



**Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd**  
**Faculté de Technologie**  
**Département de Génie Civil**



**Thèse**

Présentée pour l'obtention du diplôme de :  
**Doctorat 3<sup>ème</sup> Cycle LMD**  
**Option : Géotechnique**

Sous le Thème :

**Étude de l'endommagement des sols salés soumis à des sollicitations d'humidification Séchage (température- humidité).**

Présentée par :

**HAFHOUF Ilyas**

**Devant le jury composé de :**

M. MAALEM Toufik	Prof.	Université de Batna	Président
M. ABBECHÉ Khelifa	Prof.	Université de Batna	Rapporteur
M <sup>lle</sup> . BAHLOUL Ouassila	MCA.	Université de Batna	Co-Rapporteur
M. BELGASMIA Mourad	Prof	Université de Sétif 1	Examineur
M. MOKRANI L'Arbi	MCA.	Université de Sétif 1	Examineur

## Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord mon Directeur de thèse, professeur ABBECHHE Khelifa, qui m'a accueilli très chaleureusement et qui m'a dirigé, surveillé, encouragé pendant ces quatre années. Il m'a guidé dans mon travail, toujours en me montrant la voie la plus simple pour arriver à comprendre des phénomènes complexes. Son enthousiasme, son expérience et ses connaissances m'ont aidé non seulement à compléter mes travaux, mais aussi savoir comment être un bon expérimentateur en travaillant de manière scientifique et efficace. Je tiens également à remercier mon Co-encadreur Dr BAHLOUL Ouassila, Maître de conférences A à l'université Batna 2 pour ses conseils qu'elle m'a accordé pour finaliser ce travail.

Je remercie MAALAM Toufik, Professeur à l'université de Batna 2, pour avoir accepté de présider le Jury de ma soutenance de thèse et avoir lu mon rapport avec attention.

Je remercie vivement Monsieur BELGACEMIA Mourad, Professeur à l'université Sétif 1, pour l'honneur qu'il m'a fait d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Mes reconnaissances les plus sincères vont au Dr MOKRANI l'Arbi, Maître de conférences A à l'université de Sétif 1 d'avoir accepté de participer au Jury et d'examiner cette thèse.

Ces remerciements ne seraient pas complets si je ne cite pas tout le personnel du laboratoire des travaux publics LTPEst de Sétif pour leur soutien.

Sans oublier tous mes collègues et amis, ainsi que toutes les personnes qui m'ont encouragé de près ou de loin pour finaliser ce travail, qu'ils trouvent ici l'expression de ma sincère gratitude.

# Sommaire

<b>Résumé.....</b>	<b>5</b>
<b>Liste des figures.....</b>	<b>9</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>12</b>
<b>Liste des abréviations.....</b>	<b>13</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>15</b>

## Chapitre 1. Analyse bibliographique sur les sols non saturés.

1.1	Introduction.....	19
1.2	Définition d'un sol non saturé.....	19
1.3	La succion dans les sols .....	19
1.3.1	Définition de la succion .....	19
1.3.2	Composantes de la succion.....	20
1.3.2.1	Succion capillaire.....	20
1.3.2.2	Succion d'adsorption.....	23
1.3.2.3	Succion osmotique .....	24
1.4	Méthodes de mesure de la succion .....	24
1.4.1	La méthode papier filtre .....	25
1.5	Rôle des différentes composantes de la succion.....	27
1.6	États de saturation d'un sol .....	28
1.7	L'effet des cycles de séchage-mouillage (d-w) sur le comportement mécanique des sols non saturés 31	
1.7.1	L'effet des cycles D-W sur la résistance à la compression non confinée (UCS).....	31
1.7.2	L'effet des cycles de séchage-mouillage sur la résistance au cisaillement .....	33
1.8	Endommagement des sols sous l'effet des cycles de séchage-mouillage .....	34
1.9	Effondrement des sols non saturés .....	35
1.9.1	Phénomènes d'effondrement .....	35
1.9.2	Méthodes expérimentales de caractérisation .....	36
1.9.2.1	Essais oedométrique simple.....	36
1.9.2.2	Essai oedométrique double.....	37
1.9.2.3	L'effet des cycles de séchage-mouillage sur l'effondrement des sols non saturés ....	39
1.10	Conclusion .....	40

## Chapitre 2. Analyse bibliographique des sols salés « sabkhas »

2.1	Introduction.....	42
2.2	Généralités sur sebkha .....	42

2.2.1	Définition de sebkha .....	42
2.2.2	types de sebkha.....	43
2.2.3	Distribution des Sebkhass : .....	44
2.2.4	Les sols de sebkha.....	45
2.2.5	Caractéristiques géotechniques des sols de sebkha.....	46
2.2.6	Problèmes liés au sol de sebkha.....	46
2.3	Les sols sales .....	48
2.3.1	Définition des sols salés .....	48
2.3.2	Définition de la salinisation.....	48
2.3.3	Définition de la salinité .....	48
2.3.4	Type de salinisation du sol et compréhension des mécanismes .....	49
2.3.4.1	Salinisation .....	49
2.3.4.1.1	Salinisation primaire .....	49
2.3.4.1.2	Salinisation secondaire.....	49
2.3.4.2	Sodisation .....	49
2.3.4.2.1	Sodicité.....	50
2.3.4.3	Alcalinisation.....	50
2.3.4.3.1	Alcalinité .....	51
2.3.5	Mesure de la salinité du sol .....	51
2.3.6	Classification des sols salés.....	51
2.3.6.1	Les sols salins .....	52
2.3.6.2	Les sols salins-alcalins .....	52
2.3.6.3	Les sols alcalins .....	52
2.3.7	Sels solubles .....	52
2.3.7.1	Chlorures .....	53
2.3.7.2	Sulfates .....	53
2.3.7.3	Carbonates .....	53
2.3.8	Mouvements des sels solubles dans le sol.....	54
2.3.8.1	La lixiviation.....	54
2.3.8.2	La capillarité.....	54
2.3.8.3	Thermodialyse .....	54
2.3.9	Action des sels solubles sur le sol.....	54
2.3.9.1	Sur la structure du sol.....	54
2.3.9.2	Action sur la perméabilité .....	55
2.4	Conclusion .....	55

**Chapitre 3. Matériaux et matériels et essais**

3.1	Introduction.....	57
3.2	Localisation et description du site .....	57
3.2.1	Emplacement et échantillonnage du sol .....	57
3.2.2	Description et aperçu sur les sols sebkha d'Ain M'lila.....	58
3.3	Essais de caractérisation chimiques, minéralogiques et géotechniques .....	61
3.3.1	Préparation des échantillons .....	61
3.3.2	Analyses spectroscopie de fluorescence X (XRF).....	62
3.3.3	Analyses minéralogiques (DRX : Diffraction des rayons X) .....	63
3.3.4	Analyses thermiques ATG et ATD.....	64
3.3.5	Analyse microstructurale : microscopie électronique à balayage MEB.....	65
3.3.6	Analyses chimiques sur l'extrait du sol.....	66
3.3.7	Essais de caractérisation géotechniques .....	67
3.4	Essais de compression non confinée sous l'effet des cycles hydrique de séchage-humidification.....	69
3.4.1	Préparation des éprouvettes.....	69
3.4.2	Les cycles hydriques de séchage-humidification.....	70
3.4.3	Essais de compression non confinée .....	74
3.5	Essais de cisaillement, succion et d'effondrement sous l'effet des cycles hydrique de séchage-humidification .....	75
3.5.1	Préparation des éprouvettes.....	75
3.5.2	Cycles de séchage-mouillage (D-W) .....	75
3.5.3	Essais oedométriques .....	76
3.5.4	Essais de cisaillements directs .....	78
3.5.5	Essai de succion.....	78
3.6	Conclusion .....	80

**Chapitre 4. Analyse, discussion et interprétation des résultats**

4.1	Introduction.....	82
4.2	Caractérisation géotechnique .....	82
4.2.1	Analyse granulométrique .....	82
4.2.2	Essai du Proctor normal .....	83
4.2.3	Limites d'Atterberg.....	83
4.3	Caractérisation chimique et minéralogique.....	85
4.4	Caractérisation thermique .....	86

4.5	Effet des cycles de séchage-mouillage sur la salinité du sol.....	88
4.6	Effet des cycles de séchage-mouillage sur la résistance à la compression non confinée.....	93
4.6.1	Résistance à la compression non confinée pendant le séchage.....	93
4.6.2	Effets de couplage des cycles de séchage-mouillage et de la salinité sur la résistance à la compression non confinée .....	96
4.7	Effet des cycles de séchage-mouillage sur la succion .....	101
4.8	Effet des cycles de séchage-mouillage sur l'effondrabilité.....	106
4.9	Effet des cycles d-w sur la résistance au cisaillement .....	110
4.10	Effet des cycles d-w sur la microstructure .....	114
4.11	Conclusion .....	118
	<b>Conclusion générale.....</b>	<b>119</b>
	<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>121</b>

## Résumé

Les sols sebkha sont définis comme des sols à problèmes situés dans les zones arides et semi-arides. Généralement ces sols sont considérés comme étant des sols fins, composés de l'argile, limon et sable, ces composants sont cimentés par différents sels (par exemple, halite, gypse et calcite). Dans la nature les sols salins de sebkha sont exposés aux différents cycles de séchage et mouillage (D-W). Ces cycles ont un effet important sur le comportement mécanique des sols sebkha ce qui pose d'énormes problèmes pour la construction des ouvrages en générale. Pour y remédier à ce problème les géotechniciens doivent être capables de maîtriser le comportement mécanique de ces sols sebkha sous l'effet de ces cycles D-W. Cette étude est consacrée à l'étude expérimentale du sol sebkha en se basant sur la caractérisation chimique, minéralogique, thermique et géotechnique. Cependant et dans un environnement de laboratoire, des échantillons de sol de sebkha d'Ain M'Lila compactés ont été soumis à des cycles D-W et en se basant sur le processus de séchage naturel pour atteindre les teneurs en eau visées de 13%, 11.4% (teneur en eau du Proctor normal), 7% et 4%. Pour cha cune de ces teneurs en eau des essais de laboratoire ont été effectués pour étudier l'effet des cycles D-W sur la résistance à la compression non confinée (UCS), le potentiel d'effondrement  $C_p$ , la succion et la résistance au cisaillement du sol sebkha d'Ain M'Lila. Les résultats obtenus montrent que la UCS augmente avec la diminution de la teneur en eau et diminue avec l'augmentation du nombre de cycles D-W. Aussi, la salinité du sol sebkha a été affectée par ces cycles. En effet, une diminution importante de la salinité du sol a été enregistrée avec l'augmentation du nombre de cycles D-W. Les trois composantes de succion en l'occurrence totale, matricielle et osmotique augmentent avec la diminution de la teneur en eau. Néanmoins, ces succions diminuent lorsque le nombre de cycles D-W croit. Par ailleurs, le potentiel d'effondrement  $C_p$  augmente avec l'augmentation du nombre de cycle D-W sachant qu'une augmentation plus importante a été obtenue pour une teneur en eau de 4%. En plus les résultats obtenus illustrent que les paramètres de résistance au cisaillement (cohésion et l'angle de frottement interne) ont été affectés par les cycles D-W. En effet, pour chaque cycle de séchage et avec la diminution de la teneur en eau, une augmentation des paramètres de cisaillement a été constatée. Tandis qu'une diminution importante de la cohésion et une augmentation de l'angle de frottement interne ont été remarquées lorsque le nombre des cycles D-W augmente. En fin, une corrélation a été constatée entre la salinité du sol et les facteurs étudiés (résistance à la compression non confinée, succion, potentiel d'effondrement

et résistance au cisaillement). Ces derniers ont été affectés par la diminution de la salinité sous l'effet des cycles D-W.

**Mots clés :** Sol sebkha compacté ; Cycles de séchage mouillage ; Salinité ; Résistance à la compression non confinée ; Effondrabilité ; Succion. ; Résistance au cisaillement.

---

## Abstract

Sebkha soils are defined as problem soils located in arid and semi-arid areas. Generally these soils are considered to be fine soils, composed of clay, silt and sand, these components are cemented by different salts (e.g. halite, gypsum and calcite). In nature the saline sebkha soils are exposed to different drying and wetting cycles (D-W). These cycles have a significant effect on the mechanical behavior of sebkha soils which poses enormous problems for the construction of structures in general. To remedy this problem geotechnicians must be able to control the mechanical behavior of these soils sebkha under the effect of these cycles D-W. This study is devoted to the experimental study of sebkha soil based on the chemical, mineralogical, thermal and geotechnical characterization. However, in a laboratory environment, compacted sebkha soil samples from Ain M'Lila were subjected to D-W cycles and based on the natural drying process to reach the target moisture contents of 13%, 11.4% (normal Proctor moisture content), 7% and 4%. For each of these water contents, laboratory tests were carried out to study the effect of D-W cycles on the unconfined compressive strength (UCS), collapse potential  $C_p$ , suction and shear strength of the sebkha soil of Ain M'Lila. The results obtained show that the UCS increases with the decrease of the water content and decreases with the increase of the number of D-W cycles. Also, the salinity of the sebkha soil was affected by these cycles. Indeed, a significant decrease in soil salinity was recorded with the increase in the number of D-W cycles. The three components of suction in this case total, matrix and osmotic increase with the decrease in water content. Nevertheless, these suctions decrease when the number of D-W cycles increases. Moreover, the collapse potential  $C_p$  increases with the increase of the number of D-W cycles knowing that a more important increase was obtained for a water content of 4%. Moreover, the results obtained illustrate that the shear strength parameters (cohesion and internal friction angle) were affected by the D-W cycles. Indeed, for each drying cycle and with the decrease of the water content, an increase of the shear parameters was observed. While a significant decrease in cohesion and an increase in the internal friction angle were noticed when the number of D-W cycles increases. Finally, a correlation was found between soil salinity and the factors studied (unconfined compressive strength, suction, collapse potential and shear strength). These were affected by the decrease in salinity under D-W cycles.

**Keywords:** Compacted sebkha soil; Wetting drying cycles; Salinity; Unconfined compressive strength; Collapsibility; Suction; Shear strength.

## ملخص

تُعرّف تربة السبخة بأنها تربة ذات مشاكل تقع في المناطق القاحلة وشبه القاحلة. بشكل عام ، تعتبر هذه التربة من التربة الناعمة ، وتتكون من الطين والطين والرمل ، هذه المكونات متماسكة بأملاح مختلفة (على سبيل المثال ، الهاليت والجبس والكالسيت). في الطبيعة ، تتعرض تربة السبخة المالحة لدورات مختلفة من التجفيف والترطيب (D-W) . هذه الدورات لها تأثير على السلوك الميكانيكي لتربة السبخة مما يطرح مشاكل جسيمة لبناء الهياكل بشكل عام. لمعالجة هذه المشكلة ، يجب أن يكون الفنيون الجيوتقنيون قادرين على التحكم في السلوك الميكانيكي لتربة السبخة تحت تأثير دورات D-W. هذه الدراسة مخصصة للدراسة التجريبية لتربة السبخة بالاعتماد على الخصائص الكيميائية والمعدنية والحرارية والجيوتقنية. ومع ذلك وفي بيئة معملية ، تعرضت عينات تربة سبخة عين مليلة المدكوكة لدورات D-W والاعتماد على عملية التجفيف الطبيعي لتحقيق المحتوى المائي المستهدف بنسبة 13٪ و 11.4٪ (محتوى الماء العادي من بروكتور) و 7٪ و 4٪. لكل من هذه المحتويات المائية ، تم إجراء اختبارات معملية لدراسة تأثير دورات D-W على مقاومة الانضغاط غير المحصورة (UCS) ، و Cp المحتملة للانهييار ، والشفت وقوة القص لتربة السبخة في عين مليلة. أظهرت النتائج المتحصل عليها أن UCS يزداد مع انخفاض محتوى الماء وينخفض مع زيادة عدد دورات D-W. كما تأثرت ملوحة تربة السبخة بهذه الدورات. في الواقع ، تم تسجيل انخفاض في ملوحة التربة مع زيادة عدد دورات D-W. المكونات الثلاثة للشفت في هذه الحالة الكلية والمصفوفة والتناضحية تزداد مع تناقص محتوى الماء. ومع ذلك ، تنخفض هذه الامتدادات عندما يزداد عدد دورات D-W. علاوة على ذلك ، يزداد احتمال الانهييار Cp مع زيادة عدد دورات D-W مع العلم أنه تم الحصول على زيادة أكبر لمحتوى الماء بنسبة 4٪. بالإضافة إلى ذلك ، توضح النتائج التي تم الحصول عليها أن معاملات مقاومة القص (التماسك وزاوية الاحتكاك الداخلي) قد تأثرت بدورات D-W. في الواقع ، لكل دورة تجفيف ومع انخفاض محتوى الماء ، لوحظ زيادة في معاملات القص. بينما لوحظ انخفاض في التماسك وزيادة في زاوية الاحتكاك الداخلي عند زيادة عدد دورات D-W. أخيرًا ، وجد ارتباط بين ملوحة التربة والعوامل المدروسة (قوة الانضغاط غير المحصورة ، والشفت ، وإمكانية الانهييار ، ومقاومة القص). وقد تأثرت الأخيرة بانخفاض الملوحة تحت تأثير دورات D-W.

**الكلمات المفتاحية :** تربة سبخة مدمجة. دورات تجفيف ترطيب ؛ الملوحة ؛ قوة الضغط غير المحصورة؛ الانهييار. مص. ؛ قوة القص.

## Liste des figures

### Chapitre 1. Analyse bibliographique sur les sols non saturés.

<i>Figure 1.1 : Actions de forces sur une molécule d'eau</i> .....	21
<i>Figure 1.2 : Remontée capillaire dans un tube.</i> .....	21
<i>Figure 1.3: Représentation schématique d'un sol non saturé.</i> .....	23
<i>Figure 1.4: Mécanismes possibles d'adsorption à la surface de l'argile (Mitchell, 1993).</i> .....	24
<i>Figure 1.5: Courbe de rétention proposée par la norme ASTM pour filtre Watman 42.</i> .....	26
<i>Figure 1.6: Placement d'un papier filtre entre deux autres de protection dans un sol.</i> .....	26
<i>Figure 1.7: Variation des succions totale, matricielle et osmotique en fonction de la teneur en eau pour une argile compactée, (Krahn et Fredlund, 1972).</i> .....	28
<i>Figure 1.8: Représentation schématique de l'état de saturation (Boutonnier, 2007).</i> .....	30
<i>Figure 1.9: Limite des domaines D1, D2, D3 et D4 sur le diagramme de Proctor pour des sols fins (Boutonnier, 2007).</i> .....	30
<i>Figure 1.10: Courbes de déformation-contrainte des échantillons à différents teneurs en eau pour chaque cycle de séchage, (a) 1er cycle de séchage ; (b) 2ème cycle de séchage ; (c) 3ème cycle de séchage (Tang et al., 2020).</i> .....	32
<i>Figure 1.11: UCS des échantillons pour chaque cycle du séchage (Tang et al., 2020).</i> .....	32
<i>Figure 1.12: Cohésion (a) et angle de frottement interne (b) des échantillons de lœss compactés en fonction de l'intensité du nombre de cycles de mouillage-séchage (Li et al. 2018).</i> .....	33
<i>Figure 1.13: Développement des fissures en surfaces des éprouvettes du sol en fonction des cycles D-W. (Tang et al., 2020).</i> .....	34
<i>Figure 1.14: Courbe oedométrique simple (Jennings et Knight, 1957).</i> .....	37
<i>Figure 1.15: Double oedomètres (Jennings et Knight, 1975).</i> .....	37
<i>Figure 1.16: Collapsible behavior of the natural and remolded soils and the soils for different W-D cycles (.Zhang et al. 2017).</i> .....	39

### Chapitre 2. Analyse bibliographique des sols salés « sabkhas »

<i>Figure 2.1: Section transversale typique de la sebkha côtière (Akili et Torrance, 1981).</i> .....	43
<i>Figure 2.2: Photo satellitaire d'une sebkha côtière (sebkha d'Oran).</i> .....	43
<i>Figure 2.3: Sebkha continentale de Ain M'lila.</i> .....	44
<i>Figure 2.4: Carte du monde représentée les localisations des sebkhas actives et potentielles (Al-Amoudi, 1995a).</i> .....	45

### Chapitre 3. Matériaux et matériels et essais

<i>Figure 3.1: Localisation de la zone d'étude.</i> .....	59
<i>Figure 3.2: Carte géologique de la région d'AIN M'LILA (a) et sections lithologiques des forages (b).</i> .....	60
<i>Figure 3.3: Préparation des échantillons.</i> .....	61

<i>Figure 3.4:Étapes de préparation de la poudre du sol et l'appareil de XRF.</i> .....	62
<i>Figure 3.5:Appareil de diffraction des rayons X (DRX).</i> .....	63
<i>Figure 3.6:Appareil d'ATG et ATD.</i> .....	64
<i>Figure 3.7:Microscope électronique à balayage (NeoScope).</i> .....	65
<i>Figure 3.8:(a) conductimètre électrique ; (b) PH mètre à électrode.</i> .....	66
<i>Figure 3.9:Analyse granulométrique : (a) Par tamisage; (b) sédimentométrie.</i> .....	67
<i>Figure 3.10:Essais de limites de liquidité et de plasticité.</i> .....	68
<i>Figure 3.11:Essai de Proctor normal.</i> .....	69
<i>Figure 3.12:Presse CBR utilisée pour le compactage statique des éprouvettes du sol.</i> .....	70
<i>Figure 3.13:Échantillon de sol enveloppé dans du papier filtre Whatman grade 1 avec deux pierres poreuses.</i> .....	72
<i>Figure 3.14:Dispositif utilisé pour la saturation des échantillons de sol.</i> .....	73
<i>Figure 3.15:Cycles de séchage-mouillage.</i> .....	73
<i>Figure 3.16:Presse utilisée pour la compression simple (marque MTS).</i> .....	74
<i>Figure 3.17:Pesage et mesure des dimensions des éprouvettes confectionnées.</i> .....	75
<i>Figure 3.18:Échantillon de sol enveloppé dans du papier filtre Whatman grade 1 avec deux pierres poreuses.</i> .....	76
<i>Figure 3.19:Étapes du carottage d'un échantillon du sol pour le test d'oedomètre.</i> .....	77
<i>Figure 3.20:Appareil de cisaillement direct.</i> .....	78
<i>Figure 3.21:Principe de la mesure de la succion totale et matricielle par la méthode du papier filtre.</i> .....	79

#### **Chapitre 4. Analyse, discussion et interprétation des résultats**

<i>Figure 4.1:Courbe granulométrique du sol sebkha d'Ain M'Lila.</i> .....	82
<i>Figure 4.2:Courbe de Proctor normal.</i> .....	83
<i>Figure 4.3:Position du sol testé dans l'abaque de Casagrande.</i> .....	84
<i>Figure 4.4:Composition chimique obtenue par XRF.</i> .....	86
<i>Figure 4.5:Composition minéralogique obtenue par DRX.</i> .....	86
<i>Figure 4.6:Analyse thermique ATG et ATD sur le sol sebkha de Ain M'Lila.</i> .....	87
<i>Figure 4.7:Description thermique (ATG et ATD) des cristaux : (a) cristal de gypse ; (b) cristal d'halite.</i> .....	88
<i>Figure 4.8:Conductivité électrique (ECe) et pH du sol en fonction du nombre de cycles.</i> .....	89
<i>Figure 4.9:(a) Composition chimique du sol sebkha sans et après le 4ème cycle ; (b) Composition minéralogique du sol pendant les 4 cycles entre <math>2\theta = 12</math> et <math>60^\circ</math> (b) ; (c) Composition minéralogique du sol pendant les 4 cycles entre <math>2\theta = 25</math> et <math>35^\circ</math> (c).</i> .....	91
<i>Figure 4.10:État de surface des échantillons de sol en fonction des cycles, (b) État de surface du sebkha avant et après précipitation.</i> .....	92
<i>Figure 4.11:Courbes de contrainte-déformation à différents teneurs en eau à chaque cycle de séchage, (a) 1er cycle de séchage ; (b),(c) et (d) aux 2ème, 3ème et 4ème cycles de séchage respectivement.</i> .....	94
<i>Figure 4.12:Variation de volume pour chaque séchage.</i> .....	96
<i>Figure 4.13:Effet des cycles de séchage-mouillage sur les courbes de contrainte-déformation (a) : <math>w = 7\%</math> ; (b) : <math>w = 11,4\%</math> ; (c) : <math>w = 13\%</math> et UCS à différents teneurs en eau (d).</i> .....	99

<i>Figure 4.14:L'effet de couplage des cycles D-W et de la salinité sur la UCS : (a) L'effet du nombre de cycles D-W sur les UCS ; (b) l'effet de la salinité sur les UCS. ....</i>	<i>101</i>
<i>Figure 4.15:Variation de la succion en fonction de la teneur en eau pour chaque cycle de séchage : (a) succion totale et matricielle ; (b) succion osmotique. ....</i>	<i>104</i>
<i>Figure 4.16:Conductivité électrique en fonction du nombre de cycles. ....</i>	<i>105</i>
<i>Figure 4.17:L'effet de la salinité sur la succion et l'indice de vide : (a) sur la succion totale ; (b) sur la succion matricielle ; (c) sur la succion osmotique ; (d) sur l'indice de vide. ....</i>	<i>106</i>
<i>Figure 4.18:Variation de Cp en fonction de la contrainte appliquée pour différents cycles D-W : (a) pour w = 11,4% ; (b) pour w = 4%. ....</i>	<i>109</i>
<i>Figure 4.19:Variation de Cp en fonction du nombre de cycles et de ECe pour une contrainte de 200 kPa : (a) en fonction du nombre de cycles ; (b) en fonction de ECe. ....</i>	<i>110</i>
<i>Figure 4.20:Variation de la cohésion et de l'angle de frottement interne en fonction du nombre de cycles : (a) pour la cohésion ; (b) pour l'angle de frottement interne. ....</i>	<i>113</i>
<i>Figure 4.21:Variation de la cohésion et de l'angle de frottement interne avec la salinité : (a) pour la cohésion ; (b) pour l'angle de frottement. ....</i>	<i>113</i>
<i>Figure 4.22:État de surface d'un échantillon de sol après séchage. ....</i>	<i>114</i>
<i>Figure 4.23:Microstructure pour chaque cycle de séchage : (a) 1er cycle ; 2ème cycle ; 3ème cycle. ....</i>	<i>117</i>

---

## Liste des tableaux

### Chapitre 1. Analyse bibliographique sur les sols non saturés.

<i>Tableau 1.1:Résumé des méthodes de mesure de la succion.....</i>	<i>25</i>
<i>Tableau 1.2:Classement des sols affaissables d'après Jennings et Knight (1975).....</i>	<i>38</i>

### Chapitre 2. Analyse bibliographique des sols salés « sabkhas »

<i>Tableau 2.1:SAR et degrés d'alcalinisation des sols (Servant 1975). .....</i>	<i>51</i>
--	-----------

### Chapitre 3. Matériaux et matériels et essais

<i>Tableau 3.1:Données météorologiques de la région (année 2018) .....</i>	<i>58</i>
<i>Tableau 3.2:Spécifications du papier filtre Whatman grade 1.....</i>	<i>72</i>

### Chapitre 4. Analyse, discussion et interprétation des résultats

<i>Tableau 4.1:Caractérisation géotechnique du sol sebkha (<math>\gamma_s = 2.7 \text{ g/cm}^3</math>) . .....</i>	<i>84</i>
<i>Tableau 4.2:Résultats des analyses chimiques obtenues sur l'extrait de pâte de sol saturé. ....</i>	<i>85</i>

## Liste des abréviations

<b>A</b> : Section transversale moyenne de l'éprouvette
<b>A<sub>0</sub></b> : Surface de section transversale moyenne initiale
<b>c</b> : Cohésion
<b>CEC</b> : Capacité d'échange cationique
<b>D-W</b> : Cycles de séchage et mouillage
<b>e<sub>0</sub></b> : Indice des vides initial
<b>ECe</b> : Conductivité électrique
<b>e<sub>dry</sub></b> : Indice de vide sec
<b>ε<sub>l</sub></b> : Déformation axiale
<b>F</b> : Force de rupture
<b>g</b> : accélération de la pesanteur
<b>h</b> : Remontée capillaire
<b>H<sub>0</sub></b> : Hauteur initial de l'échantillon
<b>H<sub>c</sub></b> : Variation de la hauteur après mouillage
<b>I<sub>p</sub></b> : Indice de plasticité
<b>M</b> : Masse molaire
<b>OPN</b> : Optimum Proctor normal
<b>P<sub>0</sub></b> : Contrainte effective réelle
<b>P<sub>c</sub></b> : Pression de prés consolidation
<b>PSE</b> : Pourcentage de sodium échangeable
<b>P<sub>v</sub></b> : Pression partielle de vapeur
<b>P<sub>vs</sub></b> : Pression de vapeur saturante à la température
<b>r</b> : Rayon
<b>R</b> : Constante des gaz parfaits
<b>RN3</b> : Route nationale
<b>S</b> : Succion

<b>SAR</b> : <i>Sodium adsorption ration</i>
<b>S<sub>r</sub></b> : <i>Degré de saturation</i>
<b>T</b> : <i>Température absolue</i>
<b>U<sub>a</sub></b> : <i>Pressions d'air</i>
<b>UCS</b> : <i>Compression non confinée</i>
<b>U<sub>w</sub></b> : <i>Pressions d'eau</i>
<b>w</b> : <i>Teneur en eau</i>
<b>W<sub>l</sub></b> : <i>Limite de liquidité</i>
<b>w<sub>OPN</sub></b> : <i>Teneur en eau optimale</i>
<b>W<sub>p</sub></b> : <i>Limite de plasticité</i>
<b>γ<sub>dopn</sub></b> : <i>Poids volumique sec de l'optimum Proctor normal</i>
<b>γ<sub>s</sub></b> : <i>Poids volumique des grains solides</i>
<b>Δe<sub>c</sub></b> : <i>Variation de l'indice des vides à l'état inondé</i>
<b>φ</b> : <i>Angle de frottement interne du sol</i>
<b>ψ</b> : <i>Succion matricielle ou totale de l'échantillon de sol</i>
<b>θ</b> : <i>L'angle de raccordement entre le ménisque et le solide</i>
<b>σ<sub>s</sub></b> : <i>La tension de surface eau-air</i>
<b>e1</b> : <i>Indice des vides au début de saturation</i>
<b>e2</b> : <i>Indice des vides à fin de saturation</i>
<b>P1</b> : <i>Poids du sol séché à l'air libre, : Poids du sol séché</i>
<b>P2</b> : <i>Poids du sol sec séché dans un four</i>
<b>w<sub>Rés</sub></b> : <i>Teneur en eau résiduelle</i>
<b>w<sub>f</sub></b> : <i>Teneur en eau du papier filtre</i>
<b>γ<sub>d</sub></b> : <i>Densité sèche</i>
<b>γ<sub>h</sub></b> : <i>Densité humide</i>

## Introduction générale

A travers le monde en général, les sols sebkha sont localisés dans les zones arides ou semi arides. Ces sols sont définis comme étant des dépôts salins de sable mélangés avec limon et/ou l'argile. Les activités environnementales telles que le vent, la température ainsi que les activités biologiques sont des facteurs favorisant la formation des sols sebkha. Lorsque l'évaporation devienne plus importante que la précipitation cela introduit une concentration de différents types de sels dans les eaux souterraines proche de la surface ce qui entraîne le phénomène de précipitation dans la partie supérieure du profil sédimentaire en formant le sol sebkha. Les sebkhas, existent toujours sous la forme d'une alternance de couches cimentées et non cimentées, ainsi que des morceaux de quartz et/ou de sable de carbonate. Dans les couches cimentées, les matériaux de cimentage principaux sont aragonite et calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ), et halite ( $\text{NaCl}$ ) (Al-Amoudi and Abduljawwad, 1995; Mohamedzein and Al-Rawas, 2011; Liu and Zhang, 2014; Nasr, 2015; Al-Homidy et al., 2017). Ces sols sebkha sont considérés comme sols très variables en termes de caractéristiques géotechniques ce qui pose de nombreux problèmes techniques pour la construction de bâtiments, de routes, de barrages et d'autres structures. La percolation de l'eau distillée (eau de pluies) à travers le sol sebkha provoque la destruction des liaisons naturelle des grains ce qui entraîne un effondrement, une augmentation de la perméabilité, une réduction de la résistance et une augmentation du tassement. Abduljawwad and Al-Amoudi (1995); Al-Amoudi et al. (1992) ont montré dans leurs études que les sols sebkha dans leur état naturel ont une faible résistance à la compression non confinée (UCS) environ 20 kPa. Selon Al-Amoudi et al. (1992), le compactage de ces sols augmente cette résistance de 370%. Par ailleurs, Liu and Zhang (2014) montrent que la résistance à la UCS est affectée par la teneur en sel dans le sol cette résistance augmente avec l'augmentation de la teneur en sel dans le sol, cette augmentation devienne très significative lorsque la salinité atteint ou dépasse 45.7%. Aussi Wang et al. (2019) indiquent que l'existence de la salinité dans le sol améliore sa cohésion.

Dans la nature les sols de sebkha sont exposés aux différents cycles de séchage et mouillage (D-W), ces sols présentent des propriétés morphologiques et géotechniques variables avec l'alternance des cycles de séchage-mouillage (D-W). La compréhension du comportement du sol sebkha sous l'effet de cycles de séchage-humidification et l'influence des cycles sur les caractéristiques mécaniques des sols, constitue un élément majeur dans la

conception et le dimensionnement des ouvrages en terre, notamment les remblais en sol compactés.

L'Algérie est un pays d'Afrique du Nord qui possède des zones dispersées et importantes de sebkha. Cependant, l'évolution du réseau routier et autoroutier du pays nécessite parfois de traverser ces zones de sebkha, où ces dernières posent d'énormes problèmes à ces ouvrages. Récemment, un projet relatif à la route nationale RN3, considéré comme axe principal du réseau routier a connu plusieurs types de dégradations à des endroits entre Batna et Ain M'Lila particulièrement dans les zones proches de sebkha, sachant que cet axe joue un rôle essentiel dans l'économie de la région du Nord-est d'Algérie. Ces dégradations affectent la sécurité des usagers d'une part, et détériorent les véhicules de toute catégorie d'autres part. Pour rendre cet axe conforme, un programme de modernisation de cet axe est envisagé. Sachant que, ce projet de modernisation fait l'objet d'un passage obligatoire par le sol sebkha d'Ain M'Lila. Donc pour y remédier et savoir les causes provoquant ces dégradations et d'assurer la stabilité et d'augmenter la durée de vie de cette partie de cet axe, on a jugé utile d'étudier le comportement mécanique de ce sol sebkha, sachant que dans la littérature des investigations ont été menées pour étudier ce type de sol, mais peu d'études ont été consacrés à l'étude des cycles de D-W sur les propriétés chimiques, minéralogiques et mécaniques des sols sebkha. Cependant, l'objectif principal de cette étude est d'étudier les effets des cycles de D-W sur le comportement mécanique et la salinité des sols sebkha d'Ain M'Lila. A cet effet, une série d'essais de compression non confinée, d'effondrabilité, de succion et de cisaillement sur des échantillons de sol sebkha en utilisant un séchage à l'air libre pour atteindre les valeurs de teneurs en eau ciblées (4% , 7%, 11,4% et 13%) a été réalisée au laboratoire. Par ailleurs, la variation de la salinité sous les effets des cycles a été mesurée en utilisant la conductivité électrique. Pour atteindre l'objectif désiré, il est nécessaire de réaliser des essais de caractérisations chimiques, minéralogiques, thermiques et géotechniques de ce sol sebkha. Sur la base des résultats obtenus les effets de couplage des cycles D-W et la salinité sur le comportement mécanique, seront présentés, analysés et discutés dans cette étude.

Le travail de thèse est présenté en quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique des sols non saturés. On a abordé dans ce chapitre la définition des sols non saturés et la succion, les composantes et les méthodes de mesure de la succion, le rôle des différentes composantes de succion et les états de saturation. On présente également les travaux réalisés sur les effets des cycles de séchage-mouillage sur le comportement mécanique des sols non saturés et en termine par l'analyse de l'endommagement des sols non saturés sous l'effet des cycles de séchage-mouillage.

Le deuxième chapitre est consacré aussi à l'étude bibliographique des sols sebkha et les sols salés. Ce chapitre commence par quelques généralités sur les sebkhas (définitions, types de sebkha...etc). Les caractéristiques géotechniques et les problèmes liés à ces sols sebkha ont été bien illustrés. Comme les sols sebkha sont définis comme des sols salés, ces derniers ont fait l'objet aussi d'une étude bibliographique, passant par quelques définitions et les différents types de salinisation, mesure de la salinité et la classification des sols salés, les sels solubles et leurs mouvements dans les sols et les actions de ces sels sur les sols.

Le troisième chapitre est réservé à la présentation du programme expérimental et les méthodes d'essais et ce après avoir donné la localisation et la description de la zone d'étude « Sebkha d'Ain M'Lila ». Les méthodes de recherches développées récemment ainsi que les normes d'essais utilisées pour la caractérisation chimique, minéralogique, thermique et géotechnique ont été bien illustrées. Ajoutant aussi les méthodes de recherches et les normes d'essais utilisées pour étudier l'effet des cycles de séchage-mouillage sur les propriétés des sols sebkha à savoir la salinité, la résistance à la compression non confinée, l'effondrabilité, la succion et la résistance au cisaillement.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des résultats et discussion. Les résultats de caractérisation chimique, minéralogique, thermique et géotechnique ont été discutés, cependant pour certaines caractérisations (chimique et géotechnique) la discussion de chaque caractéristique est terminée par une classification du sol sebkha. Également dans ce chapitre les résultats des essais effectués pour étudier l'effet des cycles de séchage-mouillage sur la salinité et le comportement mécanique, ont été illustrés et discutés, cependant des corrélations ont été discutées entre la salinité du sol et les quatre facteurs étudiés (succion, potentiel d'effondrement, résistance à la compression non confinée et résistance au cisaillement).

## **CHAPITRE .1**

# **ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES SOLS NON SATURÉS**

## 1.1 Introduction

Le dimensionnement des ouvrages en génie civil (remblais routiers, barrage....) est basé sur les paramètres de résistance à l'état saturé, ces ouvrages sont souvent à l'état non saturé et soumis, dans les régions arides et semi-arides, à des sollicitations de séchage-humidification. Les études sur les sols non saturés permettent de mieux comprendre leur comportement et d'éviter l'apparition de différentes pathologies observées sur le corps des remblais routiers. Étudier l'effet des cycles de séchage-humidification sur le comportement du sol non saturé à une grande importance sur la stabilité et la déformabilité des ouvrages en terre.

Dans ce chapitre, après avoir défini les sols non saturés et la succion dans le sol avec ces différentes composantes ainsi que les méthodes couramment utilisées pour la mesure de la succion. Nous avons parlé du rôle des différentes composantes de la succion et les états de saturation d'un sol. En fin on a présenté également les études expérimentales effectuées sur les effets des cycles sur le comportement hydromécanique des sols non saturés en général.

## 1.2 Définition d'un sol non saturé

Un sol saturé est un milieu bi-phasique (solide et liquide), alors que dans un sol non saturé, les pores sont partiellement remplis d'eau et d'air ou éventuellement de gaz, de pétrole,... Autrement dit, un sol non saturé est un milieu au moins tri phasique (phases solide, liquide et gazeuse).

## 1.3 La succion dans les sols

Les sols non saturés sont caractérisées par la présence d'une troisième phase gazeuse en plus des deux phases solide et liquide qui composent les sols saturés. La présence de cette phase gazeuse se traduit par une pression interstitielle négative si l'on considère la pression de l'air comme origine des pressions.

La pression interstitielle négative confère aux sols non saturés des caractéristiques physiques et mécaniques qui les distinguent des sols saturés, et rendent ainsi insuffisantes la théorie de la mécanique des sols classique qui avait comme hypothèse principale la saturation du milieu.

