés à la suite d'activités humaines, dont 58% concentrés dans des zones irriguées. En moyenne, les sels affectent 20% des terres irriguées du monde, mais ce chiffre atteint plus de 30% dans des pays tels que l'Égypte, l'Iran et l'Argentine (Ghassemi et al 1995). Selon les estimations de la FAO et de l'UNESCO, près de la moitié des systèmes d'irrigation existants dans le monde sont plus ou moins sous la pression de la salinisation secondaire et de la saturation en eau. Environ 10 millions d'hectares de terres irriguées sont abandonnées chaque année, principalement en raison de la salinisation et de l'alcalinisation secondaires (Szabolcs, 1989). La prévision de la dégradation ultérieure nécessite une surveillance des changements spatiaux et temporels de la salinité. La détection en temps voulu de l'évaluation de la gravité et de l'étendue de la salinisation, en particulier au début, est très importante. Contrôler la salinité du sol signifie d'abord identifier les endroits où se concentrent les sels et, ensuite, détecter les changements de cette concentration. Les deux dépendent de la distribution des sels à la surface du sol et de la capacité des outils de télédétection à identifier les sels.

En Algérie, les sols salins représentent 25% de la surface cartographiée dans les régions arides (Halitim, 1988). Près de 10 à 15 % de terres irriguées sont concernées par problème de salinité. Bien que le problème d'alcalinisation, selon Daoud et Halitim (1994) ne se pose plus, on estime que les terres salinisées seront difficilement récupérables. Les sols agricoles sont dans leur majorité, affectés par la salinité ou susceptibles de l'être (Durand, 1983). Les sols salins sont très répandus dans les basses plaines de l'Oranie, dans la vallée de Mina près de Relizane, sur les hautes plaines au sud de Sétif et de Constantine. Ils ont aussi une grande extension dans les régions sahariennes au sud de Biskra jusqu'à Touggourt, Ouargla et au-delà (Durand, 1983). (Figure II. 5).



**Figure II. 5 :** Répartition des sols salins en Algérie (INSID, 2008)

### II.2.3. Processus conduisant à la salinité du sol

La salinité dans le paysage s'est développée dans différentes conditions environnementales au cours de nombreuses périodes géologiques. Même si de nombreux sols sont naturellement salins et se trouvent principalement dans les régions arides et semi-arides. Tous les types de sols dotés de propriétés morphologiques, chimiques et biologiques diverses peuvent être affectés par la salinité (Rengasamy, 2010).

La salinité des sols est une caractéristique qui se rapporte à leur teneur en solides dissous dans l'eau et le sol (Charman et Murphy, 2007). Habituellement, les sels inorganiques sont des composés ioniques cristallins, qui se dissocient dans l'eau pour former des cations. Les principaux ions présents dans l'eau sont les cations de sodium ( $\text{Na}^+$ ), de potassium ( $\text{K}^+$ ), de calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), de magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), d'aluminium ( $\text{Al}^{3+}$ ), de fer ( $\text{Fe}^{2+}$ ), d'anions de chlorure ( $\text{Cl}^-$ ), de nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ), phosphate ( $\text{PO}_3^-$ ), sulfate ( $\text{SO}_4^-$ ), carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) (Mc Bride, 1994; Patterson, 2006; White, 2006). Les solutions de sol contiennent les mêmes éléments que l'eau. La proportion de cations et d'anions dans l'eau du sol naturelle

dépend du type de sol, du climat et de l'utilisation des sols. Généralement, la salinité est décrite comme une concentration totale de sels, indépendamment de ses composants.

Rengasamy (2006) a distingué trois processus principaux conduisant à des terres salines dans le monde entier: associé à la nappe phréatique, associé à la nappe phréatique et à la salinité associée à l'irrigation (figure II.6). La salinité associée aux terres arides est causée par l'apport de sel par les processus naturels de précipitation ou par le mouvement des eaux souterraines salines. Considérant que, la salinité d'irrigation est induite par la teneur en sel dans l'eau d'irrigation. La salinité transitoire est causée par les variations temporelles et spéciales de l'accumulation de sel dans la zone racinaire, non influencée par la nappe phréatique ou par la nappe phréatique saline en remplissage, et se produit principalement dans les zones dominées par des sous-sols sodiques (Rengasamy, 2002b).

L'autre source d'accumulation de sels est le dépôt des sels océaniques et terrestres transportés par le vent et la pluie. L'eau de pluie contient de 6 à 50 mg / kg de chlorure de sodium: la concentration diminue avec l'éloignement de la côte. Une pluie contenant 10 mg / kg de chlorure de sodium déposerait 10 kg / ha de sel pour chaque 100 ml de pluie (Munns et Tester, 2008). L'influence océanique diminue rapidement avec la distance à la côte, et la proportion croissante de cations tels que le calcium et le potassium dans l'eau de pluie suggère l'influence de sources terrestres sur la composition de l'eau de pluie (Isbell et al, 1983).

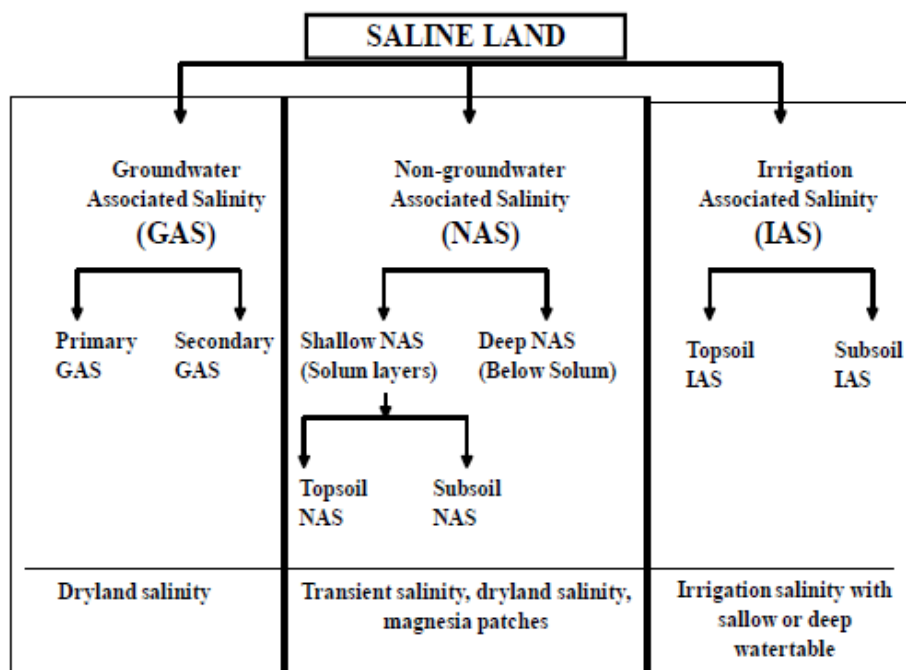


Figure II. 6 : Formation de terres salines par trois processus différents (Rengasamy, 2006a)

## II.2.4. Caractéristiques des sols affectés par le sel

La salinité et la sodicité sont des problèmes majeurs du sol entraînant une détérioration des sols. Leur présence peut modifier les propriétés des sols, mais ces deux principaux groupes de sols affectés par le sel diffèrent non seulement par leurs caractéristiques chimiques, mais également par leurs propriétés physiques. Un aperçu de la classification des sols affectés par le sel montre qu'un certain nombre de tentatives ont déjà été faites pour classer ces sols en différentes catégories (Gupta et Arbol, 1990; Mc Intyre, 1979; Northcote et Skene, 1972; Rengasamy, 2010; Shainberg et Letey, 1984; Sumner et al, 1998). Le Département de l'agriculture des États-Unis a mis au point une classification largement utilisée dans de nombreux pays.

### II.2.4.1. Propriétés chimiques et physiques

Dans les sols affectés par les sels, des sels solubles constitués de chlorures et de sulfates de sodium, de calcium et de magnésium sont présents à des concentrations élevées, entraînant une augmentation de la conductivité électrique (CE). Selon la classification du Laboratoire américain de salinité (USDA, 1975), les sols (pâte saturée) ayant une conductivité électrique (CE) supérieure à 4 déciSiemens / mètre ( $\text{dS m}^{-1}$ ) sont salins. (Tableau II.1).

**Tableau II.1** : Classification des sols salins et sodiques. Source : US Salinity Laboratory Staff (1954)

Classification des sols	Paramètres
Saline, sol non sodique	Pourcentage de sodium échangeable (ESP) <15, conductivité électrique dans un extrait de pâte saturée ( $E_{\text{Ce}} > 4 \text{ dS/m}$ )
Sodique, non- saline	$ESP > 15$ et $E_{\text{Ce}} < 4 \text{ dS/m}$
Saline, Sodique	$ESP > 15$ et $E_{\text{Ce}} > 4 \text{ dS/m}$
Non saline, non sodique	$ESP < 15$ et $E_{\text{Ce}} < 4 \text{ dS/m}$

Bien que l'augmentation de la salinité de la solution du sol a un effet positif sur l'agrégation et la stabilisation du sol, elle peut endommager la structure du sol en augmentant la concentration de  $\text{Na}^+$  dans la solution de sol et en s'accumulant sur les particules d'argile causant la sodicité (Rengasamy, 2006). Dans les sols sodiques, la stabilité des agrégats est réduite en raison de l'augmentation du pourcentage de sodium échangeable (ESP) (Buckland et al, 2002). Les particules d'argile du sol ont une charge électrique négative qui attire un

grand nombre de cations. Sachant que la zone entourant les cations au niveau des charges négatives sur les particules de sol est appelée double couche diffuse. La concentration de cations est élevée dans la double couche diffuse près de la surface des particules d'argile et diminue avec la distance. Les particules d'argile sont soumises à des forces qui peuvent les déplacer ensemble (agrégation) ou séparées (dispersion). Dans les sols non sodiques, l'accumulation de sels peut affecter les propriétés physiques du sol en amenant les particules fines à se lier en agrégats. Ce processus est connu sous le nom de floculation (Pearson et Bauder, 2003) et est bénéfique en termes d'aération du sol (en raison de la stabilisation des agrégats lorsqu'il est humide), de la conductivité hydraulique (car les pores du sol restent ouverts et de l'eau s'infiltrer facilement dans le sol) et de la croissance des racines. La dispersion des particules d'argile se produit lorsque la double couche diffuse est déformée par une grande taille d'ions hydratés ou par répulsion électrostatique (Qureshi et Barrett-Lennard, 1998). La réduction de l'épaisseur de la double couche diffuse permet de maintenir les particules d'argile proches les unes des autres. Lorsqu'ils sont dissous dans l'eau, les ions  $\text{Na}^+$  ont une taille supérieure à celle de  $\text{K}^+$  et  $\text{Mg}^{2+}$  est supérieure à  $\text{Ca}^{2+}$ . Comparés aux petits cations, les gros cations de la double couche diffuse séparent les particules d'argile (Shainberg, 1992). La structure du sol est donc dégradée en raison d'un degré élevé de dispersion de l'argile (Gupta et Verma, 1983; Rengasamy et al, 2003).

Le pH de la pâte à saturation de sol salin est inférieur à 8,5. Dans les sols sodiques, du  $\text{NaCO}_3$  se forme dans la solution du sol (Russell, 1961), ce qui entraîne une élévation du pH au-dessus de 9. Un ESP et un pH élevés dans le sol peuvent réduire la porosité et la perméabilité du sol (Pearson et Bauder, 2003; Rengasamy et al, 2003). ), affectant ainsi négativement l'aération du sol et la conductivité de l'eau (Acharya et Abrol, 1991) et établissant une hypoxie (manque d'oxygène). Les sols sodiques tendent à avoir un aspect organique foncé en raison de la dispersion d'argile et de particules organiques, tandis que les sols salins ont tendance à présenter une surface croustillante blanche en raison de la précipitation de sels (Lax et al, 1994).

### II.2.5. Sols sodiques

Le sol est considéré sodique lorsque les sels libres sont lessivés de la couche de sol et que seul le sodium échangeable reste adsorbé sur les particules de sol à des concentrations affectant négativement la structure des sols (Charman et Murphy, 2007; Rengasamy, 2002b). La distinction entre sols salins et sodiques apparaît lorsque les forces attractives et répulsives varient selon que la solution de sol est concentrée (solution saline) ou diluée avec une forte

proportion de cations Na /divalents suffisante pour provoquer un gonflement et une dispersion (sodicité) (Rengasamy et Sumner, 1998).

En raison de leur forte teneur en sodium et de leur faible teneur en sel, les sols sodiques ont des propriétés physiques extrêmement médiocres qui se traduisent par une dégradation de la structure des agrégats, une perte de macroporosité, ce qui entraîne un déséquilibre important entre les mouvements de l'eau et de l'air dans le sol. Ce déséquilibre provient d'une infiltration d'eau et de propriétés de transmission restreintes qui rendent le sol trop humide ou trop sec pendant la plupart du temps (Brady et Weil, 2008; Rengasamy et Olsson, 1991; Shainberg et Letey, 1984). L'absence de stabilité structurelle dans ces sols favorise la formation de joints et de croûtes à la surface du sol, ce qui entraîne une érosion (Rengasamy et Olsson, 1991). Des sols sodiques se forment suite à l'adsorption des ions sodium ( $\text{Na}^+$ ) par les sites chargés négativement sur des particules de sol, principalement des argiles, à partir des solutions de sol contenant des sels de sodium libres tels que le chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ), le carbonate de sodium ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) et bicarbonate de sodium ( $\text{NaHCO}_3$ ) et sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

Le gonflement, la dispersion et l'extinction sont les principaux mécanismes par lesquels la structure des sols sodiques s'effondre sous la pluie ou l'irrigation, entraînant une mauvaise condition physique (Brady et Weil, 2008). Premièrement, le sodium échangeable augmente la tendance des agrégats à se désintégrer ou à s'effacer lors du mouillage. Les particules d'argile et de limon libérées par l'extinction des agrégats obstruent les pores du sol ils ont arrosé le profil. Deuxièmement, lorsque l'argile sujette à la dilatation, comme la montmorillonite, devient saturée de  $\text{Na}^+$ , son degré de gonflement augmente, ce qui ferme les grands pores responsables du drainage de l'eau dans le sol. Troisième condition, la plus importante: la combinaison d'une concentration élevée en sodium et en sels dissous entraîne la dispersion de l'argile dans le sol (Brady et Weil, 2008; Nguyen et al, 2009; Rengasamy, 2002a).

#### **II.2.6. Évaluation de la sodicité:**

Le pourcentage de sodium échangeable (ESP) est souvent utilisé comme mesure de la sodicité. L'ESP est déterminé en mesurant la concentration de tous les cations échangeables dans le sol et en exprimant la quantité de sodium échangeable en proportion de la somme de tous les cations échangeables ou de la capacité d'échange de cations (CEC), (Brady et Weil, 2008; Charman et Murphy, 2007).

Patterson (2006) a souligné l'importance de comprendre la différence entre la mesure des cations échangeables  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ . La sodicité peut être mesurée indirectement en mesurant les concentrations de tous les cations dans la solution de sol (suspensions 1:5 sol /

eau). Ces concentrations sont utilisées pour mesurer le taux d'adsorption de sodium (SAR), qui décrit la concentration de l'ion sodium par rapport à celle du calcium et du magnésium, définie comme suit:

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2}} \quad (\text{II.1})$$

Avec toutes les concentrations en cations exprimées en mmol / L.

Le SAR est de plus en plus utilisé que l'ESP, en raison de sa forte corrélation avec l'ESP et sa mesure est pratiquement plus facile. En outre, le SAR peut être déterminé à partir du même extrait sol-eau utilisé pour évaluer la CE dans une solution de sol (Qadir et Schubert, 2002).

L'ESP et le SAR sont tous deux liés au processus d'échange de cations (Rengasamy et Olsson, 1991). Les valeurs ESP peuvent être exprimées en équivalent SAR par plusieurs relations. Par exemple, l'ESP d'un sol peut être estimée à partir du SAR de l'extrait saturé en utilisant l'équation suivante (USSL, 1954):

$$\text{ESP} = \frac{1.475(\text{SAR})}{(1 + 1.0147 \text{ SAR})} \quad (\text{II.2})$$

Rengasamy et al. (1984a) ont suggéré que l'ESP peut être estimée à partir du SAR de l'extrait aqueux du sol 1: 5 en utilisant l'équation suivante:

$$\text{ESP} = 1,95 (\text{SAR}) + 1,8 \quad (\text{II.3})$$

Cependant, ces relations peuvent varier avec la teneur en argile et la minéralogie, la salinité de la solution à l'équilibre et le pourcentage de saturation des sols (Sumner et al, 1998).

### II.3. Traitement électrocinétique des sols

La remédiation des sols pollués par les méthodes traditionnelles, telles que la biorestauration, la solidification et la phyto-remédiation, peuvent être moins efficaces, plus coûteuses et se limiter à une couche mince de surface du sol. Le traitement électrocinétique est devenu l'une des techniques les plus prometteuses en matière de dépollution, notamment dans les sols peu perméables.

### II.3.1. Histoire du traitement électrocinétique

Les phénomènes électrocinétiques sont connus depuis le début des années 1800, lorsque Ferdinand Friedrich Reuss appliqua un courant continu au mélange argile-eau et observa le mouvement de l'eau vers la cathode sous l'influence du champ électrique induit. (Reuss, 1809). En 1879, Helmholtz traita pour la première fois analytiquement les phénomènes d'électro-osmose et fournissait une base mathématique. Smoluchowski, (1928) a ensuite modifié et prolongé sa théorie, ce qui a conduit à la théorie bien connue de Helmholtz-Smoluchowski (HS). L'équation (HS) est toujours appliquée systématiquement pour la quantification des flux électroosmotiques de fluides newtoniens (Lyklema, 2000). À la fin des années 1940, Leo Casagrande a eu recours à l'électroosmose pour induire la consolidation des sols à grains fins (Casagrande, 1949). Casagrande a développé un modèle de détermination de l'électroosmose dans l'argile à partir de l'équation de Helmholtz-Smoluchowski en tenant compte les effets de la porosité et de la tortuosité sur le flux électroosmotique dans les sols. À partir de la fin des années 1980, le traitement électrocinétique a été appliquée pour la remédiation des sols (Lageman et al, 1989; Pool, 1989). Plusieurs chercheurs russes ont utilisés l'électromigration dans la prospection des métaux dans les années 1960 (Shenbagavalli et Mahimairaja, 2011). La première démonstration réussie connue de l'utilisation de la technique électrocinétique pour l'assainissement des sols a été effectuée aux Pays-Bas en 1986. La même année, en Europe et aux États-Unis, le traitement électrocinétique a également été utilisé pour éliminer les espèces chimiques toxiques. Ces études et applications couronnées de succès ont encouragés d'autres chercheurs et des études in situ, qui ont abouti à des avancées décisives dans la compréhension du phénomène électrocinétique en tant que technique d'amélioration du sol. La technique de traitement électrocinétique a de nombreuses applications en géotechnique et géo-environnement (Yeung et al, 1997). Une quantité importante de travail a été réalisée dans les années 90, au cours de laquelle un nombre exceptionnel de publications et d'études ont permis de mieux comprendre les effets électrocinétiques dans les sols (Acar et al, 1990; Alshawabkeh et Acar, 1994; Acar et Alshawabkeh, 1993; Probstein et Hicks, 1993; Jacobs et al, 1994; Acar et al, 1995), en modélisation (Yeung, 1990; Choi et Lui, 1995; Yeung et Datla, 1995; Alshawabkeh et Acar, 1996; Yu et Neretnieks, 1996) et applications sur le terrain (Lageman, 1993; USEPA, 1998; Ho et al, 1999a; Ho et al, 1999b; USAEC, 2000). Plus récemment, le traitement électrocinétique a été utilisé avec succès pour le traitement des sols, des sédiments et des eaux souterraines contaminés par une grande variété des polluants tels que les métaux lourds, les

composés organiques, les radionucléides et les sels (Virkyute et al, 2002; Reddy et Cameselle, 2009; Yeung, 2009).

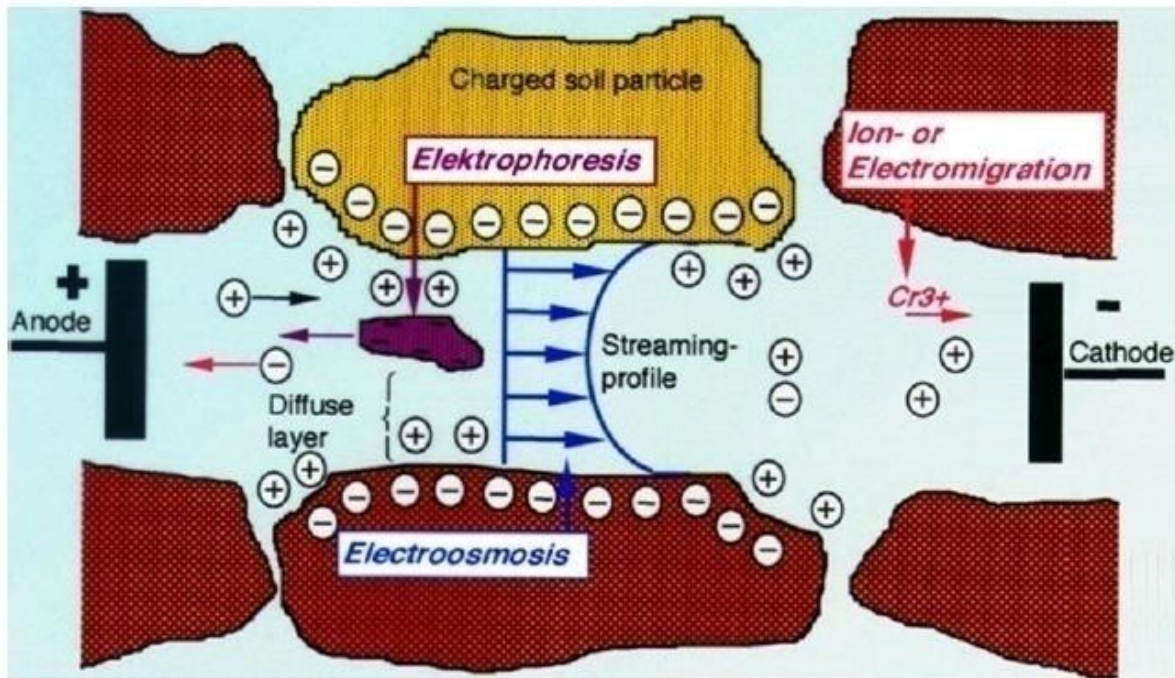
### II.3.2. Généralités sur le traitement électrocinétique

L'électrocinétique est définie comme le transport physicochimique de la charge, l'action des particules chargées et les effets du potentiel électrique appliqué sur la formation et le transport des fluides dans les milieux poreux (Alshwabkeh, 2001). Traitement électrocinétique, également appelée le traitement électrochimique des sols, l'électromigration, l'électrolyse ou l'électrosurfaçage, est une technique émergente qui utilise un courant continu (DC) de faible intensité ou un potentiel, pour éliminer l'eau et modifier le potentiel électrique des sols, boues et sédiments à grain fin. L'utilisation de cette technique implique une approche avec une perturbation minimale de la surface tout en améliorant les propriétés d'ingénierie des sols sous la surface (mosavat, 2014). La technique électrocinétique a une grande efficacité pour la dépollution des matériaux pollués dans les conditions complexes, caractérisées par exemple par une faible perméabilité ou une grande hétérogénéité. En effet, la remise en état des matrices à grain fin est particulièrement difficile parce que la faible conductivité hydraulique entrave le transport de l'eau à travers le milieu poreux et rend inefficaces les techniques à base hydraulique (telles que le pompage et le traitement, le rinçage ou le lavage du sol). En outre, Les sols à grains fins se caractérisent par une grande surface spécifique des particules du sol et par un grand nombre de sites de réaction, impliquant des fortes interactions entre les contaminants et la matrice du sol (Yeung, 2011). Ces interactions dépendent de type du sol, du pH et de multiples facteurs qui varient d'un cas à l'autre. Parmi les nombreuses options de traitement disponibles, l'électrocinétique remédiation est reconnue comme étant le plus approprié pour les matrices poreuses à faible perméabilité. Le champ électrique appliqué induit le mouvement des particules chargées, des solutés et des fluides interstitiels à travers le support poreux vers les électrodes, grâce à trois mécanismes de transport principaux (Acar et Alshwabkeh, 1993):

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

couplage visqueux, ce qui conduit à un écoulement net d'eau dans la direction du champ électrique (Figure II.7).

- **Electromigration:** transport d'ions chargés ou de complexes d'ions dans la solution (Figure II.7).
- **Electrophorèse:** mouvement des particules chargées ou de colloïdes (Figure II.7).



**Figure II.7:** Schéma de principe de la technique du traitement électrocinétique, d'après (Iyer, 2001).

L'application d'un champ électrique sur une matrice poreuse entraîne également une série d'effets complexes modifiant la chimie du système. Premièrement, l'électrolyse de l'eau se produit aux électrodes, produisant  $H^+$  à l'anode et  $OH^-$  à la cathode. Deuxièmement, les phénomènes de transport (électromigration, électroosmose et électrophorèse) provoquent des gradients d'espèce le long du matériau sous traitement, y compris  $H^+$  et  $OH^-$ . En général, la spéciation des polluants dépend du pH et il est souvent nécessaire d'ajuster le pH pour contrôler les performances du système et éviter les effets indésirables, tels que la précipitation d'espèces (carbonates ou hydroxydes, par exemple) qui peuvent entraver les processus de transport. Ceci est généralement effectué par addition acide / base au niveau des compartiments anodiques et cathodiques. Yeung et Gu (2011) ont travaillé sur des méthodes permettant d'améliorer l'extraction des polluants au cours du traitement électrocinétique. Le contrôle des conditions de pH au niveau des électrodes est un facteur clé car les électrolytes définissent les conditions aux limites pour le processus. La composition en électrolytes varie

en permanence en raison des mécanismes de transport induits par le champ électrique et ces effets, produire un comportement transitoire et non linéaire du système (Alshawabkeh, 2009). Cette non-linéarité produit également des profils géochimiques non uniformes et une distribution de la conductivité électrique. Tous ces effets sont interdépendants, comme toutes les variables sont liées entre elles. L'électrocinétique remédiation offre des avantages uniques par rapport aux autres technologies conventionnelles. Ces avantages comprennent (Reddy et Cameselle, 2009):

- Applicabilité aux matrices peu perméables et hétérogènes
- Applicabilité dans des conditions saturées ou non saturées (encore en présence d'eau)
- Peut être implémenté in situ et ex situ
- Peut être utilisé pour extraire plusieurs types des polluants, y compris leur mélange (tels que les métaux lourds, les radionucléides, les contaminants organiques et la concentration en sels).
- Peut être associé à d'autres technologies de dépollution (telles que la biorestauration, Processus de Fenton, barrières réactives, phytoextraction, etc.).

### **II.3.3. Facteurs influant le traitement électrocinétique des sols**

Le traitement électrocinétique du sol est une technique émergente, applicable dans les sols fins, sols à faible conductivité hydraulique et à grande surface spécifique. Un procédé électrocinétique a été appliqué pour éliminer divers polluants dans différents types de sol, allant des sols sableux aux sols argileux (Shenbagavalli et Mahimairaja, 2011). Il convient de noter que le degré d'efficacité de la décontamination électrocinétique des sols est très peu cohérent, car il est extrêmement efficace. Dépend des interactions entre la nature du sol, les contaminants et les conditions / configurations de fonctionnement. Néanmoins, il est raisonnable de conclure que l'efficacité de l'élimination des polluants est régie par plusieurs paramètres tels que : différence de potentiel / courant, conditionnement du pH, agents chimiques, texture du sol, et espèces des contaminants.