### 1.3.1 Définition de la succion

La pression interstitielle négative, encor appelée succion dans un sens plus large, présente la mesure de l'intensité de l'attraction exercée par le sol sur l'eau interstitielle. Elle peut être définie comme la dépression qu'il faut dans un système isotherme, appliqué à l'eau

libre pour amener son potentiel à la même valeur que celui de l'eau contenue dans un échantillon de sol libérée de toutes contraintes extérieures.

Du point de vue thermodynamique, la succion est définie comme l'énergie libre de l'eau interstitielle. Cette énergie libre peut être quantifiée en termes de tension de la vapeur d'eau. La loi de kelvin (Équation 1.1) donne une expression de succion en fonction de la tension de la vapeur d'eau (humidité relative).

$$S = -\gamma_w \left( \frac{R.T}{M_m \cdot g} \right) \ln \left( \frac{P_v}{P_{vs}} \right) \dots \dots \dots 1.1$$

S : Succion totale (kPa) ; R : Constante des gaz parfaits (8.31432 j.mol<sup>-1</sup>.k<sup>-1</sup>) ; T : Température absolue (k) ; M : Masse molaire de l'eau (18.016 g.mol<sup>-1</sup>) ; g : accélération de la pesanteur (9.81 m.s<sup>-2</sup>) ; P<sub>v</sub> : Pression partielle de vapeur (kPa) ; P<sub>vs</sub> : Pression de vapeur saturante à la température T (kPa).

### 1.3.2 Composantes de la succion

La succion totale du sol peut être vue comme la somme de deux composantes principale : la succion matricielle et la succion osmotique (Fredlund et Rahardjo, 1993). La succion matricielle exprime la capacité de rétention d'eau des composants du sol. Elle est la somme d'une composante capillaire et d'une composante associée aux forces d'adsorption développées par les particules d'un sol. La succion osmotique du sol est liée aux sels présents dans le sol.

#### 1.3.2.1 Succion capillaire

Les phénomènes de capillarité se produisent à l'interface entre deux fluides, car les molécules y sont soumises à un ensemble de forces d'interactions non équilibrées, à la différence d'une molécule située au sein du fluide. Une molécule d'eau au sein d'une masse d'eau est soumise à des actions de même nature (figure 1.1b), alors que celle à l'interface entre deux fluides, eau-air par exemple, est soumise à des actions différentes : actions dues à l'eau et actions dues à l'air (figure 1.1a). Les molécules d'eau à l'interface eau-air sont donc attirées vers la masse d'eau et la surface de l'eau est soumise à une force perpendiculaire à la surface libre. C'est cette attraction qui engendre une tension de surface  $\sigma_s$  à l'interface, représentée sur la figure 1.1 dans le cas d'une interface plane.

La capillarité est souvent illustrée par le schéma de la figure 1.2, décrivant la remontée capillaire **h** de l'eau dans un tube de rayon **r** petit plongé dans un récipient contenant de l'eau.

La relation entre le rayon de courbure du ménisque sphérique eau-air dans le tube et la différence de pression entre l'air et l'eau est donnée par la loi de Laplace, qui se simplifie dans l'hypothèse de pores cylindriques et prend l'expression de la loi de Jurin :

$$U_a - U_w = \frac{2\sigma_s \cos\theta}{r} \dots \dots \dots 1.2$$

Avec  $U_a$  et  $U_w$  respectivement les pressions d'air et d'eau,

$\sigma_s$  La tension de surface eau-air,

$\theta$  L'angle de raccordement entre le ménisque et le solide.

On a pour l'eau :

$$\sigma_s = 72,75 \times 10^{-3} \text{ N/m et } \cos \theta = 1.$$

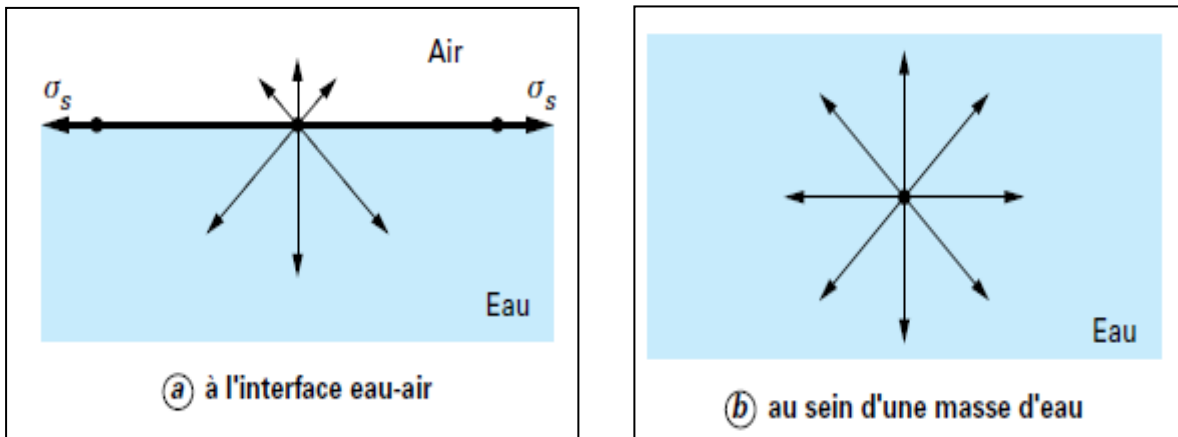


Figure 1.1 : Actions de forces sur une molécule d'eau (DELAGE & CUI, 2000).

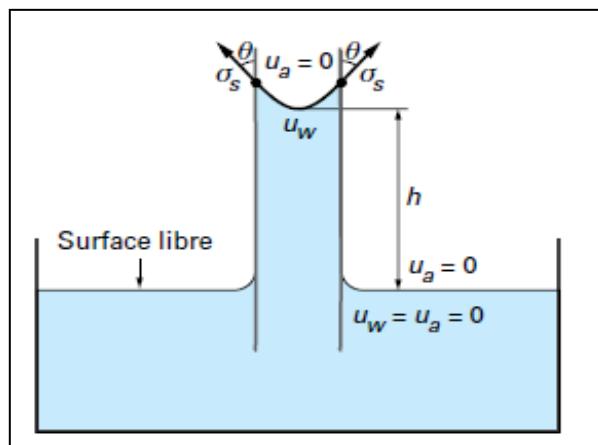


Figure 1.2 : Remontée capillaire dans un tube (DELAGE et CUI, 2000).

Cette relation implique que, au niveau du ménisque, la pression d'eau est inférieure à la pression d'air, et ce d'autant plus que  $r$  est petit. La pression atmosphérique étant prise nulle par convention, il s'ensuit que la pression de l'eau dans le tube est négative, du fait de la tension gravitaire exercée sur l'eau. Si l'on considère la charge hydraulique  $h$  du fluide à l'équilibre hydrostatique, avec une origine placée à la surface plane du liquide, on a :

$$h = \frac{U_w}{\gamma_w} + Z = Cte = 0 \dots\dots\dots 1.3$$

et donc, dans le fluide :

$$U_w = -\gamma_w Z \dots\dots\dots 1.4$$

L'eau dans le tube capillaire est sous une tension proportionnelle à la hauteur d'eau. Dans les conditions usuelles, cette tension ne peut excéder la valeur de la pression de cavitation de l'eau, proche de 80 kPa.

En fait, la loi de Jurin peut se retrouver simplement à l'aide de la figure 1.2, qui illustre les notions de tension de surface  $\sigma_s$  et d'angle de contact eau-solide  $\theta$  :  $\sigma_s$  est une force qui s'exerce sur la circonférence, avec une inclinaison  $\theta$  par rapport à la paroi du tube. On peut simplement écrire l'équilibre du ménisque sphérique de la façon suivante :

- les actions dirigées vers le haut sont estimées en intégrant les tensions sur la circonférence, en projetant sur l'axe vertical, ce qui donne une valeur :

$$(2 \pi r \cos \theta) \sigma_s$$

- les actions dirigées vers le bas correspondent au poids de la colonne d'eau de hauteur  $h$ , qui vaut :

$$\gamma_w \pi r^2 h$$

L'équilibre de ces actions entraîne l'égalité de ces deux termes, qui donne :

$$h = \frac{2\sigma_s \cos\theta}{\gamma_w r} \dots\dots\dots 1.5$$

équivalent à la loi de Jurin, si l'on utilise l'équation (1.4).

Le schéma de la figure 1.3a présente un sol granulaire non saturé. Les ménisques sont localisés dans les plus petits pores du squelette solide, aux contacts entre les grains ; plus le sol se désature, plus les ménisques deviennent petits, avec un faible rayon de courbure qui

engendre une forte valeur de la succion. Ainsi, la succion prend une valeur maximale quand on approche l'état complètement sec.

Le début de la pénétration de l'air dans un sol granulaire initialement saturé qu'on laisse sécher, intervient au niveau des plus gros pores affleurant à la surface du sol, au contact eau-air. L'augmentation de la succion se traduit par la diminution des rayons de ménisques, qui s'insinuent dans des pores de plus en plus petits.

La figure 1.3b représente schématiquement le cas plus général d'un sol fin, avec un agrégat de plaquettes argileuses d'une dizaine de micromètres de diamètre, au contact d'un grain de limon. La succion est définie par le rayon du ménisque à proximité du grain de limon, et l'on observe que l'agrégat est saturé. Ceci est dû à la plus petite taille des pores situés entre les plaquettes, d'une part et à l'attraction physico-chimique exercée par les argiles sur les molécules d'eau, d'autre part.

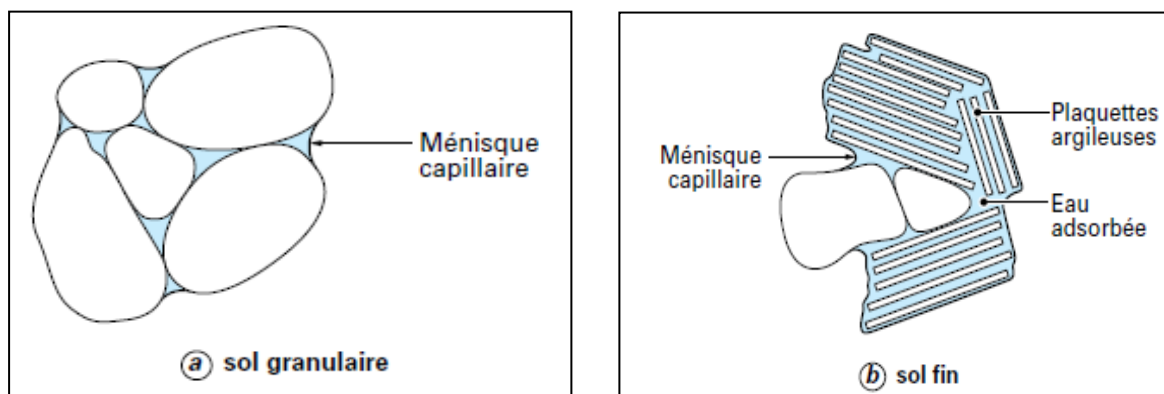


Figure 1.3: Représentation schématique d'un sol non saturé (DELAGÉ et CUI, 2000).

### 1.3.2.2 Succion d'adsorption

L'eau est attirée à la surface des particules solides d'un sol par des forces d'attraction intermoléculaires. Les particules argileuses chargées électriquement produisent en outre un champ de forces électrostatiques dans lequel les molécules polaires de l'eau sont attirées vers les particules. Selon Prost, 1990, au cours de l'imbibition d'un matériau sec, les molécules d'eau se fixent en premier lieu sur les sites hydrophiles représentés par les cations compensateurs, les groupes hydrophiles ou les cations de bords de feuillets. La jonction de ces sites hydrophiles hydratés forme un film d'eau monomoléculaire continu à la surface des particules. Puis sur ce film, apparaît le phénomène d'adsorption multicouche, correspondant à la superposition de n couches monomoléculaires d'eau. Par conséquent, les dimensions des feuillets et celles des particules formées jouent un rôle important dans les propriétés d'adsorption.

Michell, 1993 a proposé plusieurs mécanismes susceptibles d'expliquer le phénomène d'adsorption :

- Les liaisons hydrogène qui se développent entre les molécules d'eau et les atomes d'oxygène ou les hydroxydes situés sur la surface du feuillet argileux (figure 1.4.a), l'eau nécessaire à l'hydratation des cations attirés électriquement par les défauts de charge du feuillet (figure 1.4.b).
- Les dipôles des molécules d'eau attirés électriquement par les feuillets argileux chargés négativement (figure 1.4.c)
- Les molécules d'eau liées à la surface argileuse par des forces de type Vander Waals.

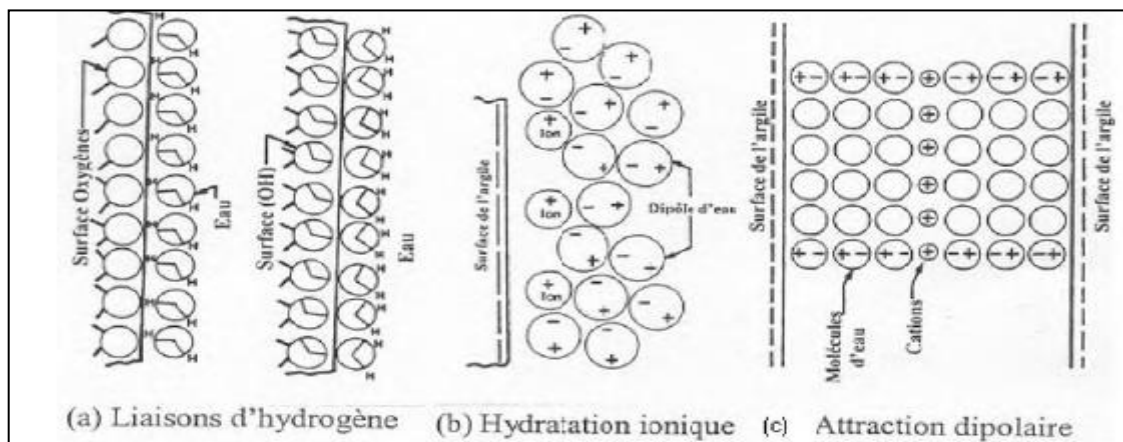


Figure 1.4: Mécanismes possibles d'adsorption à la surface de l'argile (Mitchell, 1993).

### 1.3.2.3 Succion osmotique

La composante osmotique de la succion est due à la présence d'ions en solution. La tendance des ions à s'hydrater et l'existence de différences de concentration entre plusieurs points du sol sont à l'origine de cette composante. Elle peut être définie comme étant la pression à appliquer pour empêcher l'équilibre entre deux solutions de concentration différentes mises en contact par une membrane semi perméable.

## 1.4 Méthodes de mesure de la succion

Plusieurs méthodes ont été développées et discutées dans la littérature pour mesurer la succion. Ces méthodes ont été classées en deux catégories : directes et indirectes. Les mesures directes impliquent un contact physique entre le sol et le dispositif de mesure, tandis que les

méthodes indirectes consistent à obtenir la succion du sol en se basant sur d'autres paramètres mesurables comme la teneur en eau et l'humidité relative (Kasangaki, 2012). De nombreux chercheurs (Pan et al. 2010 ; Elgabru, 2013 ; Dutta, 2014) ont examiné et résumé les différentes techniques de mesure de la succion du sol et leurs limites en termes de mesures de la portée de la succion. Le tableau 1.1 présente un résumé des techniques/méthodes de mesure de la succion connues qui sont généralement discutées dans la littérature. On peut conclure du tableau 1.1 que les techniques de mesures directes sont utilisées pour déterminer la succion matricielle, tandis que les mesures indirectes de la succion s'appliquent à toutes les composantes de la succion, à savoir la succion matricielle, la succion osmotique et la succion totale.

Tableau 1.1:Résumé des méthodes de mesure de la succion (Pan et al.,2010 and Dutta.2014).

	Composante de la succion mesurée	Technique (méthode)	Succion (kPa)	Temps d'équilibre
Mesure directe	Succion matricielle	Technique de translation axiale Tensiomètre Sonde de succion	0-1500	Heures Heures minutes
Mesure indirecte	Succion matricielle	Réflectométrie temporelle	0-1500	Heures
		Conductivité électrique	50-1500	6-50 heures
		Conductivité thermique Papier filtre de contact	0-1500 Tous	Heures 7-14 jours
	Succion osmotique	Technique d'écrasement	0-1500	Jours
	Succion totale	Technique du psychromètre	100-10000	Heure
		Capteur d'humidité relative	100-8000	Heures –jours
		Hygromètre à miroir réfrigéré	150-30000	10 minutes
		Papier filtre sans contact	Tous	7-14 jours

#### 1.4.1 La méthode papier filtre

La mesure de succion peut être exécutée de deux manières, soit par transfert direct de l'eau, soit par l'intermédiaire de l'humidité relative. La mesure au papier filtre (Chandler et Gutierrez 1986) utilise les deux. Les échanges entre le papier et le sol se passeront soit par

adsorption depuis le sol, soit par échange sans contact par phase de vapeur (Likos et Lu 2002). Une fois la succion du papier filtre en équilibre avec celle du sol, sa teneur en eau est mesurée. La valeur ainsi trouvée est comparée à une courbe de rétention calibrée comme présenté en figure 1.5.

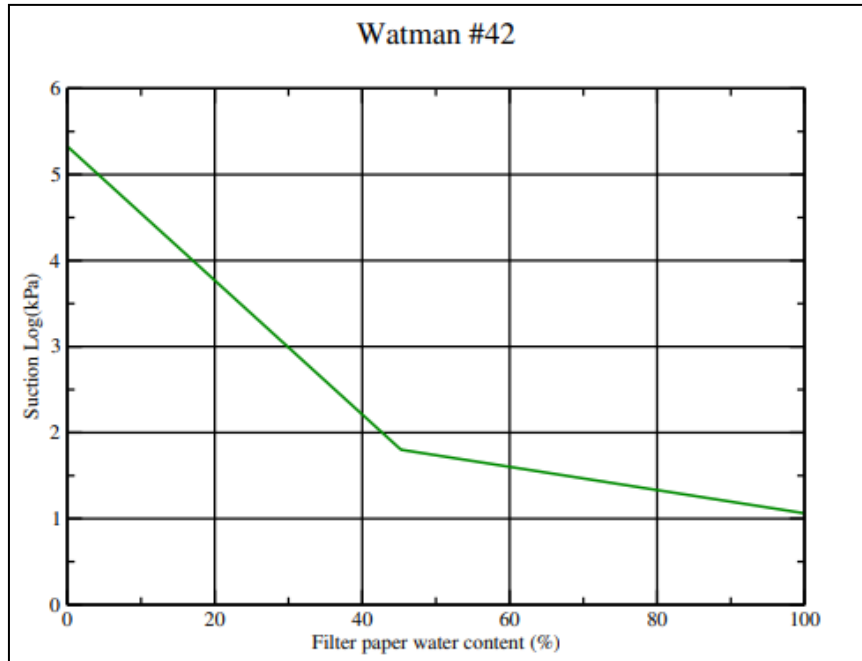


Figure 1.5: Courbe de rétention proposée par la norme ASTM pour filtre Watman 42.

La procédure (ASTM 2010) de mesure consiste à placer un papier filtre, soit dans l'échantillon de sol comme en figure 1.6 (succion matricielle), soit placée en présence du sol, mais sans contact direct (succion globale) dans un récipient fermé. Le temps concédé par les normes à l'équilibrage est de 7 jours. Le filtre est alors pesé humide, puis étuvé, et pesé sec (Arsenie 2009) pour déterminer sa teneur en eau.

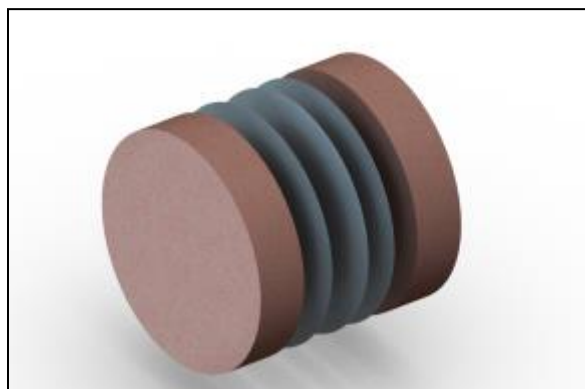


Figure 1. 6: Placement d'un papier filtre entre deux autres de protection dans un sol.

Les variations de température durant l'équilibrage posent de grands problèmes, car les cycles d'absorption/désorption des papiers filtres présentent une hystérésis. De plus, la pesée demandée par les normes (ASTM 2010) est au dixième de milligramme. Cette mesure est gênée par les changements rapides de teneur en eau des filtres à l'air libre pendant la pesée.

La calibration à caractère logarithmique mène à une erreur variable en fonction de la succion mesurée. Agus et Schanz (2007) montrent que pour toutes les mesures de succion, l'erreur tend à augmenter en fonction de l'augmentation de l'hystérésis de température. La méthode papier filtre est donc souvent considérée comme un bon indicateur, mais pas comme une mesure précise de la succion.

## 1.5 Rôle des différentes composantes de la succion

Il reste à se demander lesquelles de ces composantes de la succion ont un effet sur le comportement mécanique, en d'autres termes lesquelles de ces composantes faudra-t-il choisir comme variable indépendante.

Il n'y a aucune ambiguïté sur le rôle de la succion matricielle (capillaire + adsorption) sur le comportement mécanique tant au niveau des variations de volume que la résistance au cisaillement, les avis restent contradictoires en ce qui concerne le rôle de la succion osmotique.

Concernant la résistance au cisaillement, Alonso et al 1987 rapporte un résultat de Blight, 1983 montrant que la succion osmotique n'a pas un effet significatif. Par ailleurs, on estime qu'une interprétation possible des résultats expérimentaux présentés par Richard et al, 1984, est que la succion osmotique ne gouverne pas le comportement volumique.

D'autres auteurs estiment que dans certains cas l'effet de la composante osmotique de la succion peut devenir significatif (Fredlund et Rahardjo, 1993) et doit être pris en compte dans la combinaison des variables de contrainte. Sadhakar et Shivananda, 2005, ont constaté sur une argile gonflante que la valeur de la succion osmotique initiale influe sur le taux de gonflement observé. Des résultats plus clairs obtenus par Krahn et Fredlund, 1972 montrent que les variations de teneur en eau provoquent des variations considérables de la succion matricielle, la composante osmotique n'étant pratiquement pas affectée. La figure I.7 montre que les variations de la succion totale sont pratiquement équivalentes aux variations de la succion matricielle. Cependant des études récentes comme celle de Ying et al., (2022) montrent que la succion osmotique, qui est corrélée à la salinité de l'eau interstitielle du sol, est l'un des principaux facteurs influençant le comportement hydromécanique du sol avec la salinité. Cependant selon plusieurs études (Wan et al., 1995 ; Sreedeeep et Singt, 2006 ; Dao et

al., 2008 ; Ying et al., 2022) considèrent que la succion osmotique est égale à différence entre la succion totale et matricielle et joue un rôle important dans les sols de forte plasticité néanmoins elle est plausible pour les sols de faible plasticité. Donc la détermination de la succion osmotique est indispensable pour mieux comprendre le comportement hydromécanique des sols salins.

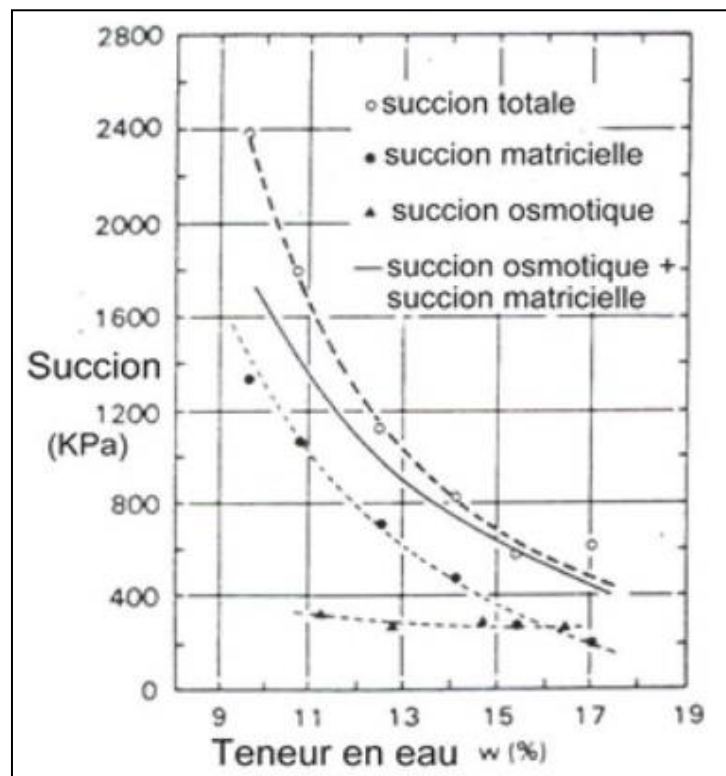


Figure 1.7: Variation des succions totale, matricielle et osmotique en fonction de la teneur en eau pour une argile compactée, (Krahn et Fredlund, 1972).

## 1.6 États de saturation d'un sol

D'après Wroth et Houlsby, 1985, il est possible de distinguer trois états de saturation dans lesquelles les phases se répartissent comme suite :

- La phase liquide est continue, la phase gazeuse discontinue ;
- Les phases liquide et gazeuse sont continues ;
- La phase liquide est discontinue, la phase gazeuse continue ;

Aitchison, 1959 cité dans cuisinier, 2002 définit quatre états de saturation :

- L'état saturé où le sol est saturé en eau et la succion est nulle;

- L'état partiellement saturé où le degré de saturation est voisin de 100% mais la succion n'est pas nulle ;
- L'état non saturé où le degré de saturation est largement inférieur à 100% et la succion est non nulle ;
- Le sol sec où le degré de saturation en eau est nul et la succion est très forte ;

Pour les sols compactés, [Boutonnier, 2007](#) considère quatre domaines de saturation notés de 1 à 4. C'est quatre domaines sont schématisés dans la figure **1.8**, et ils sont définis comme suite :

- Le domaine D1 : le sol est non saturé. Dans ce domaine la phase d'air est continue.
- Le domaine D2 : le sol est non saturé avec une phase d'air occlus et en contact avec le squelette solide.
- Le domaine D3 : le sol est partiellement saturé. Ce domaine diffère du domaine D2 par le fait que l'air occlus n'est pas en contact avec le squelette solide.
- Le domaine D4 : le sol est saturé par le fluide interstitiel.

L'auteur considère que la limite entre le domaine D2 et D3 correspond à une succion égale à zéro, et que le domaine D1 et D2 correspond au domaine à pression interstitielle négative.

En se basant sur quelques résultats de la littérature, [Boutonnier, 2007](#) considère que le domaine D2 couvre l'optimum Proctor et une partie du côté humide de l'OPN, et peut être généralisé sur la ligne optimale de compactage comme illustré dans la figure **1.9**.

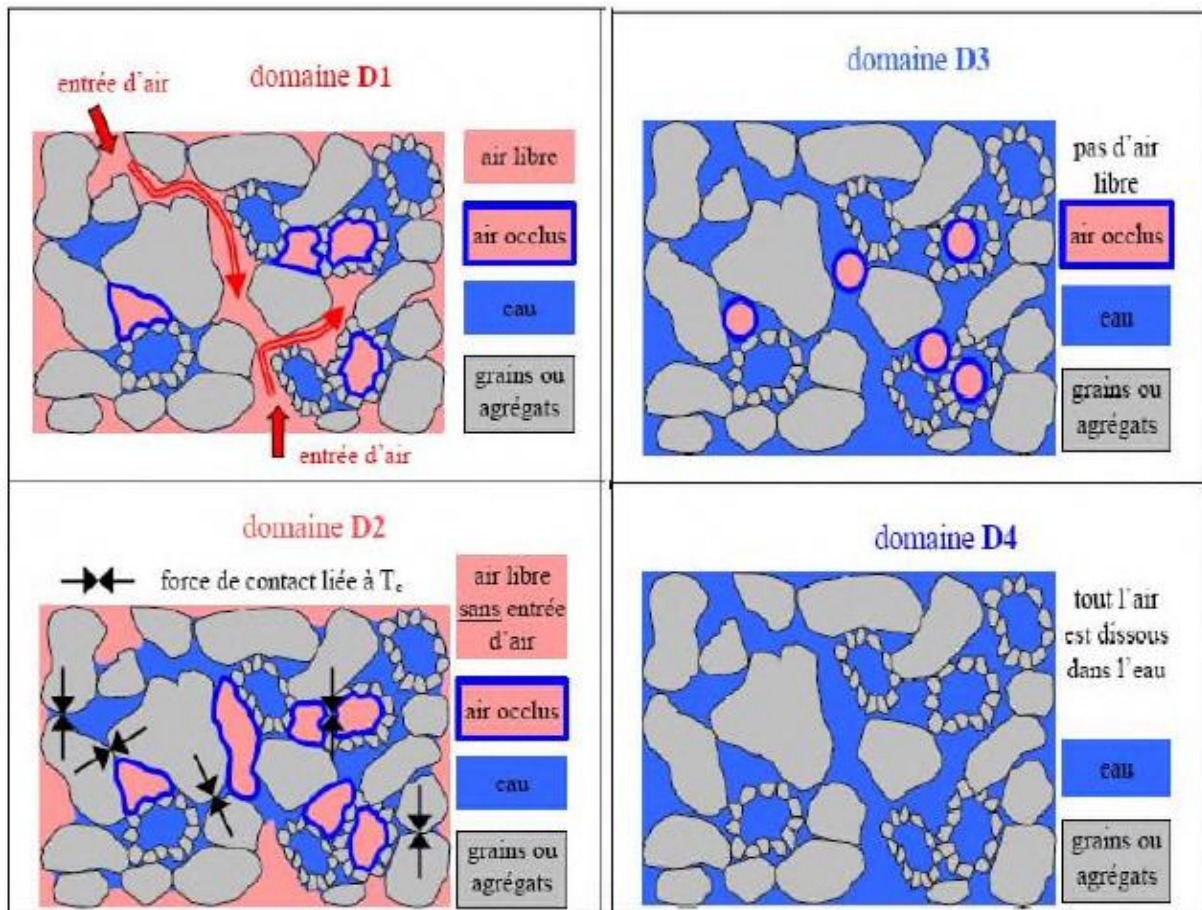


Figure 1.8: Représentation schématique de l'état de saturation (Boutonnier, 2007).

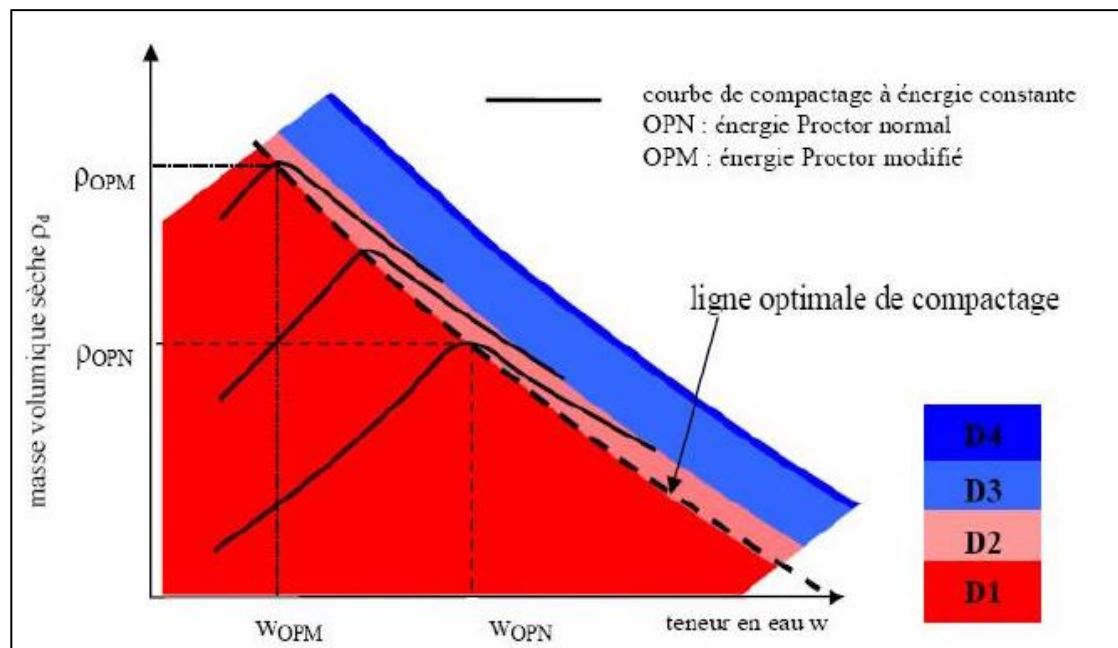


Figure 1.9: Limite des domaines D1, D2, D3 et D4 sur le diagramme de Proctor pour des sols fins (Boutonnier, 2007).

## **1.7 L'effet des cycles de séchage-mouillage (d-w) sur le comportement mécanique des sols non saturés**

### **1.7.1 L'effet des cycles D-W sur la résistance à la compression non confinée (UCS)**

Dans la nature, les sols peu profonds sont exposés aux effets des cycles répétés de D-W (Ying et al. 2020). Pour les différents types de sols, la UCS est influencée par ces cycles D-W en raison des facteurs climatiques. Dans la littérature des investigations ont été menées pour étudier l'effet de ces cycles sur la UCS. On notera à ce titre les travaux effectués par Tang et al. (2020) pour étudier les effets des cycles D-W sur la UCS d'un sol argileux ( $W_p = 29.1\%$  ;  $W_l = 76.2\%$  et  $I_p = 47.1\%$ ) compacté à 95% de l'optimum Proctor normal  $\gamma_{dopn}$ . Des éprouvettes cylindriques (50 mm de diamètre et 100 mm d'hauteur) ont été préparées et soumises aux 3 cycles de D-W avec l'utilisation d'une approche de séchage naturel. Pour chaque cycle de séchage des essais de UCS ont été réalisés à différentes teneurs en eau.

Les résultats obtenus montrent qu'à chaque cycle de séchage, la rigidité initiale de l'échantillon augmente avec l'évaporation de l'eau pendant le séchage. Aussi la résistance maximale augmente avec la diminution de la teneur en eau pour chaque cycle de séchage, cependant, la déformation axiale diminue avec la diminution de la teneur en eau (Figure 1.10).

Les cycles W-D provoquent une réduction de la UCS du sol en raison de l'initiation des fissures de dessiccation. La différence de réduction de résistance pour la première et la deuxième étape de séchage est plus prononcée que cela de deuxième et troisième étapes de séchage, et cette différence augmente avec une teneur en eau décroissante (Figure 1.11). De plus, les cycles W-D produit une diminution de la rigidité initiale et augmente la ductilité. Celles-ci sont attribuables à la présence de fissures qui endommagent considérablement structure du sol.

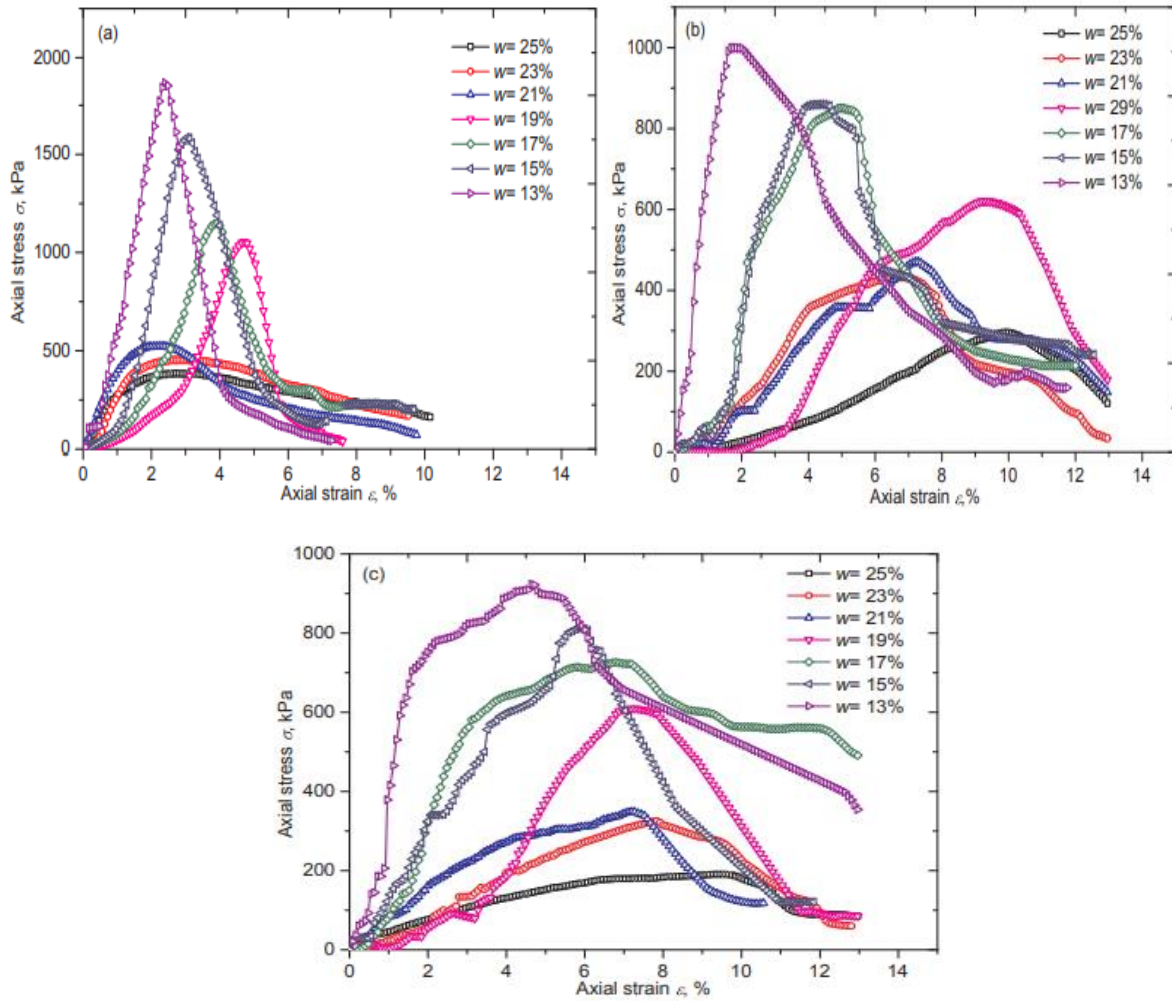


Figure 1.10: Courbes de déformation-contrainte des échantillons à différentes teneurs en eau pour chaque cycle de séchage, (a) 1er cycle de séchage ; (b) 2ème cycle de séchage ; (c) 3ème cycle de séchage (Tang et al., 2020).

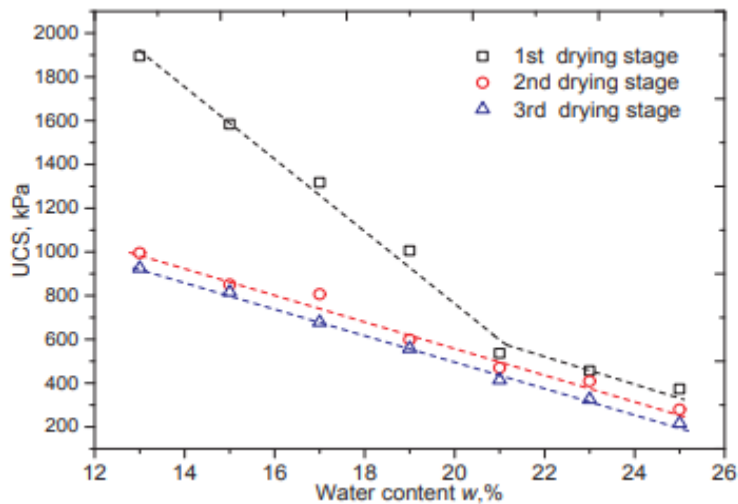


Figure 1.11: UCS des échantillons pour chaque cycle du séchage (Tang et al., 2020).