#### **II.3.3.1. Niveaux de tension et de courant**

Selon de nombreuses études, l'intensité du courant électrique est de l'ordre de quelques ampères par mètre carré. Même si les niveaux de courant plus élevés génèrent plus d'acide et augmentent la solubilité des matériaux, cela diminuera le flux électro-osmotique global en augmentant la concentration ionique totale (Wise, 2000). Le choix d'un courant et d'une

tension appropriés dépend de nombreuses propriétés électrochimiques, en particulier la conductivité électrique (CE) du sol, les sols avec une CE plus élevée nécessitent une charge et un courant plus élevés que les sols d'une CE plus basse (Alshwabkeh, 2001; Wise, 2000). Wise (2000) a suggéré un gradient de tension de 100 V / m pour le traitement électrocinétique initial. Une augmentation du gradient de tension (densités de courant) entraînera une augmentation du taux de transport de la migration ionique, tandis que le coût du processus augmentera également. Par conséquent, une tension appliquée optimale doit être envisagée en fonction de la composition minéralogique et chimique du sol, de l'espacement des électrodes et de la durée du processus électrocinétique, ce qui nécessiterait une approche empirique. Nature et configuration des électrodes. En général, les électrodes inertes sont préférées car elles évitent d'introduire la contamination due à la dissolution du matériau anodique et elle évite de réagir à la plupart des réactions chimiques associées au processus électrocinétique. L'utilisation d'acier, de fer et de cuivre comme des électrodes sont plus efficaces que le carbone noir, le plomb et le platine. Dans certaines études (Liaki et al, 2010), l'acier inoxydable a été utilisé pour comprendre les propriétés physicochimiques. Les changements à partir desquels les effets des ions de fer peuvent être déterminés avec précision. Le cuivre et le graphite peuvent être également utiliser comme des électrodes au niveau de laboratoire, tandis que dans les applications sur le terrain, les matériaux tels que le titane activé avec un revêtement électro-catalytique d'oxydes mixtes ou de céramiques conductrices peuvent être utilisés (Page et Page, 2002). L'utilisation d'électrode de platine est peu pratique pour des raisons économiques (Yeung et al, 1997). En général, le choix des électrodes se fait selon la disponibilité du matériau, facilité de fabrication, facilité d'installation sur le terrain, le coût de fabrication et d'installation (Wise, 2000). Les électrodes peuvent être installées verticalement ou horizontalement. La taille, la forme, la disposition et la distance entre les électrodes affectent également les taux de processus électrocinétique. Les électrodes doivent avoir des enveloppes poreuses et perforées afin que les solutions et les gaz puissent y circuler facilement.

### **II.3.3.2. Temps du traitement**

Pour un type de sol et un type de fluide interstitiel donnés, le temps de traitement requis dépendra des niveaux de courant et de tension, de la vitesse de transport, de la configuration des électrodes et de leur espacement. Par exemple, un grand espacement des électrodes réduit le nombre de trous de forage et les coûts d'installation, mais augmente le temps de traitement et les coûts d'exploitation (Alshwabkeh, 2001; Wise, 2000). Par conséquent, il est nécessaire

d'optimiser toutes ces variables avant de sélectionner une configuration et des dispositions d'espacement.

### II.3.3.3. Texture du sol

La texture du sol est un autre facteur important qui entraîne des modifications dans le phénomène électrocinétique. Il influence la performance des solutions de lavage dans les processus électrocinétiques en termes d'électro-osmose et d'efficacité de l'élimination des contaminants (Reddy et Saichek, 2003). Plusieurs propriétés du sol auraient une incidence sur les performances du processus électrocinétique, telles que la taille des particules, le pouvoir tampon et la teneur en matière organique / carbone (Yang et Liu, 2001; Reddy et Saichek, 2003; Kim et al, 2006; Gioannis et al, 2008; Sumbarda-Ramos et al, 2010; Alcántara et al, 2012). La taille des particules de sol affecte l'électro-osmose. L'électro-osmose s'est avérée efficace lors du traitement d'un sol sableux par un champ électrique appliqué sous un gradient hydraulique nul, tandis que le sol argileux ne présentait aucune trace de flux électroosmotique, en raison de la grande perméabilité du sol sableux (Sumbarda-Ramos et al, 2010). Outre la taille des particules, la capacité tampon du sol est également responsable de l'efficacité de l'électro-osmose dans le sol, en particulier pour les sols à faible perméabilité (Saichek et Reddy, 2003, cité dans Alcántara et al, 2012). Cette observation est rapportée par Kim et al. (2006) à base d'argile de Hadong, qui a un pouvoir tampon supérieur, produit un flux électro-osmotique plus élevé qu'un kaolin à faible capacité tampon. Reddy et Saichek (2003) suggèrent également que les sols à forte teneur en carbonates et à pouvoir tampon offrent une électro-osmose plus élevée que le kaolin lorsque 3% de Tween80 est appliqué comme solution de lavage en raison de la capacité du sol à maintenir un potentiel zêta négatif. Il est rapporté que ceci améliore l'efficacité d'élimination du phénanthrène dans les sols glaciaires. En revanche, les sols à forte capacité tampon présentent généralement une élimination médiocre des métaux lourds, cette efficacité est due à une acidification inefficace du sol (Reddy et al, 2006b; Gioannis et al, 2008) pour la désorption des métaux. En outre, les sols à forte teneur en matière organique réduisent également l'efficacité d'élimination, en particulier pour les contaminants organiques tels que le phénanthrène, en raison de leur liaison plus forte à la matière organique (Reddy et Saichek, 2003). Ceci est conforme aux travaux d'Alcantara et al, (2012) qui ont indiqué que l'efficacité d'élimination du plomb et du phénanthrène pour les sols sableux était inférieure à celle du kaolin (73,5 à 82,4% contre 93,3 à 95,1%) dans des conditions de fonctionnement similaires à celles de la matière organique. la teneur pour le sol sableux était plus élevée que celle pour le kaolin. De plus, Yang et Liu

(2001), qui ont travaillé sur la dépollution du trichloroéthane, sol contaminé au TCE par procédé électrocinétique-fenton, ont également affirmé qu'une teneur élevée en matière organique entraînait non seulement une efficacité d'élimination du trichloroéthane plus faible par adsorption sur la matière organique, mais aussi une efficacité de destruction moindre du TCE. via une surconsommation de radicaux hydroxyles sur les matières organiques.

#### **II.3.3.4. Teneur en humidité**

La teneur en humidité des sols est un autre facteur qui modifie le débit électro-osmotique dans les sols (Mitchell et Yeung, 1990). Pour que le traitement électrocinétique fonctionne, l'humidité du sol doit être suffisamment conductrice et suffisante pour permettre l'électromigration, mais pour des résultats optimaux, elle n'est pas complètement saturée afin d'éviter les effets additionnels de la tortuosité et de la teneur en eau des pores (Cauwenberghe, 1997). La revue de la littérature montre que le traitement électrocinétique pouvait entraîner une distribution inégale de l'humidité dans le sol, entraînant l'apparition de pressions interstitielles négatives dues aux variations de pH, de l'intensité du champ électrique et du potentiel (Page et Page, 2002). Une autre cause de l'assèchement des sols pendant le traitement EK est l'effet de chauffage du courant électrique et l'élévation de la température de l'argile (Shapiro et Probst, 1993). L'augmentation de la température pendant le traitement Le traitement électrocinétique du sol peut provoquer une certaine dessiccation, qui est grave dans les sols non saturés, bien qu'elle puisse se produire même dans des sols initialement saturés. Certaines des conséquences du dessèchement pendant le traitement électrocinétique sont le retrait, le développement de fissures et des chemins d'écoulement inégaux et éventuellement l'arrêt de l'écoulement du fluide (Page et Page, 2002).

#### **II.3.3.5. Développement du gradient de pH**

L'application d'un courant électrique continu à travers le sol entraîne une oxydation à l'anode (générant un front acide) et une réduction à la cathode (produisant un front basique). Par conséquent, le traitement électrocinétique modifie le pH du sol et provoque la décomposition de l'eau via la réaction de l'oxydoréduction, du flux d'eau entre les électrodes et de la migration des ions vers l'électrode de signe opposé. Ces ions comprennent les ions présents dans le sol, les ions des agents stabilisants ajoutés aux électrodes et les ions libérés en raison de la dégradation des électrodes (Liaki et al, 2010). Au cours du processus EK, du fait de l'électrolyse de l'eau, des ions  $H^+$  et de l'oxygène se formeront à l'anode et des ions  $OH^-$  et de l'hydrogène se formeront à la cathode. Le résultat immédiat est un changement local du pH

de la solution interstitielle, de sorte que l'acidité augmente avec le temps à l'anode et que l'alcalinité augmente à la cathode (Page et Page, 2002). À cet égard, l'effet du pH sur les minéraux du sol génère une complication supplémentaire. Le front acide se déplace à travers le sol de l'anode vers la cathode et le front de base se déplace de la cathode vers l'anode (Acar et al, 1990). Le front acide se déplace plus rapidement que le front de base en raison de la mobilité plus élevée du  $H^+$  que celle de  $OH^-$ . Aux endroits où ces fronts d'acide et de base se rejoignent, de l'eau se forme, ce qui entraîne une modification brutale du pH, qui influe sur la solubilité des espèces chimiques présentes dans le sol et leur adsorption sur les particules du sol (Page et Page, 2002). Au cours du temps de traitement, la majorité du volume de sol devient acide, sauf près de la cathode (Page et Page, 2002). Le processus de cette précipitation dépend de nombreux facteurs tels que le type de sol, la nature des espèces chimiques dans la solution interstitielle du sol et les conditions de traitement. Cependant, dans certains sols possédant un pouvoir tampon relativement élevé, la migration des ions hydrogène sera entravée (Shenbagavalli & Mahimairaja, 2011). Le pH du sol ayant un effet significatif sur la valence, la solubilité et la sorption des ions, le développement de ces conditions de pH extrêmes formées au niveau des électrodes est considéré comme un facteur important dans le traitement électrocinétique des sols. Certains chercheurs estiment que la génération du  $H^+$  et l'acidification à l'anode devraient être contrôlées; sinon ce processus retarderait les ions transportant de manière à ce que la plus grande partie de l'énergie soit consommée par la génération et la migration des ions d'hydrogène entre les électrodes plutôt que par le transport des ions chargés (Acar et Alshawabkeh, 1993; Jayasekera, 2008). À cet égard, la mise au point des techniques nouvelles et efficaces de contrôle de production d'acide à l'anode est une exigence importante dans le traitement électrocinétique.

### **II.3.5. Conclusion**

Ce chapitre a été consacré à la description de la salinisation des sols et la gestion de ce phénomène par le traitement électrocinétique.

La salinisation des sols est le principal processus de dégradation des sols dans les régions arides et semi-arides. Les sols salins occupent environ de 7,7% de l'étendue continentale de la Terre dans le monde, et 25% de la surface cartographiée en Algérie. Les dommages causés par les sels dans le sol ont des effets négatifs sur l'agriculture, les ouvrages de génie civil et la santé humaine.

Les sols salins sont caractérisés par une forte concentration en sels et une conductivité électrique élevée. Les sols sodiques ont une forte teneur en sodium et faible teneur en sels. Le SAR et ESP sont deux facteurs important pour mesurer la sodicité du sol.

Le traitement électrocinétique est une technique émergente, utilisé principalement pour traiter le sol fin, peu perméable et saturé. La facilité d'installation de l'équipement électrocinétique, nous permettons de traiter le sol au niveau de laboratoire et in-situ sur une surface de terrain étendu. La technique électrocinétique assure la caractérisation et la remédiation du sol dans le même temps de traitement.

Le traitement électrocinétique peut être influencé par plusieurs facteurs tels que : le niveau de courant, le temps de traitement, la texture du sol, la teneur en eau et le gradient de pH.

# **Partie 2 : Etude expérimentale**

**Chapitre III : Identification et caractérisation du sol étudié**

**Chapitre IV : Mesure des paramètres physicochimiques du sol par la conductivité électrique**

**Chapitre V : Détermination des paramètres géotechniques du sol après traitement électrique**

## **Chapitre III :**

### **Identification et caractérisation du sol étudié**

## Chapitre III : Identification et caractérisation du sol étudié

### III.1. Introduction

Dans les régions arides les sols salins représentent 25% de la surface cartographiée de l'Algérie, (Halitim, 1988). Près de 10 à 15 % de terres irriguées sont concernées par problème de salinité. Des essais expérimentaux ont été effectués, dans le but d'identifier un sol salin-sodique provenant de la région d'Ain Nouissy Mostaganem (nord-ouest de l'Algérie).

Le travail présenté dans ce chapitre est la caractérisation physicochimique, mécanique et minéralogique des échantillons de sol.

### III.2. Localisation et géologie du site

Le sol étudié est situé dans la région d'Ain Nouissy Mostaganem (nord-ouest de l'Algérie), dont la superficie est de 680 Km<sup>2</sup> et qui ne dépasse guère 105 mètres d'altitude. Elle est distante de 17 Km de Mostaganem. Cette région est considérée comme une zone semi-aride. Les précipitations annuelles moyennes dans cette région sont de 329 mm. Selon la classification de Koppen – Geiger, le climat est de type BSK, ce qui explique une semi-aridité (sèche et chaude). Dans cette région, la faible pluviosité, la forte évaporation et les pratiques agricoles intensives induisent la surexploitation de l'eau d'irrigation et empêchent la lixiviation du sol (Figure III.1 et III.2)



**Figure III.1** : Photo satellitaire de la zone d'étude d'Ain Nouissy (Mostaganem).

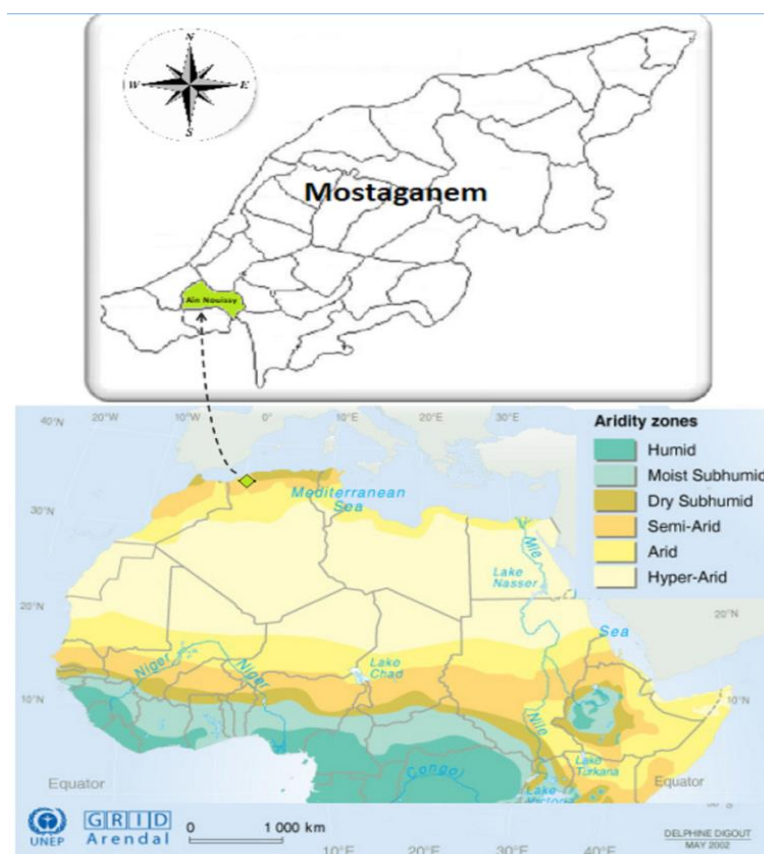


Figure III.2 : Localisation du site d'Ain Nouissy Mostaganem

### III.3. Analyse du sol étudié

Les échantillons de sol ont été extraits du premier mètre de la sub-surface du sol, où les sels chloridriques ont une concentration importante dans le sol. Le sol a été pour la suite transporté dans des sacs en plastique bien fermés afin maintenir correctement ses propriétés initiales (Figure III.3).

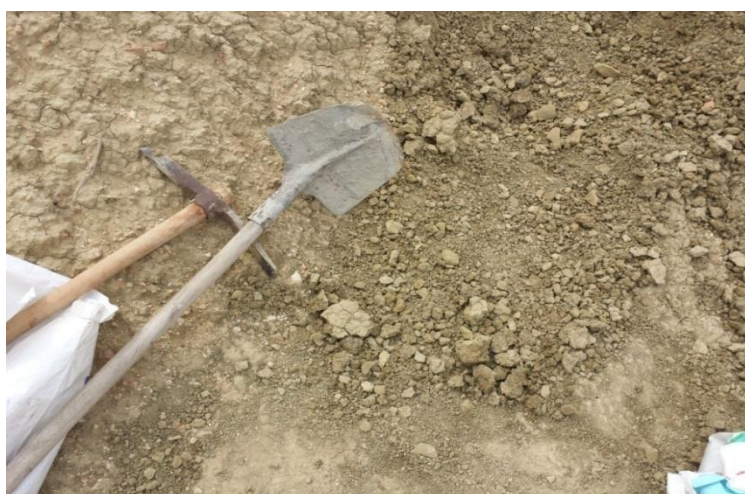


Figure III.3 : Extraction manuel du sol d'Ain Nouissy

Le sol a été broyé après séchage dans une étuve pendant une durée de 24 heures, afin d'obtenir des échantillons à grains fins (figure III.4). En suite, les échantillons de sol broyés ont été mis à l'étuve afin d'éliminer l'humidité contenue dans le sol étudié.



**Figure III.4.** Echantillons d'argile avant et après broyage

### **III.4. Caractérisation géotechniques du sol étudié**

#### **III.4.1. Paramètres physiques**

Les propriétés physiques du sol recherchées : l'analyse granulométrique, les limites d'Atterberg, l'activité des argiles, la surface spécifique et la teneur en matières organiques.

##### **III.4.1.1. Analyse granulométrique (NF P94-057)**

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la répartition dimensionnelle en poids des particules constituant notre sol étudié. Elle a été effectuée par tamisage sous l'eau pour les éléments supérieurs à 80  $\mu\text{m}$  et par sédimentation pour les éléments inférieurs à 80  $\mu\text{m}$ . La courbe granulométrique représentée sur la figure (III.5) montre que l'argile a plus de 50% d'éléments inférieurs à 80  $\mu\text{m}$  et que le pourcentage d'éléments inférieurs à 2  $\mu\text{m}$  est de 23%.

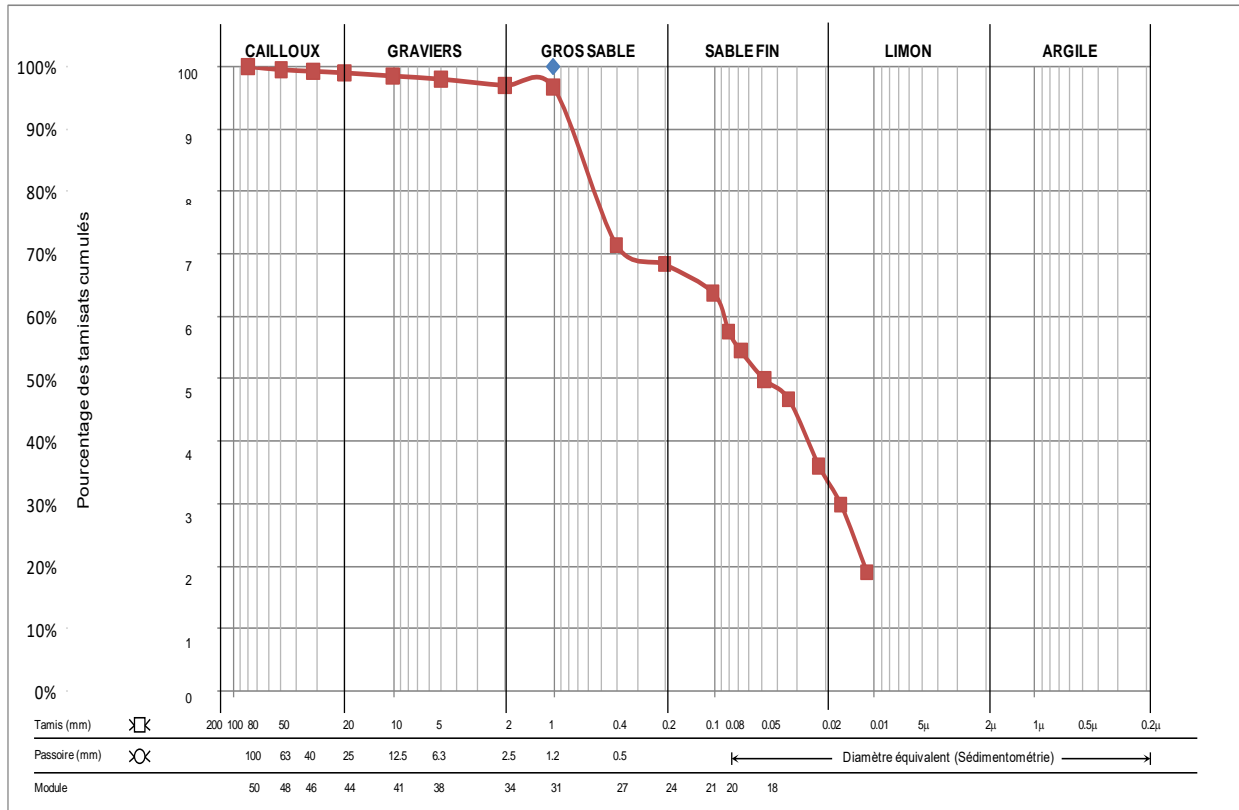


Figure III.5 : Courbe granulométrique du sol étudié.

#### III.4.1.2. Limites d'Atterberg (NF P94-051)

Les teneurs en eau de référence, liées au changement d'état des échantillons de sol, ont été déterminées par les limites d'Atterberg en utilisant la boîte de Casagrande (figure III.6).

La limite de liquidité  $W_L$  est de 42,8%, la limite de plasticité  $W_p$  est de 20,1 % et l'indice de plasticité  $IP$  est peu élevé (20,7%). En utilisant l'abaque de plasticité de Casagrande (1948) (figure III.6), on peut conclure que le sol d'Ain Nouissy se situe parmi les sols argileux peu plastiques.

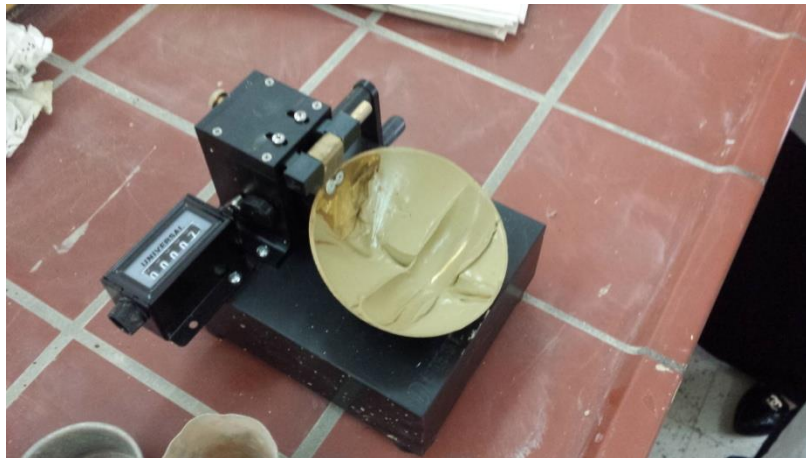


Figure III.6 : Echantillon dans la boîte de Casagrande.

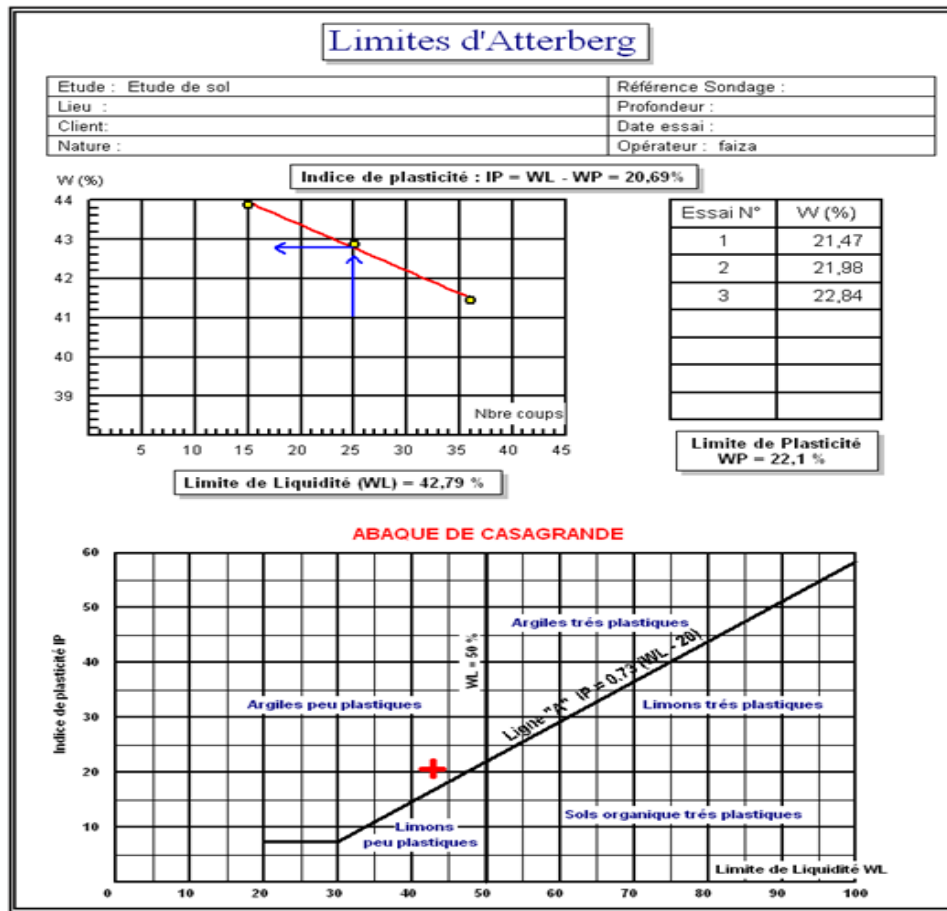


Figure III.7 : Courbe limites d'Atterberg et classification du sol étudié

### III.4.1.3. Activité des argiles

L'activité ( $AC = IP/F2$ ) d'une argile est définie par Skempton, (1953) comme le rapport de son indice de plasticité (IP) au pourcentage des particules de diamètres inférieurs à  $2\mu m$  (F2). La valeur de l'activité du sol étudié est égale à 0,9. En comparant cette valeur à celles données par les classifications de Skempton, (1953) et Mitchell, (1976) (tableau III.1), on constate que la valeur de l'activité de cette argile est dans l'intervalle des valeurs des illites : entre 0,5 et 1,3.

Tableau III.1 : Activité des différents minéraux (Skempton, 1953 et Mitchell 1976).

Minéral	Activité
Montmorillonite Na	4-5
Montmorillonite Ca	2,5
Illite	0,5-1,3
kaolinite	0,3-0,5
Calcite	0,2
Quartz	0,0

#### III.4.1.4. Mesure de la surface spécifique par l'essai d'absorption de bleu de méthylène (NF P94-068)

La surface spécifique totale d'un sol est déduite de l'essai au bleu de méthylène. Cette surface spécifique est liée directement à la quantité de bleu de méthylène absorbée par la fraction argileuse. Elle est donnée par la formule de Tran, (1977).

$$SST = 20,93 \times V_{cc} \times \frac{1}{P_s}$$

(III.1)

SST : surface spécifique totale (m<sup>2</sup>/g)

V<sub>CC</sub> : volume de bleu de méthylène utilisé (cm<sup>3</sup>)

P<sub>s</sub> : masse de matériau sec (g)

20,93 : surface correspondant à 1 cm<sup>2</sup> de bleu de méthylène.

Les résultats obtenus sont donnés par le tableau (III.2)

**Tableau III.2** : Paramètres tirés de l'essai au bleu de méthylène

Paramètres	Ain Nouissy
Valeur du bleu VBS (%)	6,67
Surface spécifique totale SST (m <sup>2</sup> /g)	139,53

Le premier paramètre tiré de l'essai est la valeur du bleu VBS, et le tableau (III.3) représente la valeur de bleu de quelques sols.

**Tableau III.3** : valeur de bleu de quelques sols (Hang 1984)

V <sub>B</sub> (%)	Sols
0,1	Sols insensibles à l'eau
0,2	Apparition de la sensibilité à l'eau
1,5	Seuil distinguant les sols sablo-limoneux des sols argileux
2,5	Seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité moyenne
6	Seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux
> 8	Seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux

D'après le tableau (III.3), la valeur de bleu de cette argile est supérieure à 6, donc elle appartient du seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux.