### 1.7.2 L'effet des cycles de séchage-mouillage sur la résistance au cisaillement

La courbe de résistance au cisaillement est décrite par deux paramètres, l'angle de frottement  $\phi$  et la cohésion  $c$ . Pour les sols non saturés, ces deux paramètres sont influés par les cycles de séchage-mouillage. Plusieurs études ont été effectuées pour étudier l'effet des cycles de séchage- mouillage sur la résistance au cisaillement des sols non saturés. [Li et al. \(2018\)](#) ont réalisés des essais de cisaillement direct sur des échantillons de sol lœss ( $W_L = 26.29\%$ ,  $W_P = 18.24$  et  $I_P = 8.05\%$ ) comportant 14.7% sable, 66.1% limon et 19.2% d'argile. Les éprouvettes ont été compactées statiquement aux caractéristiques du Proctor normal, à un poids volumique de  $1.81 \text{ g/cm}^3$  et une teneur en eau de 13%. Les éprouvettes confectionnées ont été exposées à 1, 3, 5, 7 ou 10 cycles de séchage-mouillage. Lorsqu'un ou plusieurs cycles ont été réalisés, des essais de cisaillement direct ont été effectués.

Les résultats obtenus (Figure 1.12) montrent que la cohésion diminue progressivement avec l'augmentation du nombre de cycles de séchage-mouillage. Par exemple, la cohésion diminue de 49,4%, d'une valeur initiale de 44.3 kPa pour les échantillons de sol intacts à 22.4 kPa après 10 cycles. De plus, la plupart des variations de la cohésion se produisent au cours des cinq premiers cycles. Cependant, l'angle de frottement interne ne montre aucune tendance évidente.

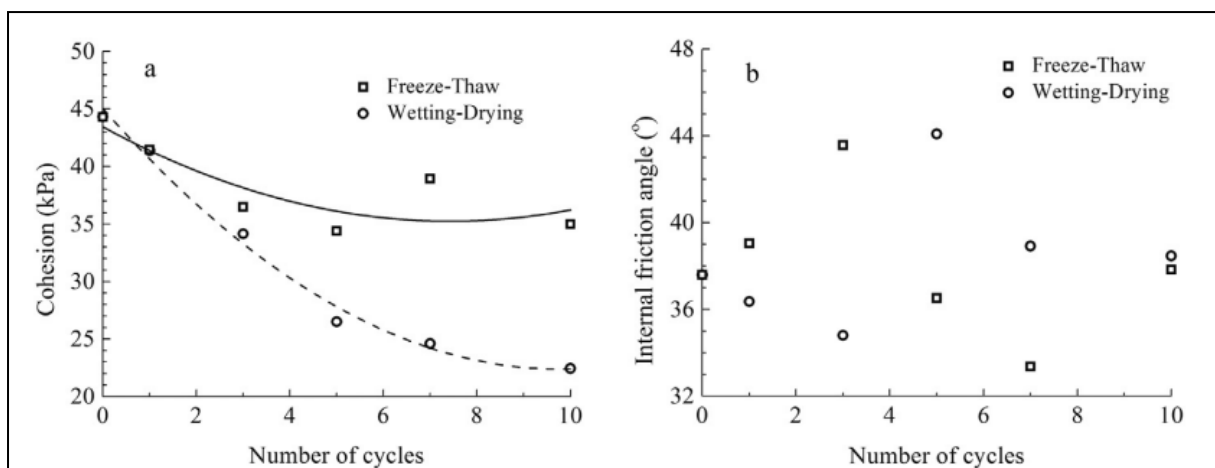


Figure 1.12: Cohésion (a) et angle de frottement interne (b) des échantillons de lœss compactés en fonction de l'intensité du nombre de cycles de mouillage-séchage ([Li et al. 2018](#)).

## 1.8 Endommagement des sols sous l'effet des cycles de séchage-mouillage

Plusieurs études ont montré que les sols non protégés et qui sont exposés aux cycles de D-W sont susceptibles d'être endommagés. Il convient de noter que lorsque le sol argileux subit des cycles D-W, des fissures de dessiccation peuvent se produire. Des chercheurs précédents ont constaté que la fissuration du sol en surface augmente de manière significative dans les trois premiers cycles D-W et tend à atteindre l'équilibre. Les fissures qui en résultent après la seconde cycle D-W, sont généralement plus irréguliers que ceux qui suivent le premier cycle D-W (Yesiller et al., 2000 ; Lu et al., 2002 ; Tang et al., 2011b ; Wang et al., 2017).

L'étude effectuée par Tang et al. (2020) sur un sol argileux ( $W_p = 29.1\%$  ;  $W_l = 76.2\%$  et  $I_p = 47.1\%$ ) compacté à 95% de l'optimum Proctor normal  $\gamma_{dopn}$  pour confectionner des éprouvettes cylindriques de 50 mm de diamètre et 100 mm d'hauteur, montre que dans la première étape de séchage, aucune fissuration par dessiccation ne s'est produite, après le deuxième cycle les fissures sont relativement larges et se répartissent généralement verticalement et horizontalement sur une surface d'échantillon. Après le troisième Cycle D-W, les fissures deviennent plus irrégulières et beaucoup de microfissures obliques apparaissent sur les surfaces des échantillons de sol (Figure 1.13). La présence de fissures endommage considérablement l'intégrité et structure du sol et crée des zones faibles dans le sol. Par conséquent, la résistance globale du sol diminue.

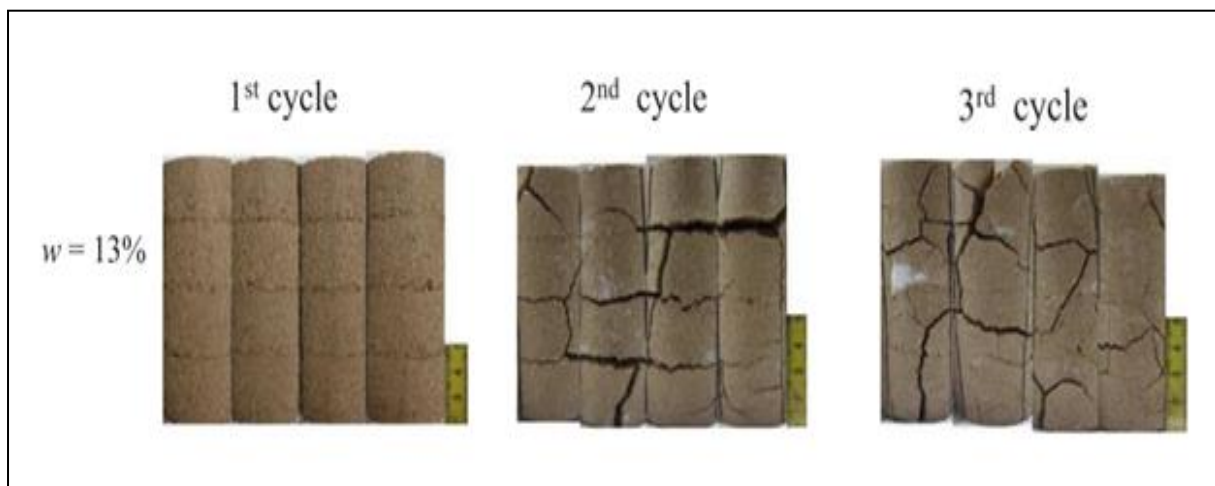


Figure 1.13: Développement des fissures en surfaces des éprouvettes du sol en fonction des cycles D-W. (Tang et al., 2020).

## 1.9 Effondrement des sols non saturés

### 1.9.1 Phénomènes d'effondrement

Les sols effondrables, comme les sols gonflants, attirent depuis longtemps l'attention des chercheurs de par les problèmes de stabilité qu'ils posent aux bâtiments, aux ouvrages géotechniques et aux infrastructures linéaires. D'après [Dudley \(1970\)](#), [Terzaghi et Fröhlich \(1936\)](#) avaient déjà observé la tendance que peuvent avoir certains sols non saturés à s'effondrer lorsqu'ils sont inondés.

Le phénomène d'effondrement est typiquement associé aux sols de faible plasticité et non saturés, bien qu'il puisse être aussi observé dans de sols saturés soumis à de sollicitations mécaniques. Les sols salins de sebkha ont tendance à subir ce phénomène du fait de ses caractéristiques spéciales. Selon [Al-Amoudi et al. 1995](#), les grains du sol sebkha sont liés entre eux par les différents types de sels, considérés comme des composés cimentaires. Cependant le mouillage de ce type de sol provoque la solubilité de ces sels et la perte de liaison entre les grains ce qui rend ce sol susceptible à l'effondrement. Cette observation a été soutenue par les travaux de [Rao and Revanasiddappa 2006](#) et [Rahardjo et al. \(2004\)](#) qui ont étudié l'effondrement des sols résiduels et qui ont montré que la structure poreuse du sol a été causée par le lessivage de quelques types de minéraux du sol au cours duquel l'eau et l'air ont remplacé l'emplacement des minéraux solubles, entraînant ainsi un taux de vide très élevé.

[Mohamed et al, 2017](#) ont défini les sols susceptibles à l'effondrement comme des sols où la réduction volumique est brusque après l'inondation et qui sont généralement répartis dans les zones arides et semi arides. Aussi ont défini le potentiel d'effondrement comme le pourcentage de variation volumétrique à certaines contraintes verticales avant et après l'immersion d'eau. Plusieurs études ont été effectuées pour examiner et cerner les facteurs influençant l'effondrement des sols. [Barden and Collins,1973](#) ont considéré que les remblais artificiels compactés à une teneur en eau inférieure à la teneur en eau optimale de proctor, ont été identifiés comme susceptibles d'affaissement. Aussi ([Cui et al. 1999](#), [Loiseau et al. 2001](#)) ont montré que le phénomène d'effondrement des sols, se produit si la densité sèche et la teneur en eau initiale sont faibles. Cependant d'autres facteurs peuvent influencer l'effondrement tel que la minéralogie, la contrainte appliquée, le degré de saturation, la nature des agents cimentaires ([Abbeche et al. 2010](#); [Ali 2011](#)).

Les sols non saturés ayant une structure naturelle lâche ont tendance à s’effondrer lorsqu’ils sont soumis à une augmentation du degré de saturation. Ce processus entraîne la diminution de la valeur de la succion initiale et une compression volumique irréversible. Le risque et l’intensité de l’effondrement sont associés à l’amplitude des contraintes appliquées et à la valeur de la succion initiale. Ces conditions changent d’un sol à l’autre.

## 1.9.2 Méthodes expérimentales de caractérisation

### 1.9.2.1 Essais oedométrique simple

[Knight \(1963\)](#) a proposé une méthode pour analyser le risque d’effondrement basée sur l’humidification sous une contrainte verticale de 200 kPa d’un échantillon de sol préalablement chargé à sa teneur en eau naturelle. Le critère est basé sur le pourcentage de déformation verticale obtenu. Le potentiel d’affaissement est défini comme suit :

$$C_p = \left[ \frac{\Delta e_c}{(1+e_0)} \right] \times 100 \dots \dots \dots 1.6$$

Où :  $\Delta e_c = e_1 - e_2$

$e_0$  : indice des vides initial ;

Le potentiel d’affaissement peut être aussi défini comme :

$$C_p = \frac{H_c}{H_0} \dots \dots \dots 1.7$$

Où :

$H_c$  : variation de la hauteur après mouillage ;

$H_0$  : hauteur initial de l’échantillon ;

Le potentiel d’affaissement ainsi défini donne une appréciation sur le degré d’affaissement du sol. Les valeurs suggérées par [Jennings et Knight \(1975\)](#) sont donné au tableau (1.2).

En se basant sur l’étude [Lutenegger et al \(1988\)](#) ont proposé le même essai oedométrique effectué par [Jennings et Knight \(1975\)](#), mais avec une saturation de l’échantillon à un niveau de contrainte de 200 KPa (figure 1.14).

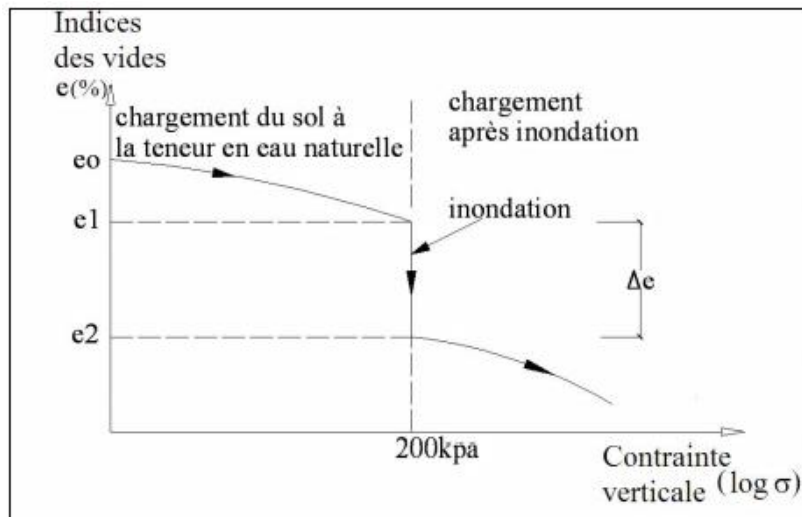


Figure 1.14: Courbe oedométrique simple (Jennings et Knight, 1957).

### 1.9.2.2 Essai oedométrique double

Jennings et Knight (1975) ont proposé le "test du double oedomètre" pour étudier le risque d'effondrement des sols non saturés. Celui-ci est basé sur deux types d'essais oedométriques. Le premier test est réalisé à la teneur en eau initiale en condition non saturée. Pour le deuxième, on humidifie l'échantillon sous une charge fixe et on suit le chargement en condition saturée (figure 1.15). Dans certains cas, l'humidification du sol produit des changements importants du volume total. Ce processus implique une perte de la résistance du sol, car pour la plupart des sols non saturés, la résistance augmente lorsque le niveau de saturation diminue et la valeur de succion augmente.

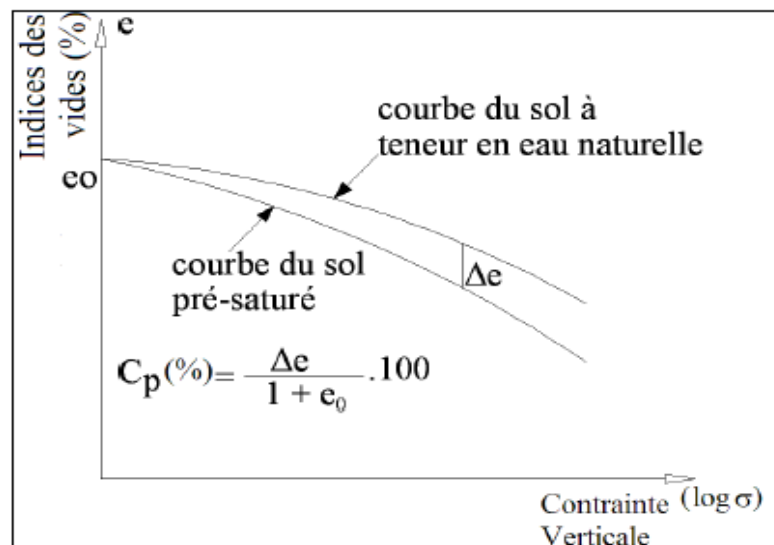


Figure 1.15: Double oedomètres (Jennings et Knight, 1975).

Le potentiel d'affaissement se définit de la même manière que pour l'essai oedométrique simple (équation 7).

Tableau 1.2: Classement des sols affaissables d'après Jennings et Knight (1975).

$C_p$	Gravité du problème
0 à 1%	Sols non affaissables (pas de problème)
1 à 5%	Trouble moyennes
5 à 10%	Troubles
10 à 20%	Troubles sévères
> à 20%	Troubles très sévères

Deux échantillons de sol sont placés dans deux oedomètres sous une charge de 1KPa pendant 24 heures, à la fin de ce chargement un des échantillons est saturé à l'eau l'autre est gardé à sa teneur en eau naturelle.

En suite les deux essais sont conduits à leurs chargements maximaux tout en doublant la charge toutes les 24 heures. A la fin du chargement, avant saturation d'un des échantillons, les indice des vides des deux échantillons pourraient être différents et que les deux courbes ne partent pas du même point.

Après avoir tracé les deux courbes oedométriques sur un même diagramme, on calcule la contrainte effective réelle  $P_0$  due au poids des terres à la profondeur de prélèvement de l'échantillon et on positionne cette valeur sur la courbe  $e = f(\log \sigma)$  pour les deux courbes. On détermine en suite la pression de prés consolidation  $P_c$  à partir de la courbes oedométriques de l'échantillon saturé.

La courbe à partir de laquelle sera calculé l'affaissement est construite par translation parallèle à la courbe relative à l'échantillon à teneur en eau naturelle au point  $(e_0, P_0)$  (figure 1.15).

Si l'augmentation du chargement est de  $\Delta P$ , le sol à la teneur en eau naturelle aura un tassement de :

$$\left[ \frac{\Delta e_s}{1 - e_0} \right] \dots \dots \dots 1.8$$

Si le chargement reste constant et le sol subit une saturation, le tassement additionnel sera de :

$$\left[ \frac{\Delta e_c}{1 - e_0} \right] \dots \dots \dots 1.9$$

Jennings et Knight (1975) rapportent suite à leurs études que les tassements observés et ceux prédit par cette méthode sont suffisamment comparables et que depuis plusieurs mécanismes d'affaissement ont été avancés ainsi que plusieurs techniques de prédiction, et qu'il est souhaitable à chaque fois qu'il est possible d'effectuer des essais in situ à fin de vérifier les analyses au laboratoire et l'efficacité de la technique d'inondation utilisée. Seulement le majeur inconvénient des essais sur site réside dans les dépenses coûteuses et le temps considérable nécessaire à leur accomplissement.

### 1.9.2.3 L'effet des cycles de séchage-mouillage sur l'effondrement des sols non saturés

Différents travaux ont été effectués à l'oedomètre afin d'étudier l'effet des cycles de séchage-mouillage sur l'effondrement de différents types de sol.

Zhang et al. 2017 ont effectué des essais odométriques avec charge et humidité sur les échantillons du sol résiduel basaltique, soumis aux cycles de séchage-mouillage. Pour chaque cycle, le chargement à été réalisé avec des valeurs de pression de consolidation progressives de 5, 12,5, 25, 50, 100, 200, 400, 800 et 1600 kPa. Pour une pression de 200 kPa une fois l'équilibre atteint, les échantillons ont été trempés et des déformations supplémentaires (effondrement) ont été mesurées jusqu'à stabilisation complète. Les résultats obtenus (Figure 1.16) montrent qu'avec un nombre de cycles hydriques croissant, le potentiel d'effondrement a augmenté de 1.75% dans le sol naturel à 7.35% après deux cycles W-D et le degré d'effondrement s'est transformé de l'effondrement léger à l'effondrement sévère. Ce comportement peut être expliqué par la détérioration des liaisons entre les particules et la diminution de la résistance du sol causées par l'effet des cycles W-D.

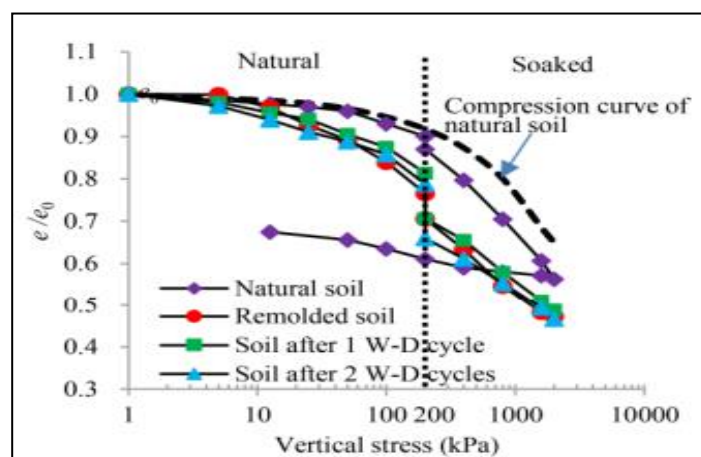


Figure 1.16: Collapsible behavior of the natural and remolded soils and the soils for different W-D cycles (.Zhang et al. 2017).

Rao and Revanasiddappa 2006 ont étudié l'influence de l'alternance de mouillage et séchage sur le comportement d'effondrement des échantillons de sol résiduel compacté ( $W_L = 37\%$ ,  $W_P = 19\%$  et  $I_p = 18\%$ ). Pour favoriser l'effondrement, les échantillons du sol résiduel ont été compactés à une densité sèche de  $1,49 \text{ g/cm}^3$  (compactage relatif = 84 %). Le potentiel d'effondrement a été calculé à des pressions verticales de 6.25, 50, 100 et 200 kPa. Pour les faire chaque échantillon était progressivement chargé à la pression souhaitée et inondé d'eau du robinet et les lectures d'effondrement dans le temps ont été notées en continu pendant le processus. Les résultats obtenus ont montré que le potentiel d'effondrement diminuait avec un nombre croissant de cycles hydriques et que la contrainte optimale, qui donne un potentiel d'effondrement plus élevé est de 200 kPa. La réduction du potentiel d'effondrement des échantillons de sol résiduel compacté lors de mouillage et le séchage cycliques sont attribués à la réduction du taux de vide et peut-être à la croissance des liaisons de cimentation.

### 1.10 Conclusion

L'utilisation des sols comme remblai ou support de chaussée nécessite l'étude de leur comportement en prenant en compte leur caractère partiellement saturé. Comme ces sols en faible profondeur sont exposés aux cycles de séchage-humidification, ces derniers ont un effet important sur le comportement de ce type de sol. La conception et le dimensionnement des ouvrages en sols compactés nécessitent l'étude de l'influence de la succion sur les paramètres de résistance et de déformation de ces sols.

Plusieurs études ont été consacrées à la description du comportement des sols non saturés. Ces études ont mis en évidence que la présence de la succion rigidifie le sol et augmente sa résistance. Des études sur l'effet des cycles de séchage-mouillage sur le comportement mécanique de ce type de sol, ont montré une diminution de la résistance du sol, une augmentation de la déformabilité et l'effondrabilité du sol ainsi que l'endommagement de ces sols traduit par des fissures de surface et ce avec un nombre croissant de nombre de cycle. Cependant une stabilisation est atteinte au troisième ou quatrième cycle. Il convient de noter que dans les sols non saturés on trouve les sols salés de sebkha et peu d'études ont été trouvées dans la littérature sur l'effet des cycles de séchage-mouillage sur le comportement de ces sols salés.

## **CHAPITRE .2**

# **ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE DES SOLS SALES « SABKHAS »**

## 2.1 Introduction

L'Algérie est un pays afro-méditerranéen, compte un nombre important de lacs salés (chotts et sebkhas) essentiellement réparti entre les deux chaînes montagneuses l'Atlas tellien, l'Atlas saharien et Erg oriental. Les sols compressibles de mauvaise qualité (sols salés) ont toujours existé dans ces zones.

L'évolution du réseau routier et autoroutier en Algérie impose parfois le passage par ces zones de sebkhas. La construction des structures (corps de remblai par exemple) de ce réseau sur ces sols salés pose de nombreux problèmes, qui sont associés d'une part à une faible résistance de ces sols, qui entraîne des difficultés à assurer la stabilité des remblais, et d'autre part à leur forte compressibilité, qui se traduit par des tassements et déformations importants des ouvrages. Les études sur les sols salés permettent de mieux comprendre son comportement et d'éviter l'apparition de différentes pathologies observées sur le corps des remblais routiers, donc il est très important de passer par une recherche bibliographique sur les sols salés afin de récolter le maximum d'informations. Dans ce chapitre on parle des généralités sur les sebkhas et les caractéristiques géotechniques des sols sebkha et les problèmes liés à ces sols. On discute également des sols salés, passant par quelques définitions ainsi que la classification des sols salés. En fin le chapitre sera clôturé par une conclusion.

## 2.2 Généralités sur sebkha

### 2.2.1 Définition de sebkha

Une **sebkha** ou **sabkha** désigne un bassin occupant le fond d'une dépression à forte salinité et plus ou moins séparé d'un milieu marin, dans des régions arides (milieu supratidal). Néanmoins, il peut être toujours en contact avec le milieu marin par un très faible filet d'eau (bassin d'eau profonde), ou au contraire par des infiltrations (bassins d'eau peu profonde). Dans ce dernier cas, il peut se produire des débordements périodiques d'eau vers le bassin.

Dans les deux cas il va y avoir une augmentation de la salinité, une évaporation importante, l'apparition d'une saumure et la précipitation d'évaporites au fond du bassin si la profondeur est faible, ou à une extrémité si la profondeur est importante (Aiban, 1994; Nasr, 2015).

### 2.2.2 Types de sebkha

Selon [Al-Amoudi, 2008](#), on distingue deux types de sebkha, celles situées le long des côtes (c'est-à-dire appelées sebkhas côtières) ou plus à l'intérieur des terres (c'est-à-dire appelées sebkhas continentales ou intérieures).

#### a) Sebkha côtière

Ces sols de sebkha sont le résultat de dépôt des sédiments marins, au moins dans leurs parties vers la mer. La plupart des sols de sebkha côtiers sont des surfaces supra-tidaux, qui ont été développées à la suite d'un ordre de sédimentation qui semble avoir commencé il y a des milliers d'années par l'eau de mer transgressant au-dessus des dunes de sable. La figure 2.1 montre le processus possible de sebkha dans les zones côtières d'après [Akili et Torrance, \(1981\)](#) et la figure 2.2 représente l'exemple d'une sebkha côtière en Algérie (Sebkha d'Oran).

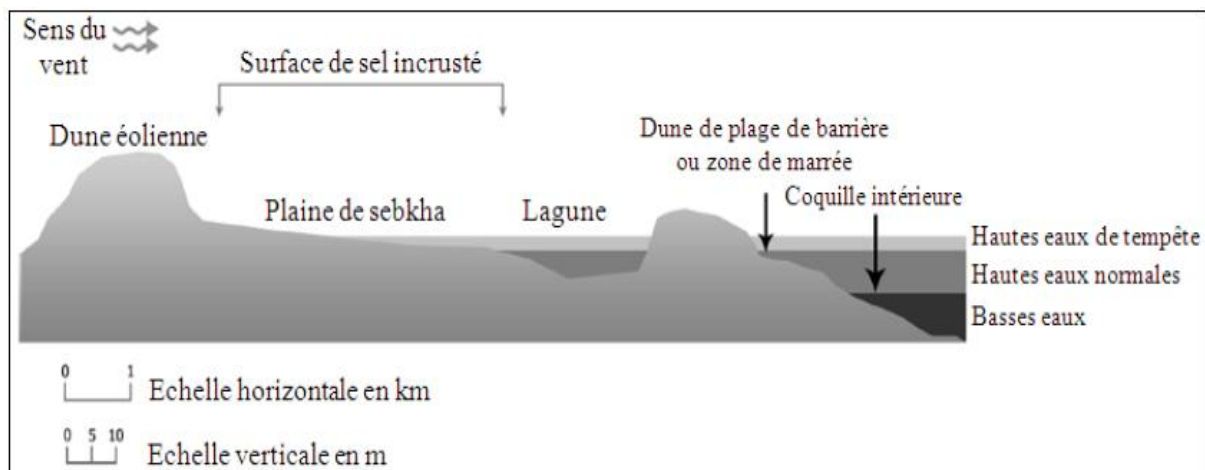


Figure 2.1: Section transversale typique de la sebkha côtière ([Akili et Torrance, 1981](#)).

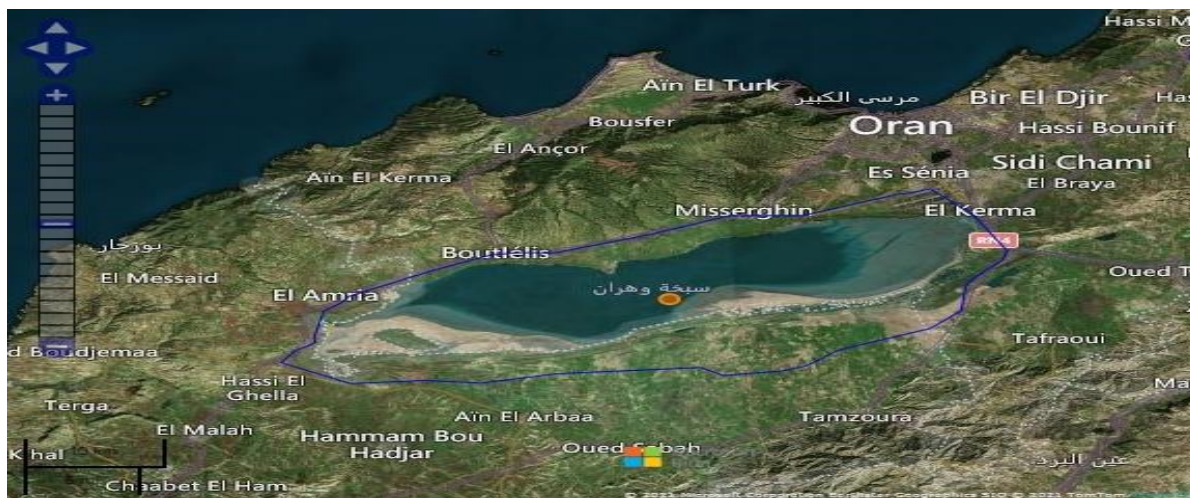


Figure 2.2: Photo satellitaire d'une sebkha côtière (sebkha d'Oran).

### b) Sebkha continentale ou intérieure

Ils se développent habituellement comme des surfaces, dont le vent a enlevé les particules sèches de sédiments, parallèles à la nappe phréatique, aux niveaux qui sont contrôlés par l'humidité des sédiments (Johnson et al., 1978). La figure 2.3 montre une sebkha continentale d'Ain M' Lila.

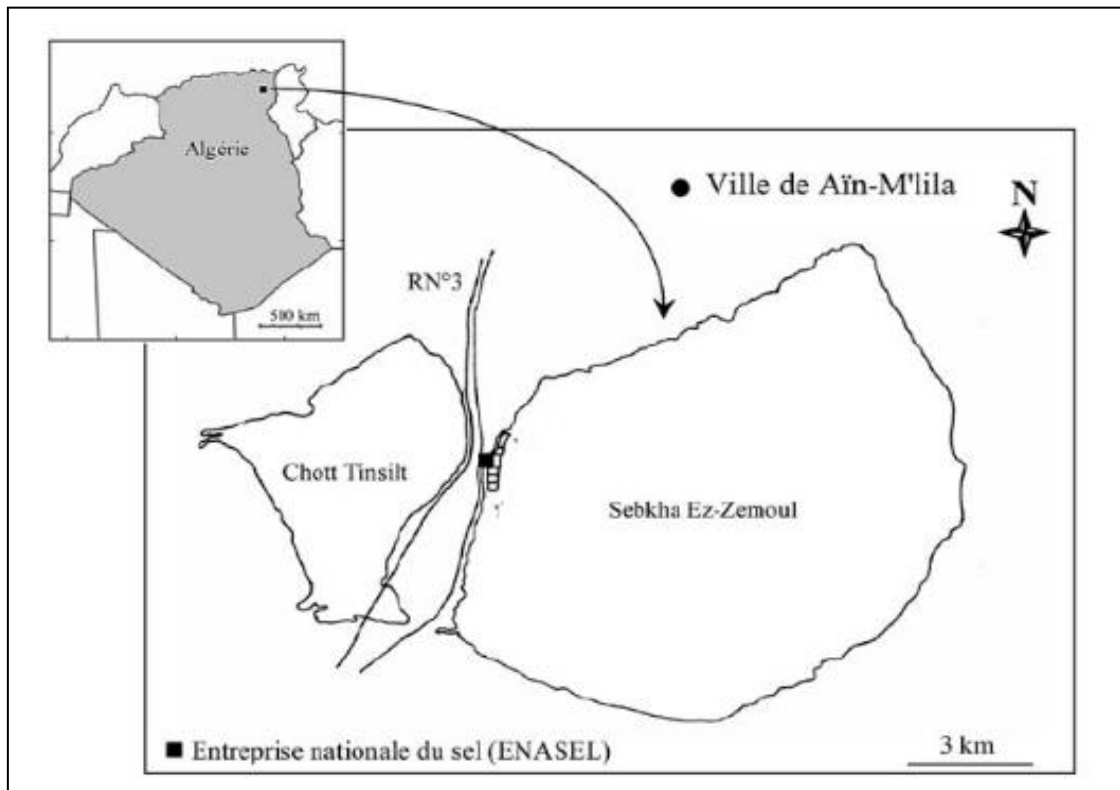


Figure 2.3: Sebkha continentale de Ain M'lila.

#### 2.2.3 Distribution des Sebkhas :

De larges surfaces de terre dans les zones arides et semi arides sont caractérisées par la concentration très élevées des sels. L'analyse de la distribution mondiale des sebkhas (Al-Amoudi1995), montre que ces dernières, couvertes de vastes zones sur l'Afrique du Nord et les pays du Moyen-Orient. La distribution des Sebkha actives et potentielles dans le monde est représentée dans la figure 2.4.

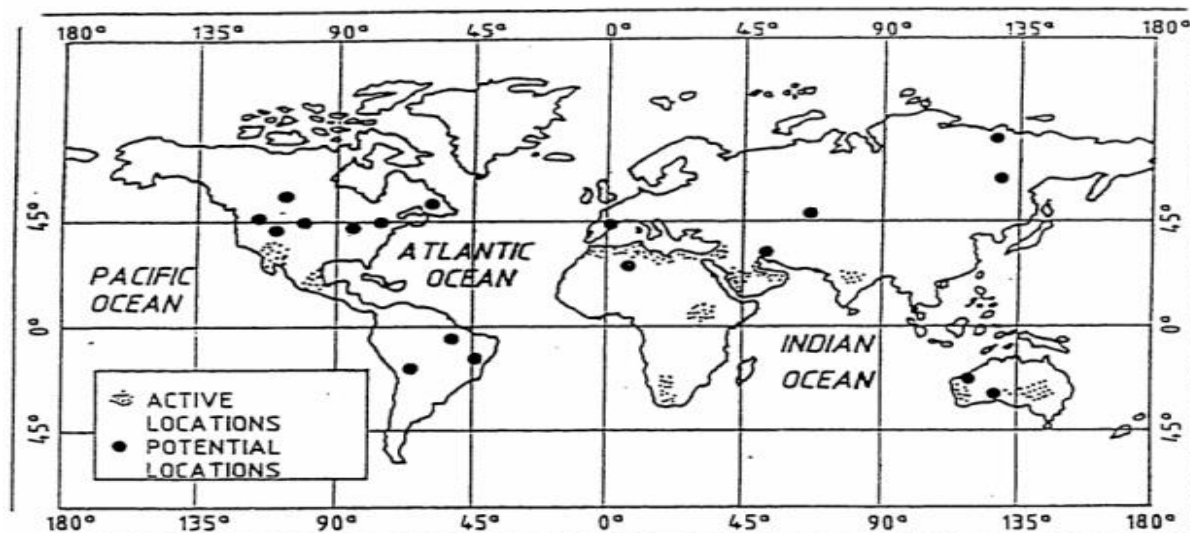


Figure 2.4: Carte du monde représenté les localisation des sebkhas actives et potentielles (Al-Amoudi, 1995a).

#### 2.2.4 Les sols de sebkha

Les sols de sebkha sont caractérisés par la présence des sels diagénétiques de composition et de texture différente à différentes profondeurs. La précipitation des sels au-dessous de la nappe phréatique est attribuée à l'augmentation de la concentration en sel au-dessus de sa limite de saturation (Al-Amoudi, 1992 ; Al-moudi, 1995). Le dépôt du sel dans les couches superficielles (c'est-à-dire au-dessus du niveau d'eau souterraine) est attribué à l'évaporation de l'humidité qui a été aspirée aux couches supérieures par l'action capillaire. Les sebkhas existent toujours sous la forme d'une alternance de couches cimentées et non cimentées, ainsi que des morceaux de quartz et/ou de sable de carbonate. Dans les couches cimentées, les matériaux de cimentage principaux sont aragonite et calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ), et halite ( $\text{NaCl}$ ). Les couches supérieures de sebkha peuvent présenter des caractéristiques fermes et raides dans son état sec. Cependant, lorsque humidifiée avec l'eau, la résistance est fortement réduite, car les sels de cimentage sont susceptibles de la lixiviation et de la dissolution ou de ramollissement conduisant ainsi à la perte de résistance en conditions humides. De plus, les sebkhas sont caractérisées par le changement volumétrique dû à l'hydratation et à la déshydratation alternative du gypse instable dans des conditions chaudes et humides (Al-Amoudi, 1992 ; Al-moudi, 1995). La conservation de l'eau de sebkha est influencée par la salinité des eaux souterraines, tandis que la salinité plus élevée de l'eau, la quantité plus grande de l'eau sera maintenue par sebkha (Sabtani et al., 1995).

### 2.2.5 Caractéristiques géotechniques des sols de sabkha

Ces sols sont considérés comme sols très variables en termes de caractéristiques géotechniques, une recherche effectuée par (Aiban et al.1995), indique que la variabilité de ses caractéristiques géotechniques et la présence de saumures peu profondes et très concentrées sont les caractéristiques distinctives d'un système sabkha. Géotechniquement, les sols sabkha, sont considérés comme très variables en termes de taille de grain et forme, texture, degré de cimentation, stratification, densité, etc. Ces caractéristiques, rendent les sols sabkha hautement corrosifs pour le béton et l'acier, améliorant ainsi la sensibilité du béton armé à la détérioration.

Plusieurs études ont été effectuées pour étudier les caractéristiques géotechniques des sols sebkha. Al-Amoudi et al 1992, Al-Amoudi et al 1997 ; Dhowian et al 1987 ; Arifuzzaman et al 2016, Abduljauwad et Al-amoudi 2008, ont étudié les caractéristiques géotechniques des sols sebkha, en se basant sur l'effet de l'eau distillée sur les propriétés mécaniques et physiques de ces sols. Ces chercheurs ont menés des essais au laboratoire et sur site pour examiner l'effet de l'inondation et le lessivage sur la structure, compressibilité, effondrement, perméabilité et tassement. Ces chercheurs ont montrés que la percolation de l'eau distillée (eau de pluies) à travers une Sebkha provoque la destruction de la cimentation naturelle, entraînent un effondrement, une augmentation de la perméabilité, une réduction de la résistance et une augmentation du tassement. Tant dis que, Al-Amoudi et al 1992, Al-amoudi et Abduljauwad 1995 ont montrés dans leurs études que les sols de sebkha à l'état naturel possèdent des résistances faibles à la compression simple, environ 20kPa.

### 2.2.6 Problèmes liés au sol de sebkha

Selon Al-Amoudi, (1992), les problèmes liés au sol de sebkha peuvent être divisés en deux parties suivantes :

#### a- Problèmes associés à sebkha comme matériau de construction

1. Une variation potentielle de la compressibilité des sédiments de sebkha mènera aux tassements différentiels excessifs. Ceci est attribué au fait que les dépôts de sebkha, en général, sont connus pour varier de conditions lâches ou très lâches aux conditions denses avec une distance relativement courte de cinq à dix mètres. En séquence, la sebkha possède un potentiel élevé d'effondrement principalement en raison de la dissolution du chlorure de sodium, de la lixiviation des ions de calcium et de l'ajustement des grains de sol Al-Amoudi et Abduljauwad, (1995).