L'autre paramètre déterminé à partir de l'essai est la surface spécifique totale. En utilisant le tableau (III.4), on remarque que la surface spécifique de notre argile est dans la limite inférieure des montmorillonites.

**Tableau III.4 :** Surface spécifique totale de quelques argiles (Lautrin, 1987).

Argiles	Surface spécifique totale (m <sup>2</sup> /g)
Montmorillonites	
Ca <sup>++</sup>	300
Na <sup>+</sup>	800
Illite	40-60
Kaolinite	5-20
Eléments non argileux	1-3

#### III.4.1.5. Teneur en matière organique (NF EN 12879)

La teneur en matière organique de l'échantillon a été mesurée selon la norme de la détermination de la perte au feu de la matière sèche (NF EN 12879). Selon cette norme, pour chaque prise d'essai, un creuset doit être placé dans un four et chauffé à température de 450 ± 25°C pendant 4 heures. La teneur en matière organique MO (%) est calculée à partir de l'équation (III.2).

$$MO (\%) = \frac{m_2 - (m_3 - m_1)}{m_1} \times 100 \quad (III.2)$$

m<sub>1</sub> : Poids du creuset vide

m<sub>2</sub> : Poids de l'échantillon

m<sub>3</sub> : Poids de l'échantillon après séchage

La mesure de la teneur en matière organique du sol d'Ain Nouissy a un pourcentage de 5,61 %. D'après le tableau (III.5), on peut dire que le sol est faible en matières organiques.

**Tableau III.5 :** Types de sols en fonction du pourcentage en matières organiques (Liang, 2012)

Teneur en MO	Type de sol
MO < 3	Argile ou limon
3 < MO < 10	Sol faiblement organique
10 < MO < 30	Sol moyennement organique
MO ≥ 30	Sol très organique

### III.4.2. Caractéristiques chimiques

Les propriétés chimiques du sol étudié déterminées dans ce travail sont : la composition chimique, la teneur en carbonate de Calcium et la concentration initiale d'ions.

#### III.4.2.1. Composition chimique

La composition chimique de chaque argile étudiée a été réalisée par diffractométrie à rayon X, au laboratoire de l'Entreprise de Lafarge (Mascara). Les résultats des analyses chimiques sont représentés au tableau (III.6). Ces résultats montrent que l'argile est un aluminosilicate avec un rapport Silice/ Alumine de 4,2. Le pourcentage de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et de CaO confirme la présence de goethite et de calcite. Par ailleurs, la teneur en K<sub>2</sub>O montre l'existence d'illite dans ce sol. La forte proportion de silice reflète la présence de la silice sous forme de minéral associé.

**Tableau III.6** : Analyse chimique du sol étudié

Constituents chimiques	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O
Valeurs %	46,71	11,09	4,73	13,86	2,68	0,07	0,11	0,17	0,55	0,07	0,03	1,87

#### III.4.2.2. Teneur en carbonate de Calcium (NF X31-106)

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

$$\text{CaCO}_3 (\%) = \frac{\text{Volume du CO}_2 \text{ dégagé par 0,5g d'échantillon}}{\text{Volume du CO}_2 \text{ dégagé par 0,5g de CaCO}_3 \text{ pur}} \quad (\text{III.3})$$

D'après les résultats de l'essai, la teneur en carbonate de Calcium est de 23,03%. En se basant sur la classification du tableau (III.7) qui donne la valeur de la teneur en CaCO<sub>3</sub> de quelques sols, notre argile appartient à la classe des argiles calcaires.

**Tableau III.7** : Teneur en CaCO<sub>3</sub> de quelques sols (cité par Bourokba, 2011).

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

100	Calcaire.
-----	-----------

### III.4.2.3. Concentrations initiales d'ions

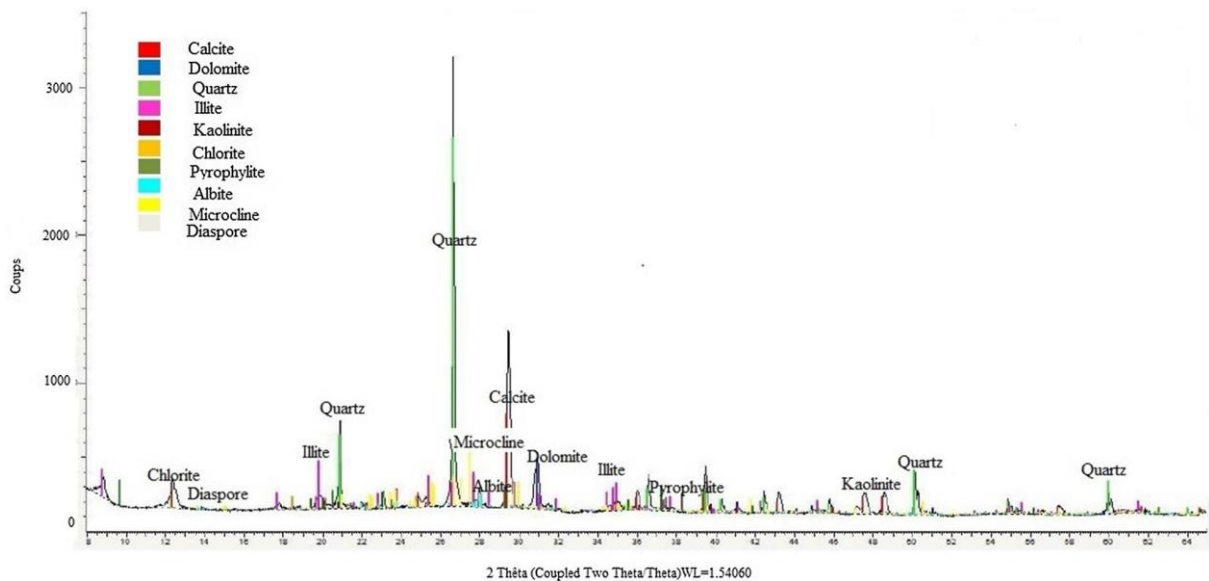
Les essais expérimentaux pour la détermination des concentrations initiales des ions ont été effectués au niveau du laboratoire de chimie (UMAB). L'annexe (1) présente le mode opératoire détaillé pour le protocole de l'essai. Les concentrations d'ions initiales de l'argile d'Ain Nouissy sont présentées dans le tableau (III.8)

**Tableau III.8 :** Concentration des ions de l'argile d'Ain Nouissy

ions	Concentration (mg/Kg)
Na <sup>+</sup>	130
K <sup>+</sup>	52
Ca <sup>2+</sup>	29
Mg <sup>2+</sup>	21
Cl <sup>-</sup>	53

### III.4.3. Caractéristiques minéralogiques

Une analyse diffractométrique aux rayons X à été menée pour déterminer la minéralogie des minéraux argileux, constituant le sol étudié, représentée sur la figure (III.4).



**Figure III.8 :** Analyse diffractométrique du sol d'Ain Nuissy.

L'analyse minéralogique par DRX des échantillons prélevés montre une probabilité d'une présence des phases cristallines essentiellement sous forme de : Quartz ( $\text{SiO}_2$ ), Dolomite ( $\text{Ca Mg}(\text{CO}_3)_2$ ), Calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), Kaolinite ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) et Illite ( $(\text{K},\text{H}_3\text{O}) (\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2 (\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10} [(\text{OH})_2, (\text{H}_2\text{O})]$ ) (Daniel et al, 2011 et Dahmane et al, 2012).

#### III.4.4. Caractéristiques mécaniques

Après avoir déterminé les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques de notre sol, on a effectué des essais au laboratoire afin de déterminer les caractéristiques mécaniques des différents échantillons de sol. Les différents essais effectués sont : Essai oedométrique, essai Proctor normal, essai de cisaillement, essai de perméabilité à charge variable.

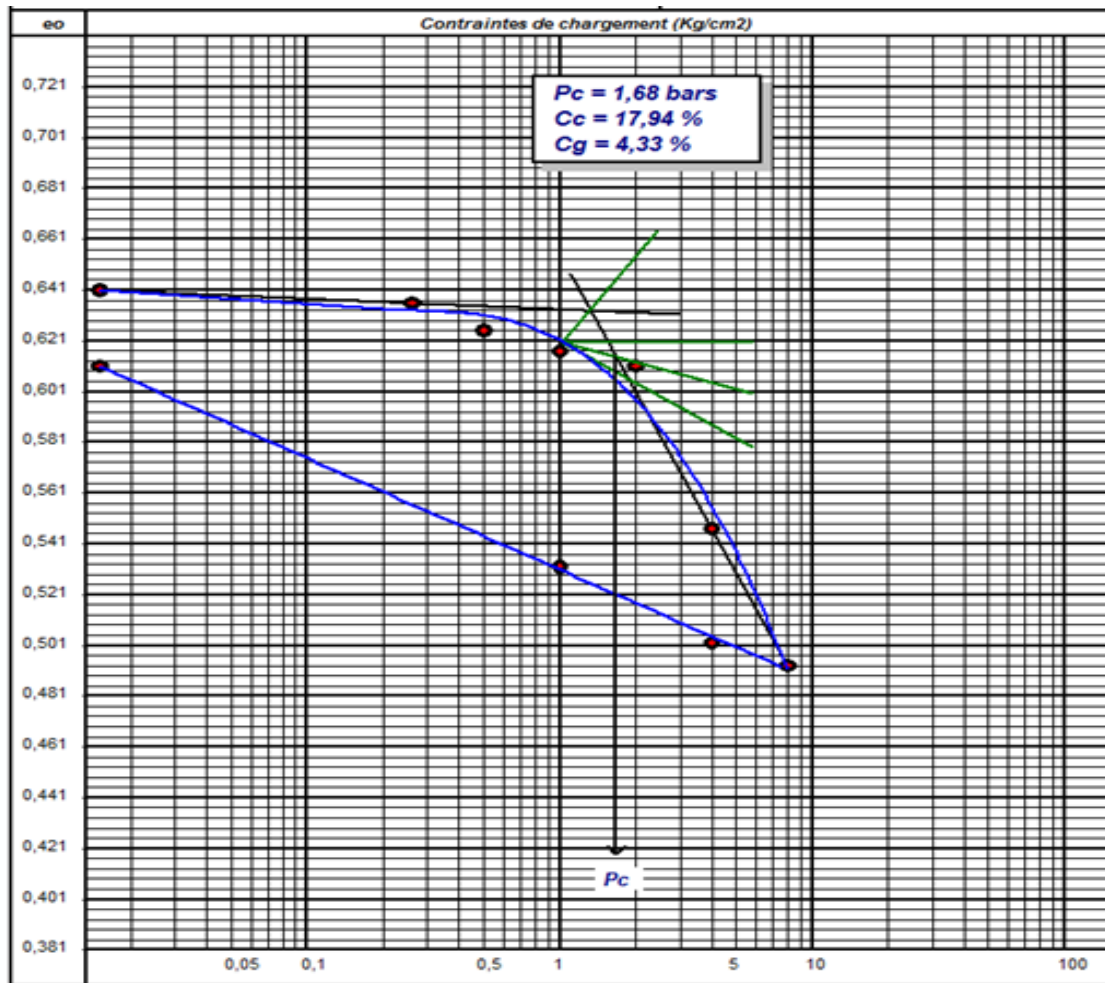
##### III.4.4.1. Essai oedométrique (NF P94-090-1)

L'essai consiste à mesurer, à l'aide d'un oedomètre (figure III.9), la déformation verticale d'un échantillon de sol saturé soumis à une contrainte verticale. La contrainte verticale peut être maintenue constante et l'on mesure alors la variation de la hauteur de l'échantillon en fonction du temps, ce qui permet d'établir une courbe appelée « courbe de consolidation ». On peut aussi faire un chargement par palier et l'on mesure le tassement final pour chaque palier. Ce dernier essai permet de tracer la courbe de compressibilité.



Figure III.9 Appareil oedométrique

- La contrainte de pré-consolidation  $\sigma'_{pc}$  qui correspond à la contrainte verticale maximale supportée par l'échantillon au cours de son histoire,
- Le coefficient de compressibilité  $C_c$ , qui représente la pente de la courbe de chargement,
- Le coefficient de gonflement  $C_g$ , qui est la pente de la courbe de déchargement.
- La courbe de compressibilité de notre argile est représentée par la figure (III.10).



**Figure III.10 :** Courbe de compressibilité de l'argile d'Ain Nouissy

Il faut noter que les échantillons sont remaniés à une densité sèche de  $12,5 \text{ kN/m}^3$  et à une teneur en eau de 25% (densité sèche et teneur en eau proches de celles des échantillons intacts), les échantillons ont 20 mm d'épaisseur et 70 mm de diamètre. Les résultats obtenus pour les différents paramètres sont représentés dans le tableau (III.9).

**Tableau III.9 :** Paramètres oedométriques de l'argile étudiée.

Paramètres oedométriques	Valeurs
--------------------------	---------

Cc	0,230
Cg	0,035

Le comportement des sols vis à vis de la compressibilité peut être apprécié selon la classification du tableau (III.10).

**Tableau III.10:** Classification selon le rapport  $Cc/(1+e_0)$  (Philipponnat et Hubert 1997).

$Cc/(1+e_0) < 0,015$	Sol incompressible
$0,015 < Cc/(1+e_0) < 0,05$	Sol peu compressible
$0,05 < Cc/(1+e_0) < 0,2$	Sol moyennement compressible
$Cc/(1+e_0) > 0,2$	Sol très compressible

L'indice des vides initial est de 1,125. D'après les résultats obtenus et le calcul du rapport  $Cc/(1+e_0)$ , nous obtenons les valeurs de 0,108 pour cette argile. La classification du tableau (III.10) permet de dire que l'argile d'Ain Nouissy est de type moyennement compressible.

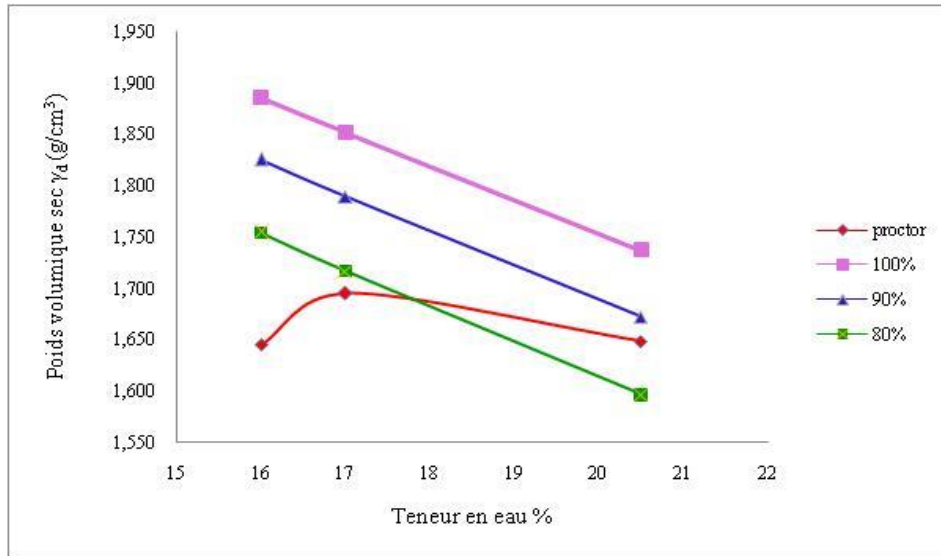
#### III.4.4.2. Essai Proctor Normal (NF P94-093)

Le compactage est un procédé de stabilisation mécanique des sols (remblai, route, etc...), il a pour but de limiter les tassements, diminuer la perméabilité et améliorer les caractéristiques mécaniques du sol.



**Figure III.11** : Appareil de compactage

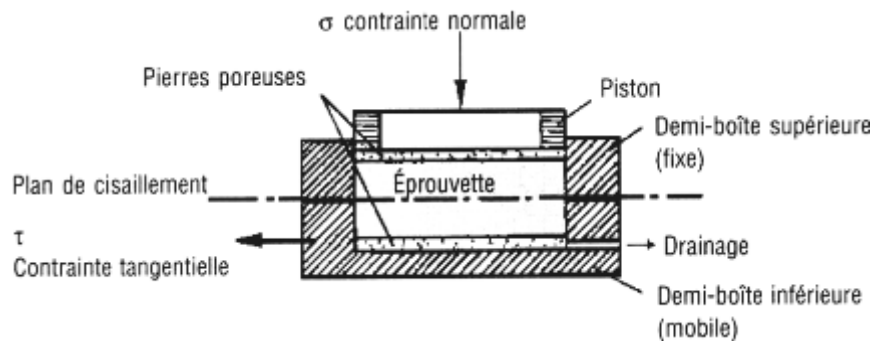
Au laboratoire, le matériau est mis à l'étuve pendant 24 heures. On ajoute un poids déterminé d'eau. L'échantillon est compacté dans un moule Proctor ( $h= 11,7$  cm ;  $\phi= 10,2$  cm) avec une énergie fournie par une dame (25 coups/couche), d'un poids de 2,5 kg. Une hausse mobile adjointe au moule pour permettre de compacter jusqu'à 13 cm (figure III.12). Ensuite l'échantillon est arasé à 11,5 cm après enlèvement de la hausse. Le point de la courbe se traduit le résultat de l'essai.

**Figure III.12** : Courbe de compactage à OPN.

Le résultat de l'essai de compactage est présenté sur la figure (III.12). On peut noter que la teneur en eau à l'OPN est de 17,5% pour un poids volumique sec de 1,85  $g/cm^3$ .

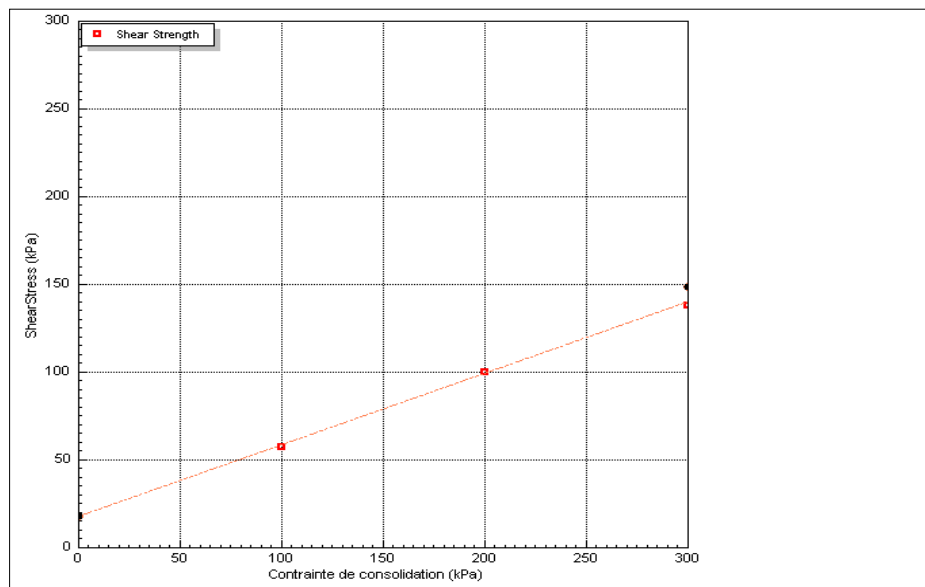
#### III.4.4.3. Essai de cisaillement (NF P94-071-1)

L'essai de cisaillement direct a été effectué au laboratoire, afin de déterminer l'angle de frottement interne  $\phi$ . Cet essai consiste à appliquer une contrainte normale à un échantillon de sol maintenu en conditions non drainées, puis à le soumettre à un cisaillement horizontal jusqu'à la rupture (figure III.13).



**Figure III.13 :** Schéma de la boîte de cisaillement direct.

La courbe intrinsèque s'obtient directement en reportant les couples  $(\sigma_n, \tau)$  où  $\sigma$  est la contrainte normale appliquée pendant une rupture et  $\tau$  la contrainte de cisaillement mesurée pour la rupture. Cet essai s'interprète en considérant que la courbe intrinsèque est une droite (droite de Coulomb), l'angle qu'elle fait avec l'axe des contraintes étant l'angle de frottement interne. Il faut noter que les échantillons sont remaniés et compactés à l'optimum proctor à une densité sèche de 1,85 et à une teneur en eau de 17,5 %, les échantillons ont une forme parallélépipédique de 23 mm d'épaisseur et 60 mm de côté. La variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte appliquée est représentée sur la figure (III.10). L'angle de frottement et la cohésion obtenus sont de  $22,2^\circ$  et 17,41 kPa respectivement.



**Figure III.14 :** Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte appliquée

#### III.4.4.4. Essai de perméabilité à charge variable

Cette procédure d'essai est généralement employée pour les sols fins qui présentent des coefficients de perméabilité assez faibles ( $<10^{-7}$  m/s). Le sol à étudier est placé dans le perméamètre à charge variable (figure III.15). On mesure le temps nécessaire pour que le

niveau d'eau descende du niveau  $h_1$  au niveau  $h_2$ . On se trouve bien dans le cas d'un écoulement à une dimension, et on peut appliquer la loi de Darcy pour chaque intervalle élémentaire de temps ( $t, t + dt$ ). La détermination du coefficient de perméabilité se fait à la fin d'essai par l'équation suivante :

$$K = 2.3 \frac{a.L}{A(t_2 - t_1)} \cdot \log \frac{h_1}{h_2} \quad (\text{III. 4})$$

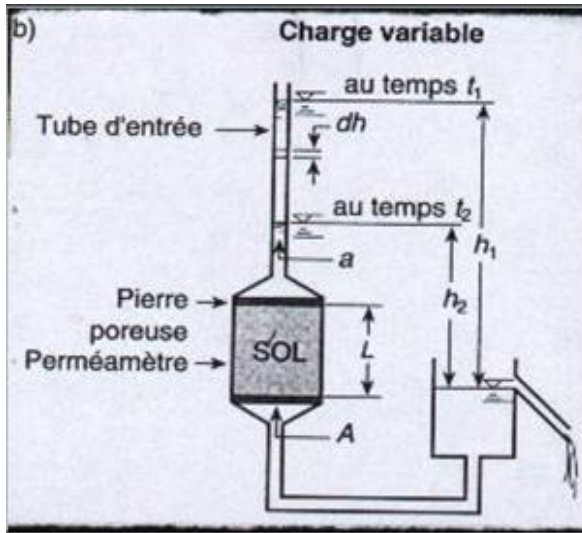


Figure III.15 : Schéma d'un perméamètre à charge variable



Figure III.16 : Perméamètre à charge variable

Le coefficient de perméabilité de l'argile d'Ain Nouissy est de  $5,06 \times 10^{-9}$  m/s. d'après le tableau (III.11), le sol étudié a un degré de perméabilité très faible.

Tableau III.11 : Ordre de grandeur de perméabilité (Cassan, 2005)

Nature	Ordre de grandeur de k en m/s	Degré de perméabilité
Graviers moyens à gros	$10^{-1}$ à $10^{-3}$	Très élevé
Petit graviers, sable	$10^{-3}$ à $10^{-5}$	Assez élevé
Sable très fin, sable limoneux, loess	$10^{-5}$ à $10^{-7}$	Faible
Limon compact, argile limoneuse	$10^{-7}$ à $10^{-9}$	Très faible
Argile franche	$10^{-9}$ à $10^{-12}$	Pratiquement imperméable

Les paramètres d'identification du sol étudié sont regroupés dans le tableau (III.12).

**Tableau III.12.** Propriétés d'identification du sol d'Ain Nouissy

Propriétés	Symbole	Valeur
Poids volumique des grains solides (NF P94-054)	$\gamma_s$	2,70 (g/cm <sup>3</sup> )
Limite de liquidité (NF P94-051)	$W_L$	42,8 %
Limite de plasticité (NF P94-051)	$W_p$	20,1 %
Indice de plasticité (NF P94-051)	IP	20,7 %
Pourcentage d'éléments inférieurs à 2 $\mu\text{m}$ (NF P94-057)	F2	23 %
Activité (= IP / F2)	AC	0,9
Valeur de bleu de méthylène (NF P94-068)	VBS	6,67 (%)
Surface spécifique totale	SST	135,39 (m <sup>2</sup> /g)
Teneur en carbonate de calcium (NF X31-106)	CaCO <sub>3</sub>	23,03 (%)
Poids volumique sec à l'OPN (NF P94-093)	$\gamma_{d \text{ max}}$	1,85 (g/cm <sup>3</sup> )
Teneur en eau optimale (NF P94-093)	$\omega_{\text{opt}}$	17,5 (%)
Coefficient de compressibilité	Cc	0,230
Coefficient de gonflement	Cg	0,035
Angle de frottement	$\varphi$	22,2°
Cohésion	Cu	17,41 (kPa)
Coefficient de perméabilité	K	5,06 (m/s)
pH NF X 31-103	-	8,47
Conductivité électrique NF X 31-113	$\sigma$	3,43 (mS/cm)
Concentration d'ions		
Na <sup>+</sup> (ISO 99643)		130
K <sup>+</sup> (ISO 99643)		52
Mg <sup>2+</sup> (ISO 7980)		29
Ca <sup>2+</sup> (ISO 7980)		21
Cl <sup>-</sup> (ISO 9297)		53

### III.5. Conclusion

Les essais d'identification ont été réalisés afin de déterminer les caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques, et mécaniques des échantillons de sol provenant de la région d'Ain Nouissy Mostagamen. Sur la base de ces essais on peut déduire que :

- D'après les analyses physiques, on constate qu'il s'agit d'un sol argileux peu plastique, à faible matière organique.
- La concentration d'ions initiale montre que le sol est une argile sodique (la concentration de  $\text{Na}^+$  est la plus élevée par rapport aux autres ions de 130 mg/kg).
- L'analyse minéralogique par DRX des échantillons prélevés montre une probabilité d'une présence des phases cristallines essentiellement sous forme de : Quartz, Dolomite, Calcite, Kaolinite et Illite. L'absence des minéraux montmorillonites indique que le sol n'est pas gonflant.
- Les essais mécaniques ont été faits pour caractérisés le comportement mécanique du sol.

## **Chapitre IV :**

### **Mesure des paramètres physicochimiques du sol par la conductivité électrique**

## **Chapitre IV : Mesure des paramètres physicochimiques du sol par la conductivité électrique**

### **IV.1. Introduction**

La résistivité électrique présente une très large gamme de variation selon les géomatériaux. La possibilité de spatialisation des mesures, la rapidité de mise en œuvre et le coût relativement modéré, permet une caractérisation des sols hétérogènes sur une surface étendue. L'objectif principal de ce chapitre consiste à étudier la relation entre la résistivité électrique et les paramètres physico-chimiques du sol étudié, tels que la teneur en eau, le degré de saturation, la porosité, le pH et la concentration en sels.

### **IV.2. Protocole expérimental**

L'étude est basée sur la contamination artificielle des échantillons d'argile par trois types de chlorure de sodium (NaCl), chlorure de potassium (KCl) et chlorure de magnésium (MgCl<sub>2</sub>). Les concentrations utilisées dans cet essai sont 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 et 1,0 mol/l. Ces sels ont été choisis car ils présentent les substances les plus courantes dans les sols. Les solutions salines ont été préparées en mélangeant les sels à différentes concentrations avec de l'eau distillée, à l'aide d'un agitateur électrique pendant une période de 20 minutes, afin de diluer les molécules de sels dans l'eau. Les grains de sol en poudre ont été mélangés manuellement avec les solutions salines pendant une durée d'une heure pour bien homogénéiser les molécules d'eau dans le sol, puis les échantillons de sol ont été laissés au repos pendant une à deux heures afin d'assurer la distribution uniforme de la teneur en eau. Le sol a été placé dans une cellule en verre transparente de forme parallélépipède comme le montre la figure (IV.1). La cellule a été fabriquée dans le laboratoire LCTPE, en verre, principalement parce que le verre est chimiquement et électriquement neutre et transparent, et il permet la vérification d'homogénéisation de la distribution du sol dans le bac. Deux plaques de cuivres ont été utilisées comme électrodes pour la mesure de la conductivité électrique.