2. Les couches supérieures de sebkha ont une faible résistance dans leur état naturel, menant aussi à une faible résistance à la pression non confinée moyenne d'environ 20 kPa (Abduljawwad et al., 1994). La résistance réduira sensiblement aussi dans les couches superficielles de sebkha en raison des précipitations, inondations, marées, ou simplement en raison de l'absorption de l'eau des environnements humides.
3. Le changement volumétrique alternatif dû à l'hydratation et à la déshydratation alternative du gypse instable endommagera la construction au-dessus du sol de sebkha (Akili, 1981).
4. Les sels fortement concentrés de chlorure et de sulfate présentent dans les sédiments de sebkha et ses saumures, mènent à la corrosion du renfort d'acier et de la détérioration du béton lui-même (Akili, 1981, Al-Amoudi, 1995).
5. L'élévation fréquente d'eau souterraine en raison du mécanisme d'évaporation déplace les sels solubles de la nappe phréatique vers la surface où ils précipitent. Les cristaux de sel ainsi formés peuvent créer les boursouffures de sel et d'initier la fissuration de la surface au-dessous des structures (par exemple les chaussées) (Akili, 1981).
6. La densification des couches supérieures de sebkha par des moyens conventionnels, afin d'améliorer sa capacité portante et de réduire ses caractéristiques de tassement, peut casser les liens de cimentation dans les couches sous-jacentes et réduire leur capacité portante (Akili et Torrance, 1981).
7. L'interaction de sebkha avec l'eau douce pourrait dissoudre certains des matériaux de cimentage et diminuer la résistance (Al-Amoudi, 1992, Sonnenfel, 1984).
8. Les difficultés liées à l'accessibilité aux sites de sebkha en raison de la saturation et la perte de résistance peuvent retarder les opérations de construction et augmenter le coût (Akili W., Fletcher, 1978).
9. L'utilisation de l'eau distillée pour déterminer les propriétés géotechniques de sebkha semble être inappropriée (Al-Amoudi et Abduljawwad., 1995). C'est parce que l'eau distillée a tendance à dissoudre les sels, qui sont considérés en tant qu'élément du sol.

#### **b-Problèmes de fondation dans le sol de sebkha**

1. Les problèmes dus aux changements périodiques de la teneur en eau, mèneront à de grands changements de la densité, la consistance, la résistance et des changements volumétriques. Ces changements volumétriques excessifs peuvent causer des dommages graves aux fondations aussi bien qu'aux constructions au-dessus du sol de sebkha (Al-Amoudi, 1992).
2. Les problèmes dus aux tassements différentiels excessifs peuvent se produire en raison de l'hétérogénéité du profil de sol de sebkha, le relâchement de certaines couches dans le profil de sol et la compressibilité fortement variable des divers composants du sol. Ceci peut mener

aux tassements différentiels rigoureux et aux fissures importantes et à l'inclinaison dans les structures sur le sol de sebkha (Al-Amoudi, 1992 ; Al-Shamrani et Dhowian, 1997).

3. Les problèmes dus à la présence des sels fortement corrosifs et des saumures en raison d'excavation et de remplissage induiront la remontée capillaire qui apporte avec lui des sels solubles supplémentaires aux nouvelles fondations. Les ions de sulfate et de chlorure présents à des concentrations élevées sont fortement corrosifs au béton et au renfort, respectivement. De plus, la cristallisation de sel se produit habituellement dans les pores du béton au-dessus de la nappe phréatique menant à la désintégration lente du béton due à la pression élevée de cristallisation qui est augmentée par évaporation (Al-Amoudi, 1995).

4. Les problèmes dus à la proximité de la nappe phréatique en raison des fluctuations dans le niveau d'eau souterraine peuvent poser des problèmes graves de tassements pour les structures construites sur un tel sol. Ces tassements se produisent en raison de l'humidification des terres arides, des sables lâches ou en raison de la compressibilité des sols sableux, lâches, arénacés. En outre, la susceptibilité du sol de sebkha à l'inondation en raison de la faible altitude de la surface de sebkha peut causer plusieurs problèmes (Al-Amoudi, 1992; Al-Shamrani et Dhowian, 1997).

## **2.3 Les sols sales**

### **2.3.1 Définition des sols salés**

Les deux critères chimiques principaux retenus pour la définition de ces sols sont le produit de solubilité des sels accumulés ou susceptibles de se former, et la concentration ionique dans la solution du sol. Pour être considérés comme Salé, ces sols doivent contenir une quantité importante de sels plus solubles que le gypse.

### **2.3.2 Définition de la salinisation**

La salinisation est un processus d'accumulation de sel à la surface du sol et dans la zone racinaire qui occasionne des effets nocifs sur les végétaux et le sol, il s'en suit une diminution des rendements, et à terme, une stérilisation du sol (Mermoud, 2006).

### **2.3.3 Définition de la salinité**

On entend, en général, par salinité une teneur du sol en sels solubles préjudiciables à la production végétale, d'une façon plus générale, il y a salinité chaque fois que la présence des sels vient modifier la vie végétale ou les caractéristiques des sols.

La liste des sels en cause varie selon le cas de salinité, le plus fréquent en zone semi-aride est d'avoir des chlorures ou des sulfates de sodium ou de magnésium (Forges, 1972).

### **2.3.4 Type de salinisation du sol et compréhension des mécanismes**

Ce qu'on appelle en général salinisation regroupe plusieurs mécanismes de dégradation : la salinisation, la sodisation et l'alcalinisation qui sont trois phénomènes différents.

#### **2.3.4.1 Salinisation**

Dans la nature, on peut distinguer une salinisation naturelle, que l'on peut dénommer primaire et une salinisation anthropique, que l'on appellera secondaire.

##### **2.3.4.1.1 Salinisation primaire**

Que l'on rencontre par exemple en Mésopotamie, et qui résulte du processus d'altération des roches. La migration et le dépôt des sels dissous dans l'eau dépendent des caractéristiques du milieu naturel et des précipitations. Dans les régions arides ou semi-arides, le lessivage et le transport en profondeur des sels dissous n'existent plus et l'évapotranspiration importante favorise la concentration des sels dans le sol.

Dans les régions côtières l'intrusion d'eaux salées et la submersion des terres basses par l'eau de mer provoquent la salinisation de l'eau souterraine et celle des sols.

##### **2.3.4.1.2 Salinisation secondaire**

Des sols irrigués due à l'accumulation des sels solubles dans le sol. Elle résulte de divers facteurs dont l'irrigation avec des eaux de mauvaise qualité, un lessivage insuffisant, un drainage inefficace, un taux important d'évaporation, des remontées du niveau des nappes.

Lorsque les sols reçoivent un excès des sels solubles, il y a échange entre le  $\text{Na}^+$  et les ions  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  fixés sur les minéraux argileux. C'est un phénomène d'alcalinisation. Il faut une quantité notable de  $\text{Na}^+$  pour qu'il y ait adsorption par les argiles. Les ions  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  échangés précipiteront quand le produit de solubilité de leurs sels sera dépassé par suite d'évaporation. Au-dessus d'un taux de 15% de  $\text{Na}^+$  échangeable on parlera de sols à alcalis. Il apparaîtra alors une dégradation des propriétés physiques du sol.

#### **2.3.4.2 Sodisation**

Le phénomène de sodisation, s'agit d'un échange de sodium sur le complexe absorbant des argiles. La capacité du sol d'échanger des cations est appelée capacité d'échange cationique CEC. La sodisation est mesurée en pourcentage de la CEC occupée par le sodium. Ce pourcentage est nommé ESP ou PSE pourcentage de sodium échangeable. Lorsque la gamiture cationique des argiles dépasse un seuil de teneur en sodium(Na), généralement situé aux environs de 10% (EPS>10%) et plus, les argiles ont tendance à défloculer (se disperser).

Le sol perd alors sa structure et sa perméabilité, il s'effondre. A un stade poussé, la sodisation s'accompagne d'une hausse du PH qui se traduit par une régression sévère des aptitudes agronomiques du sol, due en particulier à des carences (Marc,2001).

#### 2.3.4.2.1 Sodicité

L'ESP est un indice de caractérisation des sols salés. Ce paramètre est déterminé par la formule :

$$ESP (\%) = \left( \frac{Na^+}{CEC} \right) \times 100 \dots \dots \dots \mathbf{2.1} \text{ (U.S.S.L 1974).}$$

#### 2.3.4.3 Alcalinisation

L'alcalinisation, il s'agit d'une élevation du pH du sol sous l'effet de l'accumulation de base. Pour comprendre ce mécanisme en simplifiant le phénomène, il est utile de rappeler ceci :

- En milieu aride, et en cas de drainage limité ou nul, la forte évaporation conduit à concentrer les eaux de surface et du sol.
- Lorsqu'une eau même faiblement minéralisée se concentre, sa composition évolue : la teneur en ion augmente. A la limite, une évaporation poussée conduira à des eaux concentrées et donc salées.
- Toutes les espèces minérales ne se maintiennent pas en solution au cours de l'évaporation : lorsque le seuil de solubilité du minéral est atteint, il précipite et les ions correspondant cessent donc de se concentrer.
- Le premier minéral qui précipite est la calcite  $CaCO_3$ . Cette précipitation intervient pour une valeur constante du produit des concentrations en calcium et en carbonate. Or, l'eau du fleuve est relativement plus riche en carbonate (base faible) qu'en calcium. La précipitation laisse donc des carbonates résiduels en solution. Sa concentration a donc tendance à continuer à augmenter. Ceci entraine l'accroissement du PH de la solution.
- Alors que la teneur en calcium diminue, la teneur en sodium augmente, puisque aucune espèce minérale contenant du sodium ne précipite. La SAR de l'eau augmente à son tour.
- Une eau class e initialement sans danger pour l'irrigation devient ainsi alcaline et sodisante (Marc,2001).

### 2.3.4.3.1 Alcalinité

Le S.A.R (Sodium adsorption ration), il s'agit également d'un paramètre fondamental pour la détermination du niveau d'alcalinisation (tableau 2.1)

Tableau 2.1: SAR et degrés d'alcalinisation des sols (Servant 1975).

SAR	Alcalinisation
$SAR \leq 4$	Pas d'alcalinisation
$4 < SAR \leq 8$	Faible alcalinisation
$8 < SAR \leq 12$	Alcalinisation moyenne
$12 < SAR \leq 18$	Alcalinisation forte
$SAR \geq 18$	Alcalinisation intense

Le SAR est déterminé par la relation suivante :

$$SAR = Na^+ / \sqrt{(Ca^{++} + Mg^{++})/2} \dots \dots \dots 2.2$$

Na<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup> et Mg<sup>++</sup> exprimés en méq/l.

### 2.3.5 Mesure de la salinité du sol

La salinité des sols a été long temps mesurée par la résistivité des extraits de sol, qui permet de calculer leur teneur en sels solubles. Cette salinité s'exprime en conductibilité spécifique à 25°C, de la solution obtenue à partir du sol, soit C.E, 25°C, en mmhos/cm. La conductivité de l'eau peut être rapidement convertie en mg de sel par litre par la formule :

$$dS/m = 1 \text{ mS/cm} = 640 \text{ mg/l de sels (Marc, 2001).}$$

### 2.3.6 Classification des sols salés

Il existe plusieurs classifications des sols dans le monde. La classification américaine, française, russe et celle de la FAO (1975). Parmi ces classifications, celle proposée par (Duchaufour, 1977 et Cherbuy, 1991) qui voient en ces sols, trois grandes classes :

- Sol salins.
- Sols salin à alcalins.
- Sols alcalins.

### **2.3.6.1 Les sols salins**

Le terme de salin désigne des sols dont la C.E dépasse 4 dS/m et le pourcentage de sodium échangeable est inférieur à 15. Le pH est en général < 8.5.

Les sels solubles en excès peuvent être éliminés par lessivage et le sol redevient un sol normal. Les caractères chimiques de ces sols sont déterminés par la nature et les quantités de sels présents. Le Na<sup>+</sup> représente en général moins de 50% des cations solubles, les quantités de Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup> et K<sup>+</sup> sont très variables.

Les principaux anions sont Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup> et parfois NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, ou HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. En plus de ces sels solubles, on rencontre des sels de faible solubilité, tels que CaSO<sub>4</sub> .2H<sub>2</sub>O (gypse) et les carbonates de calcium et magnésium.

Ces sols sont souvent floкулés par suite d'un excès de sels solubles et leur perméabilité est égale ou supérieure à celle des sols identiques non salins.

### **2.3.6.2 Les sols salins-alcalins**

Ce terme s'applique aux sols dont la conductivité est supérieure à 4 dS/m à 25°C et le pourcentage de sodium échangeable supérieur à 15. Ces sols sont dus à la fois à la salinisation et à l'alcalisation. Tant qu'il y a des sels solubles en excès, ils ont les mêmes propriétés que les sols salins. Quand la concentration de la solution du sol est abaissée, du sodium échangeable s'hydrolyse et forme de la soude. Après lessivage le sol peut devenir très alcalin (pH > 8.5) et les possibilités de culture fortement compromises.

### **2.3.6.3 Les sols alcalins**

Ces sols sont caractérisés par une conductivité électrique de l'extrait de saturation inférieur à 4 dS/m, un pH compris entre 8.5 et 10, un pourcentage de sodium échangeable supérieur à 15%. Selon (Hullin,1983) ces sols contiennent suffisamment de sodium échangeable mais ils ne contiennent pas des quantités excessives de sels solubles. D'après (Daoud,1993), ces sols présentent une faible perméabilité.

Ces sols sont riches en Na. Foncés en raison de forte concentration en Na et de la dispersion de la MO. Sols dispersés : lessivage difficile et nécessité de remplacer le Na par un autre cation (Ca par ex) (Mermoud.2006).

## **2.3.7 Sels solubles**

Hulin, (1983) à considéré tous les sels les plus soluble que le gypse comme des sels solubles, leur concentration globale est estimée généralement par la conductivité électrique.

### 2.3.7.1 Chlorures

Le chlorure est un sel principal responsable de la formation des sols salés. Il a une solubilité très élevée et une forte toxicité pour les végétaux (Hulin, 1983).

Parmi ces sels nous avons :

- Chlorure de sodium (NaCl) : C'est le sel le plus répandu, très soluble et hautement toxique.
- Chlorure de potassium (KCl) : C'est un sel voisin du NaCl mais répand peu dans la nature.
- Chlorure de calcium ( $\text{Ca Cl}_2$ ) : C'est un sel relativement rare dans les sols, car il réagit avec  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ou  $\text{NaCO}_3$  pour former du  $\text{CaSO}_4$  ou  $\text{CaCO}_3$  (sel peu solubles) selon les réactions.
- Chlorure de magnésium ( $\text{MgCl}_2$ ) : C'est un sel relativement rare, sauf dans les cas de forte salinité, sa solubilité est de l'ordre de 350g/l qui fait de lui un sel de toxicité élevée.

### 2.3.7.2 Sulfates

Les sels sulfatés se trouvent en quantités variables dans les sols. Parmi ces sels nous avons

- Les Sulfates de Calcium ( $\text{Ca SO}_4$ ) : le gypse ( $\text{Ca SO}_4 2\text{H}_2\text{O}$ ) est la forme la plus répandue, de point de vue toxicité il est peu dangereux du fait de sa faible solubilité, mais il peut freiner le développement du système racinaire dans le cas d'une forte accumulation dans le sol.
- Le Sulfate de Magnésium ( $\text{Mg SO}_4$ ) : c'est un composant typique des sols salés, on le trouve souvent dans les eaux souterraines, sa solubilité est très élevée ce qui le rend un sel toxique.
- Le Sulfate de Sodium ( $\text{Na}_2 \text{SO}_4$ ) : composant typique des sols salés, sa solubilité de l'ordre de 300 g/l, fait de lui un sel hautement toxique.
- Le Sulfate de Potassium ( $\text{K}_2 \text{SO}_4$ ) : il se trouve en très faible quantité.

### 2.3.7.3 Carbonates

Les sels carbonatés sont très répandus dans les sols. Parmi ces sels nous avons :

- Le carbonate de magnésium ( $\text{Mg CO}_3$ ) : sa solubilité est plus élevée, il donne du  $\text{Mg (HCO}_3)$  en présence de  $\text{H}_2\text{CO}_3$ .

- Le carbonate de sodium ( $\text{Na CO}_3$ ) : c'est un sel très toxique par sa solubilité et son pouvoir alcalinisation.
- Le carbonate de potassium ( $\text{K}_2 \text{CO}_3$ ) : il est extrêmement rare de le trouver en grande quantité, car il est fixé par les argiles. Son effet est pratiquement comparable à celui de  $\text{Na CO}_3$ .

### **2.3.8 Mouvements des sels solubles dans le sol**

Les sels solubles sont en mouvement grâce à l'eau qui circule dans le sol, ces mouvements peuvent être descendants (lixiviation) ou ascendants (remonté capillaire ou capillarité) ou avec un autre mécanisme de migration appelé thermos-dialyse.

#### **2.3.8.1 La lixiviation**

L'eau apportée au sol ; soit par irrigation, inondation ou de pluies. Va s'infiltrer en dissolvant les sels présents dans leur ordre de solubilité croissante et en les entraînant en profondeur.

#### **2.3.8.2 La capillarité**

La capillarité ou la remontée capillaire est une migration ascendante des sels en solution dans un profil saturé à faible profondeur, cette migration est très intense dans les régions soumises à une forte évaporation (Duchaufour, 1977). La remontée capillaire des sels dépend beaucoup de profondeur de la nappe superficielle, la perméabilité, la granulométrie, et la structure du sol (Durand, 1983).

#### **2.3.8.3 Thermodialyse**

La thermodialyse est une migration des sels sous un gradient de température vers les parties chaudes. Cette migration dépend de la texture de la terre, de son humidité et de la nature des sels (Durand, 1983).

### **2.3.9 Action des sels solubles sur le sol**

#### **2.3.9.1 Sur la structure du sol**

C'est par les cations que les sels agissent sur les propriétés physiques du sol. En particulier par l'action dispersante du sodium échangeable qui provoque la dispersion des colloïdes, cette action néfaste se manifeste lorsque le remplacement du calcium par le sodium dans le complexe absorbante dépasse 15% de la capacité d'échange cationique (Derdour, 1981).

La stabilité structurale décroît dès que le taux de sodium échangeable représente de 12 à 15% de CEC (Derdour, 1981). Le rapport  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{++}$  influe sur la dispersion des colloïdes, cette

dispersion apparaît dès que la quantité de sodium échangeable dépasse celle du calcium échangeable, c'est-à-dire lorsque le rapport  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{++}$  dépasse la valeur de 1 (Derdour,1981).

### **2.3.9.2 Action sur la perméabilité**

La perméabilité dépend essentiellement de la texture, la structure, le type de cations absorbés et le taux de matière organique, la diminution de la perméabilité des sols salés à alcalis est une conséquence directe de la dispersion des colloïdes par l'ion  $\text{Na}^+$  (Derdour,1981). Cette perméabilité commence à augmenter avec la salinité du fait de la formation des agrégats par l'action flocculant des sels, puis elle se maintient constante (Demelon,1966).

## **2.4 Conclusion**

Les sols sebkha sont localisés dans les zones arides ou semi arides. Ces sols sont définis comme étant des sols salés ayant une salinité élevée. Ces sols sont considérés comme sols très variables en termes de caractéristiques géotechniques ce qui pose de nombreux problèmes techniques pour la construction de bâtiments, de routes, de barrages et d'autres structures. Ces caractéristiques dépendent des types et des quantités des sels présents dans le sol. Ces sels sont généralement le calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ); gypsum  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  et l'Halite ( $\text{NaCl}$ ). Plusieurs études ont été consacrées à l'étude du comportement des sols sebkha en se basant sur l'effet de l'eau distillée sur les propriétés mécaniques et physiques de ces sols. Ces études ont montré que la percolation de l'eau distillée (eau de pluies) à travers le sol sebkha provoque la destruction des liaisons naturelle des grains ce qui entraîne un effondrement, une augmentation de la perméabilité, une réduction de la résistance et une augmentation du tassement. Comme ces sols sont contrôlés par les sels présents dans le sol, dans ce chapitre la définition de la salinité, les différents types de sels et les méthodes quantification de ces sels ont été bien illustrés.

## **CHAPITRE .3**

# **MATÉRIAUX, MATÉRIELS ET ESSAIS**

### 3.1 Introduction

Ce chapitre décrit la localisation de la zone d'étude ainsi que la description du sol étudié. Les différentes procédures d'essais effectués pour la caractérisation chimique, minéralogique, thermique et géotechnique ont été détaillées dans ce chapitre.

Sachant que dans la littérature des recherches ont été menées pour étudier ce type de sol, mais presque rien n'a été consacré à l'étude de l'effet des cycles de séchage-mouillage sur le comportement mécanique des sols sebkha. A cet effet pour y remédier à ce problème les géotechniciens doivent être capables de maîtriser le comportement mécanique de ces sols sebkha sous l'effet de ces cycles D-W. Cependant et dans un environnement de laboratoire, des échantillons de sol de sebkha d'Ain M'Lila compactés ont été soumis à des cycles D-W et en se basant sur le processus de séchage naturel pour atteindre les teneurs en eau visées de 13%, 11.4% (teneur en eau du Proctor normal), 7% et 4%. Pour chacune de ces teneurs en eau des essais de laboratoire ont été effectués pour étudier l'effet des cycles D-W sur la résistance à la compression non confinée (UCS), le potentiel d'effondrement  $C_p$ , la succion et la résistance au cisaillement du sol sebkha d'Ain M'Lila. Le détail des procédures et le matériel utilisé a été bien illustré dans ce chapitre.

### 3.2 Localisation et description du site

#### 3.2.1 Emplacement et échantillonnage du sol

Le sol testé dans cette étude a été prélevé dans une zone de sebkha d'Ain M'lila dans le Nord-est de l'Algérie (Figure.3.1). En termes de géographie locale de la région le lac Mzouri (ou, en arabe, Sebkhet El Zemoul), est situé sur la route nationale RN3 qui relie Ain M'lila à Batna. Le lac Mzouri est situé à 17 km au Sud de la ville d'Ain M'lila et à 10 km à l'Est de la ville de Souk Naamane. Le lac se trouve à une courte distance à l'Est de Chott Tinsilt, aussi classé comme site Ramsar en 2004. La rive Sud du lac Mzouri se trouve à 200 m de la ville d'Ouled Zouai. Les Dairas de Souk Naamane et Aïn Kercha, dans la province d'Oum-El-Bouaghi sont administrativement responsables de la zone humide d'El Zemoul.

Étant donné la variabilité des sols de sebkha qui rend difficile l'obtention d'échantillons représentatifs, on a étudié que les zones facilement accessibles. A cet effet, sur le site en question, on a réalisé trois (03) sondages à ciels ouverts (puits) à l'aide d'une pelle hydraulique, sur une profondeur qui varie entre 1.2 à 1.5m, le but étant de déterminer la lithologie en place et de prélever des échantillons à soumettre aux différents essais de laboratoire. Afin d'acquérir des échantillons de sols représentatifs destinés pour les différents

essais, une fois le puits creusé, des échantillons de chaque couche ont été collectés dans des sacs en plastique en excluant les morceaux de cristaux de gypse, d'halite et du sable carbonaté (Aiban et al., 2006). Des mottes des sols intacts, ont été prélevées pour chaque sondage pour les caractériser.

### 3.2.2 Description et aperçu sur les sols sebkha d'Ain M'lila

Les sols sebkha d'Ain M'lila sont connus par un climat froid en hiver et parfois pluvieux, sec et chaud en été. Ce climat produit une variation saisonnière, concernant la présence des sels dans les sols sebkha, c'est à dire que ces derniers ont tendances de se dessaler en hiver en raison des précipitations et de saliniser en été en raison de la forte évaporation. La surface de sebkha d'Ain M'lila est plane et principalement recouverte d'une couche blanche et mince de sel en été. Cependant, les sels accumulés à la surface du sol ne subissent qu'un lessivage (lixiviation) partiel, nécessitant un certain nombre de cycles pour leurs disparitions, sachant que ce phénomène est déjà approuvé par Wang et al.(2019). Les données météorologiques du sol sebkha sont données dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1:Données météorologiques de la région (année 2018)

Facteurs météorologiques	Données
Température annuelle moyenne, °C	21
Température moyenne en janvier, °C	7
Température moyenne en juillet, °C	33
Précipitations annuelles moyennes, mm	460
Humidité annuelle moyenne, %	66

Selon la carte géologique de la région d'Ain Yaghout (Figure 3.2(a)), le site de la présente étude est composé par des limons salins périodiquement inondés et des sols sebkha. La différence entre ces deux types de sols réside dans la localisation du premier par rapport au second sol, c'est-à-dire les limons périodiquement salés bordent les sols sebkha. Ces derniers sont composés généralement de sable, limon et argile, par contre les sols limons salés périodiquement inondés sont constitués principalement par des grains de limons. Les trois sondages réalisés, ont montré que le sol in situ est constitué d'une couche mince de sable en surface, puis un mélange de sable et de limon en profondeur. On note aussi la présence de nombreuses bandes et de nids de sels dans ce sol. En plus de la présence de morceaux

centimétriques de cristaux de gypse, d'halite et de sable carbonaté (Figure 3.2(b)). Cette morphologie est caractérisée par l'affectation des propriétés géotechniques de ce type de sol (Al-Amoudi et al., 1995). Après trois heures de creusement, on a constaté la présence d'eau à une profondeur de 60 à 80 cm

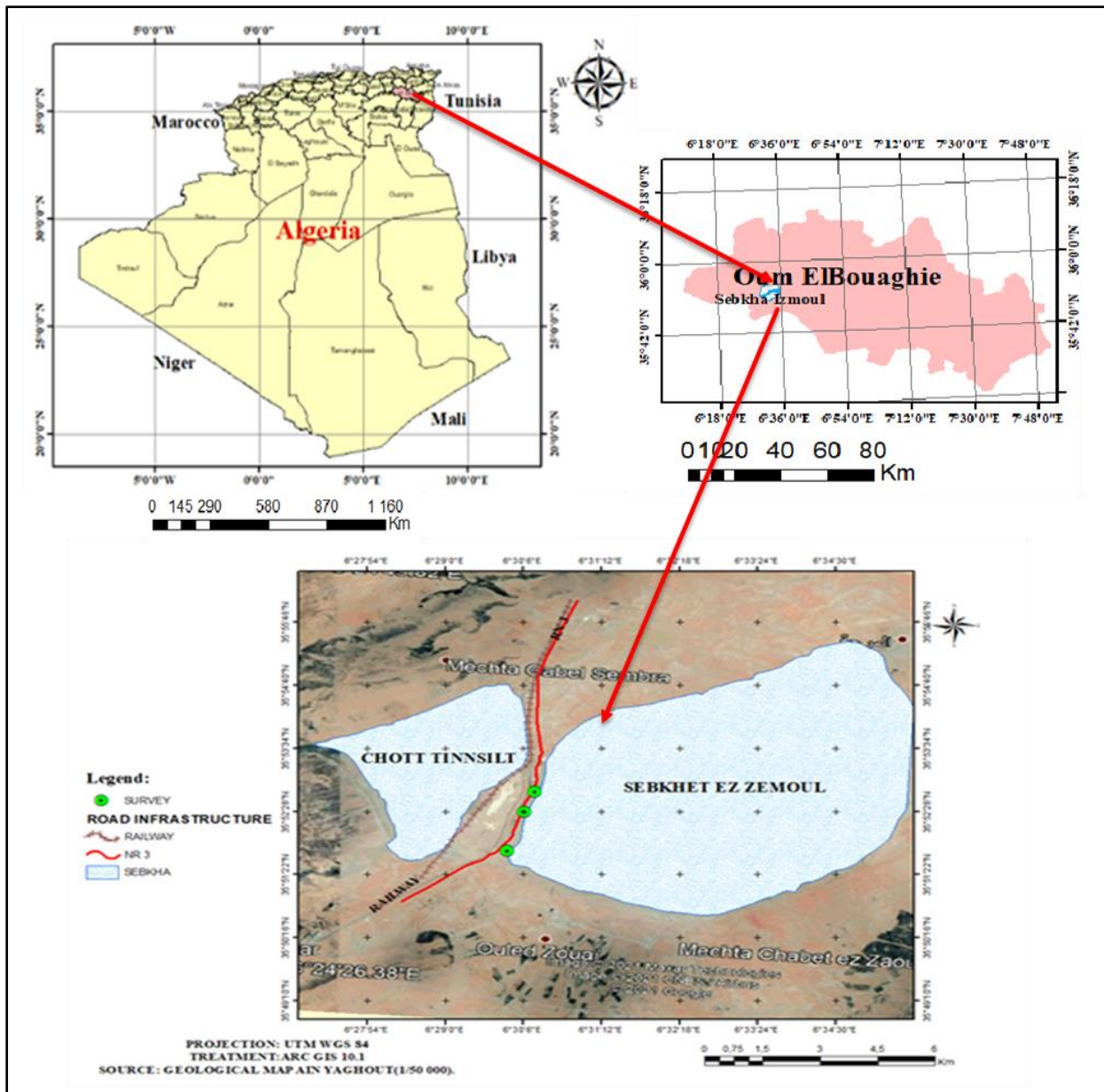


Figure 3.1: Localisation de la zone d'étude.

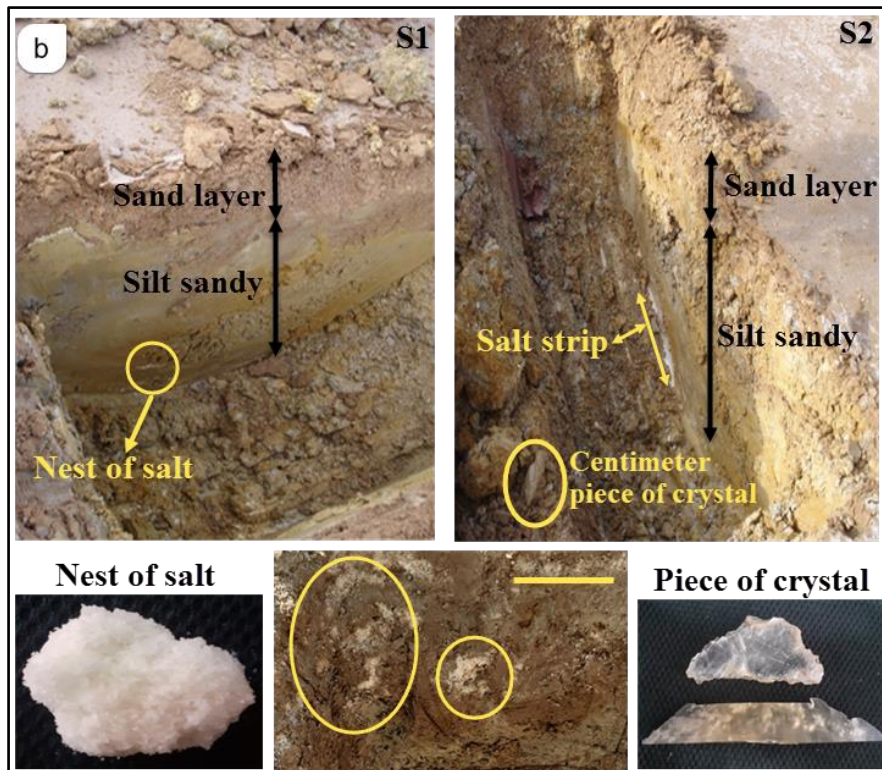
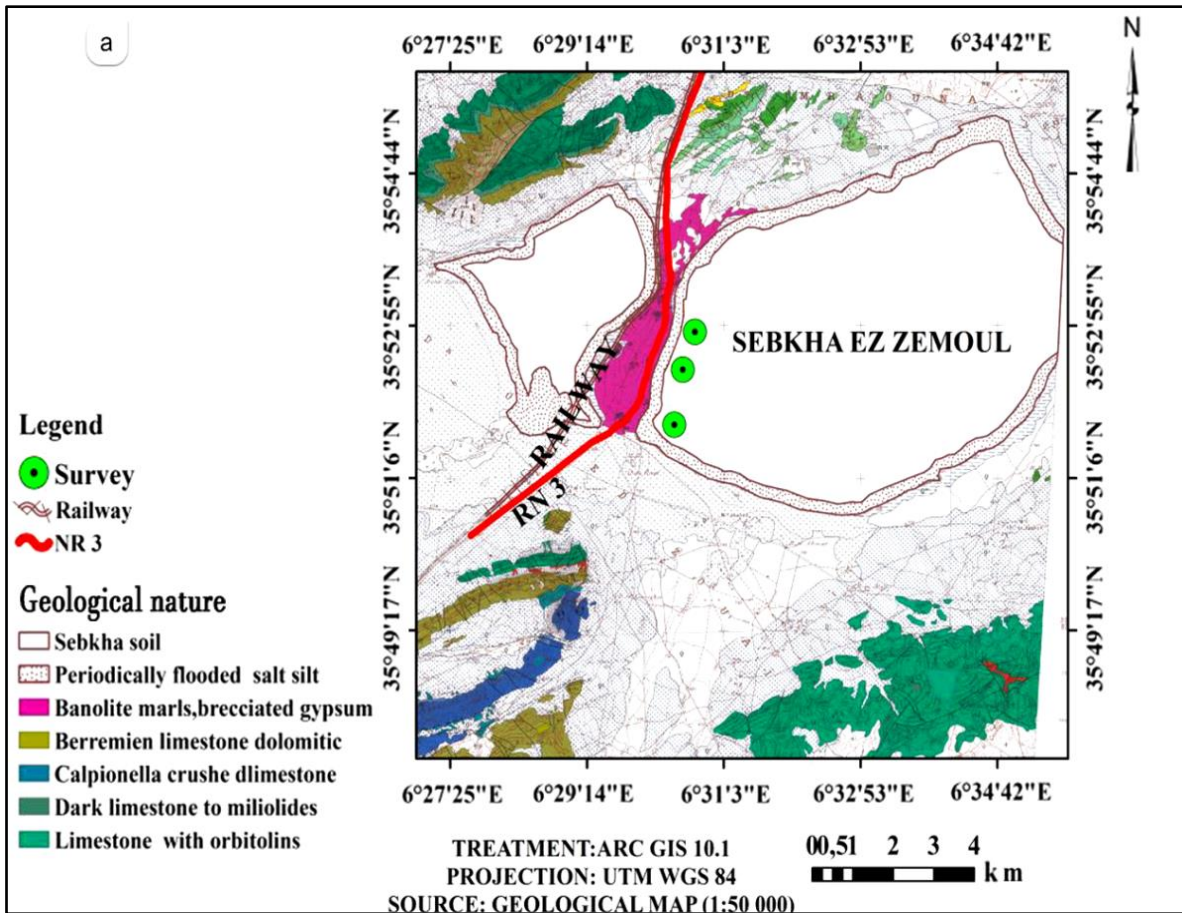


Figure 3.2: Carte géologique de la région d'AIN M'LILA (a) et sections lithologiques des forages (b).

### 3.3 Essais de caractérisation chimiques, minéralogiques et géotechniques

#### 3.3.1 Préparation des échantillons

Afin d'obtenir des échantillons représentatifs pour les différents types d'essais en laboratoire, nous avons commencé par homogénéiser les échantillons de sol, en suivant les étapes utilisées par [Aiban et al. \(2006\)](#), ce qui nous a permis d'obtenir des résultats fiables. Dans un premier temps, les échantillons ont été séchés à l'air libre ou dans un four à une température de 50 °C; le sol séché a ensuite été légèrement broyé, afin de briser les liaisons des particules cimentées par les sels. Malgré cette procédure, on a constaté à l'œil nu que le sol contient toujours des agrégats composés par les grains de sables, cimentés par les sels, ce qui nous a conduit à tamiser le sol avec le tamis de 5 mm, sachant que l'élimination de ces liaisons se réalise avec la procédure de l'essai de granulométrie. En fin, le sol tamisé est stocké dans des sacs en plastique. Une fois cette étape terminée, un programme expérimental détaillé a été réalisé pour étudier les caractéristiques géotechniques, chimiques, thermiques et minéralogiques des sols.



*Figure 3.3: Préparation des échantillons.*

### 3.3.2 Analyses spectroscopie de fluorescence X (XRF)

La composition chimique du sol a été déterminée par spectrométrie de fluorescence des rayons-X marque RIGAKU : (SFX ou FX, ou en anglais XRF pour X-ray fluorescence). C'est une technique d'analyse chimique utilisant une propriété physique de la matière, la fluorescence de rayons X. XRF est une méthode d'analyse élémentaire, donc elle permet de déterminer les concentrations en éléments purs. Cette technique peut être utilisée pour des matériaux très variés : minéraux céramiques, ciments, métaux, huiles, eau, verres, etc sous forme solide ou liquide. Elle permet l'analyse de tous les éléments chimiques du Béryllium (Be) à l'Uranium (U) dans des gammes de concentration allant de quelques ppm à 100%, avec des résultats précis et surtout reproductibles. Cette technique nécessite la préparation des pastilles en poudre du sol broyé avec un mortier en agates (Figure.3.4).

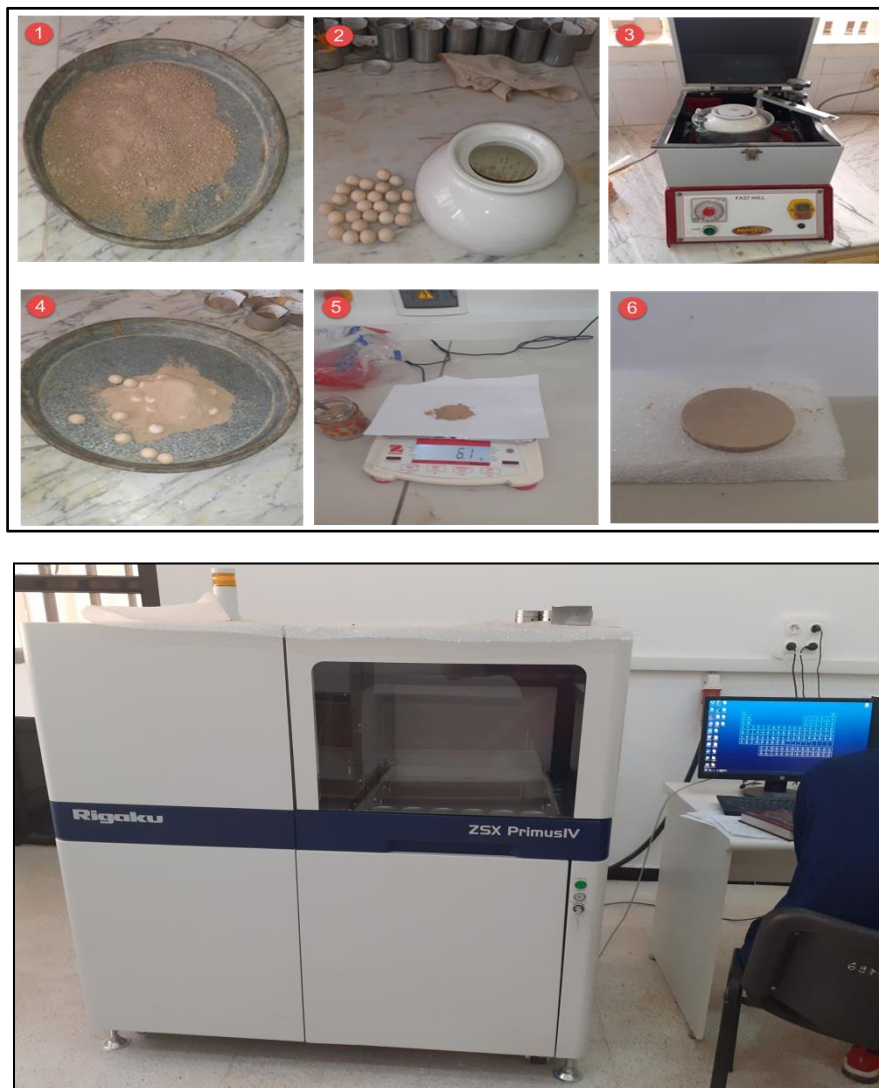


Figure 3.4: Étapes de préparation de la poudre du sol et l'appareil de XRF.

### 3.3.3 Analyses minéralogiques (DRX : Diffraction des rayons X)

Afin de déterminer les phases minérales prédominantes dans nos échantillons de sol sebkha, des tests de diffraction des rayons X (DRX) ont été réalisés sur des échantillons en poudre. L'analyse a été menée à l'aide d'un diffractomètre à poudre Siemens D500, model Bruker AXS avec une anticathode en nickel ( $\lambda K\alpha = 1,5406 \text{ \AA}$ ), couplé à un micro-ordinateur permettant le contrôle automatique de la rotation du goniomètre ainsi que l'acquisition et le traitement des données. La puissance utilisée était de 30 kV avec une intensité de 20 mA. Les résultats de ces analyses sont une base importante aidant à interpréter partiellement les résultats des autres essais. L'analyse par DRX joue un rôle primordial dans cette étude, elle nous permet d'observer les changements dans la composition minéralogique sous l'effet des cycles de séchage-humidification.