**Figure IV.1** : Cellule expérimentale

### **IV.3. Mesure de la conductivité électrique**

La résistivité électrique est un paramètre important dans la mesure des différentes propriétés du sol, de sa grande sensibilité aux petites variations électriques du sous-sol, de sa vitesse d'acquisition des mesures et de son caractère non destructif. La résistivité électrique est égale à l'inverse de la conductivité électrique, elle est donc définie par la capacité de l'horizon à limiter le passage de l'énergie électrique. La résistivité électrique a été utilisée comme indicateur de l'influence de différents paramètres tels que la concentration en ions, le pH, la teneur en eau, le degré de saturation et la porosité du sol. La première étape de cette recherche consiste à mesurer la conductivité électrique d'argile à l'aide d'un conductivimètre de poche Hanna (7833). Des échantillons de sol ont été compactés à plusieurs teneurs en eau afin de déterminer les paramètres physicochimiques du sol en fonction de la mesure de la résistivité électrique. (Figure IV.2).



Figure IV.2 : Mesure de la conductivité électrique

La résistivité électrique est calculée par l'équation suivante:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (\text{IV.1})$$

Où  $\sigma$  représente la conductivité électrique mesurée avec le conductimètre Hanna 7833

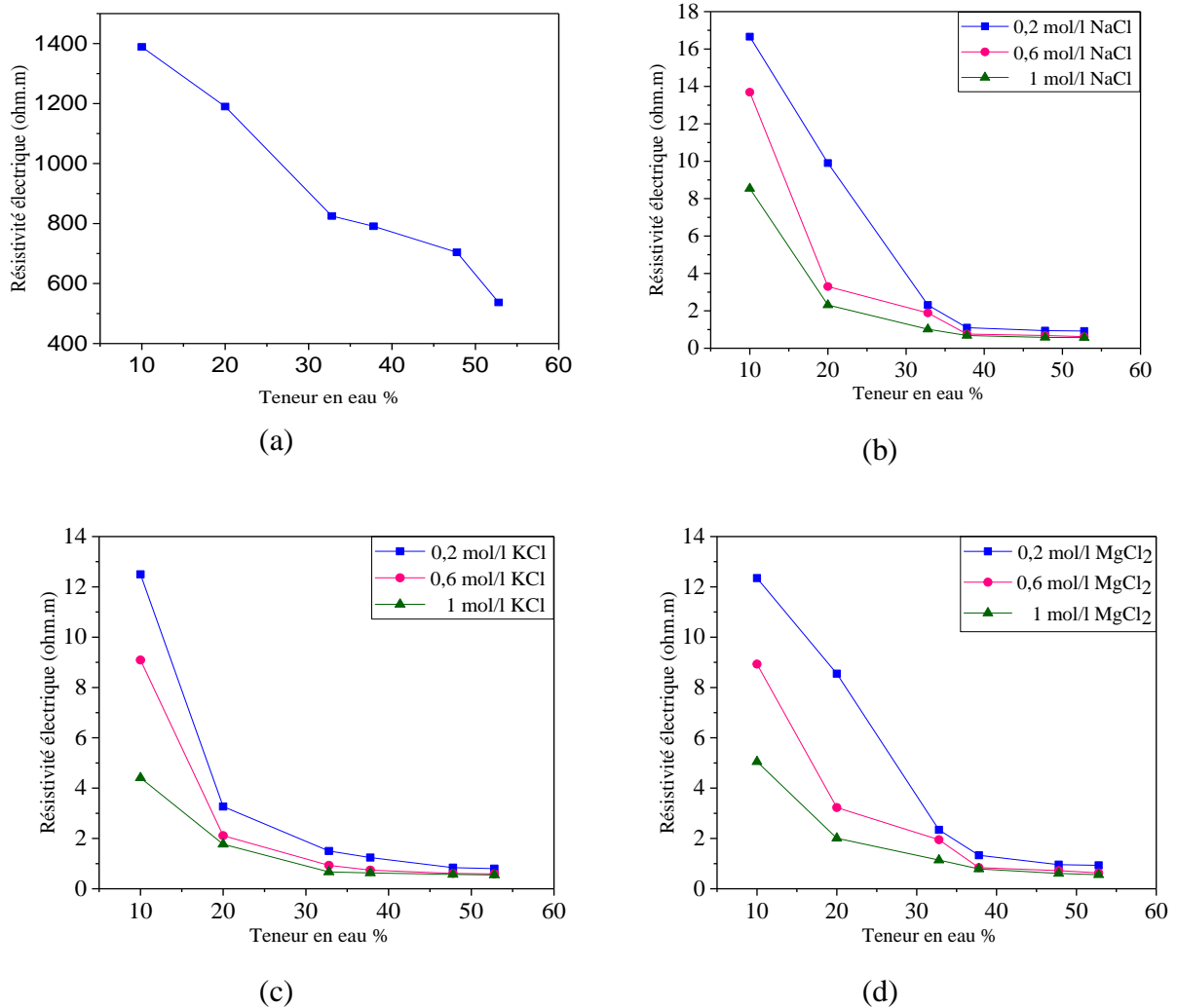
#### IV.4. Résultats et discussion

##### IV.4.1. Mesure des propriétés physiques d'argile par la conductivité électrique

Dans cette partie, les paramètres étudiés lors des tests expérimentaux ont été la teneur en eau, le degré de saturation et la porosité. Ces essais ont été effectués dans une première phase à l'état naturel, puis dans la deuxième phase, les échantillons de sol ont été contaminés par des solutions salines (NaCl, KCl et MgCl<sub>2</sub>).

##### IV.4.1.1 Variation de la teneur en eau

Les échantillons de sols ont été compactés avec différents teneur en eau (de 10% à 53%), sans et avec trois concentrations des solutions salines de NaCl, KCl et MgCl<sub>2</sub> (0,2 mol/l, 0,6 mol/l et 1,0 mol/l).



**Figure IV.3 :** Variation de la résistivité électrique en fonction de la teneur en eau

Les figures (IV.3) représentent les résultats obtenus lors de ces essais. Ces figures montrent qu'il existe une diminution de la résistivité électrique du sol avec l'augmentation de la teneur en eau (figure IV.3 a). La même hypothèse a été rapportée par Bai et al, (2013). On peut noter que la résistivité du sol a diminué jusqu'à plus de trois fois sa valeur initiale pour l'augmentation de la teneur en humidité de 10 à 30%. Cependant, aucune variation importante de la résistivité n'a été observée dans la plage d'humidité comprise entre 30 et 50% dans ces échantillons. Les mélanges d'argile avec NaCl, KCl et MgCl<sub>2</sub> ont tendance à diminuer la valeur de résistivité électrique avec l'augmentation de la teneur en eau. La même tendance a été observée par Kolay et al, (2016). (Figures (IV.5 b), (IV.5 c) et (IV.5 d)). La réduction de la résistivité suit une tendance similaire dans chaque cas. A partir de la figure (IV.3 b) on remarque que, les valeurs de résistivité diminuaient de 16,7 à 2,3 Ohm.m, pour une augmentation de la teneur en humidité de 10 à 32,8%. L'augmentation de la concentration en

NaCl entraîne une diminution de la résistivité électrique, la résistivité électrique diminue de 16,7, 13,7 et 8,5 Ohm.m pour des concentrations de 0,2, 0,6 et 1,0 mol/l respectivement à une teneur en eau de 10 %. Les phénomènes observés peuvent être discutés en utilisant l'hypothèse de Pozdnyakov (2006), (Voir chapitre I, figure I.14). De cette hypothèse, on peut constater que la présence des molécules d'eaux dans le sol augmente l'eau adsorbée donc diminuée rapidement la résistivité électrique.

#### IV.4.1.2 Variation du degré de saturation

Le degré de saturation est calculé selon l'équation (2).

$$S_r = \frac{\omega \cdot G_s \cdot \rho_d}{(G_s \cdot \rho_w) - \rho_d} \quad (IV.2)$$

Où  $\omega$  est la teneur en eau;  $G_s$  est la densité des grains solides ;  $\rho_d$  est le poids volumique sec et  $\rho_w$  est le poids volumique de l'eau.

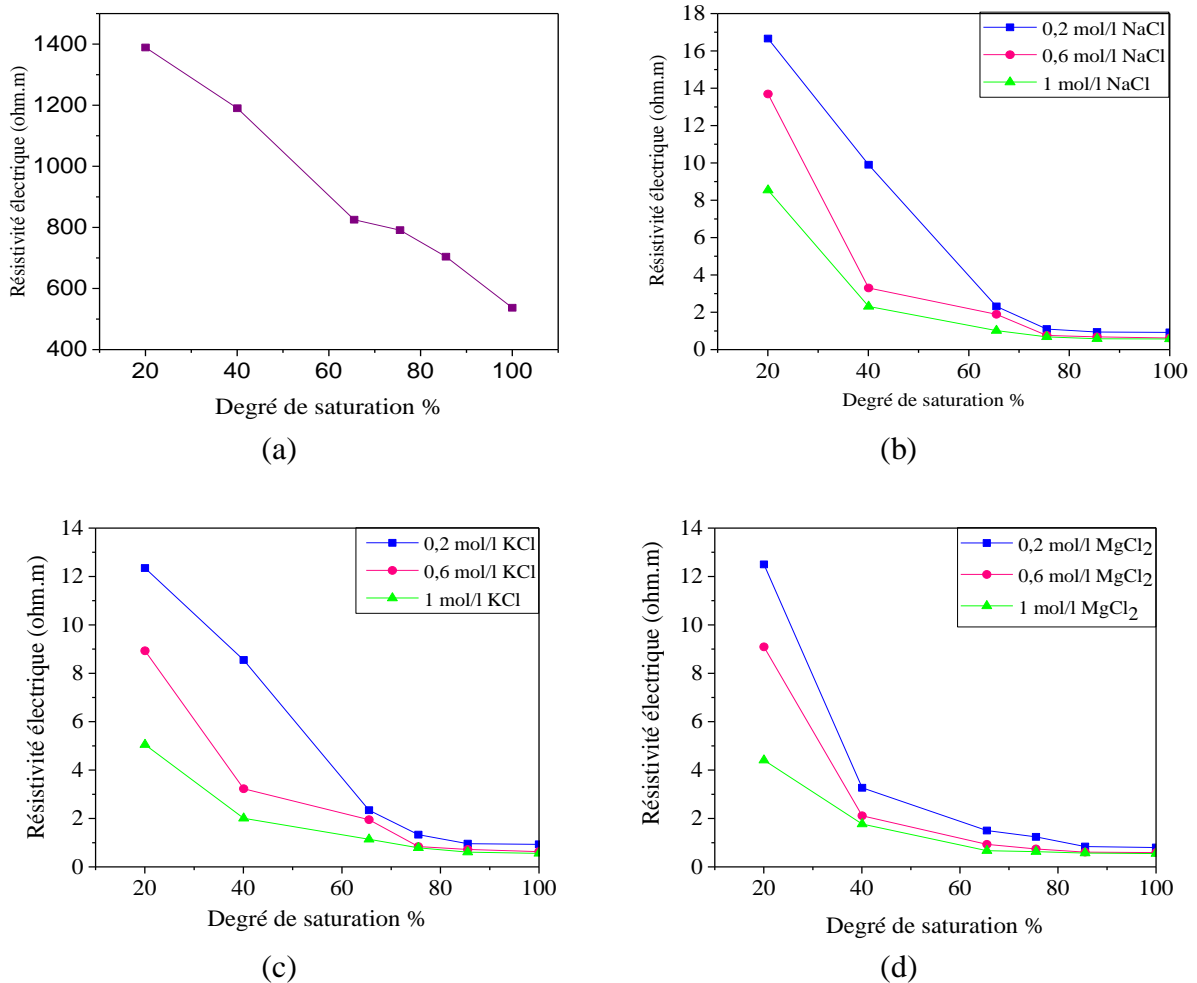


Figure IV.4 : Variation de la résistivité électrique en fonction du degré de saturation

La figure (IV.4) montre la variation de la résistivité électrique en fonction du degré de saturation des échantillons d'argile mélangés avec l'eau distillée et trois solutions salines de NaCl, KCl et MgCl<sub>2</sub> (0,2, 0,6 et 1,0 mol/l). A partir de cette figure, on remarque qu'il y'a une diminution de la résistivité électrique avec l'augmentation de la saturation du sol. Le même comportement a été observé par Bai et al. (2013) et Gingine et al. (2016), cette diminution est justifiée par, le fait que la saturation du sol occupe un grand volume des pores entre les grains du sol par les molécules d'eau, d'où son influence sur la résistivité électrique.

Les mélanges d'argile avec NaCl, KCl et MgCl<sub>2</sub> ont tendance à diminuer les valeurs de la résistivité électrique. On remarque aussi qu'il y'a une grande diminution de la résistivité électrique avec une concentration des sels de chlorure plus élevée, (pour le même degré de saturation la valeur de la résistivité électrique est de 1389 Ω.m pour l'argile mélangée avec l'eau distillée, 12,35 Ω.m pour une solution saline de 0,2 mol/l et 5,05 Ω.m pour la même solution saline avec 1 mol/l de concentration).

A partir des figures (IV.4 b), (IV.4 c) et (IV.4 d), on observe que l'augmentation de la quantité d'eau dans les pores (au delà de 60 % du degré de saturation) et la forte distribution de la solution saline dans les particules d'argiles, ont une tendance de diminuer la résistivité électrique à une valeur pratiquement négligeable.

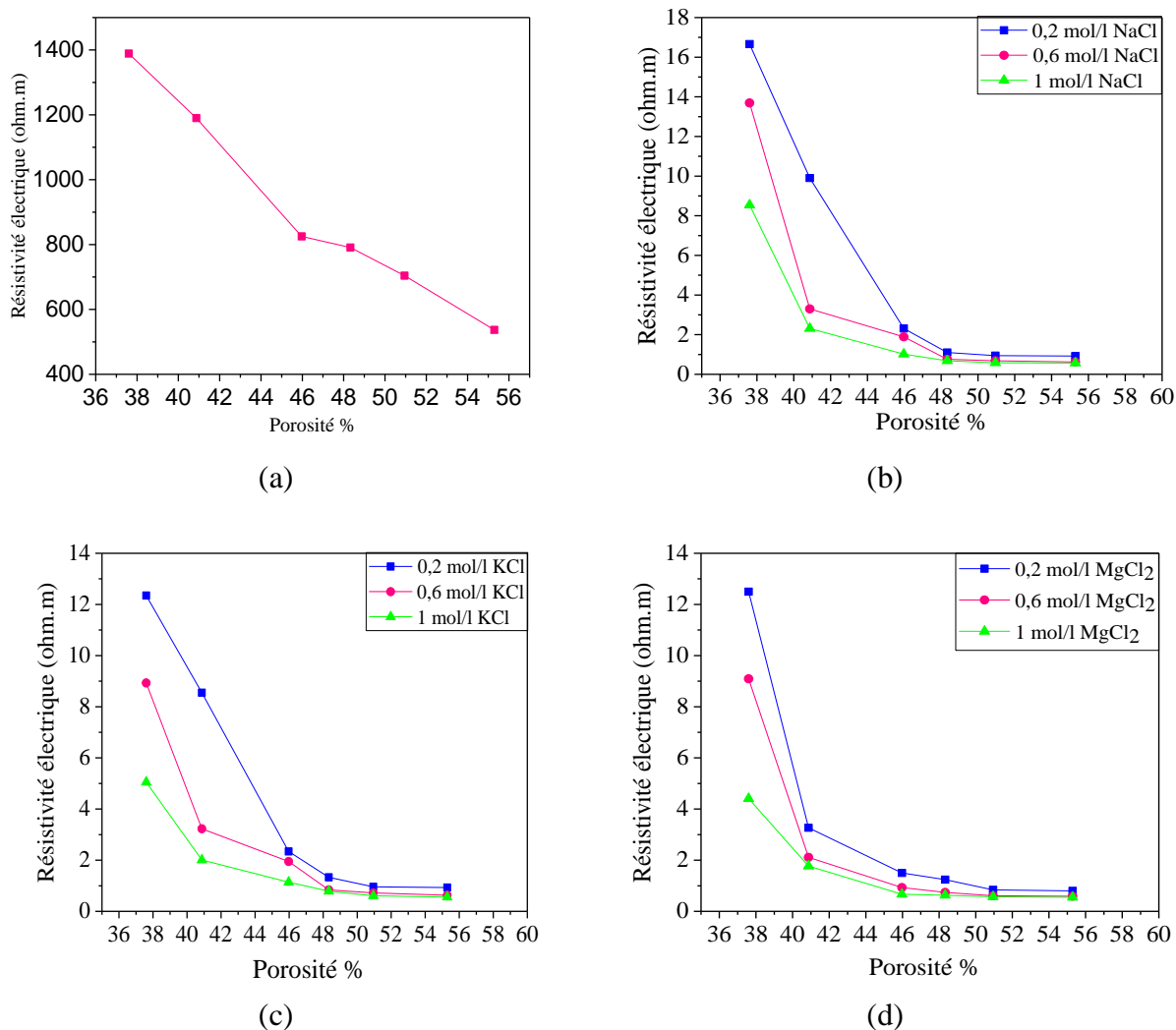
#### IV.4.1.3. Variation de la porosité

La porosité est un paramètre clé pour le comportement du sol. La porosité est déterminée par l'équation suivante:

$$n = \frac{\gamma - \gamma_s}{(S_r \cdot \gamma_w) - \gamma_s} \quad (\text{IV.3})$$

Où  $\gamma$  est le poids volumique totale;  $\gamma_s$  est le poids volumique des grains solides et  $S_r$  est le degré de saturation.

La porosité a été identifiée comme un facteur important affectant la résistivité électrique des sols. La présence des pores réduit l'inter-connectivité du film d'humidité dans les grains de sol, ce qui entraîne une réduction de la résistivité. La variation de la résistivité électrique en fonction de la porosité des échantillons d'argiles mélangées avec l'eau distillée et les différentes concentrations en NaCl, KCl et MgCl<sub>2</sub> est représentée dans la figure (IV.5).



**Figure IV.5 :** Variation de la résistivité électrique en fonction de la porosité

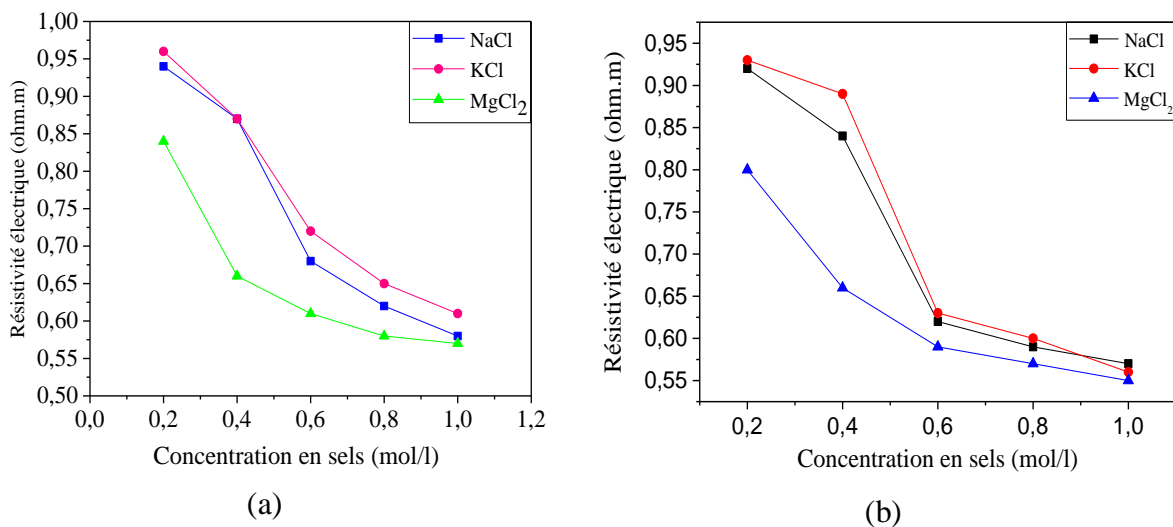
La présence des pores permet une forte circulation d'eau salée entre les particules du sol. Cela peut justifier la grande diminution de la résistivité électrique par rapport à l'échantillon sans sels. (Figures (IV.5 b) (IV.5 c) et (IV.5 d)). Les sels à base de chlorures ont une tendance similaire dans leur effet sur la variation de résistivité électrique.

#### IV.4.2. Mesure des propriétés chimiques d'argile par la conductivité électrique

Les paramètres obtenus lors des tests expérimentaux sont les suivants: la concentration en sels et le pH du sol étudié.

#### IV.4.2.1. Variation de la salinité du sol

La figure (IV.6), montre la variation de la salinité de l'eau mélangée avec l'argile 52,8% et à 42,8% de la teneur en eau respectivement. Cette figure montre que l'augmentation de la concentration en sels entraîne une diminution de la résistivité électrique. La même tendance a été citée par (Shevnin et al, 2007). On peut noter à partir de cette figure que l'influence des concentrations en sels sur la diminution de la résistivité électrique est plus importante dans les deux premières concentrations 0,2 mol/l et 0,4 mol/l, au-delà de 0,4 mol/l, la variation de la résistivité électrique est moins importante.



**Figure IV.6 :** Variation de la résistivité électrique en fonction de la salinité d'argile mélangée à des teneurs en eau a)- 52,8% et b)- 42,8%

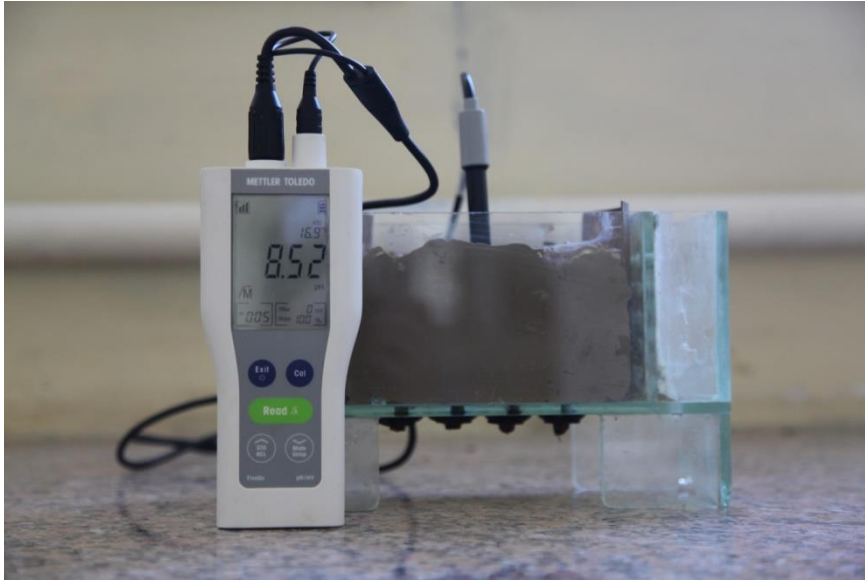
Les échantillons de sol mélangés avec des solutions de MgCl<sub>2</sub> ont un effet plus important sur la réduction de la résistivité électrique que les solutions de NaCl et de KCl. Cette hypothèse est justifiée par les principales composants du sol (Na, K, Mg) qui sont toxiques. Voici l'ordre de toxicité des différents chlorures (1) MgCl<sub>2</sub>, (2) NaCl, (3) KCl. Comme on pouvait s'y attendre, la teneur en sel du fluide interstitiel diminue rapidement avec l'augmentation de la valeur de résistivité. Les mêmes observations sont rapportées par (Lin et al, 2016).

#### IV.4.2.2. Variation de la mesure du pH

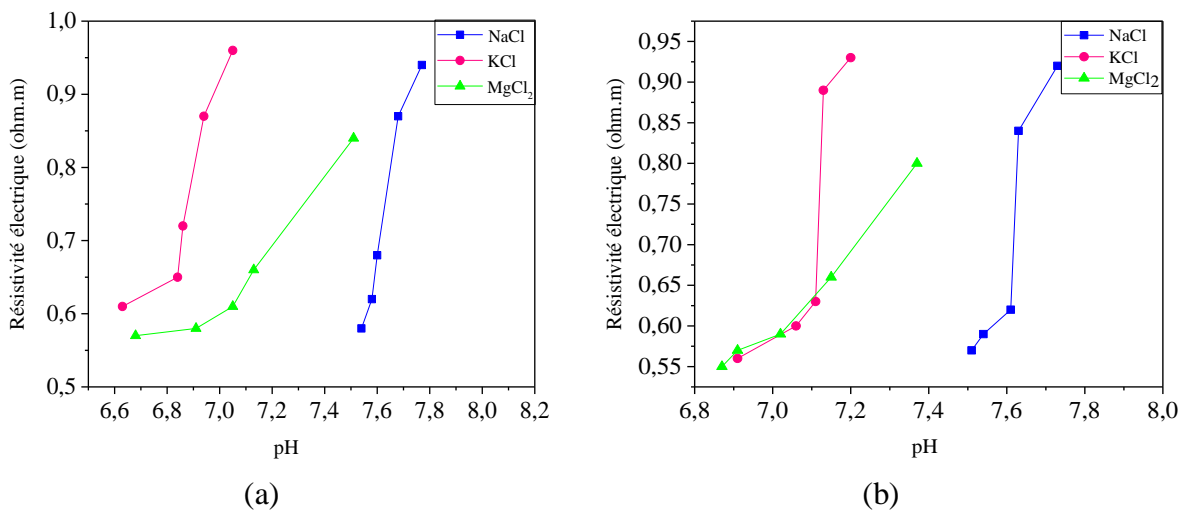
Le pH du sol est appelé «réaction du sol»; il indique l'acidité ou l'alcalinité du sol. Les effets du pH de l'eau sur la solubilité des sols dans les ions, qui affectent directement la croissance microbienne et végétale (Murad, 2012). Même si plusieurs facteurs peuvent fournir

de l'acidité ou des conditions alcalines, la concentration en sel neutre peut également influencer sur la variation du pH (Yong, 1999).

Le pH du sol a été mesuré à l'aide d'un pH mètre (METTLER TOLEDO 630), cet appareil nous permet de mesurer le pH du sol en introduisant l'électrode de mesure directement sur l'échantillon de sol. (Figure IV.7)



**Figure IV.7 :** Mesure du pH d'argile



**Figure IV.8 :** Variation de la résistivité électrique en fonction du pH

La figure (IV.8) montre la variation du pH en fonction de la résistivité électrique d'argile mélangé avec des solutions à cinq concentrations de NaCl, KCl et MgCl<sub>2</sub> (0,2, 0,4, 0,6, 0,8 et 1,0 mol/l) avec deux teneurs en eau (a=42,8% et b= 52,8%).

A partir de cette figure, on remarque que la variation du pH des échantillons de sol mélangés avec les sels est de 6,63 à 7,77. Cela peut justifier par, les ions de  $\text{Na}^+$  et de  $\text{Cl}^-$  qui n'ont pas d'effet sur  $[\text{H}^+]$  et  $[\text{OH}^-]$ , parce qu'ils sont respectivement acides et basiques indifférents, le pH reste neutre (entre 6 et 8). Même principe pour  $\text{KCl}$  et  $\text{MgCl}_2$ . Donc on peut observer que le pH du sol salin par la présence des sels de chlorure, reste neutre quelque soit la valeur de la résistivité électrique.

#### IV.5. Conclusion

La résistivité électrique est un paramètre important pour la mesure et la caractérisation des propriétés du sol. Ce chapitre présente les résultats de l'étude expérimentale menée au laboratoire de recherche LCTPE. Des essais expérimentaux ont été effectués afin de déterminer la relation entre la résistivité électrique et les paramètres physico-chimiques des échantillons de sol provenant de la région d'Ain Nouissy Mostaganem. Le sol a été étudié à l'état naturel en premier lieu, puis mélangé à différentes solutions salines (chlorure de sodium  $\text{NaCl}$ , chlorure de potassium  $\text{KCl}$  et chlorure de magnésium  $\text{MgCl}_2$ ). Cette recherche vise à déterminer l'influence de la teneur en eau, du degré de saturation, de la porosité, de la concentration en ions et du pH sur la résistivité électrique. L'étude est basée sur une mesure directe de la conductivité électrique avec un appareillage de mesure Hanna 7833. Sur la base de l'enquête expérimentale, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

Il existe une variation linéaire entre la résistivité électrique et les paramètres physiques d'argile; l'augmentation de la teneur en eau, du degré de saturation et de la porosité entraîne une diminution de la résistivité électrique.

La forte présence de la quantité d'eau dans les sols à un effet négligeable sur la variation de la résistivité électrique.

Il existe une relation entre la résistivité électrique et la salinité des sols. Une diminution de la résistivité électrique est observée avec l'augmentation de la concentration en sels dans le sol. La variation de la résistivité électrique dans les mélanges  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$  et  $\text{MgCl}_2$  ont une tendance similaire. La variation du pH affecte de manière significative le comportement du sol.

On peut déterminer les paramètres physico-chimiques d'un sol à partir de la valeur initiale de sa résistivité électrique.

## **Chapitre V :**

### **Détermination des paramètres géotechniques du sol après traitement électrique**

## **Chapitre V : Détermination des paramètres géotechniques du sol après traitement électrocinétique**

### **V.1. Introduction**

La gestion de la salinité des sols par les méthodes traditionnelles peut être complexe, coûteuse et longue. De nos jours, la méthode électrique est devenue l'un des processus d'amélioration des sols les plus émergents, principalement dans les sols à faible perméabilité (Bahemmat et al, 2016; Ji et al, 2016; Shin et al, 2016). Le principe de base du traitement électrocinétique est de permettre le déplacement de différentes espèces chimiques dans le sol sous un champ électrique entre deux électrodes (Hassan et al, 2015). Dans cette partie du travail, le traitement électrocinétique a été appliqué sur des échantillons d'argiles saturées avec de l'eau distillée, et des solutions salines avec différents types de sels NaCl, KCl et MgCl<sub>2</sub>. Ce processus nous a permis à la fois, l'élimination des sels dans les sols salins, ainsi que la mesure de la variation de la résistivité électrique avec les paramètres géotechniques tels que la teneur en eau, le degré de saturation, la porosité, le pH, la compressibilité et la consolidation du sol.

### **V.2 Protocole expérimental**

#### **V.2.1 Préparation des échantillons**

L'étude a été basée sur un mélange de 1.4 Kg d'argile avec l'eau distillée jusqu'à l'obtention d'une teneur en eau de 5% de la limite de liquidité (Estabragh, 2014). L'échantillon a été mélangé manuellement pour une durée d'une heure, puis laissé au repos pendant une à deux heures afin d'assurer la distribution uniforme de la teneur en eau. Des solutions salines de NaCl, KCl et MgCl<sub>2</sub> ont été utilisées dans le but de démontrer l'effet de la salinité des sols sur les propriétés géotechniques et la résistivité électrique. Les solutions salines ont été préparées en mélangeant une concentration de 0,2 mol/l de différents sels avec du l'eau distillée à l'aide d'un agitateur électrique pendant 20 min, pour bien diluer le sel dans l'eau. Le même procédé a été utilisé pour l'échantillon naturel.

### V.2.2 Dispositif expérimental

Les essais de laboratoire sur le traitement électrocinétique des échantillons de sols ont été réalisés dans la même cellule utilisée pour la mesure de la conductivité électrique (chapitre IV). Le compartiment central de 15 cm de longueur, 10 cm de largeur et 10 cm d'hauteur réservé pour l'échantillon de sol est séparé des compartiments cathodique et anodique de 5 cm de longueur, par deux plaques en verre trouées, couvertes par des feuilles en géosynthétiques afin d'assurer l'écoulement de l'eau sans déplacement des particules du sol. Les échantillons ont été compactés manuellement dans le compartiment central de la cellule en trois couches d'épaisseur 3cm, 3cm et 2cm respectivement à l'aide d'une petite dame afin d'éliminer les bulles d'air.

L'injection du courant électrique a été assurée en utilisant un générateur électrique à courant continu. Deux plaques en cuivre ont été utilisées dans les extrémités du compartiment central comme électrodes. Des boulons en cuivres ont été utilisés à l'intérieur de la cellule comme des électrodes de mesures. Les mesures ont été effectuées par la liaison de ces boulons avec une carte d'acquisition de données programmable (Arduino Mega 2560) en effectuant un montage électronique réalisé au niveau du laboratoire, ce qui nous ont permis de mesurer automatiquement le courant et le potentiel électrique au court du temps (figure V.1).

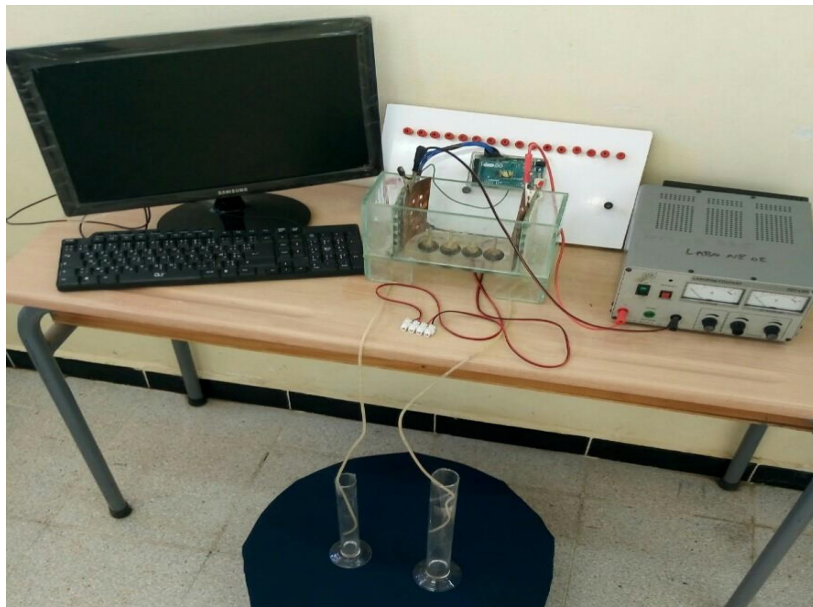


Figure V.1 : Modèle du dispositif expérimental

### V.2.3 Les électrodes

Le choix des électrodes est essentiel dans tous les traitements électrocinétiques. Les réactions chimiques et leurs coûts sont les principales considérations. L'utilisation de matériaux précieux n'est pas pratique car ce sont des métaux très chers. Les conducteurs non métalliques se sont révélés très médiocres présentant une plus grande perte de puissance à l'interface électrode-sol que les électrodes en acier et en cuivre (Mohamed elhassan et Shang, 2001). Par conséquent, dans cette étude il a été décidé d'utiliser des électrodes moins coûteuses et facilement disponibles. Les électrodes en cuivre ont été choisies car elles étaient disponibles à bas prix, faciles à fabriquer, ayant une meilleure conductance, et aussi parce que le cuivre est un matériau commun qui peut être utilisé dans la plupart des situations sur le terrain.

Les électrodes insérées dans les sols avaient la forme de plaques carrées de 10 cm de largeur, 2 mm d'épaisseur et 10 cm d'hauteur et trouées pour faciliter la circulation de la solution d'eau.

### V.2.4 Procédure du traitement électrocinétique

La méthode électrocinétique a été réalisée en injectant un courant continu de 15, 30 et 45 volts sur des échantillons d'argile saturée avec de l'eau distillée ou des solutions salines, pendant une durée plus de 72 heures. Le courant électrique injecté assure un écoulement d'eau qui suit une direction de l'anode vers la cathode. Les électrodes de mesure ont pour but de déterminer la variation de la tension appliquée au cours d'un traitement électrocinétique, provoqué par la circulation des molécules d'eau dans le sol. La technique électrocinétique nous a permis à la fois la remédiation, la désalinisation des sols, ainsi que la mesure de la variation de la conductivité électrique avec les paramètres géotechniques du sol. La figure V.2 représente un schéma descriptif du dispositif expérimental, afin de définir la procédure du traitement électrocinétique et la direction de l'écoulement d'eau après injection d'un courant électrique continu.

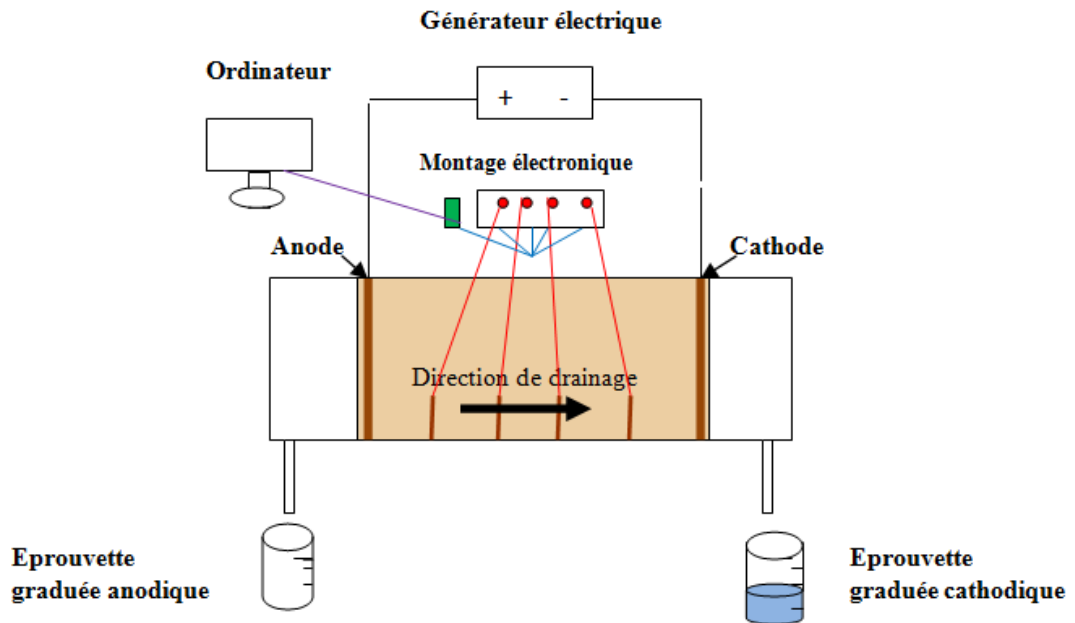


Figure V.2 : Schéma descriptif du dispositif de traitement électrocinétique

### V.3. Mesure des propriétés physico-chimiques du sol par la méthode électrocinétique

La deuxième étape de cette étude consiste à injecter un courant électrique dans les échantillons de sol. Cette technique nous a permis à la fois de mesurer les paramètres chimico-physiques du sol par la résistivité électrique et en même temps d'éliminer les sels par le traitement électrocinétique au court du temps. C'est le phénomène de dessalement des sols. Les mesures de résistivité électrique ont été effectuées conformément à la configuration de la méthode Wenner (BS 1377-3) en appliquant un courant continu dans les électrodes extérieures et un potentiel de mesure dans les électrodes internes. La valeur de la résistivité électrique a été calculée à l'aide de l'équation (V.1) (Herman, 2001).

$$\rho = \frac{4\pi L_2 R}{1 + \frac{2L_2}{\sqrt{4L_1^2 + L_2^2}} - \frac{L_2}{\sqrt{L_1^2 + L_2^2}}} \quad (V.1)$$

Où  $L_1$  et  $L_2$  sont respectivement l'espacement et la profondeur des électrodes et  $R$  est résistance électrique.

### V.4. Variation des paramètres physiques à la fin du traitement électrocinétique

#### V.4.1. Variation de la teneur en eau

La teneur en eau a été obtenue à la fin du traitement électrique. L'échantillon d'argile a été subdivisé en quatre parties. Des quantités de sol ont été extraites dans des points de mesure de la résistivité électrique à différentes profondeurs pour déterminer la teneur en eau de chaque point.

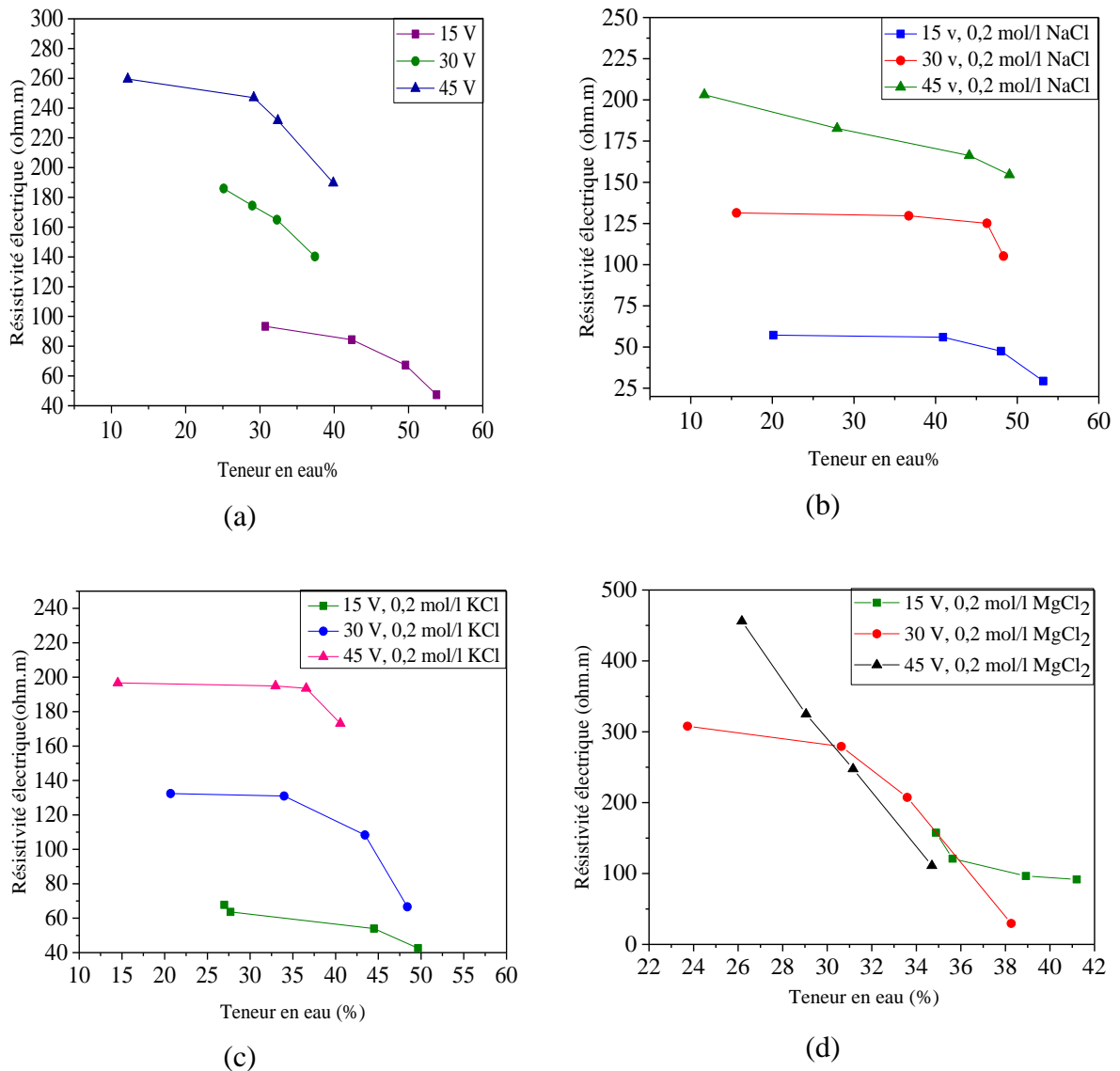


Figure V.3 : Variation de la résistivité électrique en fonction de la teneur en eau à la fin du traitement électrocinétique

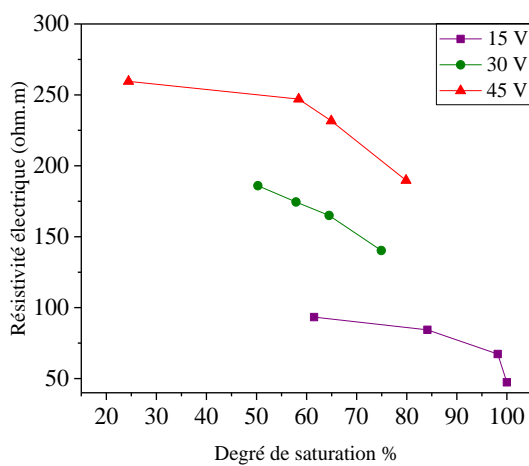
La variation de cette teneur en eau après injection du courant continu est représentée dans la figure (V.3). A partir de cette figure, on peut observer que la résistivité électrique de l'argile diminue avec l'augmentation de la teneur en eau. La même hypothèse a été reportée par Bai et al, (2013). L'augmentation du courant appliqué provoque une diminution de la teneur en eau (pour un courant électrique de 15 volts, nous avons une teneur en eau variée de 30,72% à 53,78% et pour une injection de 45 volts, la teneur en eau se varie entre 12,2% et 39,87%). Cela peut s'expliquer par, le fait que l'injection du courant provoque un écoulement d'eau qui suit une direction de l'anode vers la cathode, donc plus on augmente le courant injecté plus on obtient une quantité d'eau drainée plus élevée. L'effet du NaCl, du KCl et du MgCl<sub>2</sub> sur la résistivité électrique est montré sur les figures (V.3 b), (V.3 c) et (V.3 d). Il est à noter que la diminution de la résistivité électrique avec l'augmentation de la teneur en eau est similaire pour les différents mélanges de NaCl et de KCl. Le même comportement a été observé par Kolay et al, (2016), L'augmentation de la concentration en sel entraîne une diminution de la résistivité électrique, (Shevnin et al, 2007 et Lin et al, 2017). Hong-jing et al, (2014) ont observés que la surface des particules d'argile a beaucoup de charges négatives qui peuvent absorber beaucoup de charges positives (telles que K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>). Cette réaction peut augmenter la conductivité électrique à la surface. Cette hypothèse justifie la diminution de la résistivité électrique en présence des sels par rapport aux échantillons mélangés avec de l'eau distillée.

D'autre part, la résistivité électrique du mélange d'argile avec la solution à 0,2 mol/l de MgCl<sub>2</sub> est supérieure à celle de NaCl et de KCl, ce qui peut s'expliquer par le fait que le composé chimique de NaCl et KCl contient un cation et un anion, en comparant avec MgCl<sub>2</sub> qui contient un cation de Mg<sup>2+</sup> et deux anions de Cl<sup>-</sup>. Les améliorations observées dans les paramètres physiques des sols sodiques au cours du processus d'amélioration ont été attribuées à une augmentation des propriétés hydrauliques du sol (Greene et al, 1988; Southard et al, 1988). Cela justifie l'augmentation de la teneur en eau des mélanges de sol avec les solutions salines en comparant les échantillons de sol mélangés avec de l'eau distillée. (Figure V.3 d)

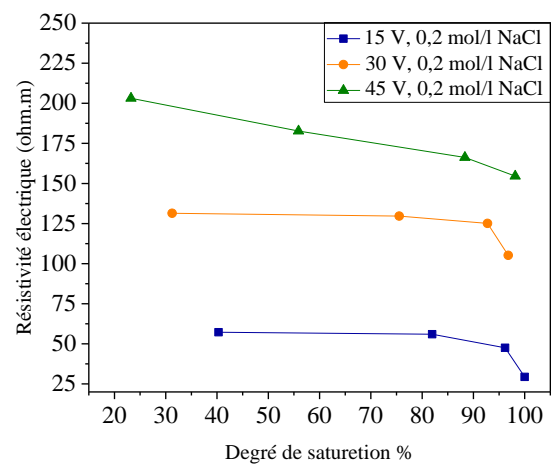
#### **V.4.2 Variation du degré de saturation**

La figure (V.4) montre la variation de la résistivité électrique en fonction du degré de saturation, des échantillons d'argiles mélangées avec l'eau distillée et des solutions de NaCl, KCl et MgCl<sub>2</sub>, après l'injection d'un courant électrique continu de 15, 30 et 45 volts. A partir

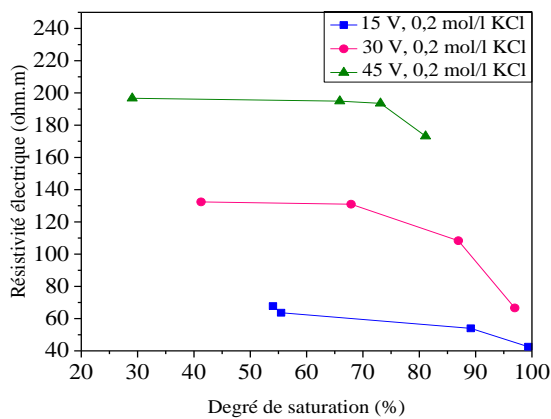
de la figure, où l'échantillon d'argile est mélangé avec l'eau distillée. On peut observer que la diminution de la résistivité électrique implique une augmentation du degré de saturation. Le même comportement a été observé par Bai et al, (2013) et Gingine et al, (2016). Pour une teneur en eau fixe de 47,8% correspond à un degré de saturation de 95,75%, l'application du courant électrique fait varier le degré de saturation initiale le long de l'échantillon de l'anode vers la cathode. Il ressort de ces chiffres que l'augmentation du potentiel électrique diminue le degré de saturation du sol. On peut aussi remarquer que le sol à côté de l'anode est plus sec par rapport à la cathode. Ceci est justifié par le fait que le drainage de l'eau est suivi dans une direction de l'anode vers la cathode, donc la tension électrique est influencée beaucoup plus près de l'anode que la cathode. La saturation des échantillons près de l'anode est pratiquement sèche par rapport à la cathode.



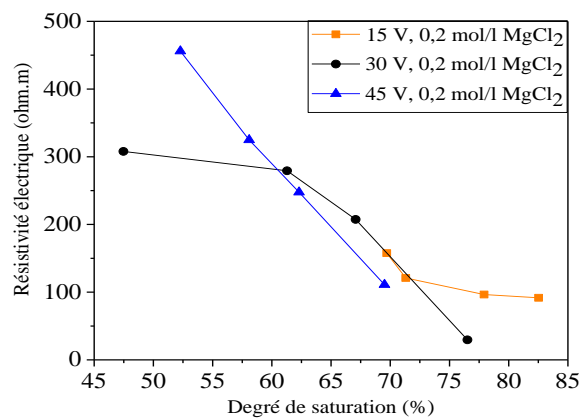
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figure V.4 :** Variation de la résistivité électrique en fonction du degré de saturation à la fin du traitement électrocinétique

Dans cette étude, nous pouvons observer que, Le courant électrique est un moyen très important de réduire la saturation de l'eau salée lors du flux d'eau de l'anode à la cathode. On peut constater que l'application d'un courant électrique élevé génère une meilleure désalinisation des sols salins. La variation du degré de saturation des échantillons prend un grand intervalle de l'anode vers la cathode (15 volts pour KCl, la variation du degré de saturation est de 53% à 100%).

Pour le mélange du sol avec  $MgCl_2$ , l'intervalle de variation est réduit par rapport à celui de NaCl et KCl, la concentration élevée en anions par rapport aux cations de la composition chimique du  $MgCl_2$  provoque une forte augmentation de la résistivité électrique qui implique une grande diminution du degré de saturation en comparant avec le degré de saturation en NaCl et KCl. (Figure V.4 d)

#### **V.4.3. Variation de la Porosité**

La porosité est un paramètre important des constituants du sol. Elle est définie par le pourcentage des pores entre les grains de sol. Les pores ont une influence significative sur la structure du sol, ainsi que sur la résistivité électrique.

La figure (V.5) montre l'effet de la porosité sur la résistivité électrique des argiles naturelles et avec une concentration en sels après l'injection du courant continu de 15, 30 et 45 volts. A partir de cette figure, on remarque que la porosité diminue avec l'augmentation de la résistivité électrique de l'échantillon d'argile mélangée avec de l'eau distillée. La même tendance a été observée par Gingine et al. (2016) et Wang et al. (2016). Les figures (V.5 b), (V.5 c) et (V.5 d) montre la relation entre la résistivité électrique et la porosité des échantillons de sol mélangés avec des solutions de NaCl, KCl et  $MgCl_2$ . Nous pouvons observer que la présence des sels réduit la résistivité et augmente la porosité. La variation de la porosité et du degré de saturation est pratiquement similaire.