*Figure 3.5:Appareil de diffraction des rayons X (DRX).*

### 3.3.4 Analyses thermiques ATG et ATD

Les analyses thermogravimétriques (ATG) et les analyses thermiques différentielles (ATD) ont été réalisées à l'aide d'un calorimètre d'analyse thermique différentielle simultanée ATG/ATD/DSC de marque Jupiter®, NETZSCH qui peut atteindre 1500 °C. Les analyses ont été réalisées avec des creusets en alumine pour les différentes expérimentations. Les mesures ont été réalisées sous atmosphère inerte à une vitesse de chauffe à savoir 10 °C/min entre la température ambiante et 1000 °C. L'analyse de l'ATG consiste à mesurer la variation de masse en fonction d'une rampe de température préétablie et à déterminer l'évolution massique des échantillons au cours des expériences de chauffage. Quant à l'ATD est basée sur la mesure de la différence de température entre l'échantillon et un corps de référence en fonction du temps ou de la température de l'échantillon sous atmosphère contrôlée. C'est ainsi qu'elle permet tout d'abord de distinguer les transformations endothermiques (consommation de la chaleur), les transformations exothermiques (libération de la chaleur). Le rapprochement des résultats de ces deux types d'analyses, permet de déterminer la nature des phases minérales présentes dans le sol.

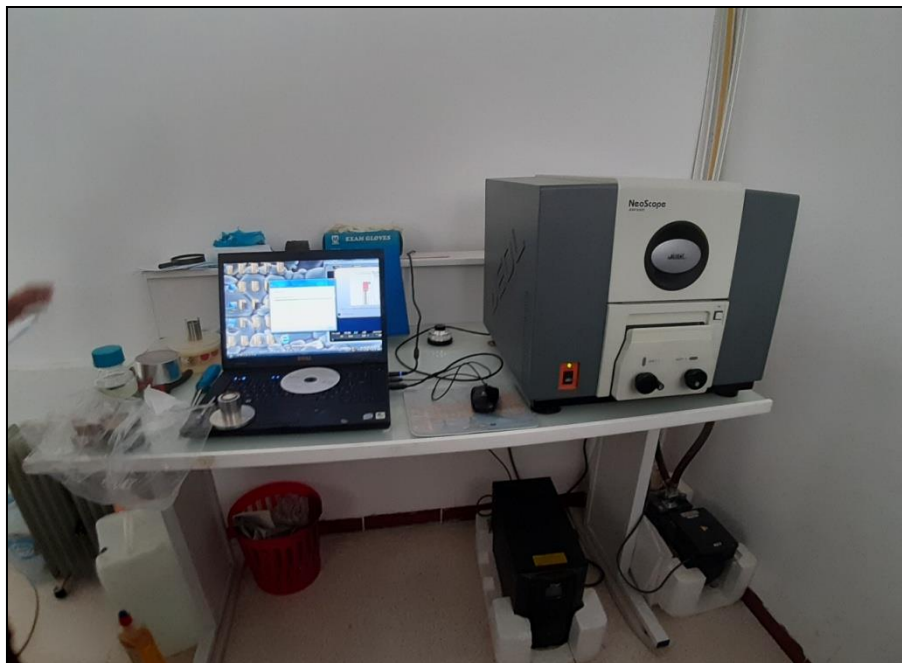


*Figure 3.6:Appareil d'ATG et ATD.*

### 3.3.5 Analyse microstructurale : microscopie électronique à balayage MEB

L'étude de la microstructure des sols sebka d'Ain M'Lila a été effectuée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) NeoScope (Figure.3.7). La microscopie électronique à balayage MEB (ou scanning electron microscopy SEM) est une technique puissante d'observation de la topographie des surfaces et capable de produire des images en haute résolution de la surface d'échantillon en utilisant le principe des interactions électrons-matières. Cette méthode est très utilisée pour observer la morphologie des précipités et de certaines phases. En science des matériaux, le MEB permet la caractérisation microstructurale (morphologie, répartition des constituants dans des mélanges ou composites), information cristallographique, cartographie chimique, mesures dimensionnelles.

Le principe du microscope électronique à balayage repose sur le balayage de l'échantillon par un faisceau d'électrons. L'interaction des électrons avec la matière conduit à l'émission d'électrons secondaires, de photons X, d'électrons rétrodiffusés, d'électrons Auger. Tous peuvent permettre la formation d'une image si le microscope est doté d'un détecteur capable de transformer les électrons ou les photons émis en signal électrique. Il est important de préciser qu'avec cet appareil, nous travaillons sous vide afin d'éviter les interférences et ainsi limiter le bruit.



*Figure 3.7: Microscopie électronique à balayage (NeoScope).*

### 3.3.6 Analyses chimiques sur l'extrait du sol

Pour la mesure de la salinité du sol il existe plusieurs méthodes, dont celles utilisées au laboratoire, basées sur la mesure de la conductivité électrique de l'extrait de la pate saturée ou l'extrait dilué des sols (1/5 ou 1/10). Dans cette étude la méthode de l'extrait de la pate saturée a été utilisée. C'est la méthode de référence internationale préconisée par le laboratoire de Riverside ([US Salinity Laboratory Staff ; Richards, 1954](#)). Cette méthode présente quelques difficultés liées à sa procédure d'exécution. Elle est lourde à mettre en œuvre du fait de la difficulté de confection de la pate et de l'extraction de la solution mais elle reste une méthode de référence internationale pour la mesure de la salinité. Cependant, l'échantillon de sol sebkha est placé dans une capsule en lui ajoutant de l'eau jusqu'au refus d'absorption. Après avoir obtenu la pâte de terre saturée, on la met sur un Büchner et on extrait l'eau sous vide. La conductivité électrique du sol a été mesurée sur cet extrait de la pate saturée en utilisant un conductimètre Inolab-Cond, marque WTW 1CA301 (Figure 3.8 (a)) ce qui permet de calculer leur teneur en sel soluble. Cette salinité est exprimée en fonction de la conductivité spécifique de la solution obtenue à partir du sol à 25 °C en unités de  $\text{dS.m}^{-1}$ . Cependant le pH du sol a été mesuré sur l'extrait du sol 1/2,5, en utilisant un pH mètre Jenway, marque 3510 (Figure 3.8 (b)).

En utilisant les méthodes de mesure volumétrique, décrites en détail dans [Pansu and Gautheyrou \(2007\)](#), les différents types de sels solubles présents dans les extraits de pates saturées d'échantillons, ont également été déterminés sous forme de cations et d'anions.

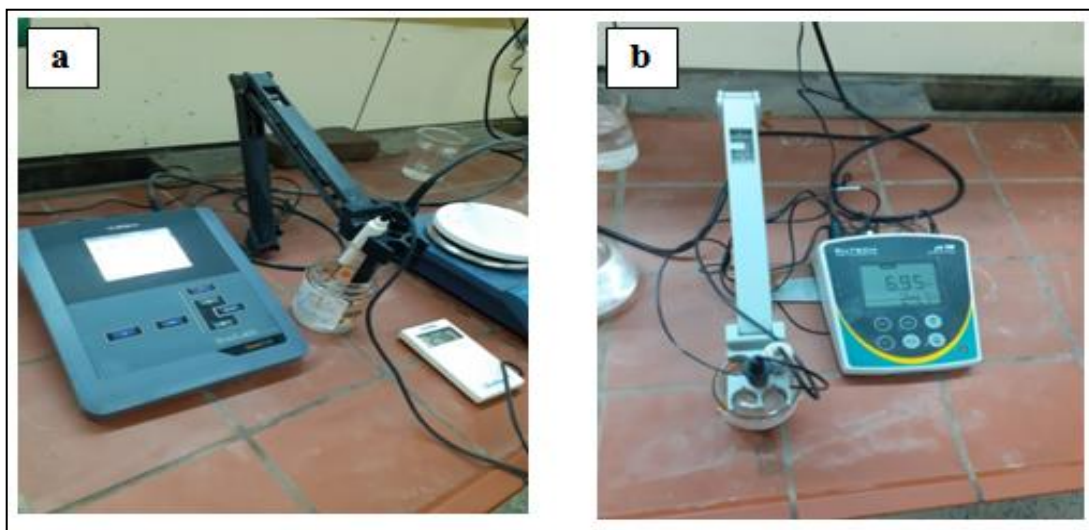


Figure 3.8:(a) conductimètre électrique ; (b) PH mètre à électrode.

### 3.3.7 Essais de caractérisation géotechniques

Pour déterminer les caractéristiques géotechniques du sol objet de cette étude, il est nécessaire de réaliser un programme d'essais de caractérisation qui comporte les essais suivants :

- Essais de granulométrie
- Limites d'atterberg
- Essai de Proctor normal OPN
- Essais de compressibilité à l'œdomètre.
- Essais de cisaillement direct.
- Essais de compression non confinée.

#### a- Analyse granulométrique (NF P94-056 et NF P94-057).

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions de grains de différentes tailles d'un matériau. Elle s'effectue :

- Par tamisage (tamis à maille carrée) pour des grains de diamètre supérieur à  $80\mu\text{m}$ ,
- Par sédimentométrie pour les grains les plus fins. Elle consiste à laisser une suspension de sol se déposer au fond d'une éprouvette pleine d'eau. Plus les grains sont fins, plus la vitesse de décantation est lente. (Loi de Stokes). La mesure de la densité de la suspension à des intervalles de temps variables permet de calculer la proportion de grains de chaque diamètre.

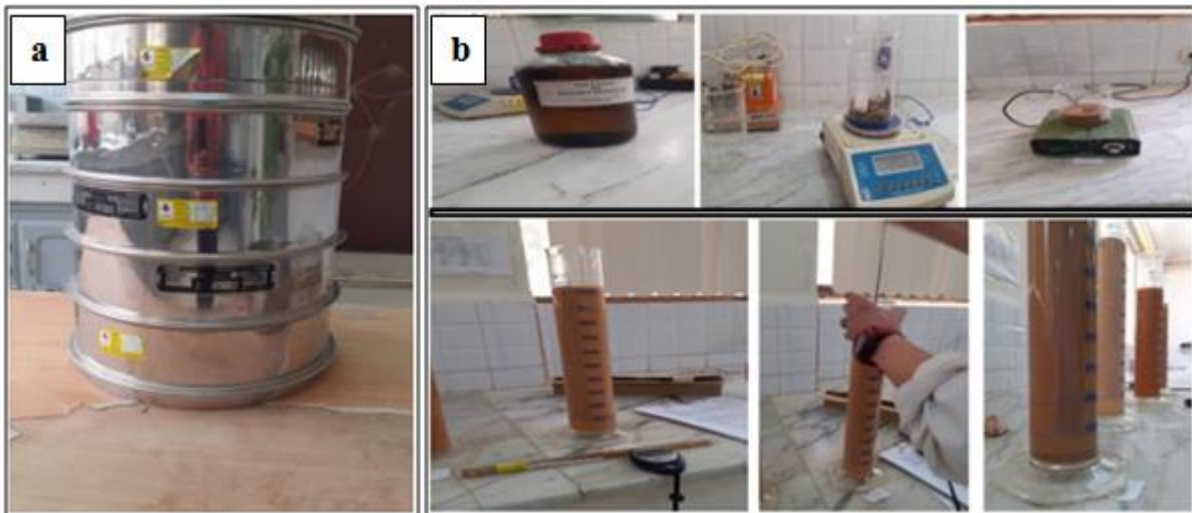


Figure 3.9: Analyse granulométrique : (a) Par tamisage; (b) sédimentométrie.

**b- Limites d'Atterberg (NF P94-051).**

Des essais ont été conduits pour déterminer la limite de liquidité (WL) et la limite de plasticité (WP) du sol sebkha, selon la norme française NF P 94-051. La limite de liquidité (WL) représente la teneur en eau massique du matériau à la limite entre l'état liquide et l'état plastique. Dans notre cas, nous avons déterminé cette limite à la coupelle de Casagrande (WL correspond à la teneur en eau pour laquelle l'incision faite dans le matériau se referme après 25 chocs). La limite de plasticité (WP) présente la teneur en eau massique du matériau à la limite entre l'état plastique et l'état solide. Elle correspond à la teneur en eau limite pour laquelle il est possible de confectionner en les roulant sur un marbre des petits rouleaux de matériau de 10 cm de longueur et 3 mm de diamètre sans les fractionner.



*Figure 3.10: Essais de limites de liquidité et de plasticité.*

**c- Essai de Proctor normal OPN (NF P94-093).**

La densité sèche et la teneur en eau optimales de compactage du sol sebkha, ont été déterminées à partir de l'essai Proctor normal. Cet essai consiste à humidifier le matériau étudié à différentes teneurs en eau et à le compacter par couches à l'intérieur d'un moule cylindrique rigide de dimension définies. L'énergie de compactage est en fonction du nombre imposé de coups d'une dame par couche (la masse de la dame et sa hauteur de chute sont constantes durant l'essai). Pour chaque valeur de teneur en eau considérée, on détermine la densité sèche du matériau après compactage et on trace la courbe densité sèche en fonction de

la teneur en eau (courbe Proctor). Sur la courbe Proctor, il existe généralement une valeur de densité sèche maximale obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau. Ces deux valeurs s'appellent densité sèche ( $\gamma_{dOPN}$ ) et teneur en eau optimale ( $w_{OPN}$ ) de compactage.



Figure 3.11: Essai de Proctor normal.

### 3.4 Essais de compression non confinée sous l'effet des cycles hydrique de séchage-humidification

#### 3.4.1 Préparation des éprouvettes

Pour préparer les éprouvettes destinées aux essais de compression non confinées (UCS), le sol sec a été mélangé avec de l'eau pour obtenir une valeur de teneur en eau  $w$  proche de la saturation  $w = 14\%$  (soit un degré de saturation,  $S_r = 93\%$ ). Le sol humide a été mélangé manuellement ensuite il a été conservé dans un sac en plastique pour une durée de temps de 2h selon la norme [NF P94-093 \(1993\)](#). Cette procédure permet à l'eau de se répartir uniformément dans le sol. Par ailleurs, le poids du sol humide nécessaire pour chaque éprouvette a été calculé par l'équation (1) sachant que la densité sèche ciblée est de 95% de l'optimum Proctor normal  $\gamma_{dopn} = 1,815 \text{ g/cm}^3$ .

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1+w} \dots\dots\dots 3.1$$

$\gamma_d$  est la densité sèche,  $\gamma_h$  la densité humide du sol et  $w$  la teneur en eau.

La méthode de confection des éprouvettes du sol compacté décrite par [Kafoyda and Okonta \(2018\)](#) a été utilisée. A cet effet, le sol a été placé dans un moule de 37,5 mm du

diamètre intérieur et de 75 mm de hauteur avec un élancement de 2. La presse utilisée est celle du CBR (Figure 3.12). Afin d'obtenir la densité sèche mentionnée ci-dessus ( $\gamma_{\text{dopn}} = 1,815 \text{ g/cm}^3$ ) d'une part et d'homogénéiser cette densité sèche le long de l'éprouvette d'autres part, un compactage statique de chaque éprouvette a été effectué en quatre couches avec une vitesse de 1,27 mm/min. Le poids et la hauteur de chaque couche ont été contrôlés, ce qui conduit d'avoir une densité homogène. L'interface entre les couches a été scarifiée pour améliorer l'homogénéité et la liaison entre les couches. Un dispositif hydraulique a été utilisé pour extraire les éprouvettes du sol compacté ce dispositif est similaire à celui de [Kafoyda and Okonta \(2018\)](#). Chaque éprouvette a été pesée à l'aide d'une balance de précision de 0,01g. Leurs dimensions ont été également mesurées à l'aide d'un pied à coulisse afin de contrôler la variation de la masse et le volume au cours de chaque cycle de séchage.



Figure 3.12: Presse CBR utilisée pour le compactage statique des éprouvettes du sol.

### 3.4.2 Les cycles de séchage-humidification

Pour cette étape l'approche de séchage à l'air libre est adoptée. Les échantillons de sol confectionnés à la teneur en eau proche de la saturation ( $w = 14\%$ ) ont été placés sur une table de laboratoire et séchés à une température de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  pour des temps allant de trois jours à une semaine pour le quatrième et le premier cycle respectivement. L'objectif de cette méthode est la simulation des temps de séchage qui se produisent dans les conditions réelles du terrain. Cependant, une série de valeurs de teneur en eau  $w$  et la teneur en eau optimale de Proctor

normal  $w_{\text{opn}}$ , ( $w= 7\%$ ,  $w_{\text{opn}}=11.4\%$ , et  $w=13\%$ ) ont été fixées pour contrôler le processus de séchage. A cet effet, lorsque ces teneurs en eau ciblées ont été atteintes. Pour chaque valeur de ces teneurs en eau trois échantillons ont été collectés et stockés dans des sacs en plastique pendant une semaine pour permettre à l'eau de se répartir uniformément dans ces échantillons. Les teneurs en eau ont été calculées gravitairement sur la base des différences de masses en utilisant une balance de précision de 0.01g. Les échantillons restants ont été ensuite séchés jusqu'au niveau de la teneur en eau résiduelle de  $3 \pm 1\%$  où la variation de masse est inférieure à 0,1 g en 48 h. Pour déterminer le poids sec du sol ce qui permet de calculer la teneur en eau ciblée ainsi que la teneur en eau résiduelle, un échantillon en parallèle a été séché dans un four à une température de 50°C. Le choix de cette température est justifié par la présence d'une quantité importante des sels (halite et gypse), sachant que le sol salin devient sensible à la température en présence de ces sels. La teneur en eau résiduelle est donnée par la formule 3.2 :

$$w_{\text{Rés}} = \frac{P1-P2}{P2} \dots\dots\dots 3.2$$

$w_{\text{Rés}}$  : la teneur en eau résiduelle ;

$P1$  : le poids du sol séché à l'air libre présentant une variation de masse inférieure à 0,1 g en 48 h ;


$P2$  : le poids du sol sec (sol séché dans un four à une température de 50 °C).

Le remouillage des échantillons restants a été réalisé par la méthode de saturation sous vide (Tang et al., 2020; Alshihabi, 2002). L'échantillon du sol séché a été enveloppé dans du papier filtre Whatman grade 1, référence 1001-150 (Figure.3.13). Ce papier est caractérisé par une filtration moyenne ce qui permet à l'eau et les sels solubles à s'infiltrer facilement et empêcher en même temps la filtration des particules du sol. Les spécifications techniques de ce papier sont données dans le tableau 3.2. Deux pierres poreuses ont été placées sur les surfaces inférieure et supérieure de l'échantillon (Figure.3.13), puis l'ensemble de l'échantillon a été mis dans un moule rigide et immergé dans un récipient d'eau. Afin d'assurer que l'eau circule autour de l'ensemble de l'échantillon et le sature, une pompe à vide a été connectée à la partie supérieure de l'échantillon comme le montre la Figure 3.14. Après cette étape de saturation des échantillons ont été prélevés ayant une teneur en eau mesurée de  $16 \pm 1\%$ .

La deuxième étape de séchage a été ensuite répétée en utilisant la même procédure. En répétant les procédures ci-dessus, un total de quatre cycles D-W a été appliqué aux échantillons. Pour chaque étape de séchage, trois échantillons ont été prélevés à différentes

valeurs de teneur en eau ( $w=7\%$ ,  $w_{opn}=11,4\%$ , et  $w=13\%$ ) pour des essais UCS (Figure 3.15) et ce afin d'étudier l'effet des cycles D-W sur la UCS.

Tableau 3.2:Spécifications du papier filtre Whatman grade 1.

	Vitesse de filtration / aspect	moyenne
	Rétention	11 $\mu\text{m}$
	Epaisseur	180 $\mu\text{m}$
	Grammage	87 $\text{g/m}^2$
	Diamètre	150 mm

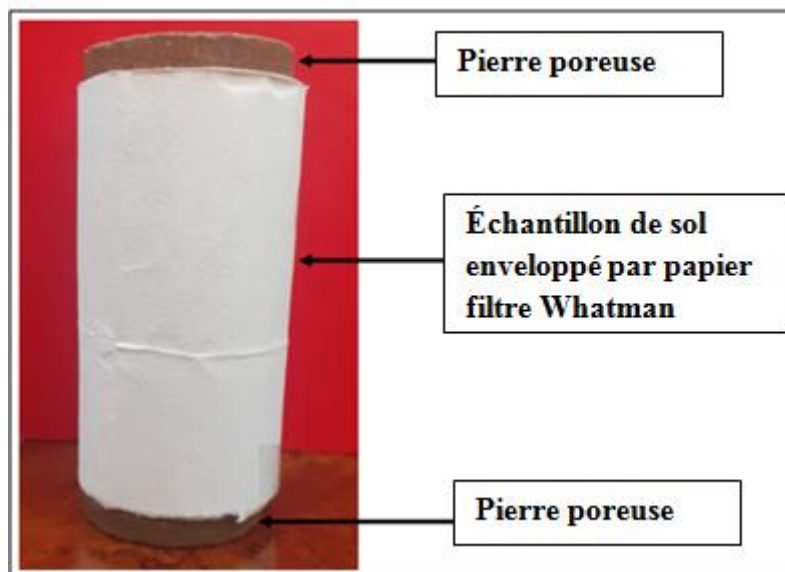


Figure 3.13:Échantillon de sol enveloppé dans du papier filtre Whatman grade 1 avec deux pierres poreuses.

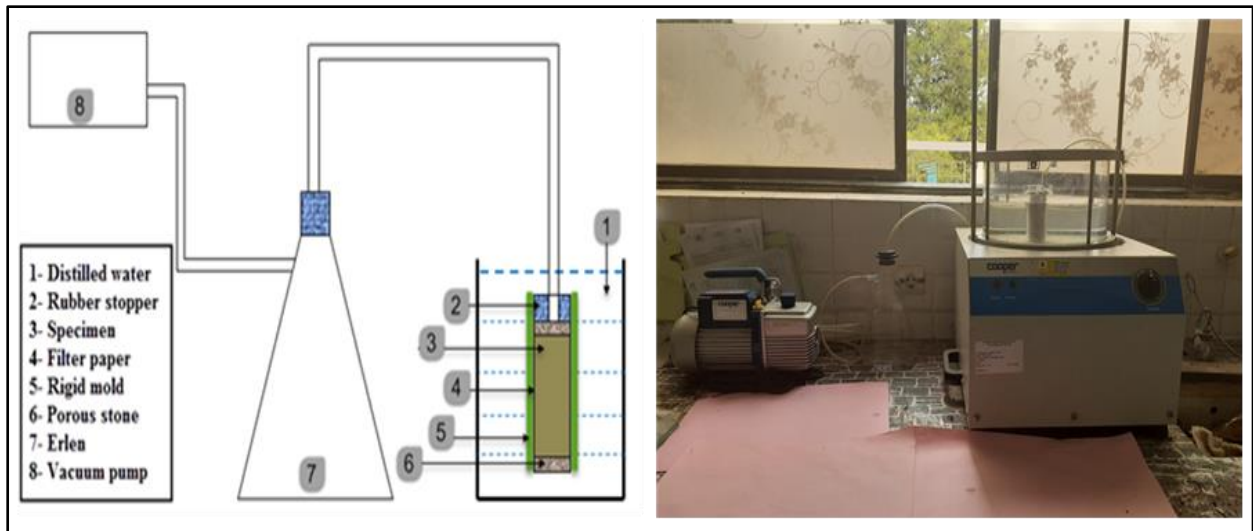


Figure 3.14: Dispositif utilisé pour la saturation des échantillons de sol.

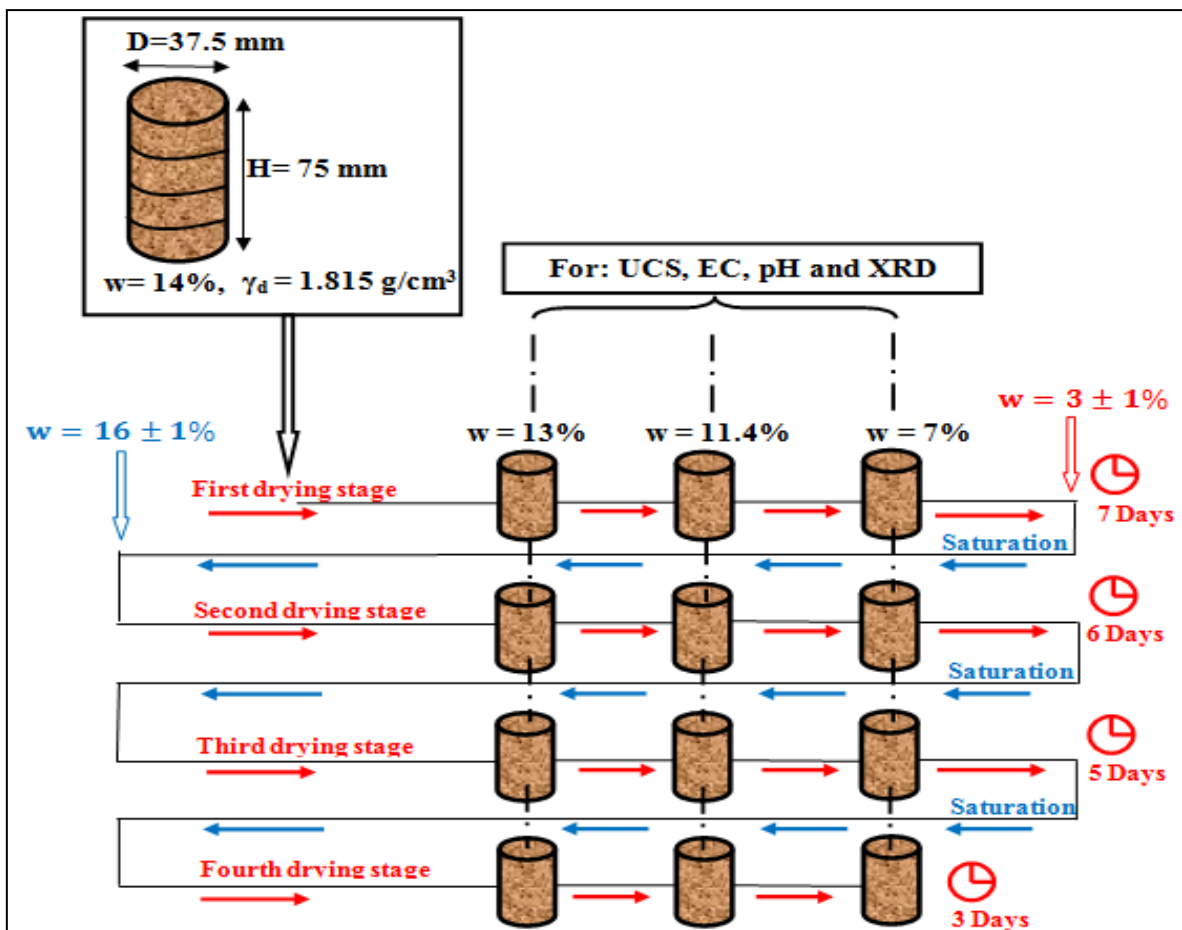


Figure 3.15: Cycles de séchage-mouillage.

### 3.4.3 Essais de compression non confinée

Les essais de compression non confinée, ont été réalisés selon la norme **NF P94-077 (1997)**. L'éprouvette du sol séchée à la teneur en eau choisie, est placée sur le plateau d'une presse à chargement axial (Figure 3.16). Après la mise en contact des deux plateaux de la presse avec l'éprouvette, le chargement axial est appliqué avec une vitesse de déplacement constante de 1mm/min, ce qui correspond à 1.33% de la hauteur de l'éprouvette par minute. La force maximale de rupture est déterminée à partir de la courbe force-déformation axiale. La résistance à la compression non confinée (*UCS*) est la contrainte à la rupture résultant du rapport entre la force de rupture (*F*) et la section transversale moyenne de l'éprouvette (*A*) :

$$UCS = \frac{F}{A} \dots\dots\dots 3.3$$

$$A = \frac{A_0}{1-\varepsilon_l} \dots\dots\dots 3.4$$

Avec  $A_0$ : la surface de section transversale moyenne initiale ;  $\varepsilon_l$ : la déformation axiale pour la force appliquée.

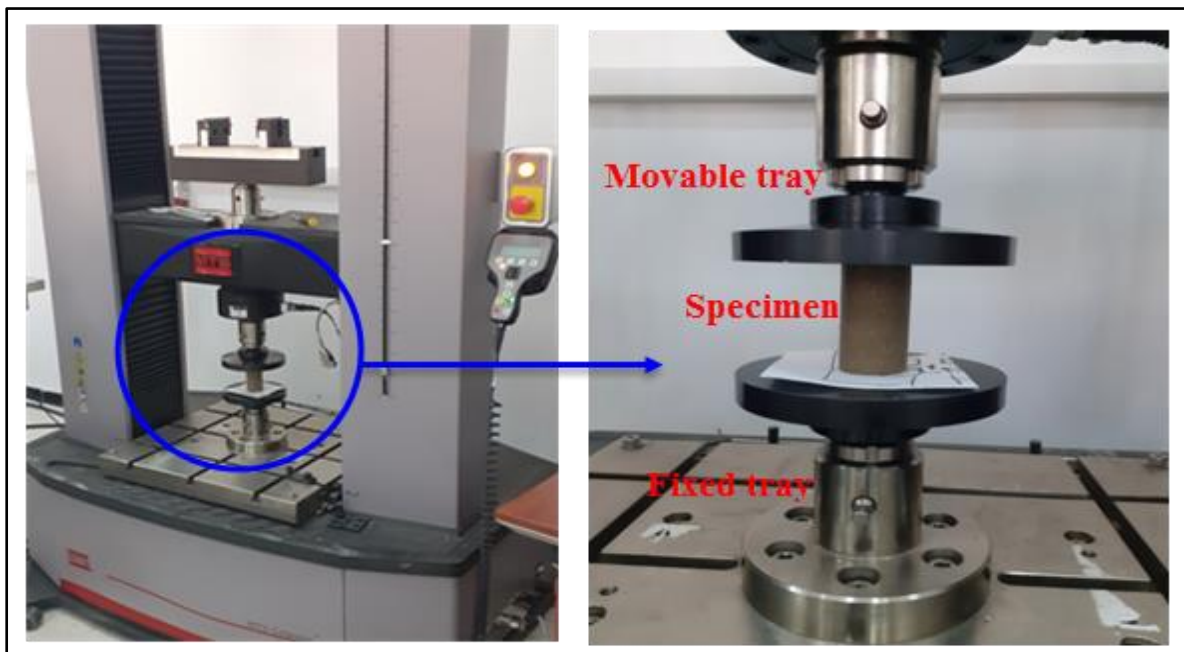


Figure 3.16: Presse utilisée pour la compression simple (marque MTS).

### 3.5 Essais de cisaillement, succion et d'effondrement sous l'effet des cycles hydrique de séchage-humidification

#### 3.5.1 Préparation des éprouvettes

Pour préparer les éprouvettes destinées aux essais de cisaillement direct, essais de succion et essais d'effondrement, le sol sec a été mélangé avec de l'eau pour obtenir une valeur de teneur en eau  $w$  proche de la saturation  $w = 14\%$  (soit un degré de saturation,  $S_r = 93\%$ ). Pour la confection des éprouvettes du sol, la méthode de confection décrite en détail dans [Soltani et al. \(2020\)](#) a été utilisée. A cet effet, le sol ainsi préparé a été placé dans un moule de 60 mm diamètre intérieur et de 20 mm d'hauteur est compacté en trois couches de même hauteur avec un compactage statique à une vitesse de 1.27 mm/min en utilisant la presse CBR. La densité sèche visée est de  $1.815 \text{ g/cm}^3$ , soit 95% de l'optimum Proctor normal  $\gamma_{\text{dopt}}$ . Les éprouvettes du sol préparées ont été pesées sur une balance de précision de 0.01g et leurs dimension ont été mesurées à l'aide d'un pied à coulisse et ce pour contrôler la variation de masse et de volume au cours de chaque cycle de séchage.



Figure 3.17: Pesage et mesure des dimensions des éprouvettes confectionnées.

#### 3.5.2 Cycles de séchage-mouillage (D-W)

Pour simuler le temps important de séchage qui se réalise sur le terrain le séchage naturel à l'aire libre est adopté ([Tang et al. 2020](#)). A cet effet et au cours de la première étape de séchage, les échantillons préparés ont été placés sur une table de laboratoire à une température de  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  pour les sécher. Une série de teneurs en eau de  $w = 13\%$ ,  $w = 11.4\%$ ,  $w = 7\%$  et  $w = 4\%$  a été fixée pour contrôler le processus de séchage. Les teneurs en eau ont été calculées à partir des variations de la masse de l'échantillon dues à la perte d'humidité. Dans cette première étape de séchage et lorsque les teneurs en eau visées ont été atteintes des

échantillons parallèles ont été collectés et stockés dans des sacs en plastique pendant une semaine et ce pour permettre à l'eau de se répartir uniformément dans l'éprouvette du sol. Ces échantillons seront destinés aux essais d'effondrement, de cisaillement et de la succion. Les échantillons restants ont été ensuite séchés jusqu'au niveau de la teneur en eau résiduelle de  $3 \pm 1\%$  où la variation de masse est inférieure à 0,1 g durant 48 h. Pour entamer l'étape suivante de saturation, l'échantillon du sol séché a été enveloppé dans du papier filtre Whatman grade 1, référence 1001-150 (Figure 3.17). Ce papier est caractérisé par une filtration moyenne ce qui permet à l'eau et les sels solubles à s'infiltrer facilement et empêcher en même temps la filtration des particules du sol. Deux pierres poreuses ont été placées sur les surfaces inférieure et supérieure de l'échantillon (Figure 3.17), l'ensemble est placé dans une cellule oedométrique modifiée décrite en détail dans [Al-Amoudi et Abduljawad \(1995\)](#), puis imbibé d'eau distillée sous une faible pression (1KPa) pendant 24h, jusqu'à la saturation. Après saturation, les échantillons ont été prélevés avec une teneur en eau mesurée de  $22 \pm 1\%$ . Pour recommencer la deuxième étape de séchage, on a utilisé la même procédure comme auparavant. En répétant les procédures ci-dessus, un total de trois cycles de séchage-humidification, ont été appliqués aux échantillons.

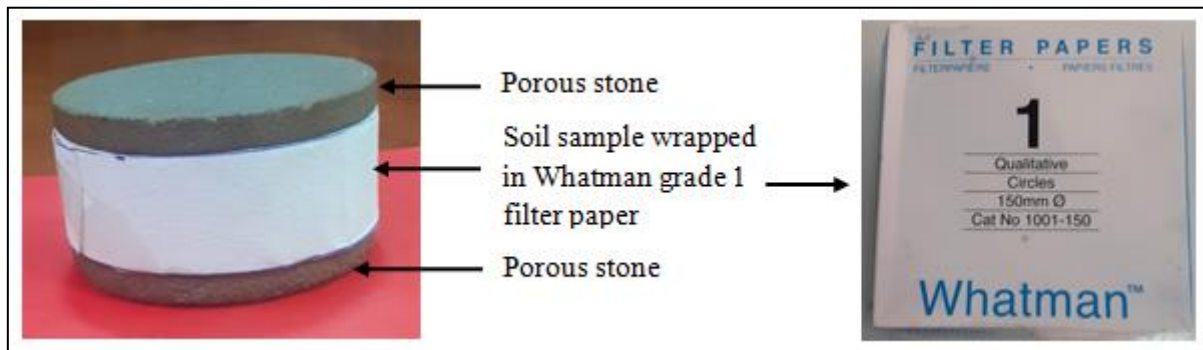


Figure 3.18: Échantillon de sol enveloppé dans du papier filtre Whatman grade 1 avec deux pierres poreuses.

### 3.5.3 Essais oedométriques

On note que les échantillons de sol confectionnés dans un moule de 60 mm de diamètre intérieur et 20 mm d'hauteur, ont subi pour chaque cycle de séchage des retraits légères et pour avoir une déformation transversale nulle lors de l'essai oedométrique comme stipule la norme d'essai [XP P94-090-1 \(1997\)](#), l'échantillon de sol séché à la teneur en eau visée a été carotté à l'aide d'un anneau oedométrique de 50 mm de diamètre et 19 mm de hauteur. Le carottage a été réalisé par taillage latéral à l'aide d'un coteau puis on procède à l'enfoncement de l'anneau en utilisant un dispositif spécial comme le montre la Figure 3.18. Pour étudier l'effondrement des sols non saturés deux méthodes sont envisageables, celle de l'essai oedométrique simple et celle de l'essai oedométrique

double (Jennings and Knight, 1975). Selon Medero et al. (2010) et pour une contrainte de 200kPa les deux méthodes donnent des résultats pratiquement identiques. Dans cette étude la méthode de l'essai oedométrique double a été adoptée pour déterminer le potentiel d'effondrement (Cp). Cette méthode consiste à placer deux échantillons de sol séchés à la teneur en eau visée dans deux œdomètres, le premier est inondé d'eau sous des contraintes verticales jusqu'à la stabilisation de la déformation (Da Silva et al., 2017 ; Ziani et al. 2019) et le second est chargé à sec c'est-à-dire à la teneur en eau visée jusqu'à la fin du chargement déchargement. Néanmoins, on note que pendant l'essai la partie supérieure de la cellule œdométrique où se trouve l'échantillon a été recouverte par une vaseline afin d'éviter une évaporation excessive qui pouvait entraîner la diminution de la teneur en eau conduisant à des résultats erronés (Wang et al. 2019). Le potentiel d'effondrement (Cp) est calculé par la formule de Howayek et al. (2011).

$$Cp = \frac{(e_{dry} - e_{sat})}{1 + e_0} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \dots \dots \dots 3.5$$

$$\Delta e = e_{dry} - e_{sat} \dots \dots \dots 3.6$$

Où  $e_0$  = Indice de vide initial

$e_{sat}$  = Indice de vide de saturation

$e_{dry}$  = Indice de vide sec



Figure 3.19: Étapes du carottage d'un échantillon du sol pour le test d'oedomètre.

### 3.5.4 Essais de cisaillements directs

Pour déterminer les paramètres de la résistance au cisaillement du sol sous l'effet des cycles D-W, des essais de cisaillement direct ont été réalisés selon la norme (ASTM D3080) sur des échantillons de sol confectionnés dans le moule de 60 mm de diamètre et 20 mm d'hauteur. A cet effet pour chaque cycle de séchage et pour chaque teneur en eau visée la surface réelle de l'échantillon qui a subi un léger retrait a été déterminée par la mesure du diamètre de l'échantillon à l'aide d'un pied à coulisse, puis il a été placé dans l'appareil de cisaillement direct avec les capteurs de déplacement et des charges. Ces capteurs sont installés et connectés à l'enregistreur des données. Ensuite, la contrainte normale a été appliquée sur l'échantillon, le boulon fixe a été retiré et l'essai de cisaillement direct a commencé instantanément. Les contraintes normales appliquées pour chaque essai sont 100, 200 et 300 kPa.



Figure 3.20:Appareil de cisaillement direct.

### 3.5.5 Essai de succion

Dans cette étude la méthode du papier filtre Whatman No. 42 a été utilisée pour mesurer la succion matricielle et totale selon la norme ASTM D5298-10 (2010). La succion osmotique est déterminée par différence entre la succion totale et la succion matricielle (Ying et al., 2022). La méthode du papier filtre est une technique de laboratoire simple et économique (Bulut et

al., 2001). Elle permet de mesurer une large gamme de succion, jusqu'à 100 MPa (Zielinski et al. 2011). Pour la mesure de la succion matricielle, la méthode consiste à placer trois papiers filtres empilés entre les deux échantillons de sol après avoir séché ces trois papiers filtres dans un four pendant 24h. Le papier filtre central objet de la mesure de la succion matricielle est présente généralement un diamètre légèrement petit par rapport aux deux autres papiers pour éviter le contact direct avec les deux échantillons de sol. L'ensemble des échantillons et papiers filtres a été déposé dans un bocal en verre. Concernant, la mesure de la succion totale deux papiers filtres ont été posés sur les deux échantillons de sol par l'intermédiaire d'un support (Figure 3.19), puis le bocal en verre a été bien fermé et enveloppé dans un papier filme en plastique et stocké dans une chambre humide avec une humidité relative de 100% et une température de 20 °C pendant 15 jours pour atteindre un équilibre hydrique entre le sol et les papiers filtres. Après cette étape les teneurs en eau du papier filtre centrale et les deux autres ont été mesurées et transférées en succion matricielle et totale en utilisant les deux équations suivantes de la courbe d'étalonnage du papier filtre Whatman No. 42.

$$\log_{10} \psi = 5.327 - 0.0779w_f (w_f \leq 45.3\%) \dots\dots\dots 3.7$$

$$\log_{10} \psi = 2.412 - 0.0135w_f (w_f > 45.3\%) \dots\dots\dots 3.8$$

Où  $\psi$  est la succion matricielle ou totale de l'échantillon de sol (kPa) ;  $w_f$  est la teneur en eau du papier filtre (%).

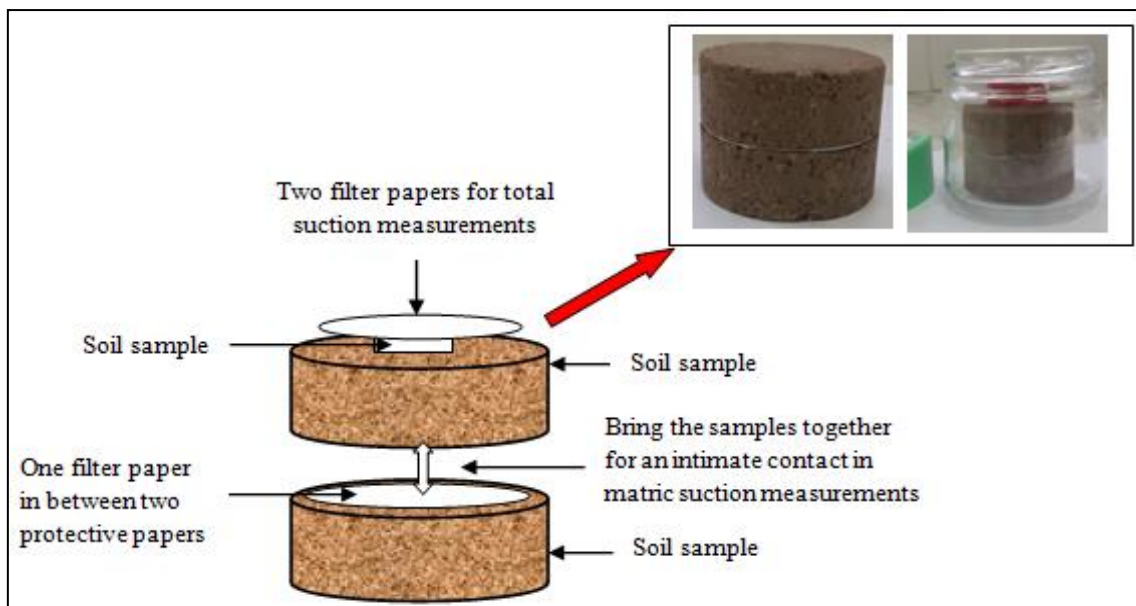


Figure 3.21: Principe de la mesure de la succion totale et matricielle par la méthode du papier filtre.

### 3.6 Conclusion

Les sols sebkha sont des sols particuliers par rapport aux autres sols à cause de la présence des sels. Aussi d'après la morphologie du sol sebkha d'Ain M'lila on note qu'il s'agit d'un sol hétérogène contenant des nids et bandes de sel ainsi que des cristaux ce qui rend difficile d'acquérir des échantillons de sol représentatifs pour les essais de laboratoire. Donc afin d'obtenir des échantillons représentatifs pour les différents types d'essais en laboratoire, l'opération d'homogénéisation des échantillons de sol est nécessaire. Les essais de caractérisation chimique, minéralogique, thermique et géotechnique ont été réalisés selon des normes internationales et des méthodes de recherche publiées précédemment. Pour simuler le temps important de séchage qui se réalise sur le terrain le séchage naturel à l'air libre est adopté pour étudier l'effet des cycles de séchage-mouillage sur le comportement mécanique du sol sebkha d'Ain M'Lila.

## **CHAPITRE .4**

# **ANALYSE, DISCUSSION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS**

## 4.1 Introduction

Les résultats obtenus à partir des essais réalisés, illustrent clairement le comportement mécanique et chimique des sols salés de la sebkha d'Ain M'Lila sous les effets des cycles de séchage-mouillage. Donc les résultats des essais de caractérisation géotechnique, chimique, minéralogique et thermique sont présentés dans ce chapitre.

Par ailleurs une grande partie de ce chapitre est consacrée à l'étude de l'influence des cycles de séchage mouillage sur la salinité et le comportement mécanique à savoir la résistance à la compression non confinée, la succion, l'effondrabilité et la résistance au cisaillement. Des relations entre la salinité, le nombre de cycles et les paramètres du comportement mécanique, ont été discutées. Ce chapitre a pour but aussi d'illustrer la microstructure de ce type de sol sous l'effet des cycles séchage-mouillage en utilisant la technique de microscope électronique à balayage (MEB).

## 4.2 Caractérisation géotechnique

### 4.2.1 Analyse granulométrique

La figure 4.1, présente la courbe granulométrique du sol sebkha d'Ain M'Lila. Cette courbe indique la présence de 57% de limon, 36% de sable, 4% de gravier et 3% d'argile. L'application de ces résultats sur le triangle des textures de l'[USDA \(1987\)](#) montre que le sol est classé en (silt loam). Les valeurs des coefficients d'uniformité et de courbure sont respectivement 10 et 0.45, montrent qu'on est présence d'une granulométrie semi étalée.

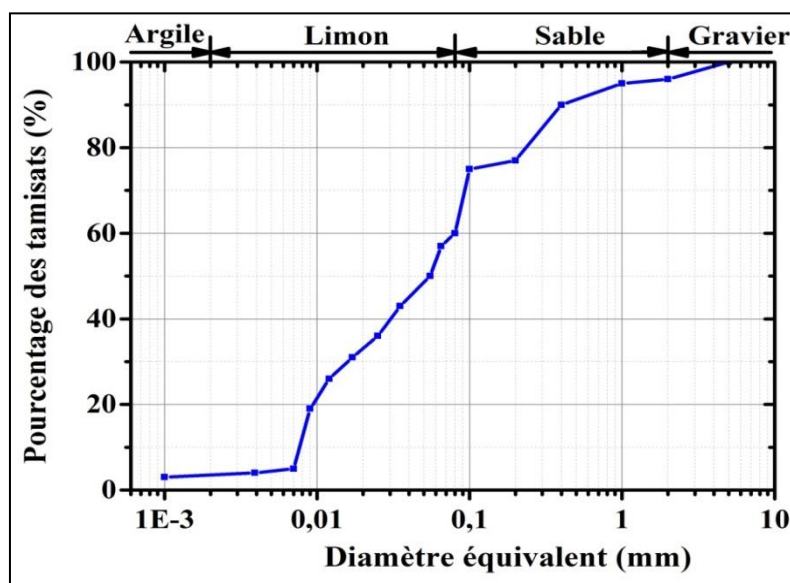


Figure 4.1: Courbe granulométrique du sol sebkha d'Ain M'Lila.

### 4.2.2 Essai du Proctor normal

La figure 4.2, présente la courbe de compactage obtenue lors de l'essai Proctor normal effectué sur le sol sebkha d'Ain M'Lila. Elle montre que la masse volumique sèche maximale  $\gamma_{dOPN} = 1.911 \text{ t/m}^3$  correspondant à une teneur en eau optimale  $w_{OPN} = 11.4\%$ . A l'optimum Proctor normal, le degré de saturation de ce sol est de **80%**.

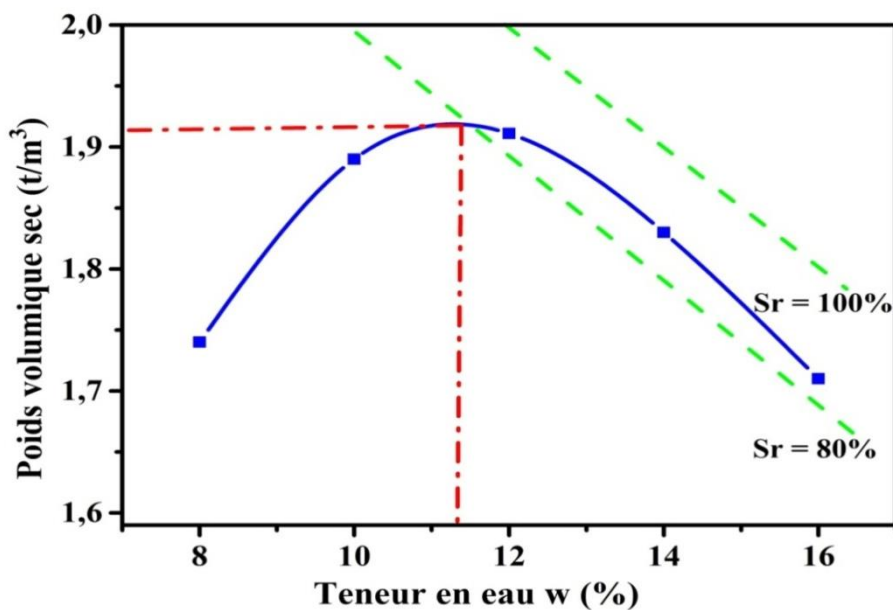


Figure 4.2: Courbe de Proctor normal.

### 4.2.3 Limites d'Atterberg

Les résultats des essais des limites d'Atterberg, ont montré que ce matériau est classé dans la catégorie des limons sableux. Avec un indice de plasticité  $I_p = 16.58\%$  et limite de liquidité  $W_L = 32.50\%$ , ce sol est classé selon le diagramme de Casagrande (Figure 4.3) dans la famille des argiles peu plastiques. Il s'agit d'un sol de type **A2** selon la classification du Guide des Techniques Routières (**GTR**) (sables fins argileux, limons).

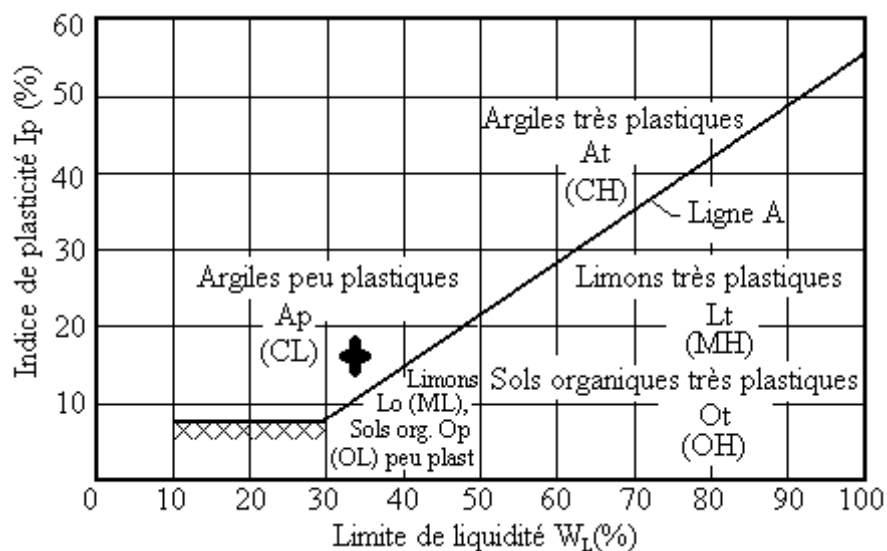


Figure 4.3: Position du sol testé dans l'abaque de Casagrande.

Les principales caractéristiques du sol sebkha sont données dans le Tableau 4.1.

 Tableau IV.1: Caractérisation géotechnique du sol sebkha ( $\gamma_s = 2.7 \text{ g/cm}^3$ ).

Paramètres du sol	Méthodes	Valeurs
<b>Cas : sol homogénéisé tamisé à 5 mm</b>		
Teneur en eau optimale $w_{opt}$ (%)	(NF P94-093, 1999)	<b>11.4</b>
Densité sèche maximale $\gamma_{d, opt}$ ( $\text{g/cm}^3$ )		<b>1.911</b>
Degré de saturation à l'optimum Proctor $S_r$ (%)	$S_r = w/w_{sat} = w \times \left( \frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)^{-1}$	<b>76</b>
Teneur en eau à la saturation $w_{sat}$ (%)	$w_{sat} = w/S_r$	<b>15</b>
Limite de liquidité $W_L$ (%)	(NF P94-051, 1993)	<b>32.50</b>
Limite de plasticité $W_P$ (%)		<b>15.91</b>
Indice de plasticité $I_p$ (%)		<b>16.58</b>
$\leq 2 \text{ mm}$ fraction (%)	(NF P94-056, 1996)	<b>96</b>
$\leq 80 \mu\text{m}$ fraction (%)		<b>68</b>
$\leq 2 \mu\text{m}$ fraction (%)	(NF P94-057, 1992)	<b>3</b>
Classification GTR	(NF P 11-300, 1992)	<b>A2</b>

### 4.3 Caractérisation chimique et minéralogique

La composition chimique du sol est présentée dans l'histogramme de la Figure 4.4. Le sol est dominé par la présence de silice ( $\text{SiO}_2$ ), d'oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ), d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et d'oxyde de magnésium ( $\text{MgO}$ ). Cependant, on note aussi la présence de petites quantités d'autres composants chimiques, tels que l'oxyde de sodium ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), le trioxyde de soufre ( $\text{SO}_3$ ), l'oxyde de potassium ( $\text{K}_2\text{O}$ ), et le chlorure ( $\text{Cl}$ ).

Les résultats des analyses chimiques obtenus à partir de l'extrait de la pâte saturée du sol (Tableau 4.2), montrent que la valeur de la conductivité électrique est de 16,3 dS/m. Cette valeur est supérieure à 16 dS/m, donc, selon la classification de salinité proposée par le [US Salinity Laboratory Staff \(1954\)](#), le sol de sebkha d'Ain M'lila est classé comme un sol fortement salin. Les résultats montrent également que ce sol présente des valeurs élevées de teneur en éléments majeurs de  $\text{Cl}^-$  (3585 mg/l) et  $\text{SO}_4^{2-}$  (4704 mg/l), donc selon [Loyer \(1991\)](#), ce sol est classé comme un sol chloruro-sulfaté neutre.

Tableau 4.2: Résultats des analyses chimiques obtenues sur l'extrait de pâte de sol saturé.

ECe (dS.m <sup>-1</sup> )	Salinité (g.l <sup>-1</sup> )	pH	Teneur en sel soluble dans l'extrait de sol (mg.l <sup>-1</sup> )						
			Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>
16.3	10.45	6.53	2323	50	391.2	156.5	10	3585	4704

Le dépouillement du diffractogramme Figure 4.5 révèle que le sol étudié est composé essentiellement de quartz, calcite, gypse, halite et des traces de la kaolinite. Donc on note que les résultats des analyses chimiques obtenus par XRF sont corrélés avec les résultats de XRD. Les valeurs élevées d'oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ) indiquent la présence des minéraux de gypse et de calcite. Par contre, l'existence de la silice ( $\text{SiO}_2$ ) et l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) révèlent l'existence des minéraux de quartz et de la kaolinite, mais la présence d'halite est indiquée par la présence du chlorure. Aussi, on déclare que l'analyse des résultats des essais chimiques obtenus sur l'extrait du sol et les résultats de l'essai granulométrique conduit à un pourcentage élevé de sable et une faible fraction argileuse (Figure 4.1) et une ECE élevée (Tableau 4.2). Par exemple la faible quantité de la fraction argileuse explique l'absence des phases minérales de l'argile mais à part des traces de la kaolinite. Aussi la conductivité électrique élevée explique la présence des phases minérales salines telle que l'halite et le gypse. Ces résultats

confirment les phases minérales indiquées par le rapprochement des résultats de DRX et XRF du sol sebkha étudié. Le sol testé présente des similitudes avec des sols sebkhas étudiés par Abduljawwad and Al-Amoudi (1995); Al-Homidy et al. (2017) .

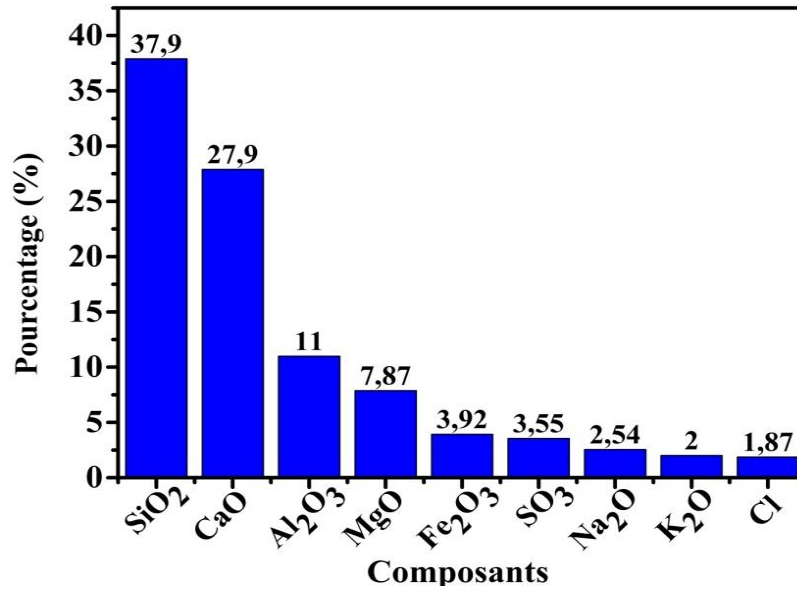


Figure 4.4: Composition chimique obtenue par XRF.

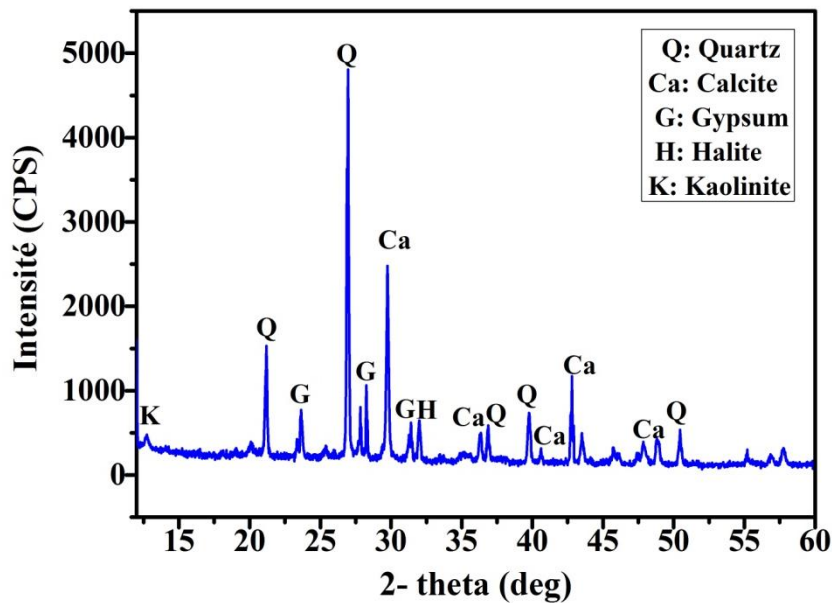


Figure 4.5: Composition minéralogique obtenue par DRX.

#### 4.4 Caractérisation thermique

La composition minéralogique obtenue par le rapprochement des résultats des essais de diffraction des rayons X (DRX) et spectrométrie de fluorescence X (XRF) ont montré que le

sol étudié est composé essentiellement de quartz, calcite, gypse, halite et des traces de la kaolinite. Ces résultats sont en bon accord avec les résultats obtenus par les analyses thermiques de thermogravimétrie (ATG) et thermique différentielle (ATD) (Figure 4.6). Par exemple pour des températures allant de 0 à 200 °C on constate deux pics endothermiques à 90 et 145 °C correspondant respectivement à l'évaporation de l'eau et la déshydratation du gypse (Azam, 2003) accompagnée par une perte de masse de 3.2%. Aussi le pic endothermique à 800 °C correspond à la fusion de l'halite confirmé déjà sur le cristal d'halite. Les analyses thermiques effectuées sur les cristaux d'halite et du gypse (Figure 4.7) confirment la présence de ces derniers dans le sol sebkha. par exemple la Figure. 4.7(a) (cristal de gypse) montre un pic endothermique important à 156.72 °C correspond à la déshydratation du gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) (Azam, 2003) accompagnée d'une perte de masse de 16.5%. Aussi la Figure 4.7(b) (cristal d'halite) montre un pic endothermique important à 800 °C correspond à la fusions de l'halite ( $\text{NaCl}$ ) (Broström et al., 2013), néanmoins un autre petit pic endothermique à 150 °C correspond à la déshydratation du gypse non cristallisé probablement présent dans les morceaux d'halite comme impureté avec des faible quantités comme montre la perte de masse faible de 0.3% .

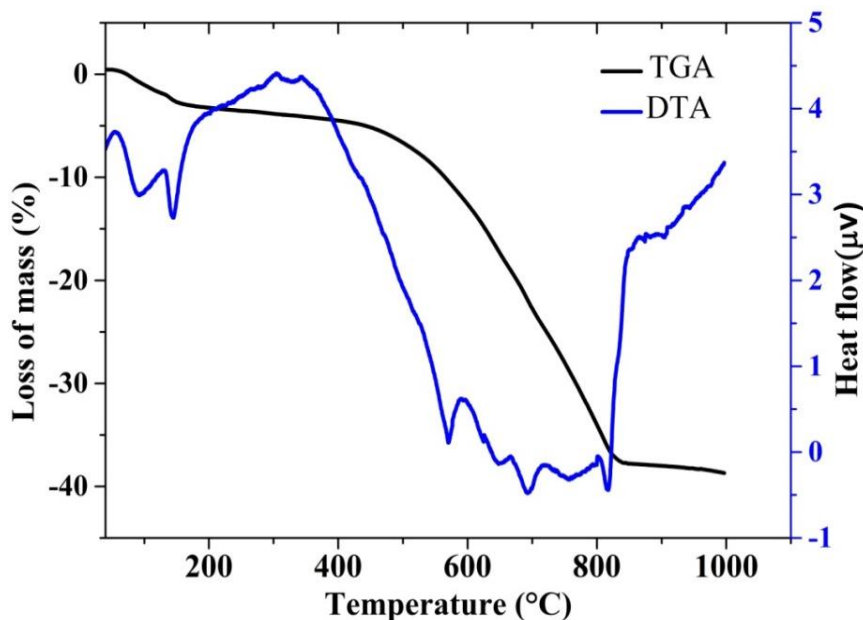


Figure 4.6:Analyse thermique ATG et ATD sur le sol sebkha de Ain M'Lila.

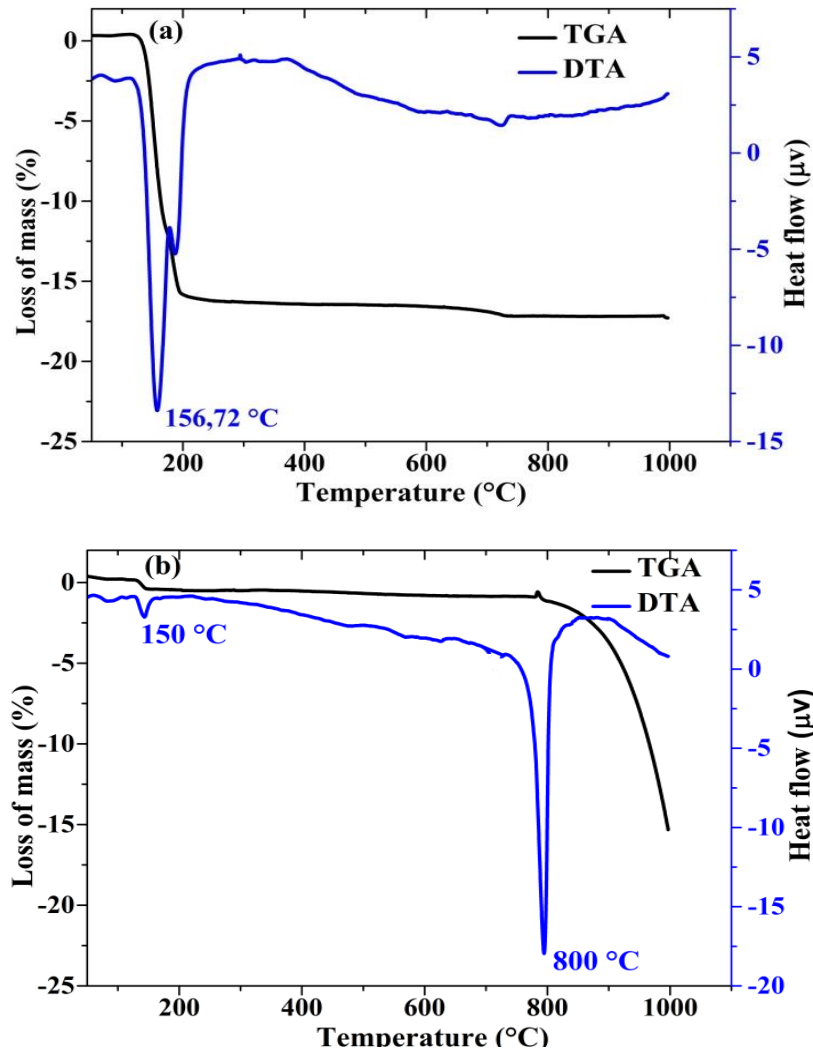


Figure 4.7: Description thermique (ATG et ATD) des cristaux : (a) cristal de gypse ; (b) cristal d'halite.

#### 4.5 Étude de l'effet des cycles de séchage-mouillage sur la salinité du sol.

La Figure 4.8 montre l'évolution de la salinité du sol, exprimée en termes de conductivité électrique (ECe) en fonction du nombre de cycles. Les résultats montrent que la ECe diminue pendant les cycles de D-W, par exemple, les valeurs de EC varient de 16,5 dS.m<sup>-1</sup> à 3,8 dS.m<sup>-1</sup> pour le premier et le quatrième cycle respectivement. Cependant, le pH a montré une légère augmentation, par exemple, après le premier cycle, le pH est de 6,53, alors qu'après le quatrième cycle, la valeur du pH est de 7,04.

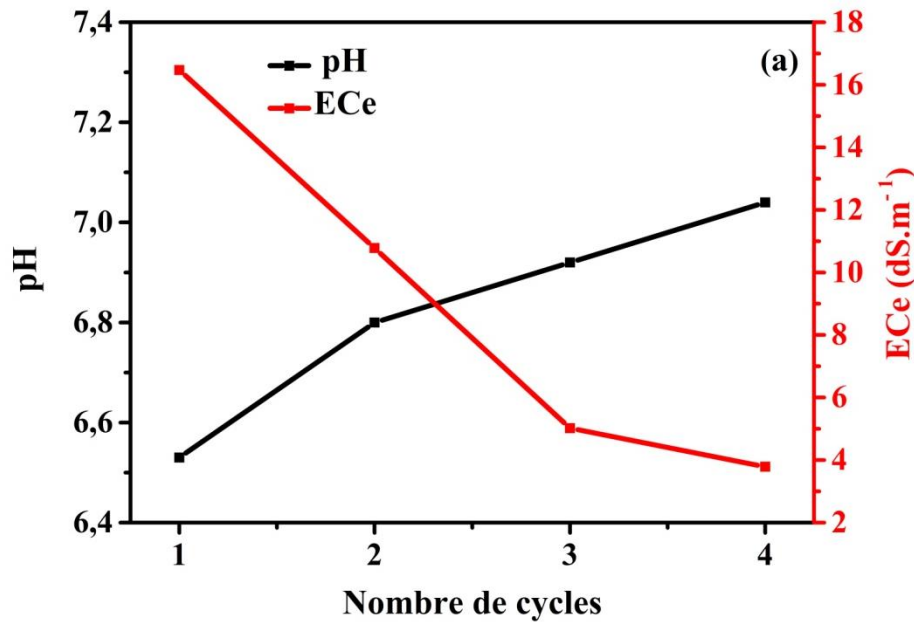


Figure 4.8: Conductivité électrique (ECe) et pH du sol en fonction du nombre de cycles.

Les résultats des analyses DRX, obtenus sur les échantillons de sol soumis aux cycles de D-W, ont illustré la disparition de la phase minérale saline d'halite et la diminution de la phase minérale saline du gypse au quatrième cycle de séchage Figure 4.9(b). Dans le but d'identifier les changements minéralogiques du sol pendant les quatre cycles, on a utilisé le modèle XRD qui cerne la zone de variation entre les deux angles de  $(2\Theta) = 25$  et  $35^\circ$ , (Figure 4.9(c)), ce modèle montre la disparition de deux pics au quatrième cycle, à savoir le premier à  $(2\Theta) = 28,26^\circ$  ( $d \sim 3,15 \text{ \AA}$ ) et le second pic à  $(2\Theta) = 31,9^\circ$  ( $d \sim 2,79 \text{ \AA}$ ) correspondant aux phases minérales du gypse et d'halite respectivement. Les résultats de l'analyse chimique effectuée par la méthode XRF, sur le sol soumis aux quatre cycles de séchage Figure 4.9(a), montrent une variation de la composition chimique par rapport au sol qui n'a pas subi de cycles, on note la diminution significative du chlorure (Cl) et de l'oxyde de sodium ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) et une légère diminution de ( $\text{SO}_3$ ) ce qui explique la disparition de l'halite et la diminution du gypse au quatrième cycle. Pour ce dernier cycle la valeur de la conductivité électrique a diminué à  $3,80 \text{ dS.m}^{-1}$ , comme cette valeur est comprise entre  $2$  et  $4 \text{ dS.m}^{-1}$ , le sol sebkha d'Ain M'lila devient très légèrement salin selon [US Salinity Laboratory Staff \(1954\)](#) donc on peut dire que les cycles de D-W affectent considérablement la salinité du sol, ce dernier passe de l'état fortement salin à l'état faiblement salin après quatre cycles D-W. Cette diminution de salinité a causé une légère augmentation du pH du sol, et comme la valeur de celui-ci, après les quatre cycles, reste dans l'intervalle de  $6,5$  à  $7,5$ , le sol, demeure toujours classé comme

neutre selon la classification de [Baize et al. \(1995\)](#), car le sol étudié est considéré comme étant un sol chloruro-sulfaté neutre selon [Loyer \(1991\)](#), présentant des sels neutres ce qui a conduit à une légère influence du pH.

Cette réduction de la salinité est liée à la lixiviation des sels pendant les événements de saturation. Pendant la première phase de séchage, l'évaporation de la solution concentrée à la surface des échantillons du sol produit une croûte saline (Figure. **4.10(a)**) qui subit un lessivage dû au processus mouillage-séchage. Durant les cycles séchage-mouillage, la croûte saline est dissoute, ce qui explique la diminution de la salinité, déterminée par la conductivité électrique, avec un nombre croissant de cycles. Ainsi, la diminution de la salinité du sol est due à la disparition de l'halite et à la diminution de la teneur en gypse sous l'effet de la lixiviation au cours des cycles séchage-mouillage. Ce comportement peut être corrélé avec des observations de terrain où l'évaporation de solutions concentrées à la surface du sol produit des croûtes salines, un processus connu sous le nom de salinisation ascendante ([Heurteaux and Servant, 1979](#)). Ces croûtes salines sont en contact direct avec la pluie lors des précipitations. Contenant une proportion importante d'ions très solubles, ces croûtes salines sont susceptibles d'être lavées latéralement par le ruissellement de surface Figure **4.10(b)**. Ce processus est appelé désalinisation temporaire ([Heurteaux and Servant, 1979](#)) et provoque le transfert descendant des sels par rapport aux eaux de surface. A travers ces résultats, les effets des cycles de séchage-mouillage ont une influence importante sur la salinité du sol. Par conséquent, et du point de vue pratique les tests au niveau du laboratoire ou sur site doivent être réalisés attentivement pour mieux cerner la teneur et le type de sel contenant dans le sol sebkha puisque l'évaluation des propriétés géotechniques de ces sols demande une bonne analyse chimique et minéralogique du sol.

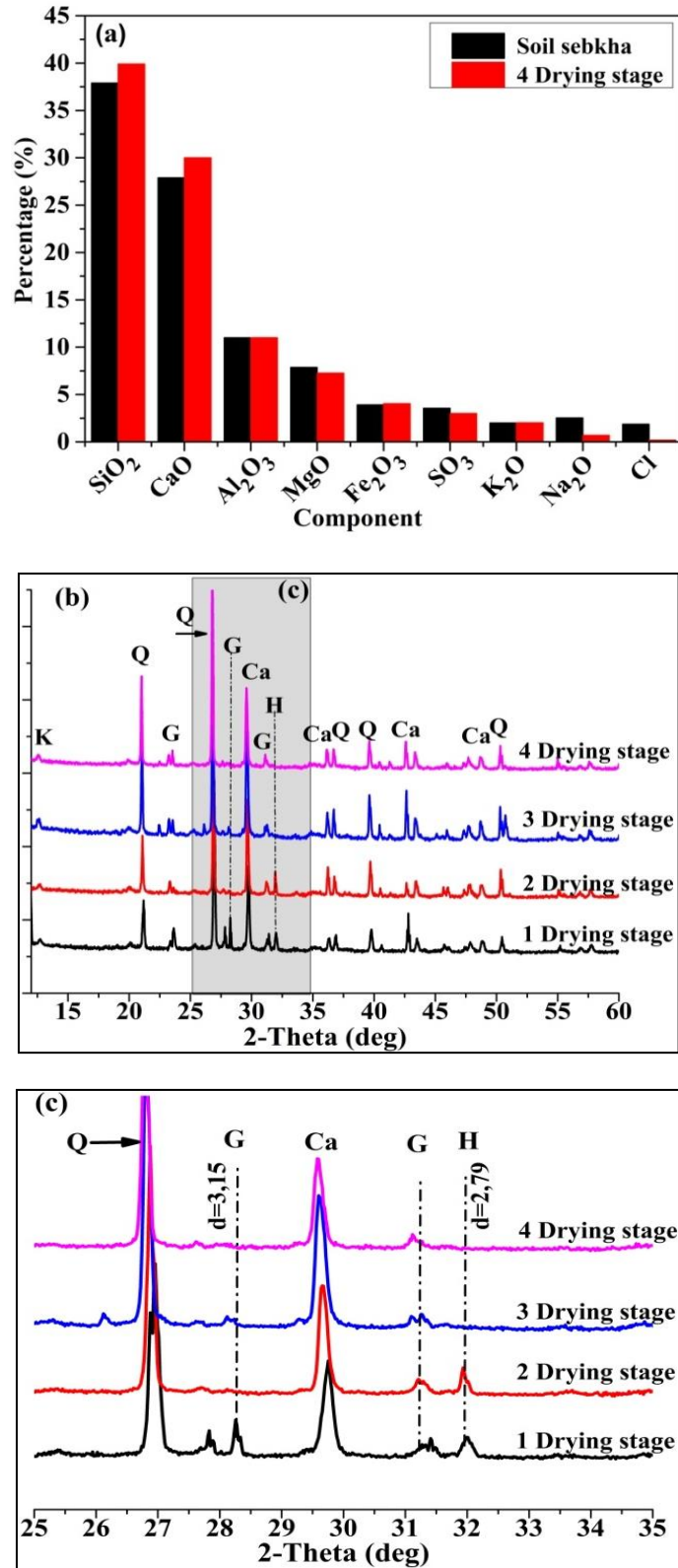


Figure 4.9:(a) Composition chimique du sol sebkha sans et après le 4ème cycle ; (b) Composition minéralogique du sol pendant les 4 cycles entre  $2\theta = 12$  et  $60^\circ$  (b) ; (c) Composition minéralogique du sol pendant les 4 cycles entre  $2\theta = 25$  et  $35^\circ$  (c).

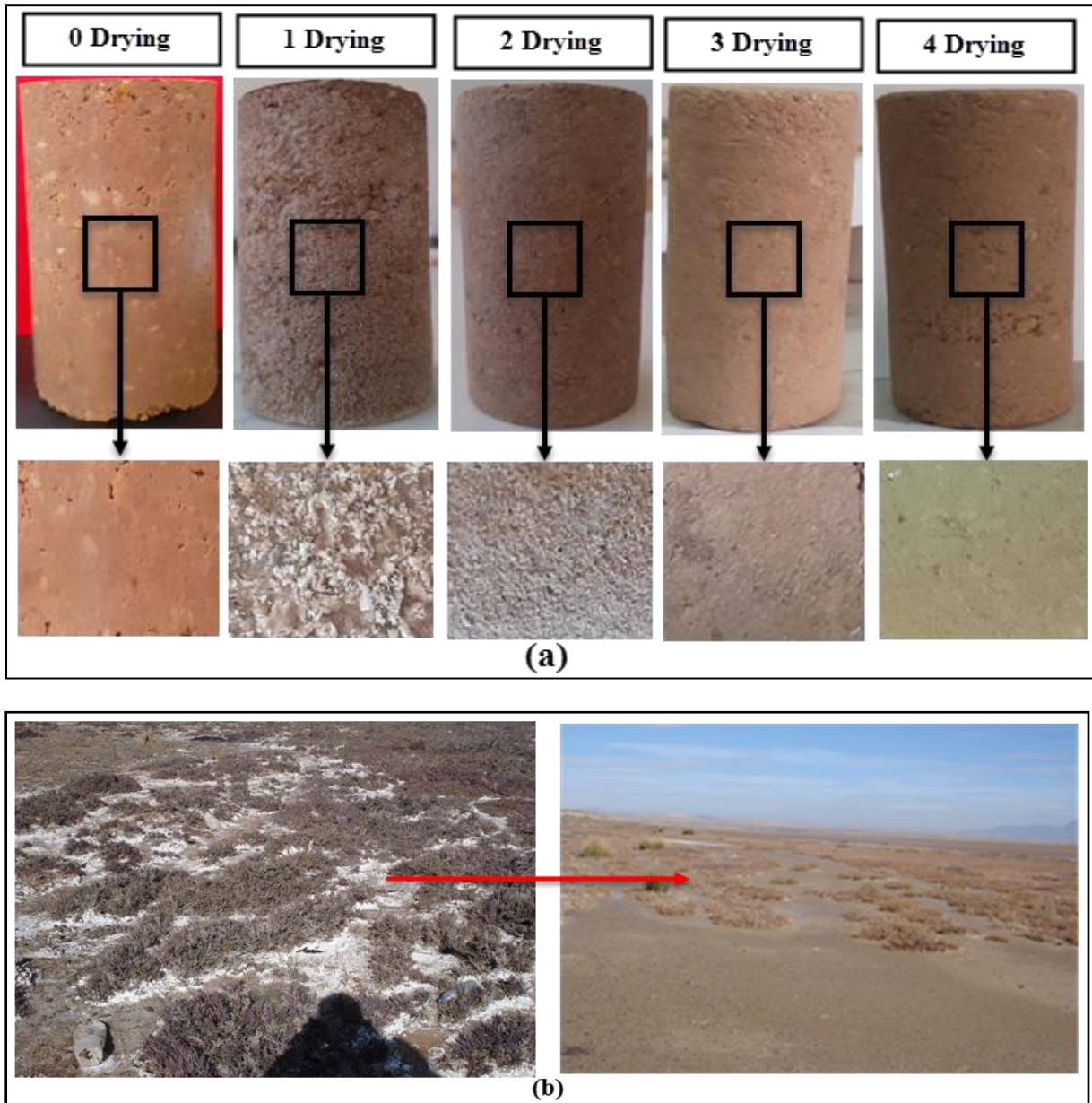
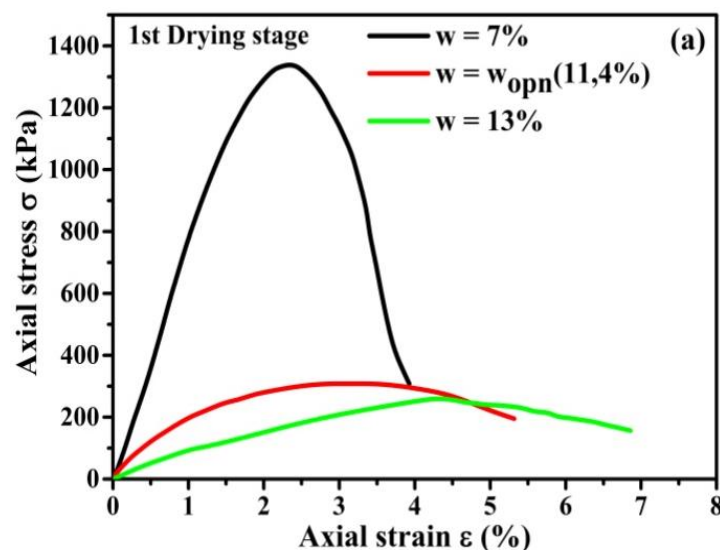


Figure 4.10: État de surface des échantillons de sol en fonction des cycles, (b) État de surface du sebkha avant et après précipitation.