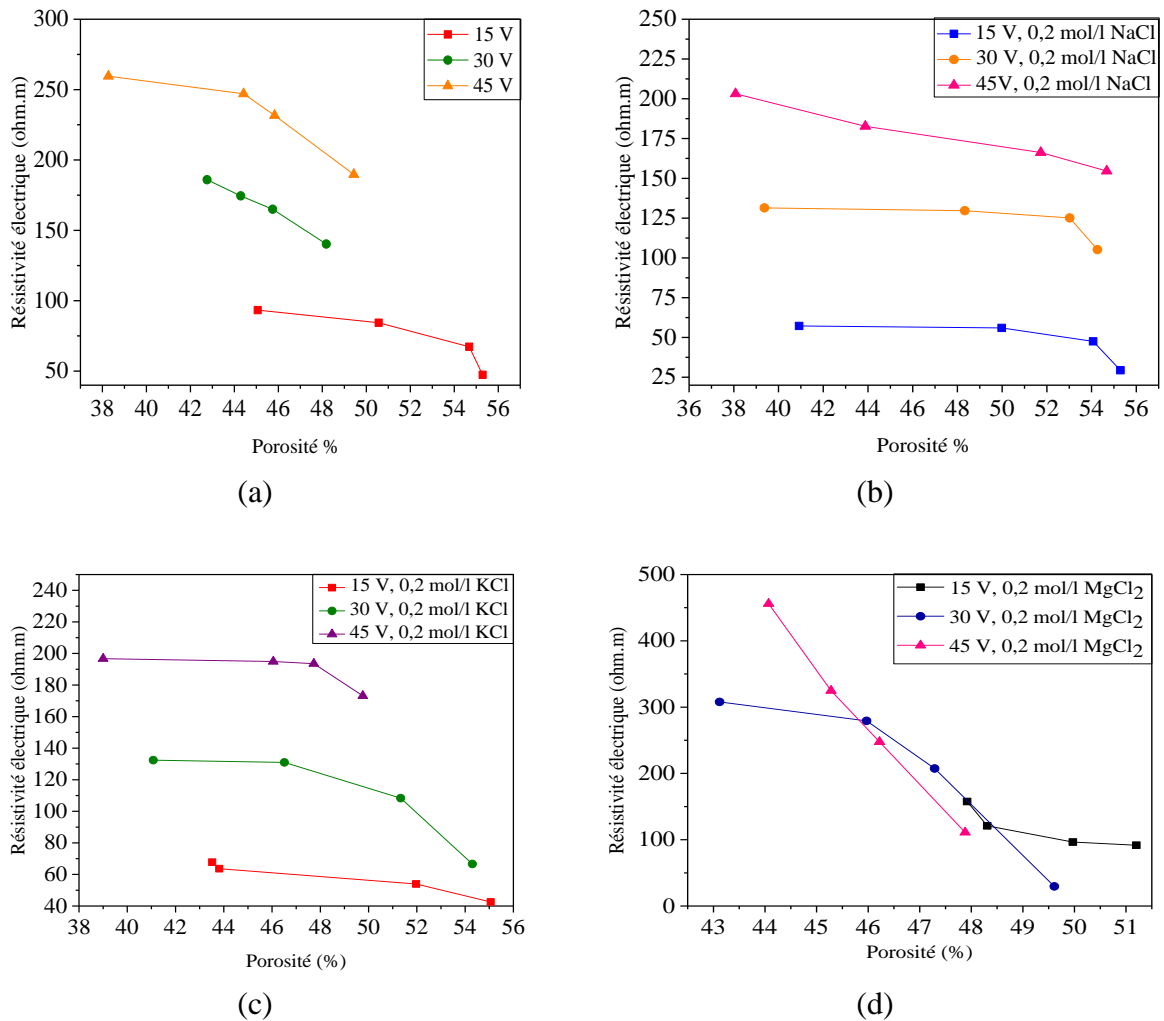
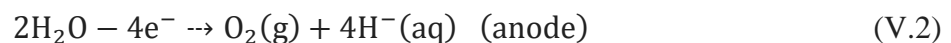
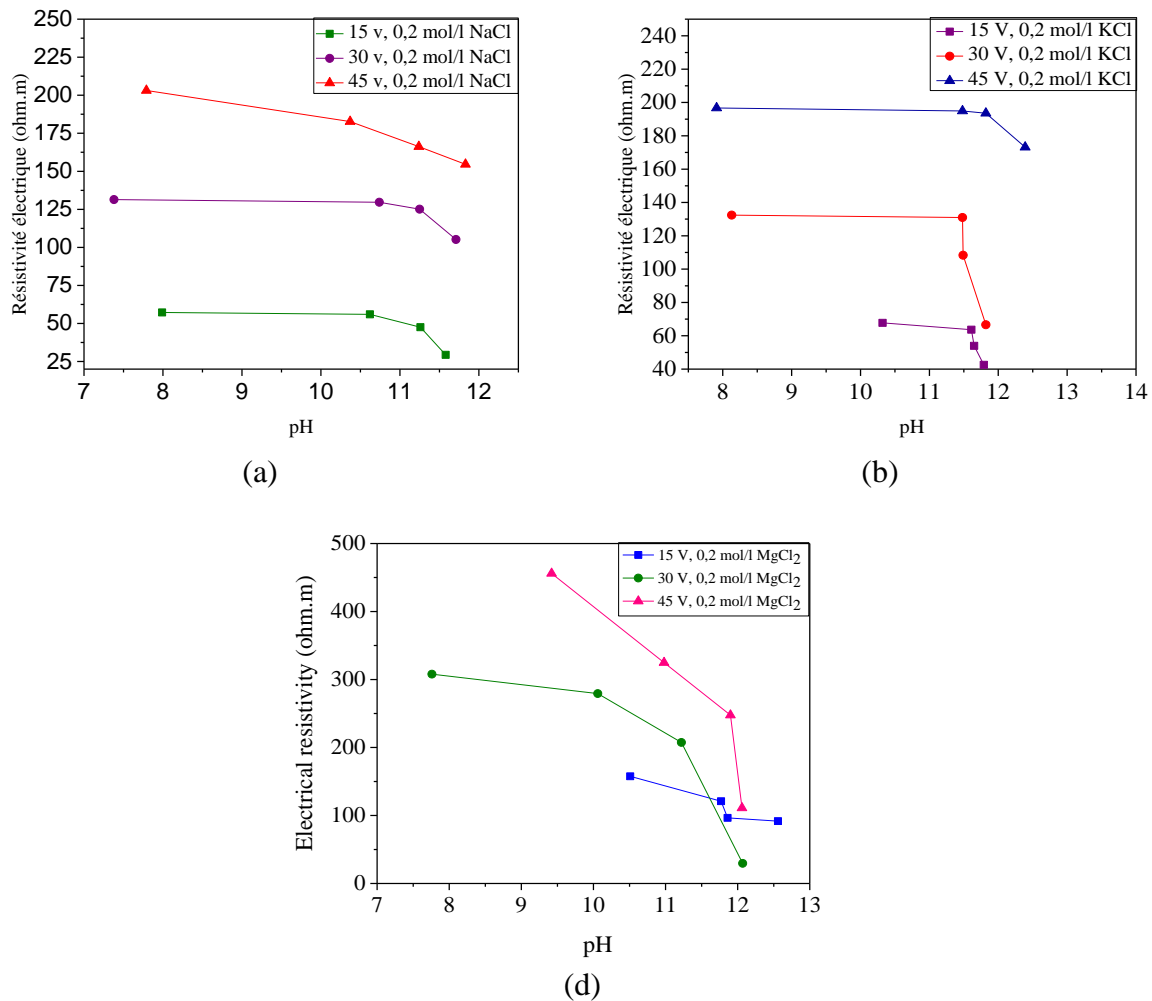
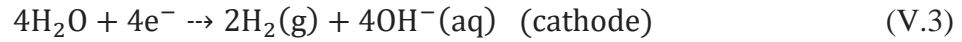


Figure V.5 : Variation de la résistivité électrique en fonction de la porosité à la fin du traitement électrocinétique

### V.5. Variation du pH sous différentes tensions appliquées à la fin du traitement électrocinétique

La figure (V.6) montre la variation du pH en fonction de la résistivité électrique après injection de courant continu de 15, 30 et 45 volts. Selon cette figure, la présence de courant électrique augmente l'alcalinité du mélange d'argile et de sels en comparant avec le pH des échantillons mesurés directement (le pH mesuré directement varie de 6-7 et le pH mesuré après l'application du courant se varie entre 7 et 12). Il y a une grande variation du pH du sol de l'anode à la cathode. Selon les résultats de la variation du pH de l'anode et de la cathode lors de l'application du courant électrique, les réactions chimiques suivantes se produisent dans l'anode et la cathode:





**Figure V.6 :** Variation de la résistivité électrique en fonction du pH à la fin du traitement électrocinétique

L'injection du courant électrique assure l'augmentation du  $\text{OH}^-$  et la diminution du  $\text{H}^+$  dans la transformation des molécules d'eau. Cette réaction augmente le pH du sol ( $\text{pH} > 7$ ). Par conséquent, la présence de  $\text{H}^+$  dans l'anode provoque une diminution de la valeur du pH près de l'anode par rapport à la cathode. Estabragh et al. (2014) ont observé que les modifications de la conductivité électrique de l'eau dans les compartiments des électrodes montrent l'augmentation de la conductivité électrique avec la tension appliquée. L'augmentation de cette conductivité peut être le résultat d'une accumulation d'ions dissous, en particulier dans le réservoir cathodique. Comme il en a été discuté précédemment, la diminution du pH de l'anode crée un front acide qui se déplace de l'anode à la cathode. Lorsque le front acide se déplace de l'anode à la cathode, les ions  $\text{H}^+$  s'échangent avec les cations adsorbés dans la

couche ionique diffuse autour des particules d'argile. La variation du pH peut affecter de manière significative le comportement du sol. Tandis qu'un pH bas peut provoquer une structure flocculée, un pH élevé peut conduire à une structure dispersive ou orientée. De plus, les variations de pH peuvent affecter les performances d'écoulement d'eau du sol (Badv et Sargordi, 2001). La figure (V.6) montre que l'augmentation de la résistivité électrique entraîne une diminution du pH des sols. On peut noter qu'il existe une alcalinité élevée dans les zones cathodiques et une résistivité plus élevée dans les zones anodiques à la fin du traitement électrique. Ceci est dû au mouvement et au transport des ions permettant le déplacement des cations dans la région de la cathode, tandis que les anions se sont déplacés vers la zone de l'anode.

## V.6. Détermination des paramètres mécaniques du sol après le traitement électrocinétique

### V.6.1. Évaluation des caractéristiques de compressibilité

Les essais de compressibilité unidimensionnelle ont été réalisés conformément à la norme (AS 1289.6.6.1-1998). Les données expérimentales de consolidation ont été utilisées afin d'évaluer les caractéristiques du sol telles que, la contrainte de pré-consolidation, le coefficient de compressibilité ( $C_c$ ), le coefficient de gonflement ( $C_g$ ) et le coefficient de consolidation ( $C_v$ ). Des essais de compressibilité et de consolidation unidimensionnels ont été effectués sur des échantillons prélevés dans les régions ayant des distances normalisées moyennes de 0 à 1 à partir de l'anode, au niveau du point de mesure du potentiel électrique, pour trois tensions appliquées de 10, 30 et 45V et à des échantillons naturels et contaminés avec des solutions saline de NaCl, KCl et  $MgCl_2$ , à la fin du traitement électrocinétique. Les éprouvettes ont été préparées dans des anneaux de 50 mm de diamètre et d'une épaisseur de 20 mm (figure V.7).



Figure V.7 : Prélèvement des échantillons à des distances normalisées

Un papier filtre et une pierre poreuse ont été placés à chaque extrémité de l'échantillon et placés dans les moules (figure V.8).

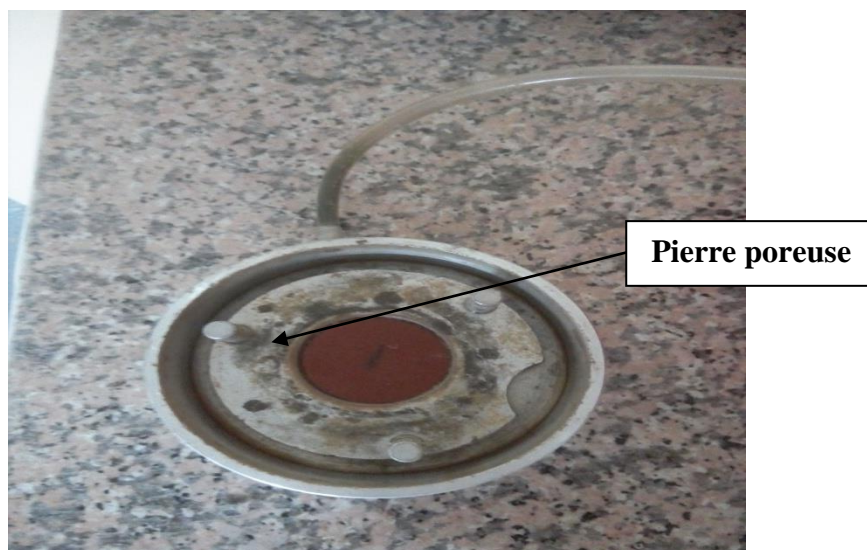


Figure V.8 : Moule oedométrique

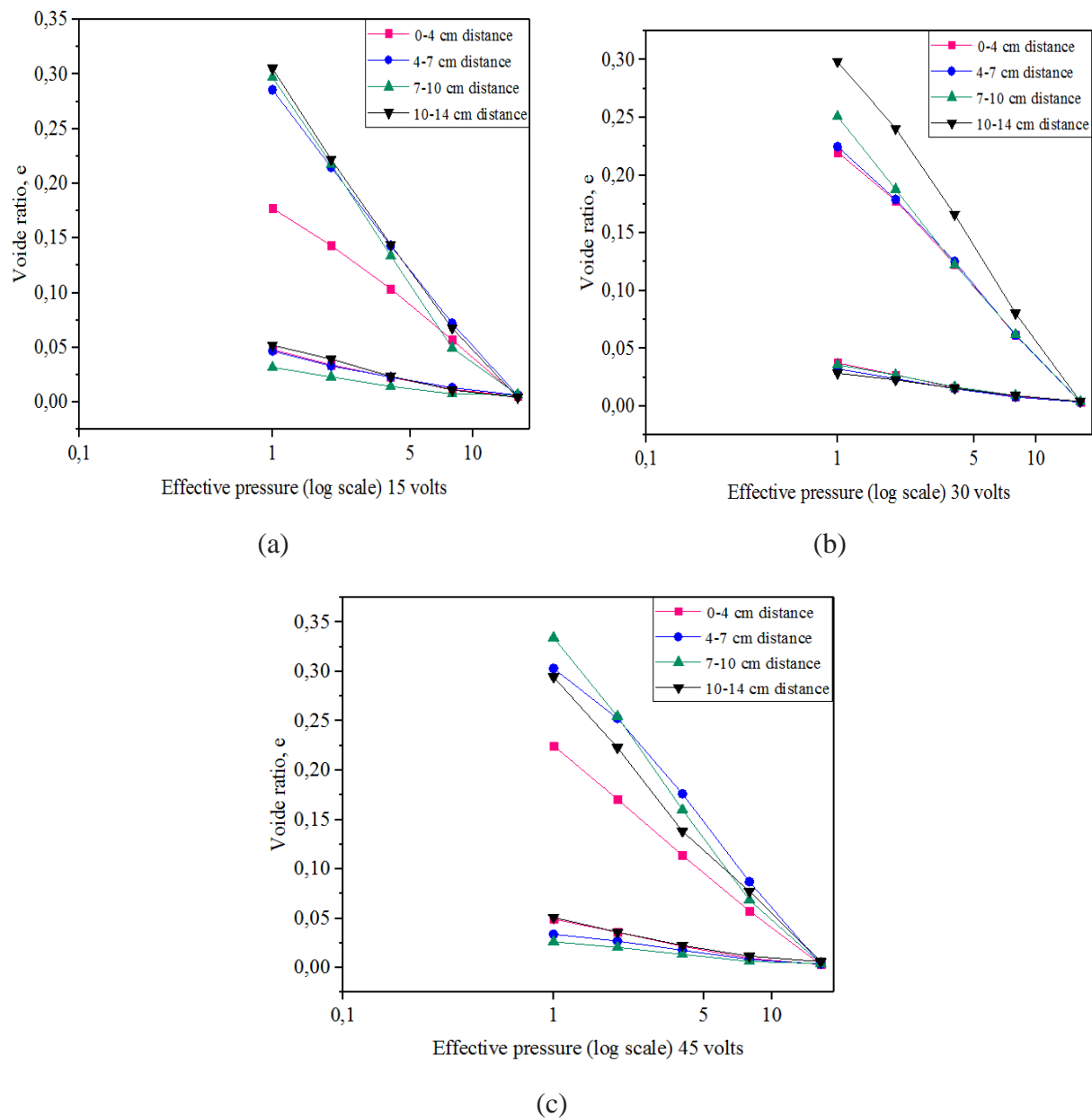
Ces unités ont ensuite été placées sur le l'oedomètre et le patin de chargement était positionné au centre sur la pierre poreuse supérieure. On a laissé l'échantillon gonfler complètement par inondation dans de l'eau distillée pendant une durée de 24 heures. Une fois les tests de gonflement terminés, les éprouvettes ont été soumises à une compressibilité par pressions croissantes. L'augmentation de charge standard était de 24 heures pour chaque chargement de 1, 2, 4, 8, 16, 32 kg et le déchargement de 16, 8, 4, 2, 1 et 0 kg. Les changements de hauteur des échantillons ont été effectués à différents intervalles de temps de chaque chargement. Une fois la consolidation terminée, les échantillons ont été placés dans une étuve à 105 ° C pour la détermination de leur valeur finale de la teneur en eau. Les parcelles étaient ensuite faites entre l'indice des vides ( $e$ ) indiqué en ordonnée et la pression effective tracée sur l'échelle logarithmique indiquée en abscisse. Le processus de compressibilité a duré environ 14 jours pour chaque échantillon.

### V.6.2. Effet du traitement électrocinétique sur les caractéristiques de compressibilité

Des essais de compressibilité ont été effectués sur des échantillons prélevés à intervalles réguliers d'argiles après 7 jours de traitement sous des tensions appliquées de 10, 30 et 45 V soumises à des solutions de NaCl, KCl et MgCl<sub>2</sub> de concentration de 0.2 mol/l.

**V.6.2.1. Courbes de compressibilité et pression de pré-consolidation ( $\sigma'_{pc}$ )**

Les figures (V.9 à V.12) montrent les courbes comparatives de compressibilité d'argile d'Ain Nouissy après 7 jours du traitement des échantillons de sol naturels et contaminés par trois type de sels à une concentration constante de 0,2 mol/l. Les contraintes de pré-consolidation ( $\sigma'_{pc}$ ) calculées à l'aide de la méthode standard de Casagrande indiquent une diminution progressive apparente de la  $\sigma'_{pc}$  de l'anode à la cathode. Ainsi, il peut être révélé que le traitement électrocinétique pourrait transformer une argile sur-consolidée en une argile normalement consolidée au voisinage de la cathode, confirmant que ces modifications sont généralement irréversibles.



**Figure V.9 :** Courbes de compressibilité des échantillons de sol naturels à la fin du traitement électrocinétique à 15, 30 et 45 V

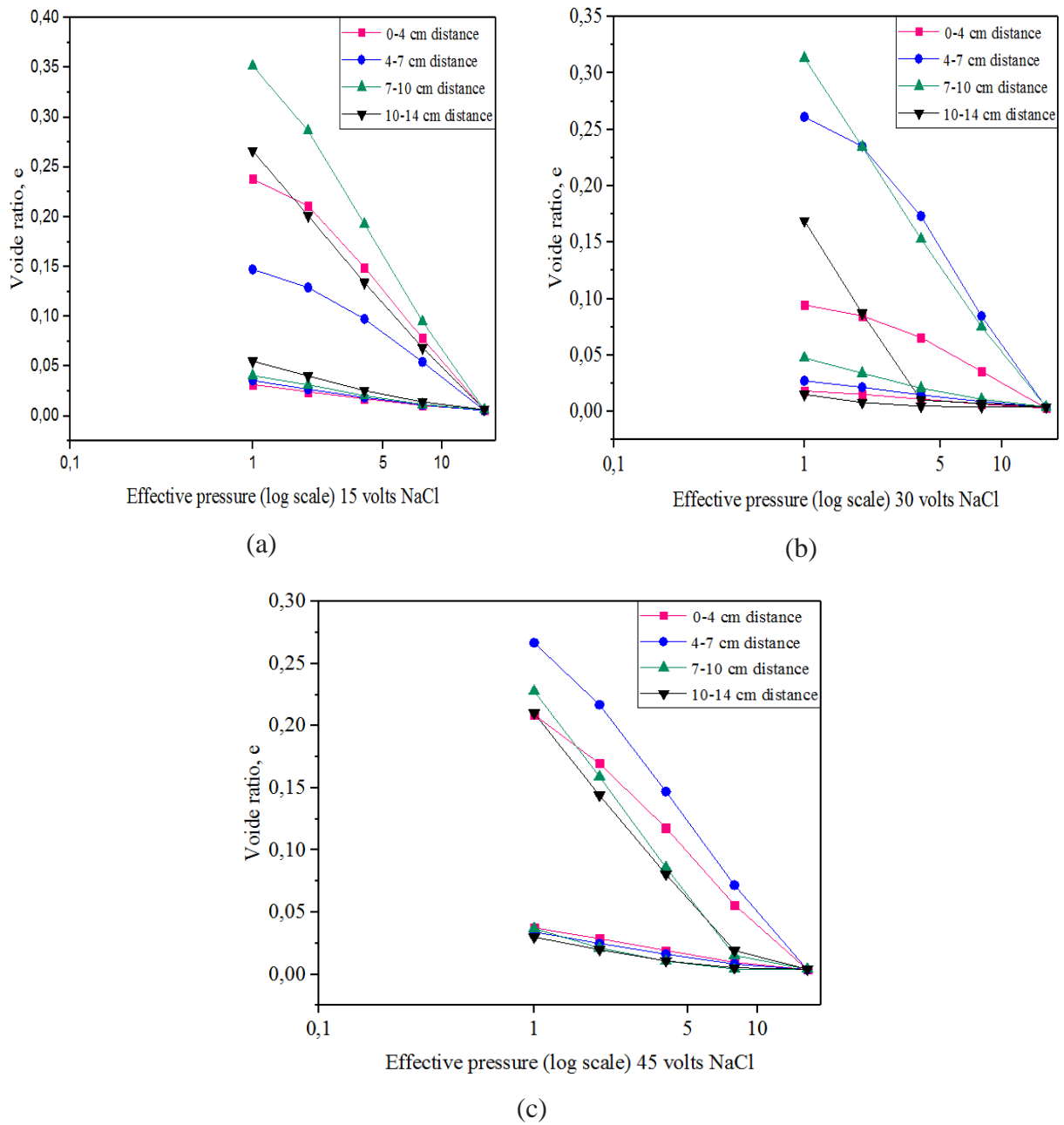


Figure V.10 : Courbes de compressibilité des échantillons de sol salins avec du NaCl à la fin du traitement électrocinétique à 15, 30 et 45 V

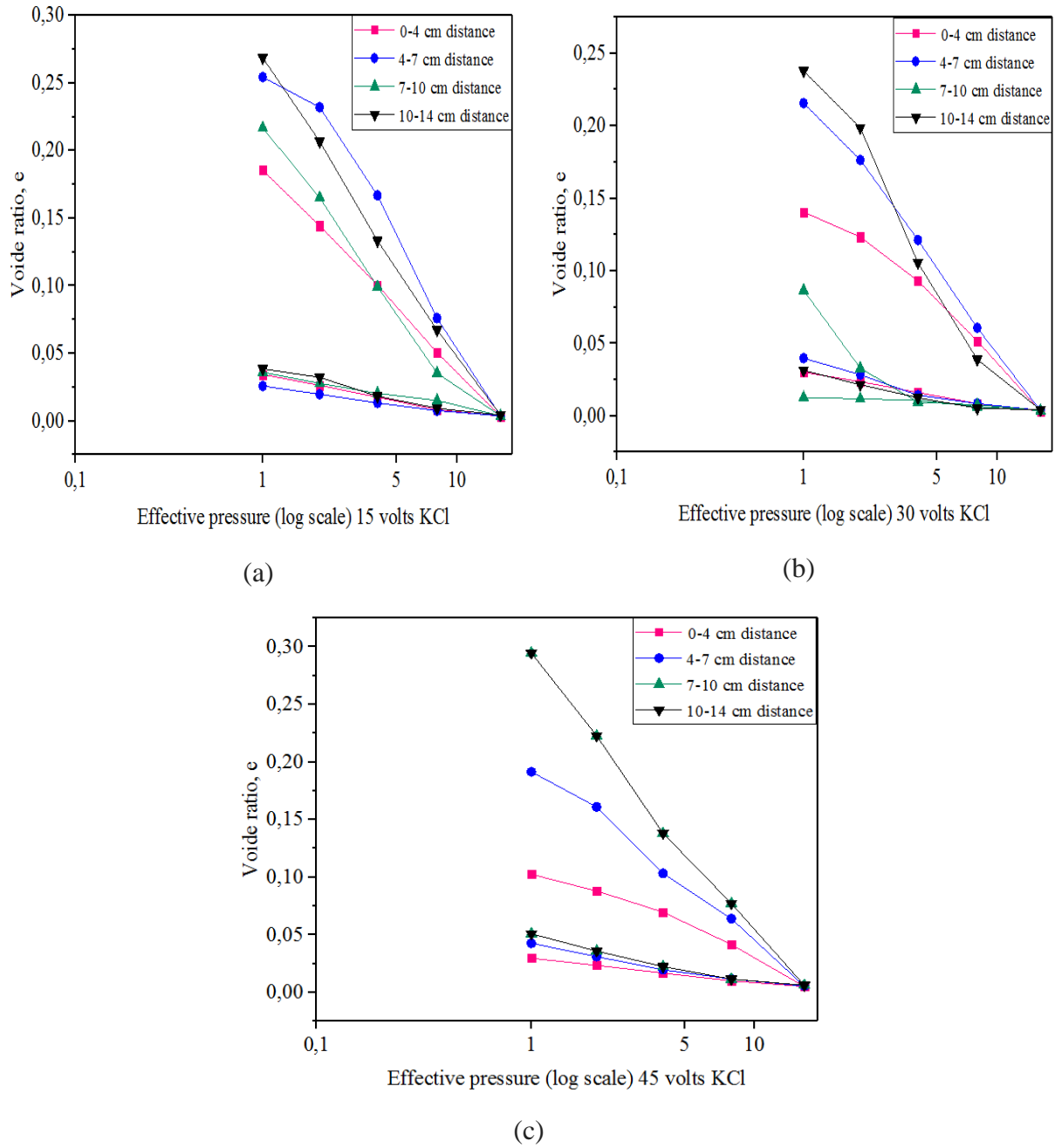
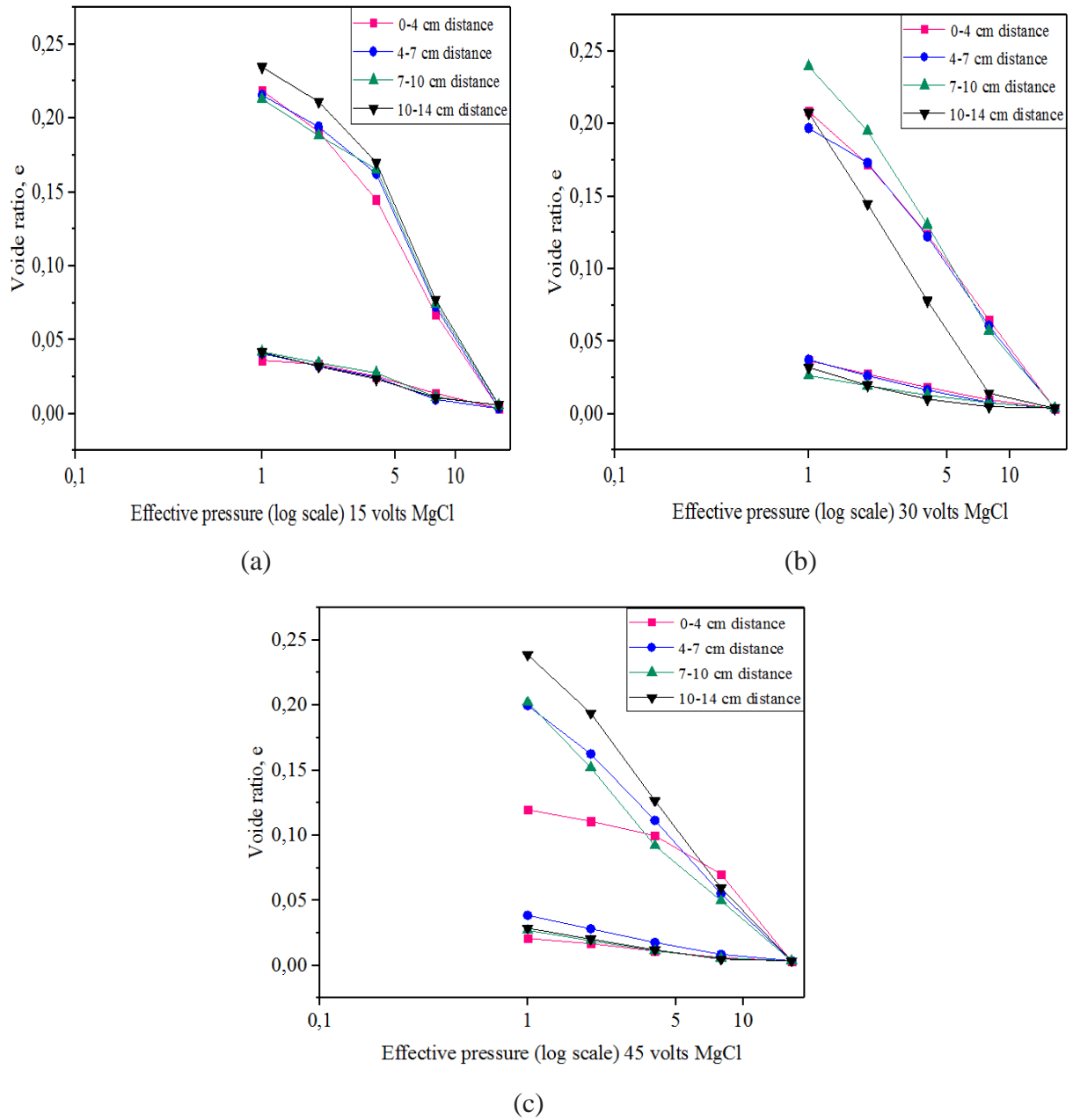


Figure V.11 : Courbes de compressibilité des échantillons de sol salins avec du KCl à la fin du traitement électrocinétique à 15, 30 et 45 V



**Figure V.12 :** Courbes de compressibilité des échantillons de sol salins avec du  $MgCl_2$  à la fin du traitement électrocinétique à 15, 30 et 45 V

**Tableau V.1** : Variation de la contrainte de pré-consolidation après le traitement électrocinétique

Sol	Nature de l'échantillon	Voltage	Distances de l'anode à la cathode			
			0-4 cm	4-7 cm	7-10 cm	10-14 cm
$\sigma'_{pc}$ (bars)	Echantillon naturel	15 v	3.8	3.4	3.0	3.0
		30 v	4.9	3.7	3.5	3.3
		45 v	6.2	5.1	4.9	4.5
	Echantillon avec NaCl	15 v	3.6	3.3	3.3	3.0
		30 v	5.9	5.1	4.6	4.5
		45 v	7.5	7.40	7.2	6.5
	Echantillon avec KCl	15 v	4.9	4.6	4.3	3.9
		30 v	5.3	4.9	4.9	4.7
		45 v	6.4	5.5	6.1	6.3
Echantillon avec MgCl <sub>2</sub>	15 v	6.3	5.3	5.3	5.2	
	30 v	7.1	6.3	6.2	6.0	
	45 v	7.5	5.9	5.9	5.1	

À partir du tableau (V.1), on peut observer que la contrainte de pré-consolidation augmente avec l'augmentation du courant électrique. L'augmentation de la contrainte est plus élevée dans la région anodique par rapport à la région cathodique. Cela peut s'expliquer par, le fait que l'injection du courant provoque un écoulement d'eau qui suit une direction de l'anode vers la cathode, donc plus on augmente le courant injecté plus on obtient une résistance du sol plus élevée dans la région anodique.