## 4.6 Étude de l'effet des cycles de séchage-mouillage sur la résistance à la compression non confinée.

### 4.6.1 Résistance à la compression non confinée pendant le séchage.

Les courbes de contrainte-déformation obtenues à partir des essais d'UCS, réalisés sur des échantillons de sol sebka soumis aux cycles de D-W à différentes teneurs en eau, sont illustrées dans la Figure 4.11. Le pic de chaque courbe contrainte-déformation est considéré comme étant la résistance à la compression non confinée UCS, tandis que la pente du segment linéaire de cette courbe avant la rupture, représente la rigidité du sol. Les résultats obtenus montrent qu'à chaque cycle de séchage, la pente de chaque courbe de contrainte-déformation avant rupture augmente avec la diminution de la teneur en eau  $w$ . Ce comportement indique que la rigidité initiale de l'échantillon augmente avec l'évaporation de l'eau pendant le séchage. La résistance maximale augmente avec la diminution de la teneur en eau pour chaque cycle de séchage, cependant, la déformation axiale diminue avec la diminution de la teneur en eau. Par exemple, pour le premier cycle de séchage, pour une teneur en eau de  $w = 13\%$ , la résistance maximale est de 263.72 kPa, la déformation correspondante est de  $\varepsilon = 4.28\%$ , cette dernière se réduit à  $\varepsilon = 2.26\%$  pour une teneur en eau de  $w = 7\%$  et une résistance de 1331 kPa. On constate également que le comportement ductile du sol est influencé de manière significative par le processus de séchage, par exemple, pour les deux teneurs en eau de  $w_{\text{opn}} = 11.4\%$  et  $w = 13\%$ , la ductilité du sol augmente avec l'augmentation de la teneur en eau et la contrainte axiale diminue lentement après le pic. Cependant, pour une teneur en eau de  $w = 7\%$ , la ductilité du sol diminue et après le pic, la contrainte diminue soudainement.



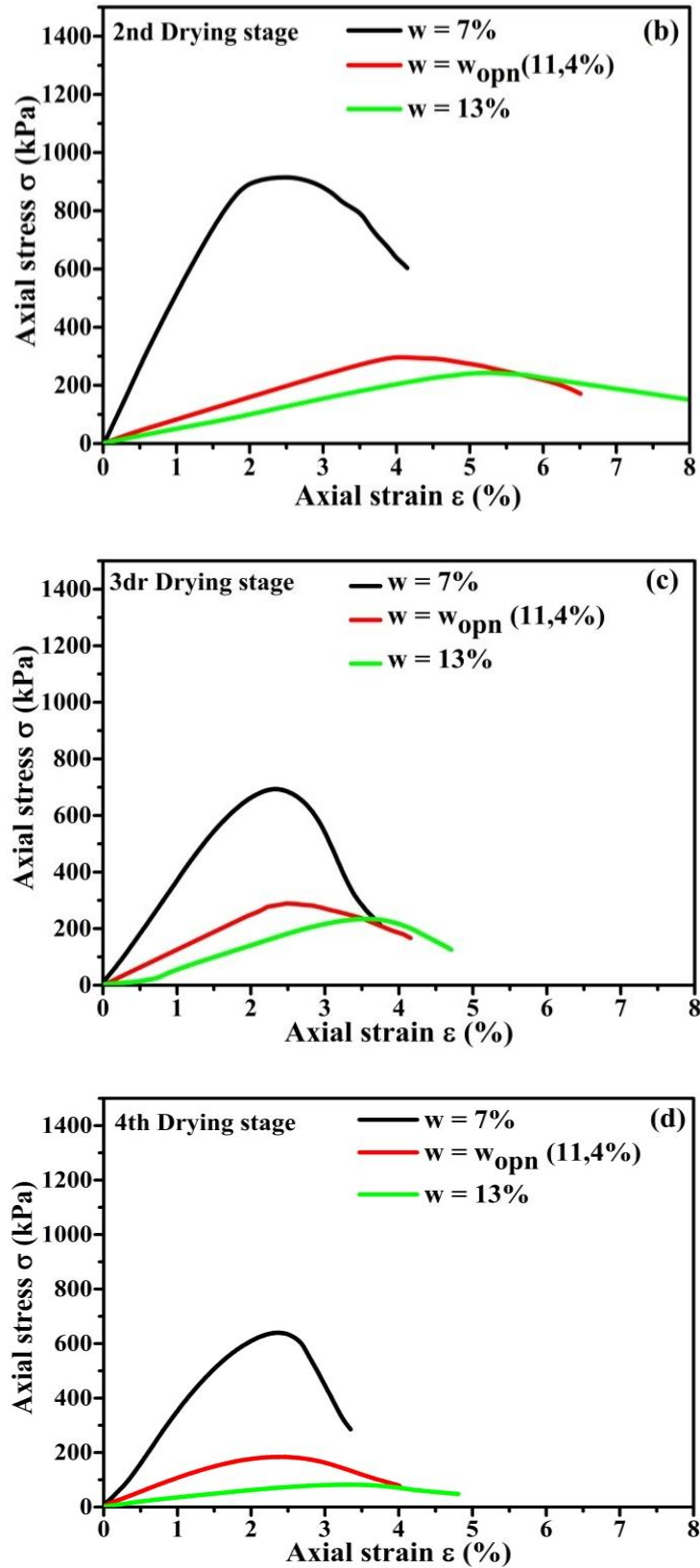


Figure 4.11: Courbes de contrainte-déformation à différentes teneurs en eau à chaque cycle de séchage, (a) 1er cycle de séchage ; (b), (c) et (d) aux 2ème, 3ème et 4ème cycles de séchage respectivement.

Les études menées sur l'effet des cycles de séchage-mouillage sur la résistance à la compression non confinée des sols non saturés [Hoang \(2017\)](#); [Tang et al. \(2020\)](#) montrent également que la résistance augmente avec la diminution de la teneur en eau, ceci est principalement dû au retrait du sol, causé par le réarrangement des particules du sol pendant l'opération de séchage conduit une densification du sol. De manière générale, l'intensité du changement de volume subi au cours des cycles D-W dépend de la nature du sol étudié, cet effet étant particulièrement marqué dans les sols argileux ([Fleureau et al., 1993](#)). Les résultats de caractérisation géotechnique de la présente étude montrent que les échantillons de sol ne contiennent qu'une faible fraction d'argile, ce qui indique que la variation de volume au cours des cycles D-W reste faible (Figure 4.12). Les résultats de caractérisation chimique, montrent que le sol étudié est salin, contenant une quantité importante de sels solubles. Donc dans notre cas, l'augmentation observée de la résistance avec la diminution de la teneur en eau au cours des cycles de séchage est probablement due à la présence de sels solubles dans le sol. Ces sels ont un effet important sur le comportement mécanique des sols, en raison de l'évaporation de l'eau pendant le processus de séchage, sachant que certains sels solubles comme le NaCl, subissent un déplacement vers la surface des échantillons de sol, ce déplacement est engendré par la migration de l'humidité ([Wang et al., 2019](#)). La solution saline qui reste dans le sol se recristallise plus en plus avec le processus de séchage, ce qui provoque des liaisons de cimentation des grains du sol. Par contre les sels immigrés à la surface, se précipitent et recristallisent, ce qui conduit à l'apparition d'une croûte saline sur la surface de l'échantillon (Figure 4.10(a)), ce phénomène entraîne une augmentation de la contrainte de confinement latérale au niveau de la surface du sol. En fin l'augmentation de la UCS avec l'augmentation de séchage traduit par la diminution de la teneur en eau est due d'une part à la cimentation des grains du sol par les sels à l'intérieur de l'échantillon et l'augmentation de la contrainte de confinement latérale en surface d'autre part. Cependant, un comportement similaire peut être observé in-situ, c'est-à-dire lorsque le sol de sebkha est humide à cause de la pluie, la surface de sebkha devienne trop faible en terme de portance donc un véhicule peut s'y enfoncer facilement. Par contre, lorsque le sol est sec, la surface de sebkha devienne dure pouvant supporter un poids d'un véhicule ([Akili and Ahmed, 1983](#); [Al-Homidy et al., 2017](#); [Renfro, 1974](#); [Shehata et al., 1990](#)). En fin la UCS est compromis par l'humidification, donc sur terrain l'utilisation des sols sebkha peut être réalisé comme remblai, mais en les conservant à des teneurs en eau faibles.

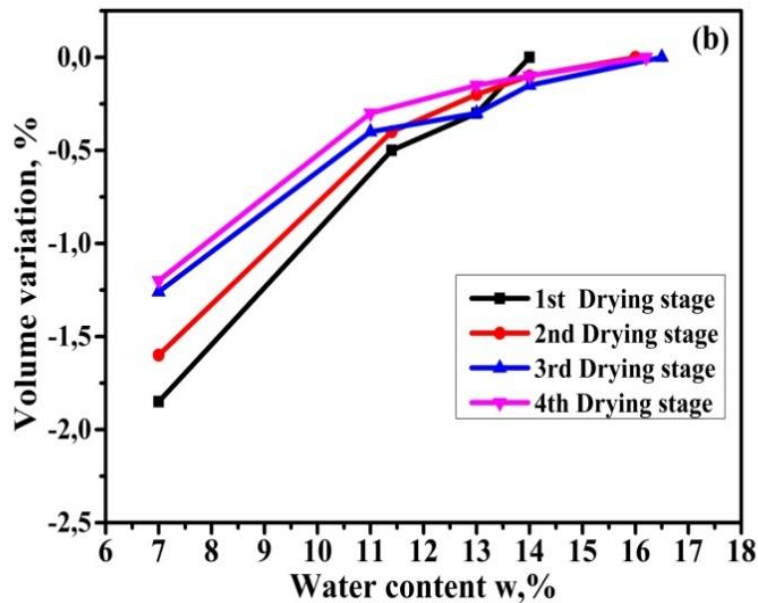


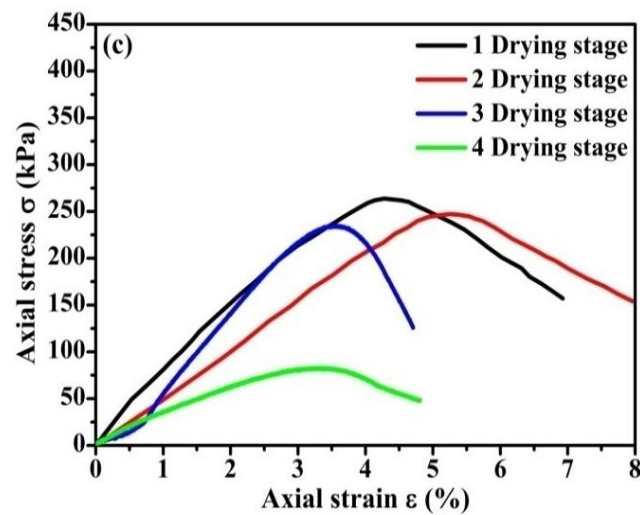
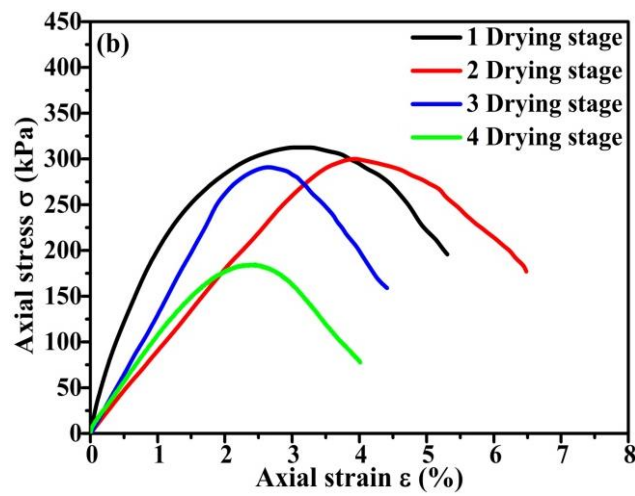
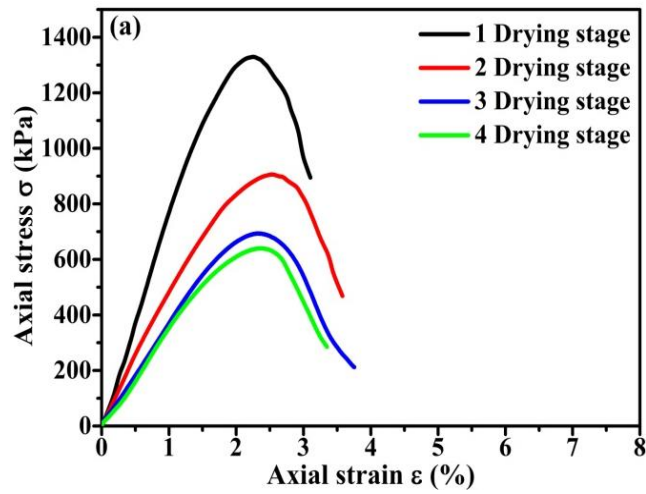
Figure 4.12: Variation de volume pour chaque séchage.

#### 4.6.2 Étude de l'effet de couplage des cycles de séchage-mouillage et de la salinité sur la résistance à la compression non confinée

La Figure 4.13 (a,b et c) montre l'effet des cycles de D-W sur les courbes de contrainte-déformation à différentes teneurs en eau ( $w = 7\%$ ,  $w = w_{\text{opn}}$ , et  $w = 13\%$ ). Ces courbes montrent que pour une valeur de teneur en eau de 7%, la pente de chaque courbe diminue légèrement avec l'augmentation du nombre de cycles de D-W. On observe également une légère augmentation de la valeur de la déformation correspondant à la résistance maximale. Par exemple, la déformation du premier cycle de séchage est de  $\epsilon = 2,26\%$  pour une résistance maximale de 1331kPa ; cette déformation passe à  $\epsilon = 2,35\%$  pour une résistance de 640,49 kPa au quatrième cycle de séchage, soit une augmentation de 4%. Cependant, ce comportement diffère pour  $w = w_{\text{opn}}$  et  $w = 13\%$  ; pour cette dernière valeur de teneur en eau, la rigidité diminue pendant les deux premiers cycles de séchage, mais pour les deux derniers cycles, la rigidité augmente. Ce comportement montre que pour des teneurs en eau faibles ( $w = 7\%$ ) les cycles de D-W influencent légèrement la rigidité et la déformabilité du sol avant la rupture. Par contre, lorsque les teneurs en eau deviennent importantes ( $w = w_{\text{opn}}$  et  $w = 13\%$ ), l'effet des cycles devient significatif.

La Figure 4.13(d) montre l'évolution de la UCS en fonction de la teneur en eau pour chaque cycle de séchage. Pour les trois premiers cycles de séchage, et pour  $w = 13\%$  et  $w = w_{\text{opn}}$ , la UCS augmente légèrement avec la diminution de la teneur en eau. Cependant, les différences de comportement entre  $w = w_{\text{opn}}$  et  $w = 7\%$  sont très importantes. Pour le premier

cycle de séchage, lorsque la teneur en eau  $w = 13\%$  la UCS est de 263.72 kPa, cette dernière augmente à 314.87 kPa lorsque la teneur en eau  $w = w_{\text{opt}}$ , un taux d'augmentation de 31.90 kPa par unité de diminution de la teneur en eau a été déterminé, tandis que lorsque un séchage très élevé est réalisé, on remarque que la résistance à la compression non confinée augmente d'une manière significative, elle passe de 314.87 kPa à 1331 kPa pour une teneur en eau de  $w = 7\%$ , ce qui conduit à un taux d'augmentation de 231 kPa par unité de diminution de la teneur en eau. En plus on constate qu'avec la croissance du nombre de cycle, on remarque une diminution du taux d'augmentation de la résistance avec la diminution de la teneur en eau. À partir du quatrième cycle, on observe que la résistance est inversement proportionnelle à la teneur en eau, notamment, cette variation devienne presque linéaire. De plus, la UCS est influencée par les cycles de D-W. Pour  $w = 7\%$ , l'effet des cycles est très significatif, pendant les trois premiers cycles, on observe une diminution importante de la UCS, cependant, entre le troisième et le quatrième cycle, on n'observe qu'une légère diminution de la résistance, à titre d'exemple on remarque que la UCS passe de 1331 kPa pour le premier cycle à 903.3 kPa pour le second cycle, ce qui signifie que le taux de diminution est 32.1%, ce dernier devient 23% entre le deuxième et le troisième cycle puisque la résistance à la UCS a connu une chute de 903.3 kPa à 695 kPa. Une chute de 695 kPa à 641 kPa a été enregistrée entre le troisième et le quatrième cycle, ce qui signifie une faible diminution de la résistance engendrant un taux de diminution de 7.7%. Un taux de réduction de 51.8% est estimé entre le premier et le quatrième cycle, dont 47.7 % entre le premier et le troisième cycle de séchage. Pour les échantillons ayant des valeurs de teneur en eau plus élevées ( $w = w_{\text{opt}}$  et  $w = 13\%$ ), l'effet des cycles D-W sur la UCS demeure faible. Pour  $w = w_{\text{opt}}$ , la résistance à la UCS est restée stable pendant les trois premiers cycles, avec seulement une légère diminution entre le 3<sup>ème</sup> et le 4<sup>ème</sup> cycle. Ce comportement explique que pour des teneurs en eau faibles  $w = 7\%$  les cycles de D-W ont un effet important sur la UCS. Cet effet devient insignifiant lorsque les teneurs en eau deviennent supérieures ou égale à la teneur en eau optimale ( $w = w_{\text{opt}}$  et  $w = 13\%$ ).



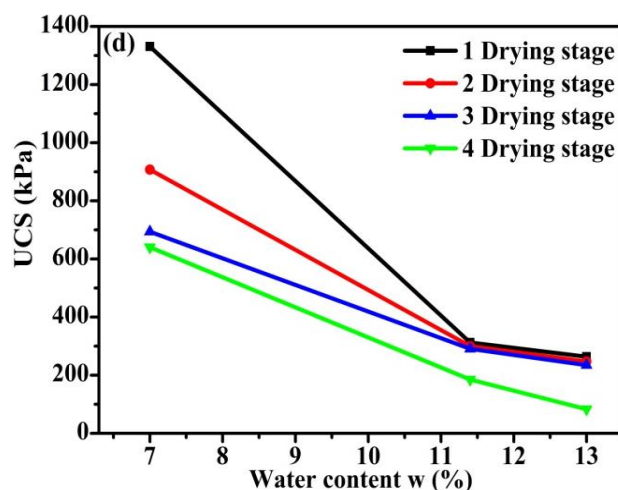


Figure 4.13: Effet des cycles de séchage-mouillage sur les courbes de contrainte-déformation (a) :  $w = 7\%$  ; (b) :  $w = 11,4\%$  ; (c) :  $w = 13\%$  et UCS à différentes teneurs en eau (d).

Ce comportement est en bon accord avec les études expérimentales précédentes, telles que celles de [Hu et al. \(2019\)](#); [Li et al. \(2018\)](#); [Tang et al. \(2020\)](#); [Zhang et al. \(2017\)](#). Ces derniers ont étudié les effets des cycles de D-W sur le comportement des sols, généralement argileux et expansifs, ils ont montré que ce comportement est dû aux changements irréversibles de la structure du sol et à la formation de fissures qui endommagent considérablement la structure du sol. Selon [Li et al. \(2018\)](#) l'humidification d'un sol argileux provoque une structure lâche, variation du volume, et un réarrangement de ces particules. Par contre, le séchage conduit à un retrait inégal provoquant des fissures de la structure du sol. En outre, avec des cycles répétitifs, ces fissures engendrent des macrospores formant des structures en nid d'abeille. Dans le cas de la présente étude, le sol présente une faible teneur en fraction argileuse, ce qui explique, l'absence de formation de fissures au cours des quatre cycles de D-W d'une part (Figure. [4.10\(a\)](#)) et le très faible changement de volume observé au cours des cycles d'autre part (Figure [4.12](#)). Aussi, les résultats de caractérisation minéralogique du sol sebka d'Ain M'lila, montrent la présence de plusieurs phases minérales salines, telle que l'halite (NaCl) et le gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) qui sont considérés comme des composants cimentaires du sol sebka ([Al-Amoudi, 2008](#); [Al-Amoudi et al., 1995](#); [Mohamedzein and Al-Rawas, 2011](#)). Selon [Liu and Zhang \(2014\)](#) la cimentation des grains par la cristallisation des sels dans le sol, est le facteur significatif qui affecte le comportement mécanique des sols salins en générale, notamment la UCS. En outre, on a constaté que la salinité du sol étudié est diminuée considérablement avec l'augmentation du nombre de cycles de D-W. la Figure [4.14\(b\)](#) montre que pour chaque teneur en eau, la UCS

diminue linéairement avec la diminution de la salinité du sol qui est causée par la lixiviation des sels pendant les cycles de D-W, ce phénomène de lixiviation est expliqué par la disparition de la phase minérale saline d'halite ainsi que la diminution de la phase minérale du gypse sachant que ces deux phases sont responsables de la cimentation des grains dans le sol sebkha. Ce mécanisme de diminution de la cimentation est considéré comme facteur important de la diminution de la résistance à la compression non confinée lorsque le nombre de cycle est augmenté. De plus, la disparition de la croûte de sel pendant les cycles D-W provoque une perte de confinement latéral des échantillons de sol. Donc, la diminution de la UCS avec l'augmentation de nombre de cycle de D-W s'explique par le cumul de la perte de contrainte due à la cimentation des grains du sol à l'intérieur de l'échantillon et la perte de la contrainte de confinement latérale. Cependant, pour des valeurs de teneur en eau supérieures ou égales à la teneur en eau optimale (i.e.,  $w = w_{opt}$  et  $w = 13\%$ ) (Figure 4.14 (a et b)), l'effet du couplage des cycles et de la salinité sur la UCS reste faible comparativement à l'effet de la teneur en eau  $w = 7\%$ . Pour cette dernière valeur, on constate que la résistance à la compression non confinée diminue linéairement avec l'augmentation du nombre de cycles ainsi qu'avec la diminution de la salinité du sol. La variation de la UCS en fonction du nombre de cycles D-W et la salinité a conduit à l'obtention de deux courbes sous forme de droite dont le coefficient de corrélation est proche de 1 ( $R^2 = 0.94$  et  $0.98$ ). Cependant pour les deux teneurs en eau de  $w = w_{opt}$  et  $w = 13\%$ , on constate une légère diminution de la UCS avec la l'augmentation de nombre de cycles et la diminution de la salinité du sol, puisque on remarque que la pente des droites illustrant la variation de UCS en fonction de D-W et la salinité respectivement est faible. En résumé, l'effet couplé des cycles de séchage-mouillage et de la salinité devient très significatif pour les sols à faible teneur en eau.

En fin et à travers les résultats obtenus, l'effet des cycles D-W joue un rôle important sur le comportement des sols sebkha. En effet, on pense qu'une partie de dégradations remarquées au niveau de la RN3 sont liées à ces effets de cycles D-W. Donc pour les prochains travaux d'entretien et de modernisation de cet axe routier, les sols sebkha peuvent être utilisés comme remblai ou matériaux de support en les gardants toujours à des teneurs en eau faibles et les protégeant contre la lixiviation, pour ce faire les géotechniciens sont appelés à traiter ces sols par les liants hydrauliques, les renforcés par les géotextiles et les protégés contre la submersion.

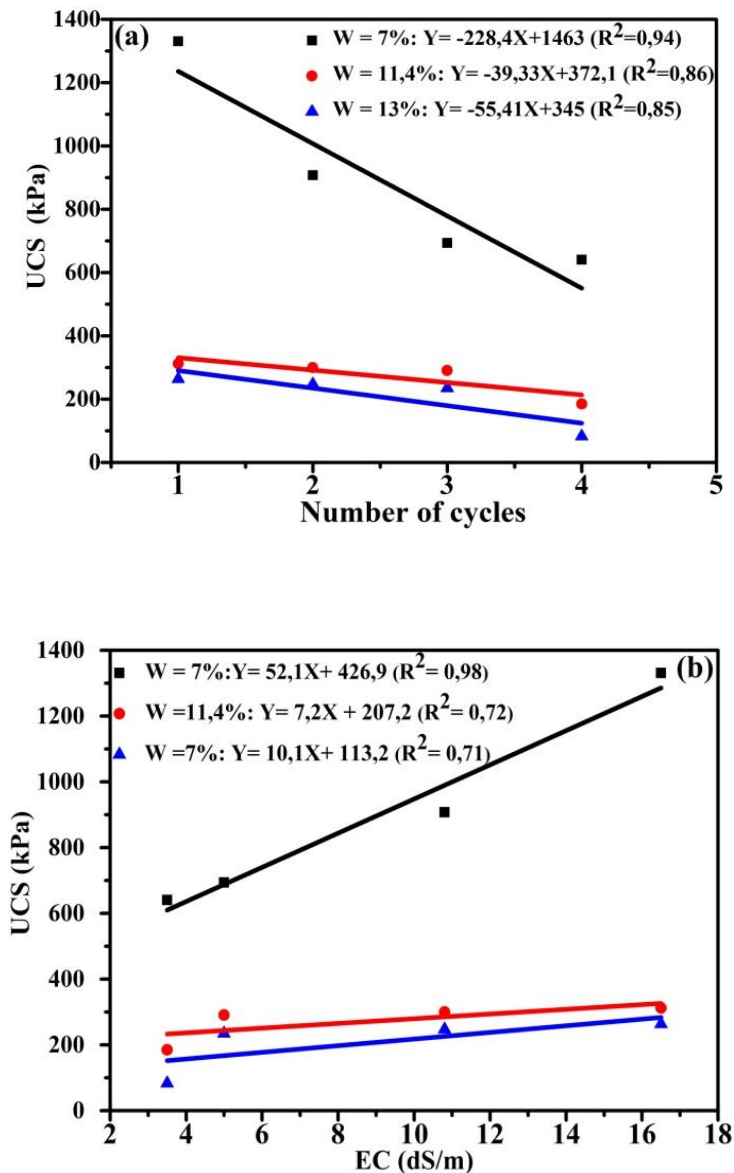


Figure 4.14: L'effet de couplage des cycles D-W et de la salinité sur la UCS : (a) L'effet du nombre de cycles D-W sur les UCS ; (b) l'effet de la salinité sur les UCS.

#### 4.7 Étude de l'effet des cycles de séchage-mouillage sur la succion

Pour chaque cycle de séchage la méthode du papier filtre a été utilisée pour mesurer la variation de la succion total ainsi que matricielle dans le sol salin de sebkha d'Ain M'Lila. La variation de ces deux succions en fonction de la teneur en eau est illustrée sur la Figure 4.15(a). Les résultats obtenus montrent l'influence du séchage sur les deux succions (totale et matricielle). En effet, les deux succions augmentent avec la diminution de la teneur en eau, néanmoins on note que l'influence du séchage est plus marquée sur la succion matricielle que totale. Par exemple pour le premier cycle de séchage et pour une teneur en eau de  $w = 13\%$  la

succion totale est largement supérieure à la succion matricielle sachant qu'avec un séchage continu traduit par la diminution de la teneur en eau on constate que la courbe de la succion matricielle converge vers la courbe de la succion totale. Il convient de noter que dans notre cas les mesures de la succion totale et matricielle pour des teneurs en eau inférieures à 7% n'ont pas été effectuées en raison de la limitation de la valeur maximale mesurée par la méthode du papier filtre qui est de l'ordre de 100 MPa (Zielinski et al. 2011). Il est bien entendu que, la succion osmotique est égale à la différence entre la succion totale et matricielle. La Figure. **4.15(b)** présente la variation de la succion osmotique en fonction de la teneur en eau et montre l'effet du séchage sur cette succion. Le comportement de cette dernière est analogue à celui des succions totale et matricielle c'est à dire on a constaté que pour les trois cycles de séchage, la succion osmotique augmente avec la diminution de la teneur en eau, mis à part pour le premier cycle de séchage où on a constaté une diminution de cette succion au niveau de  $w = 7\%$ . Ce comportement est compatible avec celui trouvé par Yin et al. (2022). Ces auteurs ont indiqué que pour les sols salés la salinité de l'eau interstitielle dans le sol a été augmentée avec la diminution de la teneur en eau et comme la succion osmotique est liée à la salinité de l'eau interstitielle du sol sur cela on peut distinguer que l'augmentation de la succion osmotique avec la diminution de la teneur en eau est due à l'augmentation de la salinité de l'eau interstitielle dans le sol. Aussi l'étude effectuée par Hafhouf et al. (2022) sur le même sol objet de cette étude montre que le séchage provoque une légère diminution du volume du sol ainsi que la solution saline dans le sol se recristallise plus en plus avec le processus de séchage ce qui provoque une densification du sol après celle du compactage conduisant à une augmentation de la succion matricielle. On note que cette densification se réalise en l'absence des fissures de retrait pour chaque cycle de séchage et ce en raison de la faible fraction argileuse qui contient ce sol objet de cette étude. Donc, l'effet des fissures sur les trois succions n'a pas été pris en charge.

La Figure **4.15(a et b)** montre aussi l'effet des cycles de D-W sur la succion totale, matricielle et osmotique. On remarque que quel que soit la teneur en eau les trois succions diminuent lorsque le nombre des cycles D-W augmente. Par exemple pour le premier cycle de séchage et pour une teneur en eau faible de  $w = 7\%$ , les valeurs de la succion totale, matricielle et osmotique sont respectivement 95800, 80000 et 15800 kPa. Ces dernières et après trois cycles de séchage deviennent 14125, 11220 et 2905 kPa respectivement correspondant à des taux de diminution de 85, 86 et 82%. Ces résultats diffèrent énormément avec ceux obtenus par Tang et al. (2020) après avoir étudié l'effet de trois cycles D-W sur un

sol argileux non salé. Ces auteurs ont conclu que pour ce sol argileux l'effet des cycles D-W est insignifiant. En effet, ils ont déclaré que pour une même teneur en eau la succion est constante quel que soit le nombre de cycle D-W. Donc et à travers les résultats de [Tang et al. \(2020\)](#), on note que pour ce sol argileux la succion total est égale à la succion matricielle car la succion osmotique est nulle ce qui explique l'effet insignifiant de cycles D-W sur ce type de sol. Concernant, la présente étude on déclare qu'un nombre croissant de cycle D-W provoque une diminution importante de la salinité du sol exprimée par la conductivité électrique (ECe) (Figure 4.16). La Figure 4.17 (a,b et c) illustre l'effet de la salinité sur les trois succions. On constate que ces dernières diminuent avec la diminution de la salinité quel que soit la teneur en eau. On note aussi que la variation des trois succions en fonction de la salinité exprimée par la conductivité électrique et quel que soit la teneur en eau est une variation linéaire représentée par des droites dont les coefficients de corrélation proches de 1. Concernant la succion matricielle ces résultats ne sont pas en accord avec ceux obtenus par plusieurs études à savoir ([Ying et al., 2022](#) ; [Sreedeeep and Singh, 2011](#) and [Zhang et al., 2017](#)). Ces derniers ont montré que l'effet de la salinité sur la succion matricielle est négligeable. Selon [Ying et al. \(2022\)](#) et après avoir confectionné des échantillons par la même densité mais avec des taux de salinité différents. Ils ont conclu que l'indice des vides demeure constant quel que soit la valeur de la salinité. On trouve que la technique utilisée par [Ying et al. \(2022\)](#) pour faire varier la salinité n'est pas compatible avec ce qui se passe réellement dans la nature c'est-à-dire cette technique n'a pas pu tenir en compte des effets des cycles D-W sur la salinité. Cependant, et du point de vue pratique les sols à faible profondeurs sont exposés aux cycles D-W qui ont un effet important sur la salinité ([Hafhouf et al. 2022](#)). Par ailleurs, et selon la Figure 4.17(d) de la présente étude on remarque que la diminution de la salinité sous l'effet des cycles D-W conduit à une augmentation de l'indice des vides dans le sol. Cette augmentation de (e) est due à lixiviation d'une partie des sels comme l'halite (NaCl) et le gypse ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ) ([Hafhouf et al.,2022](#)). Selon ([Estabragh et al. 2013](#)) l'augmentation de l'indice des vides entraîne une diminution de la succion matricielle. Donc dans le présent travail la diminution de la succion matricielle est engendrée par la diminution de la salinité puisque cette dernière déclenche l'augmentation de l'indice des vides. Cependant le comportement de la succion osmotique sous l'effet de la salinité est en accord avec les études citées ci-dessus, car cette composante de succion est gouvernée par la salinité du sol, donc la diminution de la salinité sous l'effet des cycles D-W, provoque la diminution de la succion osmotique.

En fin et à travers les résultats obtenus par cette étude on déclare que la diminution des trois composantes de succion (totale, matricielles et osmotique) est due à la diminution de la salinité dans le sol sous l'effet des cycles D-W et précisément est due à lixiviation d'une partie des sels comme l'halite (NaCl) et le gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ce qui explique que les trois succions du sol sebkhia d'Ain M'Lila sont toujours contrôlées par la salinité et les cycles de D-W.

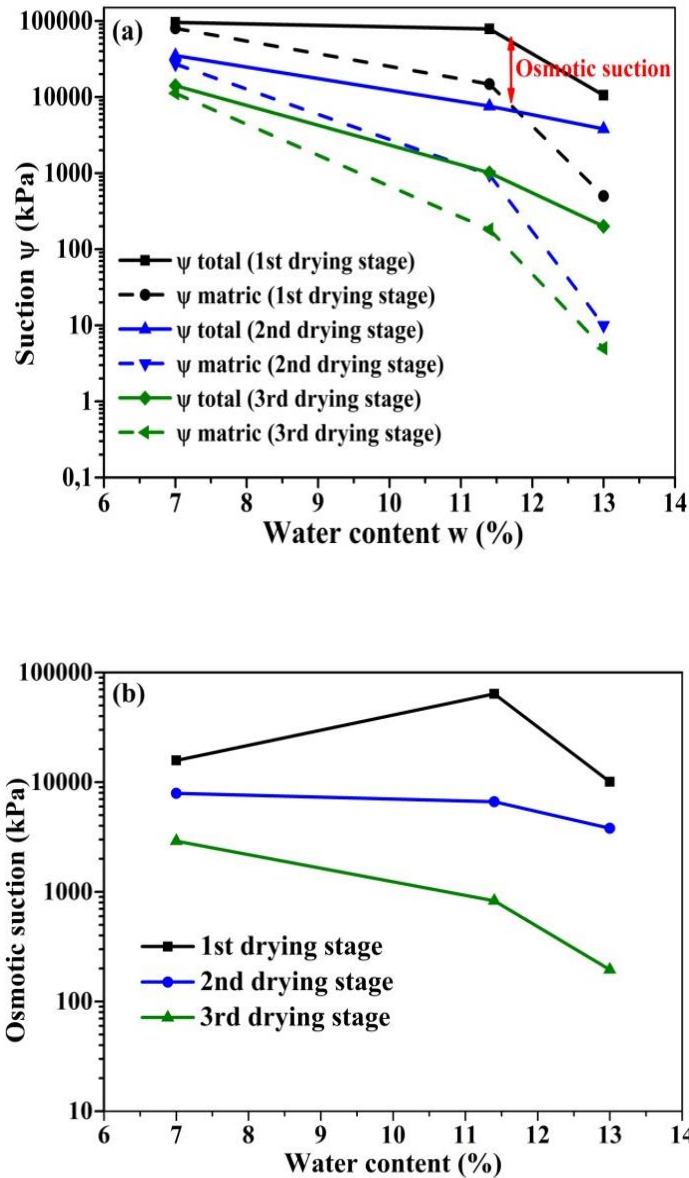


Figure 4.15: Variation de la succion en fonction de la teneur en eau pour chaque cycle de séchage : (a) succion totale et matricielle ; (b) succion osmotique.

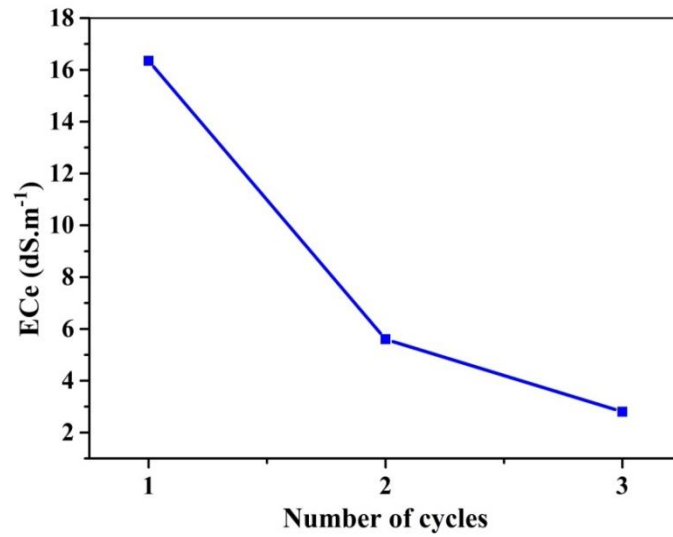
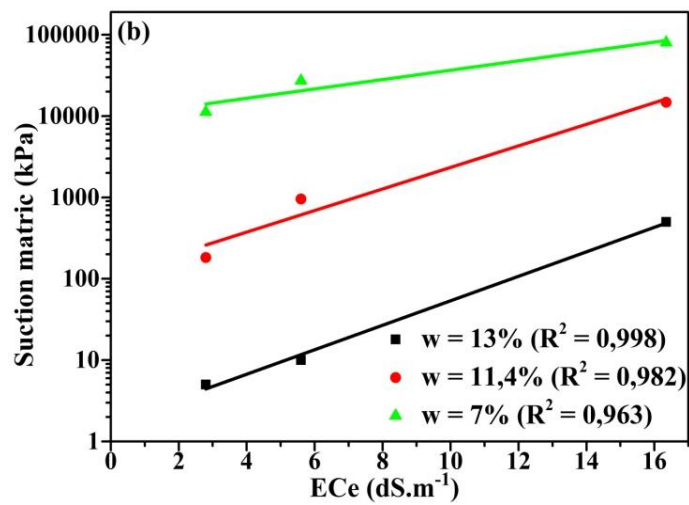
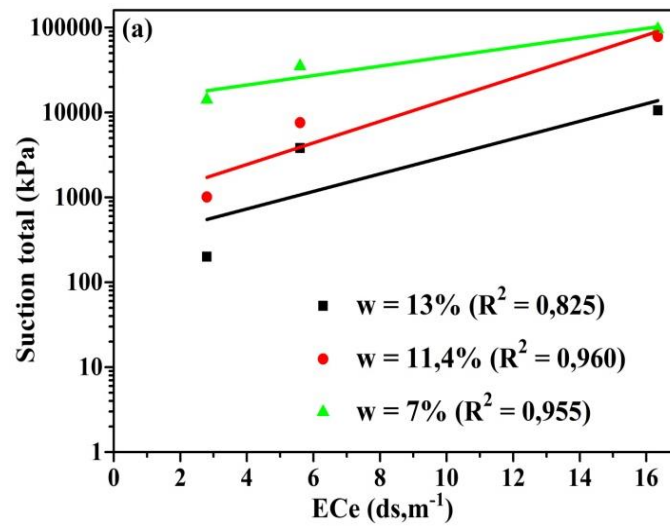


Figure 4.16: Conductivité électrique en fonction du nombre de cycles.