#### V.6.2.2. Coefficient de compressibilité (Cc)

Certains facteurs influent sur le comportement des sols en matière de changement de volume, tels que: les interactions physico-chimiques entre les particules, les propriétés chimiques et organiques, la minéralogie, la structure, l'historique de contrainte, la température et la chimie de l'eau interstitielle (Mitchell et Soga, 2005). Parmi ces facteurs, les propriétés chimiques et la chimie des fluides interstitiels jouent un rôle important dans le comportement en compression du sol soumis au traitement électrocinétique additionné à la stabilisation chimique. Le tableau (V.2) présente les valeurs du coefficient de compressibilité Cc mesurées de l'argile après 7 jours de traitement électrocinétique, à des distances normalisées régulières de l'anode, sous des tensions appliquées de 15, 30 et 45 V sans et avec solutions salines. Selon

Mitchell (1993), les valeurs d'indice de compression ( $C_c$ ) inférieures à 0,2 sont considérées pour les sols peu compressibles; les valeurs de 0,2 à 0,4 sont valables pour des sols de compressibilité moyenne; et un  $C_c$  supérieur à 0,4 indique une compressibilité élevée. L'indice de compression ( $C_c$ ) pour le calcul du tassement provoqué par la compressibilité peut être déterminé par une construction graphique (voir figures V.9 à V.12), basée sur les résultats des tests de laboratoire pour l'indice des vides. D'après le tableau on remarque que le sol situé près de l'anode est peu compressible et celui de la cathode est moyennement compressible.

**Tableau V.2** : Variation du coefficient de compressibilité après le traitement électrocinétique

Sol	Nature de l'échantillon	Voltage	Distances de l'anode à la cathode			
			0-4 cm	4-7 cm	7-10 cm	10-14 cm
Cc	Echantillon naturel	15 v	0.14	0.24	0.28	0.28
		30 v	0.12	0.13	0.21	0.27
		45 v	0.09	0.10	0.18	0.19
	Echantillon avec NaCl	15 v	0.22	0.24	0.28	0.32
		30 v	0.20	0.23	0.25	0.28
		45 v	0.19	0.21	0.24	0.25
	Echantillon avec KCl	15 v	0.16	0.22	0.23	0.26
		30 v	0.12	0.19	0.17	0.24
		45 v	0.08	0.16	0.24	0.24
	Echantillon avec MgCl <sub>2</sub>	15 v	0.20	0.20	0.19	0.22
		30 v	0.18	0.19	0.23	0.24
		45 v	0.07	0.18	0.17	0.22

Le courant électrique a affecté la liaison entre les particules de sol, ce qui a renforcé la matrice du sol entraînant une diminution de l'indice de compressibilité et une augmentation de la contrainte de pré-consolidation. D'après le tableau (V.2), on peut observer que l'augmentation de courant injecter dans le sol, réduit la compressibilité des sols salins. On peut constater que l'application d'un courant électrique élevé génère une meilleure extraction des sels dans les sols, donc une augmentation de la résistance des échantillons de sol.

### V.6.2.3.Coefficient de gonflement (Cg)

Le coefficient de gonflement a été déterminé à partir des paliers de déchargement de la courbe de compressibilité (figure V.9 à V.12). Le tableau (V.3) représente la variation du coefficient de gonflement Cg des échantillons de sol à des distances normalisées de l'anode vers la cathode. On peut déduire à partir de ces résultats d'essai que le coefficient de gonflement est diminué par rapport à l'état initial. Les valeurs de coefficient de gonflement au niveau de l'anode est peut être plus élevée par rapport aux autre distances normalisées et cela à due au forte déplacement des molécules d'eau dans cette région. L'injection du courant électrique au cours du traitement provoque une dé-saturation des échantillons de sol au niveau de l'anode. Cela implique une forte adsorption d'eau du sol lors du déchargement oedométrique. Ce phénomène augmente la valeur du coefficient de gonflement du sol près de l'anode.

**Tableau V.3 :** Variation du coefficient de gonflement après le traitement électrocinétique

Sol	Nature de l'échantillon	Voltage	Distances de l'anode à la cathode			
			0-4 cm	4-7 cm	7-10 cm	10-14 cm
Cg	Echantillon naturel	15 v	0.049	0.03	0.016	0.03
		30 v	0.03	0.03	0.03	0.016
		45 v	0.049	0.03	0.016	0.016
	Echantillon avec NaCl	15 v	0.03	0.02	0.016	0.016
		30 v	0.016	0.03	0.03	0.0016
		45 v	0.003	0.0016	0.003	0.0016
	Echantillon avec KCl	15 v	0.001	0.016	0.0016	0.03
		30 v	0.0016	0.03	0.03	0.016
		45 v	0.0016	0.03	0.005	0.005
	Echantillon avec MgCl <sub>2</sub>	15 v	0.005	0.005	0.005	0.005
		30 v	0.003	0.003	0.0016	0.003
		45 v	0.0016	0.003	0.0016	0.003

### V.6.2.4.Coefficient de consolidation (Cv)

Le coefficient de consolidation (Cv) est directement proportionnel au facteur temps et au chemin de drainage, et indirectement proportionnel à la valeur t<sub>90</sub> du sol. Par conséquent, les valeurs de Cv seraient plus grandes avec la diminution des valeurs de t<sub>90</sub>. Dans cette étude, les valeurs de Cv ont été calculées en utilisant la moyenne des valeurs de t<sub>90</sub> pour toutes les

plages et les prédictions de tassement ont été calculées à l'aide des valeurs moyennes de  $C_v$ . Les valeurs moyennes  $C_v$  d'argile à des distances normalisées régulières sont résumées dans le tableau (V.4). D'après le tableau, on remarque que le coefficient de consolidation est presque négligeable dans le sol après traitement électrique, ce qui signifie que le temps nécessaire pour achever 90% de la consolidation des particules a diminué et que le sol a atteint 90% de la consolidation plus vite. Cela a entraîné une sédimentation plus rapide des particules, entraînant une valeur de  $C_v$  plus élevée dans les sols.

**Tableau V.4** : Variation du coefficient de consolidation après le traitement électrocinétique

Sol	Nature de l'échantillon	Voltage	Distances de l'anode à la cathode			
			0-4 cm	4-7 cm	7-10 cm	10-14 cm
Cv	Echantillon naturel	15 v	0.016	0.013	0.015	0.006
		30 v	0.003	0.012	0.007	0.015
		45 v	0.005	0.015	0.013	0.009
	Echantillon avec NaCl	15 v	0.09	0.016	0.003	0.005
		30 v	0.08	0.013	0.007	0.007
		45 v	0.01	0.01	0.009	0.008
	Echantillon avec KCl	15 v	0.014	0.044	0.014	0.012
		30 v	0.012	0.01	0.003	0.009
		45 v	0.004	0.011	0.019	0.007
	Echantillon avec MgCl <sub>2</sub>	15 v	0.008	0.007	0.007	0.008
		30 v	0.007	0.015	0.011	0.01
		45 v	0.019	0.009	0.009	0.01

### V.7. Conclusion

Ce chapitre présente les résultats des essais expérimentaux pour la caractérisation des sols en déterminant leurs paramètres lorsque le sol est traité avec la méthode électrique. Le sol a été étudié à l'état naturel et avec des mélanges des solutions salines. Cette recherche vise à déterminer l'influence de la teneur en eau, du degré de saturation, de la porosité et du pH sur la résistivité électrique, ainsi que la détermination des paramètres oedométriques à la fin du traitement électrocinétique. L'étude est basée sur une injection de courant électrique de 15, 30 et 45 volts. Les paramètres électriques ont été obtenus à l'aide d'un système d'acquisition de données automatique développé dans notre laboratoire. Cette méthode affecte les paramètres

du sol, qui sont des propriétés clés pour le comportement hydromécanique du sol. Sur la base de l'enquête expérimentale, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

L'augmentation du courant appliqué génère un écoulement d'eau dans les échantillons de sols, donc une diminution de la teneur en eau.

Il existe une relation entre la résistivité électrique et la salinité des sols. Une diminution de la résistivité électrique est observée avec l'augmentation de la concentration de sels dans le sol. La variation de la résistivité électrique dans les mélanges NaCl et KCl est pratiquement la même. En revanche, le mélange  $MgCl_2$  réduit la résistivité électrique par rapport à celle du NaCl et du KCl. La variation du pH affecte de manière significative le comportement du sol. Sur la base des résultats des tests, il a été constaté qu'il existait une relation linéaire entre la résistivité électrique du sol et le pH. La présence de courant électrique augmente l'alcalinité du mélange sol et sels.

La présence du courant électrique dans le sol diminue les coefficients de compressibilité, de consolidation et de gonflement par rapport à l'état naturel. La diminution du coefficient de compressibilité implique une augmentation de la résistance du sol.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Les méthodes géophysiques se développent de plus en plus, en particulier en imagerie du sol et sous-sol et pourrait être une alternative intéressantes dans l'estimation spatialisée des constituants du sol. Parmi les méthodes géophysiques, la résistivité électrique présente une très large gamme de variation. Leur rapidité de mise en œuvre et leur coût relativement modéré, peut permettre une caractérisation des matériaux hétérogènes sur une surface étendue, ainsi qu'éventuellement une détection des variations latérales à l'échelle du site.

Le but principal de cette recherche a été d'étudier l'influence des constituants d'un sol fin sur la résistivité électrique. L'étude a été effectuée en utilisant une cellule expérimentale développée au sein du laboratoire de recherche LCTPE. Les différents paramètres du sol, physiques, chimiques et mécaniques ont été déterminés en fonction de la résistivité électrique. Le sol a été par la suite caractérisé après avoir été soumis à un traitement électrocinétique, avec des gradients de potentiel différents (15, 30 et 45 Volts). Cette technique a été utilisée afin d'améliorer les caractéristiques du sol étudié. Le sol a été étudié à l'état naturel puis mélangé à des solutions salines à différentes concentrations. Cette recherche vise à déterminer l'influence des paramètres du sol tels que ; la teneur en eau, le degré de saturation, la porosité et le pH sur la résistivité électrique.

Lors de la première étape de ces travaux, on a déterminé les différents paramètres physico-chimiques des échantillons de sol compactés à plusieurs teneurs en eau à l'état naturel et avec cinq concentrations de sels NaCl, KCl et MgCl<sub>2</sub>. Par la suite, des mesures de la conductivité électrique ont été effectuées sur ces différents échantillons de sol.

Dans de la deuxième étape, le sol a été soumis à un traitement électrocinétique. Ce processus est basé sur l'injection d'un courant électrique variable de 15, 30 et 45 volts sur des échantillons de sol naturels et d'autres contaminés artificiellement par des solutions salines. Les paramètres électriques ont été obtenus à l'aide d'un système d'acquisition de données automatique développé dans notre laboratoire. Cette technique de traitement des sols salins modifie les différents paramètres du sol, qui représentent les propriétés clés pour le comportement hydromécanique du sol. Sur la base de l'enquête expérimentale, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- Il existe une variation linéaire entre la résistivité électrique et les paramètres physico-chimiques; l'augmentation de la teneur en eau, du degré de saturation et de la porosité entraîne une diminution de la résistivité électrique.

- La diminution de la résistivité électrique est observée avec l'augmentation de la concentration de sels dans le sol. La variation de la résistivité électrique dans les mélanges NaCl et KCl est pratiquement la même. Par contre, le mélange MgCl<sub>2</sub> réduit la résistivité électrique par rapport à celle du NaCl et du KCl. On déduit qu'il existe une relation entre la résistivité électrique et la salinité des sols.
- Il y a une forte augmentation de la résistivité électrique en présence du courant électrique par rapport à la mesure directe de la conductivité électrique
- L'injection d'un courant électrique représente un moyen important qui permet de réduire la saturation du sol lors du passage de l'eau de l'anode à la cathode.
- La conductivité électrique dans un milieu particulière se produit par le mouvement des ions à travers l'eau des pores électrolytiques dans le vide et la charge de surface. Pour cela l'augmentation du courant appliqué génère un écoulement d'eau dans les échantillons de sols plus élevés, donc une diminution de la teneur en eau.
- La variation du pH affecte de manière significative le comportement du sol. La présence de courant électrique augmente l'alcalinité du mélange d'argile et de sels.

## Perspectives

Dans le cadre de cette recherche, nous préconisons quelques axes à développer dans des futurs travaux. Les points suivants pourront y être traités :

- Développer le dispositif expérimental du traitement électrocinétique, en utilisant d'autres électrodes non réactifs tel que les électrodes en graphite ou un autre matériau performant.
- Optimiser de l'énergie pour une remédiation ou stabilisation optimale.
- Inclure dans la solution d'eau d'autres matériaux favorisent la floculation et étudier leurs effets sur la résistivité électrique
- Etendue cette étude pour d'autres sols argileux
- Analyse du couplage hydro-électrique dans le processus de transfert des solutés dans les sols fins.

## **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

Abbasi, N., (2011) « The Role of Anions in the Dispersion Potential of Clayey Soil ». *Journal of Agricultural Engineering Research*, 12 (3), pp. 15-30.

Abu-Hassanein, Z.S., Benson, C.H., Blotz, L.R., (1996) « Electrical resistivity of compacted clays». *Journal of Geotechnical Engineering*, 122 (5), pp. 397-406.

Alshawabkeh, A., Acar, Y., (1996) «Electrokinetic Remediation. II: Theoretical Model». *Journal of Geotechnical Engineering*, 122 (3), pp. 186–196.

Acar, Y.B., Alshawabkeh, A.N., (1993) « Principles of electrokinetic remediation ». *Environmental Science & Technology*, 27(13), pp. 2638-2647.

Acar, Y.B., Gale, R.J., Alshawabkeh, A.N., Marks, R.E., Puppala, S., Bricka, M., Parker, R., (1995) «Electrokinetic remediation: Basics and technology status». *Journal of Hazardous Materials*, 40(2), 117-137.

Acar, Y.B., Gale, R., Hamed, J., Putnam, G., (1990) «Acid/base distributions in electrokinetic soil processing». *Transportation Research Record* (1288).

Acharya, C.L., Abrol, I.P., (1991) «Soil water relation and root water extraction in alkali soils». *Technology* 16, pp.96-111.

Aizebeokhai, A.P., (2010) «2D and 3D geoelectrical resistivity imaging: Theory and field design». *Scientific Research and Essays*, 5(23), pp. 3592-3605.

Ajam, M., Reza Sabour, M., Ali Dezvareh, G., (2015) «Study of water salinity effect on geotechnical behavior of soil structure using response surface method (RSM) ». *Ciência e Natura*, 37 (6-1), pp. 360-369.

Alshawabkeh, A.N., (2009) «Electrokinetic Soil Remediation: Challenges and Opportunities». In: *Separation Science and Technology*, 44 (10), pp. 2171–2187.

Alshawabkeh, A.N., (2001) «Basics and application of electrokinetic remediation». Handouts prepared for a short course. Federal University of Rio de Janeiro.

Alshawabkeh, A.N., Acar, Y.B., (1994) «Electrokinetic Remediation - Pilot-Scale Test Results». *Abstracts of Papers of the American Chemical Society*, 207, 114-ENVR.

Archie, G.E (1942) «The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics». *Petroleum Transactions of AIME*, 146, pp. 54-62.

- ASTM, «Annual book of standards, volume 04.08, soil and rock». West Conshohocken, PA.
- Aubouin, J., Brousse, R., Lehman, J.P., (1968) «Précis De Géologie». 1er Cycle Et Licence. Tome I :Pétrologie. Dunod.
- Audiguier-Marcel, M., (1979) «Contribution à l'étude du comportement de l'eau dans les sols en fonction de leur texture». Mémoire de DEA, Centre de Géologie d'ingénieur, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, p 148.
- Badv, K., Sargordi, F., (2001) «An investigation into the risk of piping at dams in the Urmia region, Iran». Iran J Sci Technol, Trans B, 25, pp.625-634.
- Bahemmat, M., Farahbakhsh, M., Kianirad, M., (2016) «Humic substances-enhanced electroremediation of heavy metals contaminated soil». J Hazard Mater, 312, pp. 307-318.
- Bai, W., Kong, L., Guo, A., (2013) «Effects of physical properties on electrical conductivity of compacted lateritic soil». J Rock Mech Geotech Eng, 5, pp. 406-411.
- Bois, G., (2005) «Écophysiologie de semis de conifères ectomycorhizés en milieu salin et sodique». Thèse de doctorat de l'Université Laval.
- Bourokba Mrabent, S.A., (2011) «Etude de la conductivité hydraulique et de la stabilisation par ajout de liants hydrauliques de l'argile de mers el kebir». Thèse de doctorat de l'Université de Mohamed Boudiaf d'Oran.
- Brady, N.C., Weil, R.R., (2008) «The Nature and Properties of Soils». 14th ed, Pearson Prentice Hall, New Jersey.
- Bryson, L.S., (2005) «Evaluation of geotechnical parameters using electrical resistivity measurements». Proc In Earthquake Engineering and Soil Dynamics, pp. 1-12.
- BS 1377-3, (1990) «Methods of test for Soils for civil engineering purposes. Chemical and electro- chemical tests». British Standard Institution, London: BSI.
- Buckland, G.D., Bennett, D.R., Mikalson, D.E., de Jong, E., Chang, C., (2002) «Soil salinization and sodication from alternate irrigations with saline-sodic water and simulated rain». Canadian Journal of Soil Science, 82, pp. 297-309.
- Bultel, F., (2001) «Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels». Thèse doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Buvat, S., (2012) «Caractérisation de l'organisation spatiale de la couverture pédologique par mesure de la résistivité électrique: application à la cartographie des sols en contexte agricole». Thèse de doctorat, Paris 6.
- Chapellier, D., (2000) «Cours online géophysique».

Cai, J., Wei, W., Hu, X., Wood, D.A., (2017) «Electrical conductivity models in saturated porous media: A review». *Earth-Sci Rev*, 117, pp. 419-433.

Caillère, S., Henin, S., (1959) «La classification des argiles». *XX Congr Geol Internat, Mexico*, pp. 1-8.

Calvet, R., (2003) «Le sol: propriétés et fonctions - Constitution et structure, phénomènes aux interfaces». France Agricole Editions.

Casagrande, A., (1948) « Classification and identification of soils ». *Transactions A.S.C.E.*, 113, pp. 901-991.

Casagrande, L., (1949) «Electro-Osmosis in Soils». In: *Géotechnique*, 1(3), pp. 159– 177.

Cassan, M., (2005) «Les essais de perméabilité sur site dans la reconnaissance des sols». Presses des Ponts. Paris.

Charman, P.E.V., Murphy, B.W (2007) «Soils, Their properties and Management». Oxford University Press.

Cho, J., Park, S., Baek, K., (2010) «Electrokinetic restoration of saline agricultural lands». *J Appl Electrochem*, 40, pp. 1085-1093.

Choi, J.H., Lee, Y.J., Lee, H.G., Ha, T.H., Bae, J.H., (2012) «Removal characteristics of salts of greenhouse in field test by in situ electrokinetic process». *Electrochimica Acta* 86, pp. 63-71.

Choi, Y., Lui, R., (1995) «A mathematical model for the electrokinetic remediation of contaminated soil». In: *Journal of Hazardous Materials*, 44 (1), pp. 61–75.

Collins, K., McGown, A., (1974) «The form and function of microfabric features in a variety of natural soils». *Géotechnique*, 24(2), pp. 223-254.

Cousin, I., Besson, A., Seger, M., Giot, G., Richard, G., King, D., (2012) «L'apport des méthodes géophysiques au service de la caractérisation de la fertilité des sols». *Innovations Agronomiques* 21, pp. 13-29.

Daoud, Y., Halitim, A., (1994) «Irrigation et salinisation au Sahara algérien». *Sécheresse*, 3 (5). pp 151-160.

Dobecki, T.L., Romig, P.R., (1985) «Geotechnical and groundwater geophysics». *Geophysics*, 50 (12), pp. 2621–2636.

Durand, J.H (1983) «Les sols irrigables. Etude pédologique». Ed. Imprimerie Boudin, Paris, 339 p.

Ekweue, E., Bartholomew, J., (2010). «Electrical conductivity of some soils in Trinidad as affected by density, water and peat content». *Biosystems Engineering*, 108 (2), 95-103.

Essington, M.E., (2015) «Soil and water chemistry: An integrative approach». CRC press.

Estabragh, A.R., Bordbar, A.T., Ghaziani, F., Javadi, A.A., (2016) «Removal of MTBE from a clay soil using electrokinetic technique». *Environ Technol*, 37, pp. 1745-1756.

Estabragh, A.R., Naseha, M., Javadi, A.A., (2014) «Improvement of clay soil by electro-osmosis technique». *Appl Clay Sci*, 95, pp. 32-36.

Figueroa, A., Cameselle, C., Gouveia, S., Hansen, H.K., (2016) «Electrokinetic treatment of an agricultural soil contaminated with heavy metals». *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng*, 51, pp. 691-700.

Friedman, S.P., (2005) «Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review». *Computers and electronics in agriculture*, 46 (1), pp. 45-70.

Fukue, M., Minato, T., Horibe, H., Taya., N., (1999) «The micro-structures of clay given by resistivity measurements». *Engineering Geology*, 54 (1-2), pp. 43-53.

Gens, A., Alonso, E.E., (1992). «A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays». *Revue canadienne de géotechniques*, 29, pp. 1013-1032.

Ghassemi, F., Jakeman, A. J., Nix H.A., (1995) «Salinization of Land and Water Resources. Human causes, extent, management and case studies». CAB Int. Wallingford, UK, 526 p.

Giao, P., Chung, S., Kim, D., Tanaka, H., (2003). «Electric imaging and laboratory resistivity testing for geotechnical investigation of Pusan clay deposits». *Journal of Applied Geophysics*, 52(4), pp. 157-175.

Gingine, V., Dias, A.S., Cardoso, R., (2016) «Compaction Control of Clayey Soils Using Electrical Resistivity Charts». *Procedia Eng*, 143, pp. 803–810.

Gioannis, G.D., Muntoni, A., Polettini, A., Pomi, R., (2008) «Enhanced electrokinetic treatment of different marine sediments contaminated by heavy metals». *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 43(8), 852.

Gobat, J.M., Aragno, M., Matthey, W., (2010) «Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols». PPUR Presses polytechniques, (14).

Greene, R.S.B., Rengasamy, P., Ford W.G., Chartres, C.J., Miller, J.J., (1988) «The effect of sodium and calcium on physical properties and micromorphology of two red-brown earth soils». *Journal of Soil Science*, 39, pp. 639-648.

Greve, A., Andersen, M.S., Acworth, R.I., (2010) «Investigations of soil cracking and preferential flow in a weighing lysimeter filled with cracking clay soil». *Journal of Hydrology*, 393, pp. 105-113.

Gupta, R.K., Arbol, I.P., (1990) «Salt-affected soil: Their reclamation and management for crop production». *Advances in Soil Science*. 11, pp. 224-288.

Gupta, R. K., Verma, S.K., (1983) «Water behaviour of black clay soil as influenced by degree of sodicity». *Current Agriculture*, 7, 114-121.

Hafsi, A., (1993) «Théories de la double couche et gonflement des argiles non Saturées». *Euromech colloquium N°209: Mechanics of swelling*, Rhodos, Greece.

Halitim, A., Robert, M., Tessier, D., Prost, R., (1984) «Influence des cations échangeables ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) et la concentration saline sur le comportement physique (rétenion en eau, conductivité hydraulique) de la montmorillonite». *Agronomie, EDP Sciences*, 4, pp. 451-459.

Halitim A., (1988) «Sols des régions arides d'Algérie». OPU, Alger, 384 p

Hang, S., (1984) « Identification of expansive soils by specific surface area values ». *Fifth International Conference on Expansive soils*, Adelaide, South Australia.

Hassan, I., Mohamed elhassan, E., Yanful, E.K., (2015) «Solar powered electrokinetic remediation of Cu polluted soil using a novel anode configuration». *Electrochimica Acta*, 181, pp. 58-67.

Hassan, A.A., Toll, D.G., (2015) «Water content characteristics of mechanically compacted clay soil determined using the electrical resistivity method». *Proceedings of the 16th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp. 3395-3400.

Hazreek, Z.A.M., Saiful, A.T.S., Aziman, M., Rosli, S., Wijeyesekera, D.C., Fauziah, A., (2015) «Integral analysis of laboratory and field electrical resistivity for soil density prediction». *Proceedings of the 3rd International Conference on Applied Geophysics*, Hong Kong.

Herman, R., (2001) «An introduction to electrical resistivity in geophysics». *Am J Phys*, 69, pp. 943-952.

Ho, S.V., Athmer, C., Sheridan, P.W., Hughes, B.M., Orth, R., McKenzie, D., Brodsky, P. H., Shapiro, A. M., Sivavec, T. M., Salvo, J., Schultz, D., Landis, R., Griffith, R., Shoemaker, S., (1999a). «The Lasagna Technology for In Situ Soil Remediation. 1. Small Field Test». In: *Environmental Science & Technology* 33 (7), pp. 1086–1091.

Ho, S.V., Athmer, C., Sheridan, P.W., Hughes, B.M., Orth, R., McKenzie, D., Brodsky, P. H., Shapiro, A. M., Sivavec, T. M., Salvo, J., Schultz, D., Landis, R., Griffith, R., Shoemaker, S.,

(1999b) «The Lasagna Technology for In Situ Soil Remediation. 2. Large Field Test». In: *Environmental Science & Technology* 33 (7), pp. 1092–1099.

Holtz, R.D., Kovacs, W.D., (1981) «An introduction to geotechnical engineering». Englewood Cliffs NJ, Prentice-Hall, Inc, (733)

Homand, F., Duffaut, P., (2000) «Manuel de mécanique des roches». Tome 1 : Fondements. Editions CFMR, Presses ENSMP. Paris.

Hong-jing, J., Shun-qun, L., Lin, L., (2014) «The relationship between the electrical resistivity and saturation of unsaturated soil». *Electron j geotech eng*, 19, pp. 3739-3746.

Hossain, M.S., Dharmateja, M., Hossain, J., (2010) «Assessment of geo-hazard potential and site investigations using Resistivity Imaging». *International Journal of Environmental Technology and Management*, 13(2), 116-129.

<http://geophysics.geoscienceworld.org>

<http://pubs.usgs.gov>

INSID, (2008) «Les sols salins en Algérie». Institut national des sols, de l'irrigation et du drainage.

Isbell, R.F., Reeve, R.C., Hutton, J.T., (1983) «Salt and Sodcity», in: A. Press (Ed.), *Soils: an Australian view point.*, Division of Soil, CSIRO, Melbourne. pp. 107-118.

Iyer, R., (2001) «Electrokinetic Remediation». *Particulate Science and Technology*, 19, 219-228.

Jacobs, R.A., Sengun, M.Z., Hicks, R.E., Probst, R F., (1994) «Model and experiments on soil remediation by electric fields». In: *Journal of Environmental Science and Health. Part A: Environmental Science and Engineering and Toxicology*, 29(9), pp. 1933–1955.

Jamshidi-Zanjani, A., Khodadadi Darban, A., (2017) «A review on enhancement techniques of electrokinetic soil remediation». *Pollution*, 3, pp. 157-166.

Jayasekera, S., (2008) «An investigation into modification of the engineering properties of salt affected soils using electrokinetics». Dissertation/Thesis, University of Ballarat.

Jeon, E.K., Jung, J.M., Kim, W.S., Ko, S.H., Baek, K., (2014) «In situ electrokinetic remediation of as-, cu-, and pb-contaminated paddy soil using hexagonal electrode configuration: A full scale study». *Environ Sci Pollut Res*, 22, pp. 711-720.

Ji, M., Zou, H., Du, W., Gao, K., Liu, C., (2016) «Surfactant enhanced electrokinetic remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons contaminated soil». *Chin J Environ Eng* 10, pp. 3871-3876.

Kalinski, R., Kelly, W., (1993) «Estimating water content of soils from electrical resistivity». *Geotechnical Testing Journal*, 16(3), pp. 323-329.

Keller, G.V., Frischknecht, F.C., (1966) «Electrical methods in geophysical prospecting». Pergamon Press. New York.

Kibiria, G., (2014) «Evaluation of physico-mechanical properties of clayey soils using electrical resistivity imaging technique». Doctoral thesis. University of Texas at Arlington

Kibria, G., Hossain, M.S (2012) «Investigation of geotechnical parameters affecting electrical resistivity of compacted clays». *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138 (12), pp. 1520-1529.

Kim, J.H., Han, S.J., Kim, S.S., Yang, J.W., (2006) «Effect of soil chemical properties on the remediation of phenanthrene-contaminated soil by electrokinetic-Fenton process». *Chemosphere*, 63(10), pp. 1667-1676.

Kim, D.H., Ryu, B.G., Park, S.W., Seo, C.I., Baek, K., (2009) «Electrokinetic remediation of Zn and Ni-contaminated soil». *J Hazard Mater*, 165, pp. 501-505.

Kolay, P.K., Burra, S.G., Kumar, S., (2016) «Effect of salt and NAPL on electrical resistivity of fine-grained soil-sand mixtures». *International Journal of Geotechnical Engineering*, 12, 13-19.

Lageman, R., (1993) «Electroreclamation. Applications in the Netherlands». In: *Environmental Science & Technology*, 27(13), pp. 2648–2650.

Lageman, R., Pool, W., Seffinga, G.A., (1989) «In-Situ Bodensanierung durch elektrokinetischen Schadstofftransport». *Sanierung kontaminierter Standorte*, pp. 255–282.

Lambe, T.W., Whitman, R.V., (1969) «Soil Mechanics, series in Soil Engineering». John Wiley & Sons, Inc., New York.

Lan, T.N., (1977) «Nouvel essai d'identification des sols : l'essai au bleu de méthylène ». *Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées*, 88, pp. 136-137.

Lax, A., Diaz, E., Castell, V., Albaladejo, J., (1994) «Reclamation of physical and chemical properties of a salinized soil by organic amendments». *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 8, 9-17.

Lautrin, D., (1987) «Une procédure rapide d'identification des argiles». *Bulletin Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, 152, pp.76-84.

Le Roux, A., (1975) «Les différentes textures et leur influence sur le comportement des sols argileux et marneux». *Géologia Applicata Indrogéologia*, pp. 67-85.

Li, D., Tan, X.Y., Wu, X.D., Pan, C., Xu, P., (2014) «Effects of electrolyte characteristics on soil conductivity and current in electrokinetic remediation of lead-contaminated soil». *Sep Purif Technol*, 135, pp. 14-21.

Liaki, C., Rogers, C.D.F., Boardman, D., (2010) «Physico-chemical effects on clay due to electromigration using stainless steel electrodes». *Journal of Applied Electrochemistry*, 40(6), pp. 1225-1237.

Lin, J., Cai, G., Liu, S., Puppala, A.J., Zou, H., (2016) «Correlations between electrical resistivity and geotechnical parameters for jiangsu marine clay using spearman's coefficient test». *International Journal of Civil Engineering*, 15 (3), pp. 419-429.

Liang, Y., (2012) «Co-valorisation de sédiments et de sols fins par apport de liants et de fibres». Thèse de doctorat de l'Université de Caen, 194p.

Locatelli, A., (2013) «Prévalence de pathogènes humains dans les sols français, effet des facteurs pédoclimatiques, biologiques et du mode d'utilisation des sols». Thèse de doctorat. De l'Université de Bourgogne.

Loke, M.H., (2000) «Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies». A practical guide to 2.

Luckham, P.F., Rossi, S., (1999) «Colloïdal and rheological properties of bentonite suspensions". *Adv. Colloid Interface Sci*, 82, 43-92.

Lyklema, J., (2000) «Fundamentals of interface and colloid science: Liquidfluid Interfaces». (3) Academic Press.

Mac Neill, J.D., (1980) «Electrical conductivity of soils and rocks, Mississauga». Geonics Limited. Canada.

Manokararajah, K., Ranjan, R.S., (2005) «Electrokinetic retention, migration and remediation of nitrates in silty loam soil under hydraulic gradients». *Eng geol*, 77, pp. 263-272.

Marlet, S., (1996) «Alcalinisation des sols dans la vallée du fleuve Niger (Niger): Modélisation des processus physico-chimiques et évolution des sols sous irrigation». Thèse de doctorat, ENSA, Montpellier 243 p.

Masi, M., Losito, G., (2015) «Spectral induced polarization for monitoring electrokinetic remediation processes». *J Appl Geophys*, 123, pp. 284-294.

McBride, M.B., (1994) «Environmental Chemistry». Oxford University Press, New York.

McCarter, W., (1984) «The electrical resistivity characteristics of compacted clays». *Geotechnique*, 34(2), 263.

McIntyre, D.S., (1979) «Exchangeable sodium, subplasticity and hydraulic conductivity of some Australian soils». *Australian Journal of Soil Research*, pp. 115-120.

Meunier, A., (2005) «Clays». Springer, 476 p.

Millot, G., (1964) «Géologie des argiles : Altérations, sédimentologie, géochimie». Masson, 499 p.

Mitchell, J.K., (1976) «Fundamentals of soil behaviour». John Wiley & sons. Inc, New York. 422 p.

Mitchell, J.K., Yeung, A.T., (1990) «Electro-kinetic flow barriers in compacted clay». *Transportation Research Record* (1288).

Mitchell, J.K, Soga, K., (2005) «Fundamentals of soil behavior». John Wiley and Sons. Hoboken, NJ.

Moghadam, M.J, Moayedi, H., Sadeghi, M.M., Hajiannia, A., (2016) «A review of combinations of electrokinetic applications». *Environ Geochem Health*.

Mohamedelhasan, E., Shang, J., (2001) «Effects of electrode materials and current intermittence in electro-osmosis». *Proceedings of the ICE-Ground Improvement*, 5(1), pp. 3-11.

Mosavat, N., (2014) «Electrokinetic Treatment of Fine-grained Soils with Chemical Enhancement Solutions». Doctoral thesis. Griffith University

Mostafa, M., Anwar, M.B., Radwan, A., (2017) «Application of electrical resistivity measurement as quality control test for calcareous soil». *HBRC Journal*.

Munns, R., Tester, M., (2008) «Mechanisms of Salinity Tolerance». *Annual Review of Plant Biology*, 59, pp. 651-681.

Murad, O.F., (2012) «Obtaining Chemical Properties through Soil Electrical Resistivity». *Journal of Civil Engineering Research*, 2, pp. 120-128.

Ng, Y.S., Sen Gupta, B., Hashim, M.A., (2015) «Effects of operating parameters on the performance of washing-electrokinetic two stage process as soil remediation method for lead removal». *Sep Purif Technol*, 156, pp. 403-413.

Nguyen, M.N., Dultz, S., Kasbohm, J., Le, D., (2009) «Clay dispersion and its relation to surface charge in a paddy soil of the Red River Delta, Vietnam». *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde*, 172, pp.

477-486.

Northcote, K.H., Skene, J.K.M., (1972) «Australian Soils with Saline and Sodic Properties». Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) Publishing, Melbourne.

Osipov, V.I., Sokolov, V.N., (1978) «Relation between the microfabric of clay soils and their origin and degree of compaction». Bull Inter Assoc Eng Geology, 17, pp. 73-81.

Page, M.M., Page, C.L. (2002) «Electroremediation of contaminated soils». Journal of environmental engineering, 128, pp. 208-219.

Patterson, R., (2006) «Consideration of soil sodicity when assessing land application of effluent or graywater». Technical Sheet Reference.

Pearson, K.E., Bauder, J.W., (2003) «The basics of salinity and sodicity effects on soil physical properties». The Department of Land Resources and Environmental Sciences, Water Quality & Irrigation Management, MSU Bozman.

Philipponnat, G., Huber, B., (1997) « Fondations et ouvrages en terre ». Edition Eyrolles, p. 548.

Pool, W., (1989) «A process for electroreclamation of soil material, an electric current system for application of the process, and an electrode housing for use in the electric current system». European Patent EP0312174A1.

Pozdnyakov, A., Pozdnyakova, L., Karpachevskii, L., (2006) «Relationship between water tension and electrical resistivity in soils». Eurasian Soil Science, 39(1), pp. 78-83.

Probstein, R.F., Hicks R.E., (1993) «Removal of Contaminants from Soils by Electric Fields». In: Science, 260(5107), pp. 498–503.

Qadir, M., Noble, A.D., Schubert, S., Thomas, R.J., Arslan, A., (2006) «Sodicity-induced land degradation and its sustainable management: problems and prospects». Land Degrad Dev, 17, pp. 661–676.

Qadir, M., Schubert, S., (2002) «Degradation processes and nutrient constraints in sodic soils». Land Degradation & Development, 13, pp. 275-294.

Qureshi, R.H., Barrett-Lennard, E.G., (1998) «Saline agriculture for irrigated land in Pakistan: A handbook». Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR), Canberra, Australia.

Rapport de synthèse final du projet ARGIC, (2009) Université de Poitiers, 92 p., 29 ill., 6 tabl., 39 ann.

Reddy, K.R., Ala, P.R., Sharma, S., Kumar, S.N., (2006b) «Enhanced electrokinetic remediation of contaminated manufactured gas plant soil». Engineering Geology, 85(1–2), pp. 132-146.

Reddy, K.R., Cameselle, C., (2009) «Electrochemical Remediation Technologies for Polluted Soils», Sediments and Groundwater. Wiley.

Reddy, K.R., Saichek, R.E., (2003) «Effect of soil type on electrokinetic removal of phenanthrene using surfactants and cosolvents». *Journal of environmental engineering*, 129, pp. 336.

Rengasamy, P., (2010) «Soil processes affecting crop production in salt-affected soils». *Functional Plant Biology*, 37, pp. 613-620.

Rengasamy, P., (2006a) «Soil salinity and sodicity. In: D. Stevens (Ed.), *Growing crops with reclaimed wastewater*». CSIRO, pp. 125-137.

Rengasamy, P., (2002a) «Clay Dispersion, in: B. M. McKenzie, et al. (Eds.), *Soil Physical Measurement and Interpretation for Land Evaluation*». CSIRO Publishing, Collingwood, pp. 200-210.

Rengasamy, P., (2002b) «Transient salinity and subsoil constraints to dryland farming in Australian sodic soils: an overview». *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 42, pp. 351-361.

Rengasamy, P., Chittleborough, D., Helyar, K., (2003) «Root-zone constraints and plant-based solutions for dryland salinity». *Plant and Soil*, 257, pp. 249-260.

Rengasamy, P., Greene, R., Ford, G.W., Mehanni, A.H., (1984a) «Identification of dispersive behaviour and the management of red- brown earths». *Australian Journal of Soil Research*, 22, pp. 413-431.

Rengasamy, P., Olsson, K.A., (1991) «Sodicity and soil structure». *Australian Journal of Soil Research*, 29, pp. 935-952.

Rengasamy, P., Sumner, M.E., (1998) «Processes Involved in Sodic Behaviour., in: M. E. Sumner and R. Naidu (Eds.), *Sodic Soils. Distribution, Properties, Management, and Environmental Consequences*». New York Press., New York. pp. 35-50.

Reuss, F.F., (1809) «Sur un nouvel effet de l'électricité galvanique». In: *Mémoires de la Société Impériale des Naturalistes de Moscou* 2, pp. 327-337.

Revil, A., Cathles, L.M., Losh, S., Nunn, J.A., (1998) «Electrical conductivity in shaly sands with geophysical applications». *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B10), 23925-23936.

Rinaldi, V.A., Cuestas, G.A., (2002) «Ohmic conductivity of a compacted silty clay». *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128 (10), pp. 824-835.

Robert, M., (1996) «Le Sol: interface dans l'environnement: ressource pour le développement». Elsevier Masson.

Saichek, R.E., Reddy, K.R., (2003) «Effect of pH control at the anode for the electrokinetic removal of phenanthrene from kaolin soil». *Chemosphere*, 51(4), pp. 273-287.

Samba, R., (1998) «Riziculture et dégradation des sols en vallée du fleuve Sénégal: analyse comparée des fonctionnements hydro-salins des sols du delta et de la moyenne vallée en simple et double riziculture». Thèse de doctorat de l'Université Cheikh AntaDiop (Sénégal), 172 p.

Santamarina, J.C., Klein, K.A., Fam, M.A., (2001) «Soil and Waves: Particulate material behavior, characterization and monitoring». John Wiley and Sons, NY.

Schneider, S., (2008) «Estimation des paramètres hydrodynamiques des sols à partir d'une modélisation inverse de données d'infiltration et de résistivité électrique». Thèse de doctorat de l'Université de Paris Sud - Paris XI.

Schwartz, B.F., Schreiber, M.E., Yan, T., (2008) «Quantifying field-scale soil moisture using electrical resistivity imaging». *Journal of Hydrology*, 362(3-4), pp. 234-246.

Seelig, B.D., (2000) «Salinity and sodicity in North Dakota soils». EB 57, North Dakota State University Extension Service. Fargo, North Dakota.

Sergeyev, Y.M., Osipov V.I., Sokolov, V.N., Grabowska, O., (1978) «Types of microstructure of clayey soils». Proc. 3rd Inter. Cong. Inter. Assoc. of Engineer. Geology, 1, section II, Madrid, pp. 319-327.

Shainberg, I., (1992) «Chemical and mineralogical components of crusting. In Sumner, M. E. and Stewart, B. A. (ed) Soil crusting, chemical and physical processes». *Advances in Soil Science*, Lewis Publishers, Boca Raton.

Shainberg, I., Letey, J., (1984) «Response of Soils to Sodic and Saline Conditions». *Hilgardia*, 52, pp. 1-57.

Shapiro, A.P., Probstein, R.F., (1993) «Removal of Contaminants from Saturated Clay by Electroosmosis». *Environmental Science & Technology*, 27(2), pp. 283-291.

Shenbagavalli, S., Mahimairaja, S., (2011) «Electro kinetic remediation of contaminated habitats». *African Journal of Environmental Science and Technology*, 4(13), pp. 930-935.

Shevnin, V., Mousatov, A., Ryjov, A., Delgado-Rodriquez, O., (2007) «Estimation of clay content in soil based on resistivity modelling and laboratory measurements». *Geophys Prospect*, 55, pp. 265-275.

Shin, S.Y., Park, S.M., Baek, K., (2016) «Electrokinetic Removal of As from Soil Washing Residue». *Water Air Soil Pollut*, 227, pp. 223-231.

Skempton, A.W., (1953) «The colloidal activity of clays». Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, 1, pp. 57-61.

Smoluchowski, M., (1928) «Elektrische Endosmose und Strömungsströme». ger. In: Pisma Mariana Smoluchowskiego, 3(1), pp. 246-346.

SOCO, (2009) «Sustainable Agriculture and soil conservation: Salinisation et codification». <http://soco.jrc.ec.europa.eu>

Southard, R.J., Shainberg, I., Singer, M.J., (1988) «Influence of electrolyte concentration on the micromorphology of artificial depositional crust». Soil Science, 145, pp. 278-288.

Sparks, D.L., (2003) «Environmental Soil Chemistry». Second Edition, Elsevier Science, 367 p.

Spitzer, K., Chouteau, M.A., (2003) «DC resistivity and IP borehole survey at the Casa Berardi gold mine in northwestern Quebec», Geophysics, 68 (2), pp. 453-463.

Sudha, K., Israil, M., Mittal, S., Rai, J., (2009) «Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations». Journal of Applied Geophysics, 67, pp. 74-79.

Sumbarda-Ramos, E.G., Guerrero-Gutierrez, O.X., Murillo-Rivera, B., Gonzaalez, I., Oropeza-Guzman, M.T., (2010) «Electrokinetic treatment for clayed and sandy soils». Journal of Applied Electrochemistry, 40, pp. 1255-1261.

Sumner, M.E., (1993) «Sodic soils - New perspectives». Australian Journal of Soil Research, 31, pp. 683-750.

Sumner, M.E., Rengasamy, P., Naidu, R., (1998) «Sodic Soils - Distribution, Properties, Management and Environmental Consequences». pp. 3-17.

Suzuki, K., Higashi, S., (2001) «Groundwater flow after heavy rain in landsli deslope area from 2-D inversion of resistivity monitoring data». Geophysics, 66 (3), pp. 733-743.

Szabolcs, I., (1989) «Salt-Affected Soils». CRC Press, Boca Raton, F.I.

Tabbagh, A., Cosenza, P., (2007) «Effect of microstructure on the electrical conductivity of clay-rich systems». Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32(1), pp. 154-160.

Touret, O., (1988) «Structures des Argiles Hydratées, Thermodynamique de la Déshydratation et de la Compaction des Smectites». Thèse de doctorat. Strasbourg 1.

USAEC, (2000) «In-Situ Electrokinetic Remediation of Metal Contaminated Soils». Report Number: SFIM-AEC-ET-CR-99022, p. 30.

USDA, (1975) «Soil Taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys». Agriculture Handbook Number 436

USEPA, (1998) «In situ electrokinetic extraction system». National Risk Management Laboratory. Report Number EPA/540/R-04/506a.

USSL, (1954) «Diagnosis and improvement of saline and alkali soils». Handbook Number 60.

Van Cauwenberghe, L., (1997) «Electrokinetics: Technology overview report». Groundwater Remediation Technologies Analysis Centre, 117.

Van Olphen, H., (1963) «Internal mutual flocculation in clay suspensions». J. Colloid Sci, 19, pp. 313-322.

Velde, B., (2013) «Origin and mineralogy of clays: clays and the environment». Springer Science & Business Media.

Virkutyte, J., Sillanpää, M., Latostenmaa, P., (2002) «Electrokinetic soil remediation - critical overview». In: Science of The Total Environment, 289 (1-3), pp. 97–121.

Wang, G., Qin, Y., Shen, J., Hu, Y., Liu, D., Zhao, L., (2016) «Resistivity response to the porosity and permeability of low rank coal». Int J Min Sci Technol, 26, pp. 339-344.

White, E.R., (2006) «Principles and Practice of Soil Science Blackwell Science Ltd», Carlton, Victoria, Australia.

Wise, D.L., (2000) «Remediation engineering of contaminated soils». CRC Press. New York.

Yuan, C., Weng, C.H., (2006) «Electrokinetic enhancement removal of heavy metals from industrial wastewater sludge». In: Chemosphere, 65(1), pp. 88-96.

Yang, J.S., (2002) «Three dimensional complex resistivity analysis for clay characterization in hydrogeologic study». Ph.D. thesis, University of California, Berkeley.

Yang, G.C.C., Liu, C.Y., (2001) «Remediation of TCE contaminated soils by in situ EK-Fenton process». Journal of Hazardous Materials, 85(3), pp. 317-331.

Yeung, A.T., (2011) «Milestone developments, myths, and future directions of electrokinetic remediation». In: Separation and Purification Technology, 79 (2), pp. 124-132.

Yeung, A.T., (1990) «Coupled Flow Equations for Water, Electricity and Ionic Contaminants through Clayey Soils under Hydraulic, Electrical and Chemical Gradients». In: Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics, 15, pp. 247.

Yeung, A.T., Datla, S., (1995) «Fundamental formulation of electrokinetic extraction of contaminants from soil». In: Canadian Geotechnical Journal, 32 (4), pp. 569-583.

Yeung, A.T., Gu, Y.Y., (2011) «A review on techniques to enhance electrochemical remediation of contaminated soils». In: Journal of hazardous materials, 195, pp. 11-29.

Yeung, A.T., Scott, T.B., Gopinath, S., Menon, R.M., Hsu, C., (1997) «Design, Fabrication and Assembly of an Apparatus for Electrokinetic Remediation Studies». Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, 20 (2), pp. 199-210.

Yong, R.N., (1999) «Soil Suction and Soil Water Potentials in Swelling Clays in Engineered Clay Barriers». Eng Geol, 54, pp. 3-13.

### **Les normes**

AS 1289.6.6.1, (1998) Methods of testing soils for engineering purposes - Soil strength and consolidation tests - Determination of the one-dimensional consolidation properties of a soil - Standard method.

NF EN 12879, (Novembre 2000). Caractérisation des boues – Détermination de la perte au feu de la matière sèche.

NF ISO 7980, (Mars 2000). Qualité de l'eau - Dosage du calcium et du magnésium - Méthode par spectrométrie d'absorption atomique

NF ISO 9297, (Février 2000). Qualité de l'eau - Dosage des chlorures - Titration au nitrate d'argent avec du chromate comme indicateur (méthode de Mohr)

NF ISO 9964-3, (1993). Prévisualiser. Qualité de l'eau -- Dosage du sodium et du potassium - Partie 3: Dosage du sodium et du potassium par spectrométrie d'adsorption atomique.

NF P 94-051, (Mars 1993). Sols: reconnaissance et essais – Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau.

NF P 94-057, (Mai 1992). Sols: reconnaissance et essais – Analyse granulométrique

NF P94-068, (Novembre 1993). Sols: reconnaissance et essais - Mesure de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tache.

NF P94-071-1, (Août 1994). Sols: reconnaissance et essais - Essai de cisaillement rectiligne à la boîte - Partie 1 : cisaillement direct.

NF P94-090-1, (Décembre 1997). Sols: reconnaissance et essais - Essai oedométrique - Partie 1 : essai de compressibilité sur matériaux fins quasi saturés avec chargement par paliers.

NF P94-093, (Octobre 2014). Sols: reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié

NF X31-106, (Septembre 2002). Qualité des sols - Détermination du calcaire actif

# **Annexes**

## Annexe 1

### 1. Dosage du Cl<sup>-</sup> (ISO 9297)

#### ▪ Réactifs :

- Nitrate d'argent (AgNO<sub>3</sub><sup>-</sup>) 0.01N : dissoudre 1.6987g de nitrate d'argent dans 100ml d'eau distillée. Conserver à l'abri de la lumière
- Chlorure de sodium NaCl 0.01N : dissoudre 0.585g de chlorure de sodium dans 1000ml d'eau distillée
- Chromate de potassium K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub> 5% : dissoudre 5g de chromate de potassium dans 80ml d'eau distillée, et ajouter des gouttes de nitrate d'argent (AgNO<sub>3</sub><sup>-</sup> 1N =17g/l) jusqu'à l'apparition d'un léger précipité rouge. Ajuster avec l'eau distillée à 100ml.

#### ▪ Mode opératoire :

- Transvaser une aliquote de 10ml l'extrait diluée (à 10 ou à 100) dans une fiole de 100ml
- Ajouter 4 gouttes de chromate de potassium.
- Titrer avec la solution de nitrate d'argent jusqu'à l'apparition d'une coloration barbillon brique.
- Faire un témoin avec le chlorure de sodium pour estimer la normalité de nitrate d'argent exactement. Donc prélever 10ml de chlorure de sodium 0.01N et ajouter 3 gouttes de chromate de potassium et titrer avec le nitrate d'argent.

$$\text{Cl (méq/l)} = \frac{V \times N \times 1000}{A} \times D$$

**V** : volume d'AgNO<sub>3</sub><sup>-</sup> 0.01N utilisé pour la titration de l'échantillon en ml .

**A** : volume de la prise d'essai ml.

**N** : normalité de la solution d'AgNO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

**D** : dilution (\*10) ou (\*100).

$$N_{\text{AgNO}_3^-} = \frac{10 \times N_{\text{NaCl}^-}}{V_{\text{AgNO}_3^-}}$$

**N<sub>AgNO<sub>3</sub><sup>-</sup></sub>** : normalité de la solution d'AgNO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

**V<sub>AgNO<sub>3</sub><sup>-</sup></sub>** : volume d'AgNO<sub>3</sub><sup>-</sup> utilisé (ml).

**N<sub>NaCl</sub><sup>-</sup>** : normalité de la solution de NaCl

## **2. Dosage du Ca<sup>++</sup> et Mg<sup>++</sup> (ISO 7980)**

### **▪ Réactif :**

- Solution tampon : 16.9g NH<sub>4</sub>Cl dans 142.5ml NH<sub>4</sub>OH concentré laissé refroidir complété à 250ml avec l'eau distillé
- EDTA :( 0.1N) : 2g EDAT + 0.05g MgCl<sub>2</sub> complété à 1l
- NET : 0.5g NET + 4.5g hydroxylamine hydrochlorure dans 100ml Ethanol 95%
- NaOH : 8g/100ml laisser refroidir (doucelement)
- Calcon carboxylique : 0.2g calcon carboxylique +100g NaCl
- Diluer les eaux 10fois : 5ml échantillon +45ml H<sub>2</sub>O

### **▪ Mode opératoire**

#### **Témoin :**

Prenant Bécher contient :

- 50ml l'eau distillé
- 0.2 g calcon carboxylique +100g NaCl
- 2-3 ml NaOH
- Titration avec la EDAT et changement la couleur rose –bleu

#### **2.1. Dosage du Ca<sup>++</sup>**

Prenant Bécher contient :

- 5 ml échantillon + 45 ml H<sub>2</sub>O (dillution × 10)
- 2-3 ml NaOH
- 0.2g calcon carboxylique +NaCl

Cette solution est placée au-dessus l'agitateur

- Titration avec la EDAT et changement la couleur (rose –bleu)

#### **2.2. Dosage du Ca<sup>++</sup> et Mg<sup>++</sup> NF**

Prenant bécher contient :

- 5ml échantillon + 45 ml H<sub>2</sub>O (dilution × 10)
- 4ml solution tampon (pH=10)
- 4 goutte NET

Cette solution est placée au dessus l'agitateur

- Titration avec la EDTA et changement la couleur (rose – bleu)

$$\text{Ca}^{2+} = \frac{V_1 - V_2 \times 0.01 \times 1000}{A} \times D$$

V1 : volume de titration avec l'EDTA

V2 : volume de titration avec l'EDTA (Témoin)

D : facteur de dilution

A : prise d'essai

$$[\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}] = \frac{V_1 - V_2 \times 0.01 \times 1000}{A} \times D$$

$$\text{Mg}^{2+} = (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - \text{Ca}^{2+}$$

### 3. Dosage du Sodium $\text{Na}^+$ par spectrophotométrie à flamme (ISO 9964-3)

#### ▪ Réactif

- Peser 2.54 g de chlorure de sodium, ayant séché pendant une heure, dans une étuve à 105°C.
- Dissoudre cette même quantité dans de l'eau distillée et compléter à 1L.
- Cette solution a une concentration de 1 000 mg/l de sodium.
- Conserver cette solution dans une bouteille en plastique.
- Par dilution, préparer quotidiennement une solution de 10 mg/l en prélevant 1 ml de la solution précédente dans 100 ml d'eau distillée
- Faire passer au spectrophotomètre à flamme la solution d'étalonnage de 10 mg/l, à trois reprises.
- Faire passer les échantillons.
- Si la concentration en  $\text{Na}^+$  est supérieure à 10 mg/l ; Procéder à la dilution de l'échantillon.

$$[\text{Na}^+] \text{ mg/l} = C \times F$$

où :

C : valeur notée de la réponse de l'appareil

F : facteur de dilution.

#### 4. Dosage du potassium $K^+$ par spectrophotométrie à flamme (ISO 9964-3)

##### ▪ Réactif

- Dissoudre 1,907 g de KCl (ayant été séché à 105°C pendant une heure de temps) dans un litre d'eau distillée. Cette solution a une concentration égale à 1000 mg/l de potassium ( $K^+$ ) : soit :  $C_1 = 1000$  mg/l.
- La solution doit être stockée dans une bouteille en plastique.
- A partir de  $C_1$ , préparer quotidiennement une solution de 10 mg/l, en prélevant 1 ml de la concentration dans 100 ml d'eau.
- Faire passer la solution de 10 mg/l à trois reprises dans le spectrophotomètre.
- Faire passer ensuite les échantillons.
- Si la concentration en potassium dépasse 10 mg/l, Procéder à la dilution de l'échantillon.

$$[K^+] \text{ mg/l} = C \times F$$

Où :

C : valeur notée de la réponse de l'appareil

F : facteur de dilution.