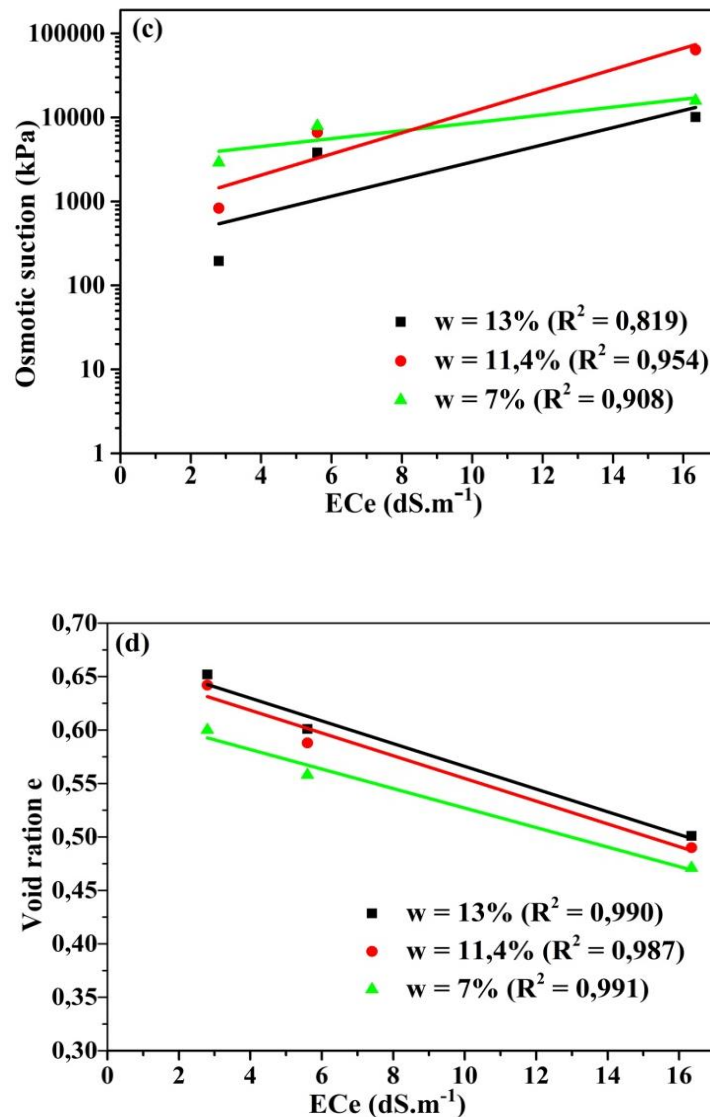


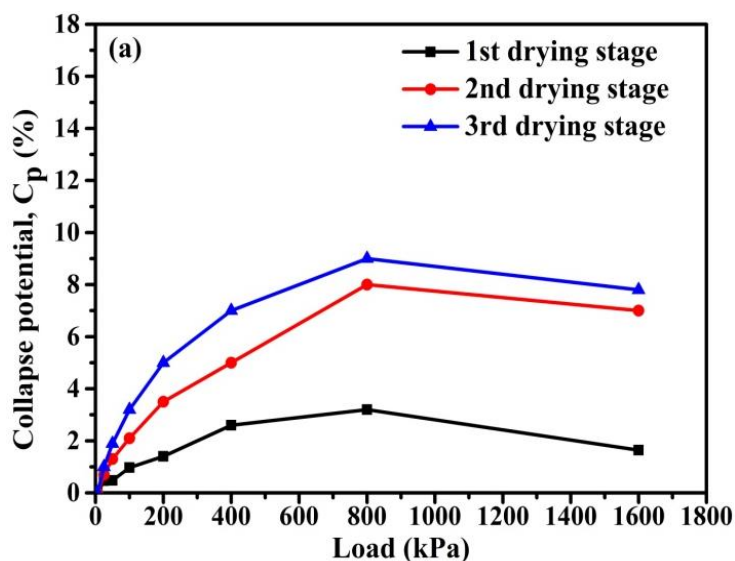
Figure 4.17: L'effet de la salinité sur la succion et l'indice de vide : (a) sur la succion totale ; (b) sur la succion matricielle ; (c) sur la succion osmotique ; (d) sur l'indice de vide.

#### 4.8 Étude de l'effet des cycles de séchage-mouillage sur l'effondrabilité

Pour illustrer l'effet des cycles de D-W sur le potentiel d'effondrement ( $C_p$ ) des sols sebkha d'Ain M'Lila des teneurs en eau initiales ont été fixées comme suit  $w = w_{opt}$  (11.4%) et  $w = 4\%$  sachant que, selon la littérature et lorsque les sols ont subi un compactage à des teneurs en eau inférieures ou égales à la teneur en eau optimale de Proctor, ces sols deviennent susceptibles à l'affaissement [Barden and Collins,\(1973\)](#). Aussi, [Cui et al. \(1999\)](#) et [Loiseau et al. \(2001\)](#) ont montré que le phénomène d'effondrement des sols se produit si la teneur en eau initiale est faible.

La Figure. **4.18 (a et b)** présente la variation du  $C_p$  en fonction des contraintes appliquées pour les différents cycles D-W (essai double consolidation). Les résultats obtenus montrent que le potentiel d'effondrement  $C_p$  augmente avec l'augmentation de la contrainte appliquée jusqu'à une contrainte de 800 kPa. Par exemple pour le premier cycle de séchage et pour les deux teneurs en eau de  $w = 11.4\%$  et  $w = 4\%$  les deux  $C_p$  obtenus respectivement sont 3.2 et 5.1% et ce au niveau de la contrainte 800 kPa. Ce comportement d'augmentation du  $C_p$  avec l'augmentation de la contrainte appliquée a été observé par plusieurs chercheurs et ce pour les différents type de sol, notamment les sols qui contiennent des phases minérales salines et solubles dans l'eau (Al-Amoudi et Abduljawad, 1995 ; Sadeghi et al., 2019 ; Li et al., 2018). Ces derniers ont expliqué ce comportement par la dissolution de ces phases minérales dans l'eau ce qui provoque le réarrangement des grains du sol conduisant à une réduction importante du volume. On rappelle que dans la présente étude que le sol d' Ain M'Lila contient des phases minérales solubles dans l'eau comme l'halite (NaCl) et le gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ce qui explique la comptabilité de ce comportement à celui obtenu par les études citées précédemment. Il est toujours utile de noter que selon la norme ASTM D 5333-92 (2002) le niveau de contrainte utilisé pour obtenir un  $C_p$  représentatif est de 200 kPa. A cet effet on a jugé utile de se baser sur la contrainte de 200 kPa pour interpréter et discuter les résultats obtenus. Selon la Figure **4.18 (a et b)** et la Figure **4.19 (a)** et pour une contrainte de 200kPa on constate que le  $C_p$  augmente avec l'augmentation du nombre de cycle D-W. Par exemple pour le premier cycle et le troisième cycle de séchage les potentiels  $C_p$  varient de 1,4% à 5% respectivement pour une teneur en eau initiale de  $w = 11.4\%$  et de 1,7% à 7% pour une teneur en eau  $w = 4\%$ . Ces résultats correspondent aux rubriques allant de risque léger à troubles modérées selon la norme ASTM D 5333-92 (2002). On remarque aussi que le  $C_p$  est inversement proportionnel à la teneur en eau c'est-à-dire à chaque fois qu'on augmente la teneur en eau le  $C_p$  diminue quel que soit le nombre de cycle D-W. Cependant, pour le premier et le troisième cycle de séchage et pour une teneur en eau initiale de  $w = 4\%$  des augmentations des potentiels d'effondrement  $C_p$  de 21.4 et 40% ont été enregistrées respectivement par rapport aux  $C_p$  obtenus à la teneur en eau de  $w = 11.4\%$ . Ce résultat d'augmentations des  $C_p$  avec la diminution de la teneur en eau est tiré au clair en se basant sur la succion c'est-à-dire lorsque la teneur en eau est diminuée la succion augmente conduisant à l'augmentation des pressions capillaires donnant plus de résistance au sol. En effet, et au moment où la teneur en eau augmente la succion décroît engendrant des pressions capillaires faibles et des chutes de résistance importantes provoquant des  $C_p$  importants.

L'augmentation de  $C_p$  avec l'augmentation du nombre de cycle de D-W est en bon accord avec celui trouvé par Li et al. (2018). Ces derniers ont étudiés l'effet des cycles D-W sur le  $C_p$  du loëss. Ces auteurs ont montré que ce résultat est dû à la perte des phases minérales contenant dans ce loëss quand le nombre de cycles croit conduisant à un indice de vide élevé. Connaissant que le  $C_p$  varie proportionnellement en fonction de l'indice des vides des sols. Cependant, pour le sol de sebkha d'Ain M'Lila qui contient des phases minérales saline (halite et gypse) et étant donné que ces phases minérales sont influencées par les cycles D-W. La Figure 4.19(b) montre une variation linéaire de  $C_p$  en fonction d' $EC_e$ . On constate aussi que lorsque  $EC_e$  décroît le  $C_p$  croît sachant que la diminution d' $EC_e$  provoquée par la dissipation des phases salines au cours des cycles D-W conduit à l'augmentation de l'indice des vides du sols sebkha ce qui engendre des augmentations de  $C_p$ . Donc, on tient à signaler que le  $C_p$  est en relation directe avec la salinité du sol. Par ailleurs, en faisant augmenter le nombre de cycles D-W on remarque une augmentation importante entre le premier et le deuxième cycle de séchage par rapport à l'augmentation obtenue entre le deuxième et le troisième cycle de séchage Figure 4.18(a et b). Par analogie et selon la Figure 4.16 on constate une diminution plus marquée de la salinité entre le premier et le deuxième cycle par rapport à celle obtenue entre le deuxième et de troisième cycle de séchage ce qui explique une perte importante des liaisons cimentaires du sol d'Ain MLILA entre le premier et le deuxième cycle après évacuation des phases salines. Ceci explique l'augmentation de  $C_p$  entre le premier et le deuxième cycle de séchage.



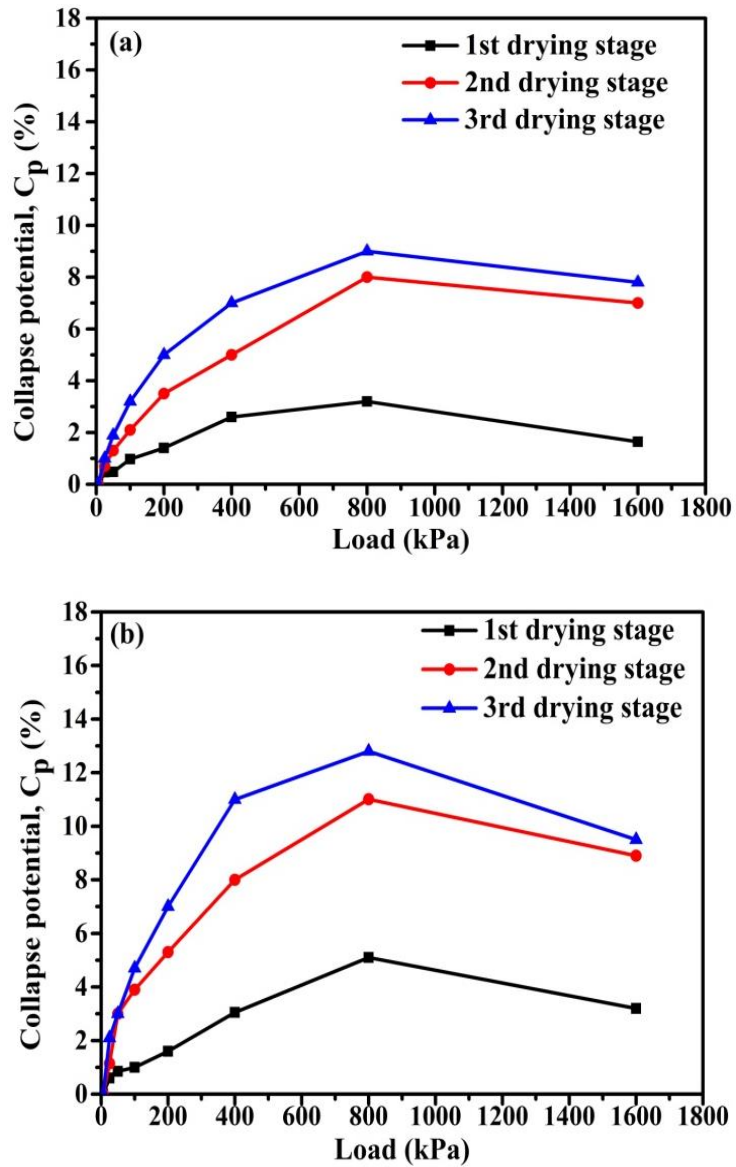


Figure 4.18: Variation de  $C_p$  en fonction de la contrainte appliquée pour différents cycles D-W : (a) pour  $w = 11,4\%$  ; (b) pour  $w = 4\%$ .

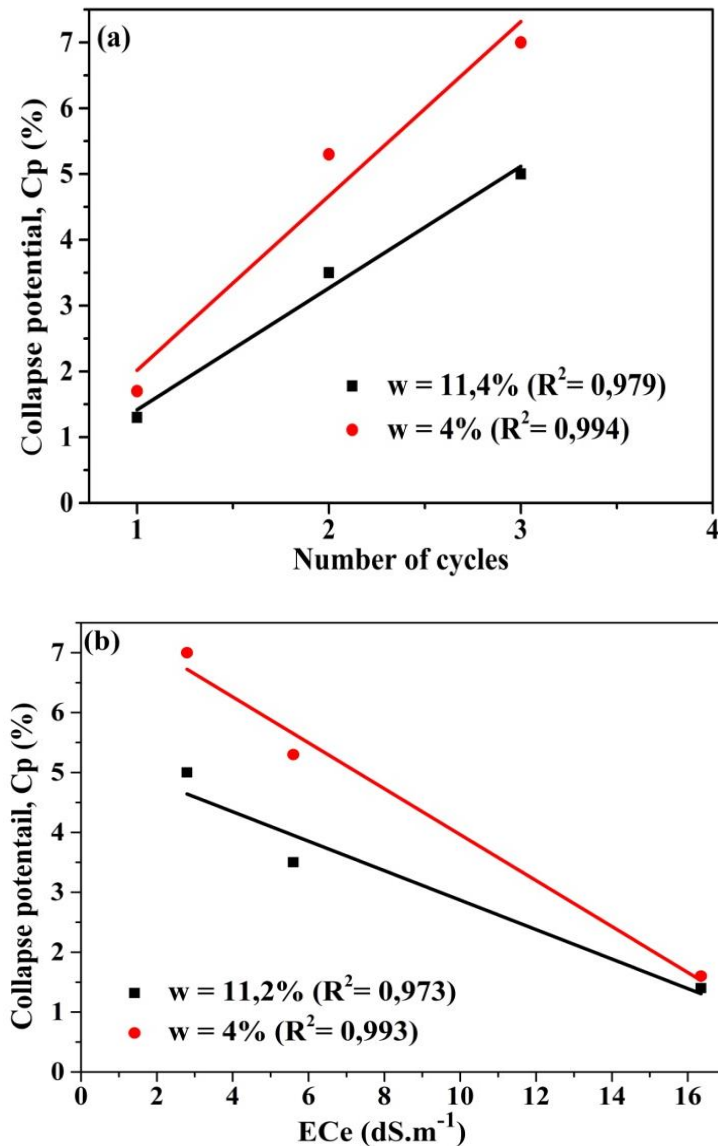


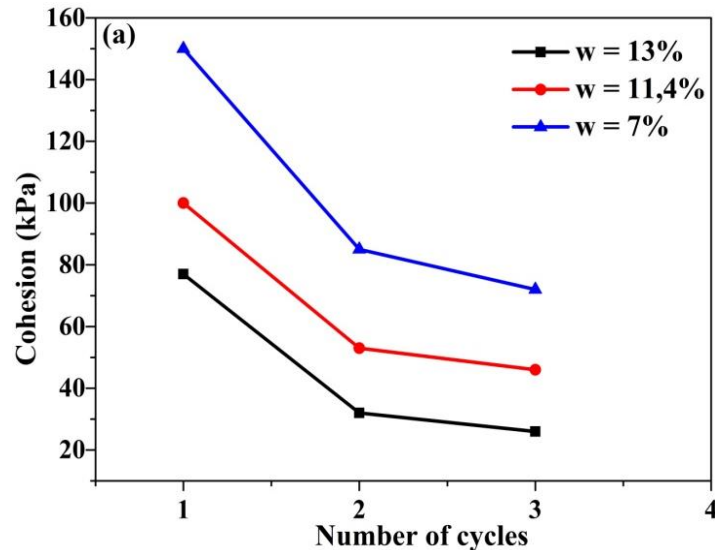
Figure 4.19: Variation de  $C_p$  en fonction du nombre de cycles et de  $EC_e$  pour une contrainte de 200 kPa : (a) en fonction du nombre de cycles ; (b) en fonction de  $EC_e$ .

#### 4.9 Étude de l'effet des cycles d-w sur la résistance au cisaillement

Les résultats des essais de cisaillement direct obtenus sur les échantillons de sol de sebkha d'Ain M'Lila en fonction des cycles D-W sont illustrés sur la Figure 4. 20(a et b). Pour chaque cycle de séchage et lorsque la teneur en eau décroît on constate une augmentation de la cohésion et l'angle de frottement interne du sol sebkha d'Ain M'Lila. Par exemple pour le premier cycle de séchage et pour une teneur en eau  $w = 13\%$  la cohésion et l'angle de frottement ont des valeurs de 77 kPa et  $26^\circ$ . Ces dernières augmentent d'une manière significative pour une teneur en eau faible  $w = 7\%$  et deviennent égales à 150 kPa et

34°. Selon (Hafhouf et al. 2022), le comportement mécanique des sols salés est contrôlé par les sels solubles dans l'eau notamment lorsque ces sols se trouvent à leur état sec ou ayant des teneurs en eau faibles. Cependant, on note que durant le processus de séchage les sels solubles se trouvant dans l'eau interstitielle du sol se déplacent vers la surface du sol et avec la migration de l'humidité ces sels se cristallisent et s'accumulent conduisant à la formation d'une croûte saline sur la surface du sol (Figure 4.22). Cette croûte saline engendre une augmentation de la contrainte de confinement latérale du sol. Aussi on note que la solution saline qui se trouve dans le sol se recristallise plus en plus avec le processus de séchage provoquant la cimentation des grains ce qui augmente les liaisons entre les grains conduisant ainsi à une augmentation de la cohésion. Aussi Il convient de noter le rôle de la succion dans l'augmentation de la cohésion. En effet, plusieurs chercheurs ont étudié l'effet de la variation de la teneur en eau sur la résistance au cisaillement des sols non saturés. Parmi ces chercheurs on trouve (Goh et al. 2014) qui ont montré que le sol présente une résistance au cisaillement plus importante quand la teneur en eau est faible. D'après ces auteurs ce résultat est dû à l'augmentation de la succion qui joue un rôle important dans l'amélioration des liens entre les particules du sol menant à l'augmentation de la cohésion des sols. On doit signaler dans le présent travail que la cohésion et l'angle de frottement interne ont été influencés par le nombre de cycle D-W. Pour la même valeur de  $w$  et lorsque le nombre de cycles D-W augmente on remarque que la cohésion diminue et l'angle de frottement interne croit. Par exemple pour le premier cycle de séchage et pour une teneur en eau de  $w = 11.4\%$  ( $w_{opn}$ ) la cohésion et l'angle de frottement interne du sol ont des valeurs de 100 kPa et 30°. Après trois cycles de séchage ces valeurs deviennent 50 kPa et 37°. Donc, un taux de diminution de 50% pour la cohésion et un taux d'augmentation de 23% pour l'angle de frottement ont été enregistrés. Ces résultats diffèrent de ceux trouvés par Liu et al. (2020). Ces auteurs ont étudié l'effet des cycles D-W sur le comportement mécanique des sols granitiques-résiduels reconstitués au laboratoire non salins. Ces auteurs ont trouvé un taux d'augmentation de 109% de la cohésion après avoir augmenté le nombre de cycles D-W de 0 à 4. Ils ont expliqué ce résultat par l'augmentation des liaisons de contact entre les grains du sol lorsque le nombre des cycles D-W croient. Ces mêmes auteurs ont noté que l'augmentation des cycles D-W conduit au réarrangement des particules de sols conduisant à la densification de ces derniers ce qui fait croître la cohésion. Pour les sols salés cas de la présente étude. Après avoir prouvé précédemment qu'avec un nombre croissant de cycle D-W une diminution importante de la salinité du sol exprimée par la conductivité électrique  $E_{c}$  a été constatée (Figure 4.16). On note que les sels accumulés en surface sont en contact directe avec l'eau pendant les

événements de saturation ce qui provoque la lixiviation de ces sels engendrant la perte de la contrainte de confinement ainsi que la diminution des liaisons entre les grains assurée par ces sels composant le sol. On remarque que la variation de la cohésion et l'angle de frottement interne du sol est une variation linéaire Figure 4.21. Pour chaque teneur en eau une diminution de la cohésion avec la diminution de la salinité exprimée par l'ECe a été observée. Par contre une augmentation linéaire de l'angle de frottement interne avec la diminution de la salinité a été remarquée. Il est toujours utile de noter que la diminution de la cohésion observée entre le premier et le deuxième cycle de séchage est plus importante que celle entre le deuxième et le troisième cycle de séchage. Ce comportement suit l'allure de la diminution de la salinité en fonction du nombre de cycle D-W. En outre on sait que la succion est une propriété importante dans l'évolution de la résistance au cisaillement des sols non saturés et comme on a déjà mentionné auparavant que la succion diminue avec l'augmentation du nombre de cycle D-W et provoque aussi la diminution de la cohésion. On déduit qu'avec un nombre croissant de cycles D-W la diminution de la cohésion est due à la diminution de la salinité et la succion du sol salé.



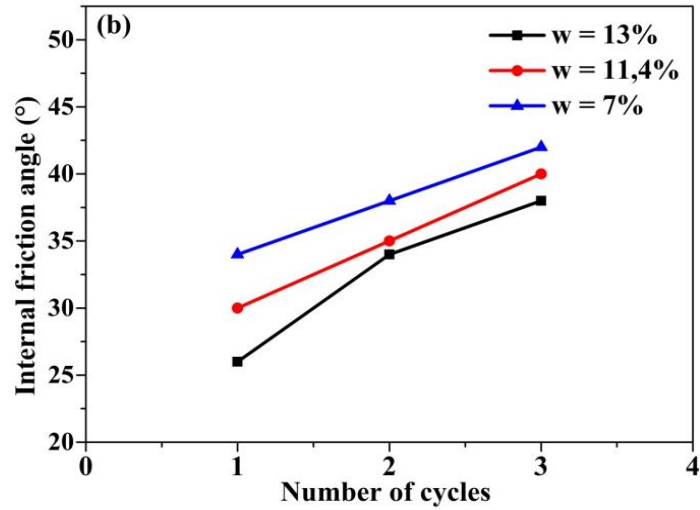


Figure 4.20: Variation de la cohésion et de l'angle de frottement interne en fonction du nombre de cycles : (a) pour la cohésion ; (b) pour l'angle de frottement interne.

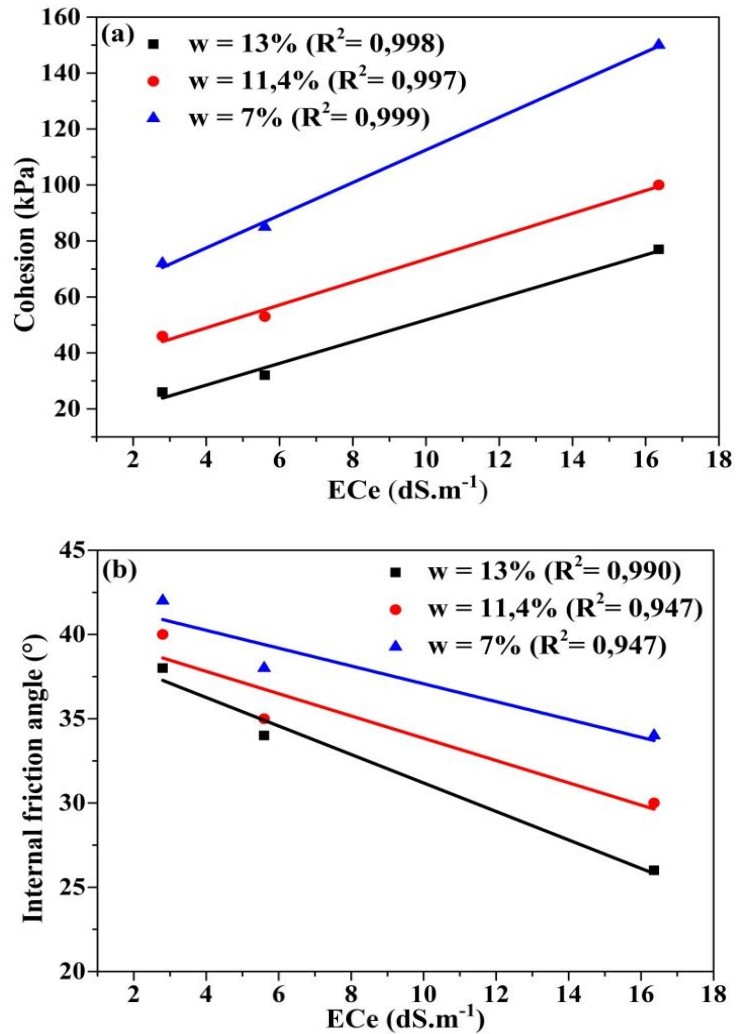


Figure 4.21: Variation de la cohésion et de l'angle de frottement interne avec la salinité : (a) pour la cohésion ; (b) pour l'angle de frottement.



*Figure 4.22: État de surface d'un échantillon de sol après séchage.*

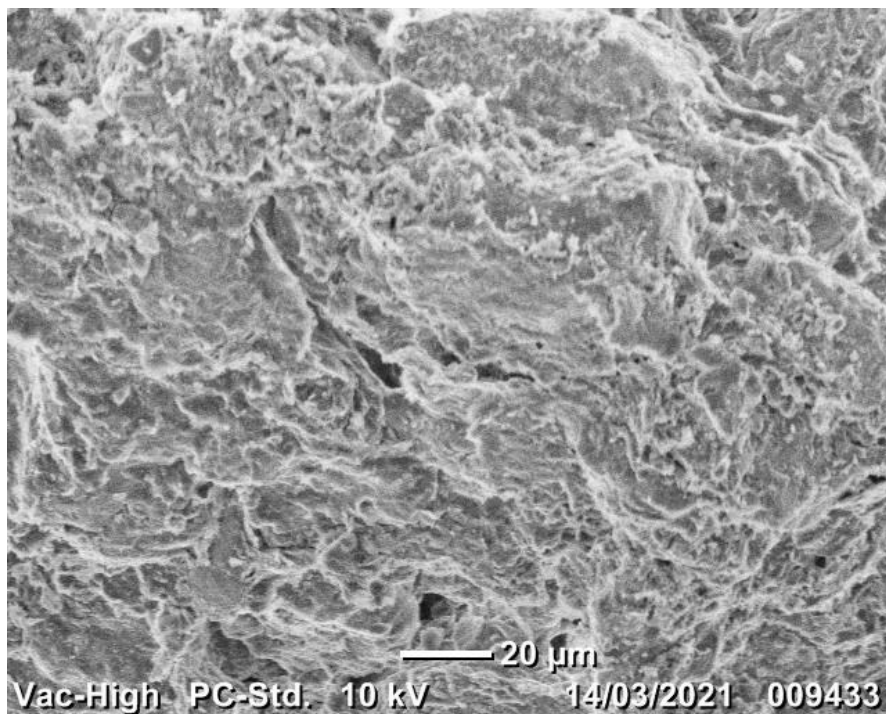
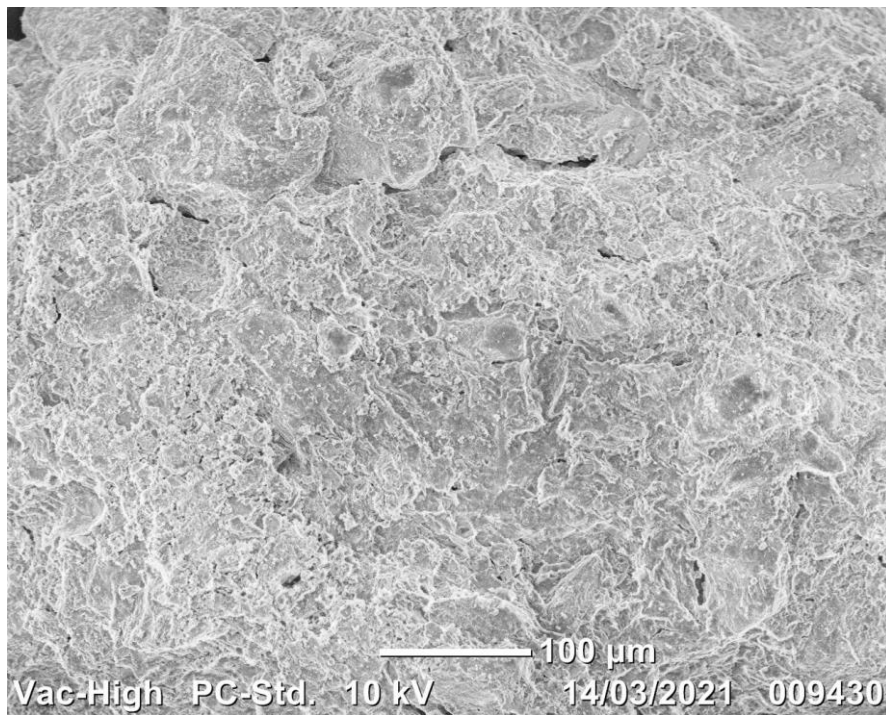
#### **4.10 Étude de l'effet des cycles d-w sur la microstructure**

Comme les cycles D-W ont un effet important sur le comportement mécanique et la salinité des sols de sebkha d'Ain M'Lila, il est très important d'illustrer aussi l'effet des cycles D-W sur la microstructure de ces sols. A cet effet, pour chaque cycle de séchage des échantillons de sol ont été scannés par le microscope électronique MEB et les observations de 100  $\mu\text{m}$  et 20  $\mu\text{m}$  ont été sélectionnées. Les résultats obtenus sont illustrés dans la Figure 4.23, cette dernière montre que :

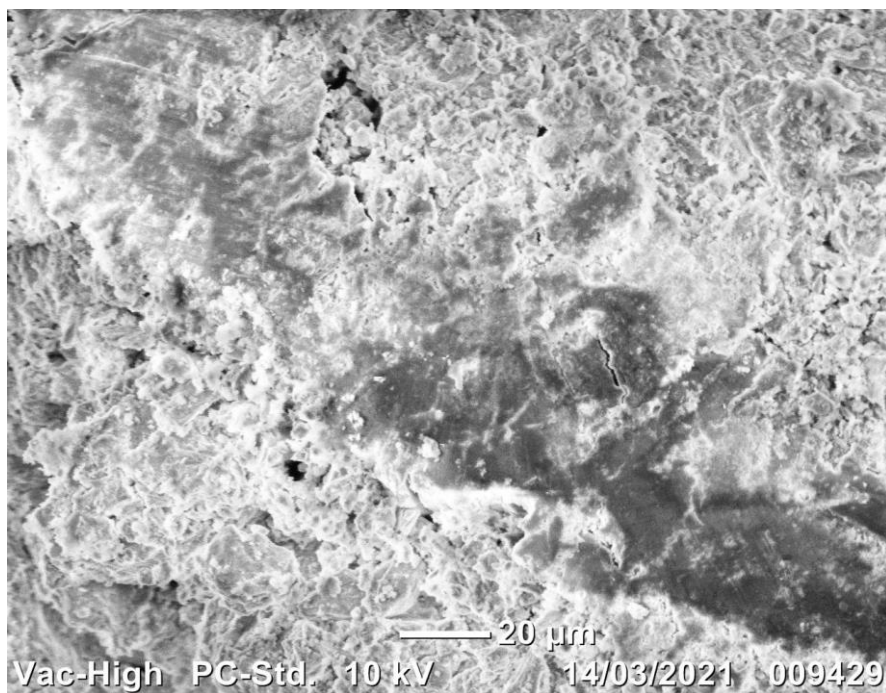
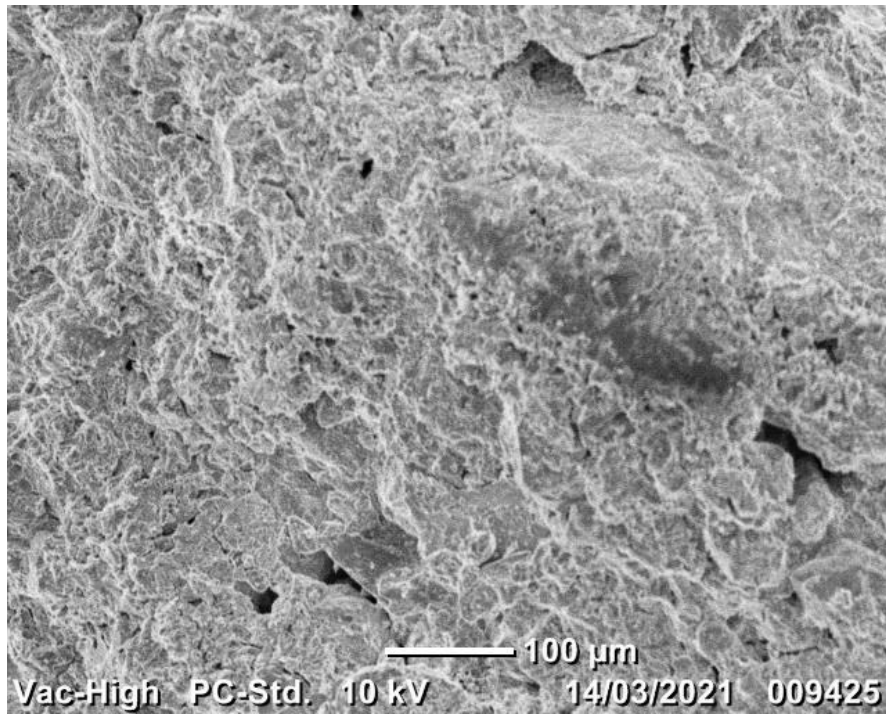
**1<sup>er</sup> cycle de séchage :** Les cristaux de sel sont clairement visibles et ils sont séparés par des particules de sol. La connexion entre les particules de sol s'est progressivement transformée en cimentation de cristaux de sel. Les particules de sol et les cristaux de sel sont distribués plus uniformément, et ils sont remplis les uns avec les autres. La structure interne globale compacte, le style structurel est une structure de cadre dense.

**2<sup>ème</sup> cycle de séchage :** Les microstructures du sol salin après le deuxième cycle de séchage démontrent que la structure générale du sol salin est moins dense à celle du premier cycle de séchage. Les petites particules sont cimentées comme ensemble de particules ; on remarque des petits pores internes, des microfissures, et quelques pores qui sont ouverts.

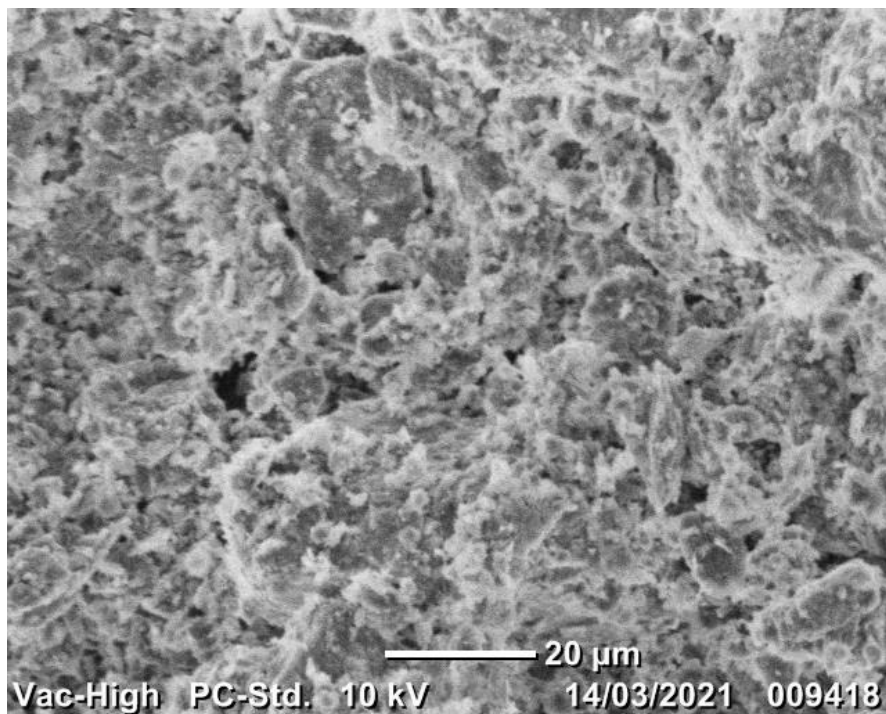
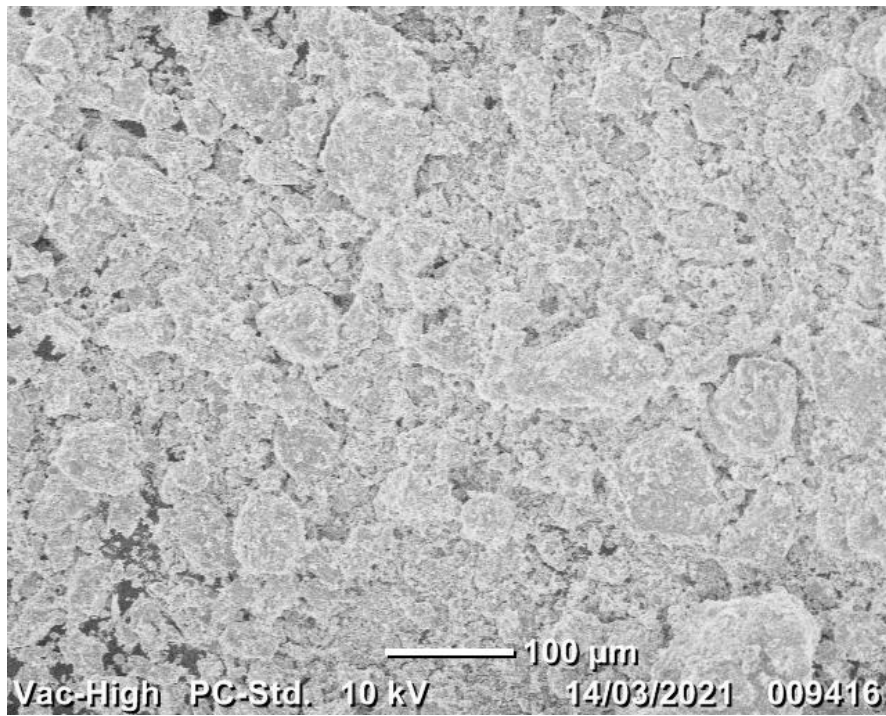
**3<sup>ème</sup> cycle de séchage :** Les particules du sol sont rondes, de taille non uniforme. Les particules sont reliées entre elles par un contact ponctuel. La structure est relativement poreuse. La forme de la structure est ouverte et poreuse.



(a)



(b)



(c)

Figure 4.23: Microstructure pour chaque cycle de séchage : (a) 1er cycle ; 2ème cycle ; 3ème cycle.

## 4.11 Conclusion

Pour étudier les effets des cycles de séchage-mouillage (D-W) sur le comportement des sols sebkha d'AIN M'LILA. Des essais ont été réalisés sur des échantillons de sol soumis aux cycles de D-W. les résultats obtenus ont été discutés et interprétés en se basant sur les résultats de la caractérisation chimique, minéralogique et géotechnique.

Les résultats des essais de la caractérisation chimique et minéralogique, montrent que notre sol est fortement salin et présente des différentes phases minérales salines comme le gypse et l'halite. Aussi les résultats ont montré que les cycles de D-W modifient considérablement les propriétés chimiques, minéralogiques et géotechniques des sols salés de la sebkha d'Ain M'Lila. On a constaté une diminution importante de la salinité de ce type de sol avec un nombre croissant de cycles de D-W. la résistance à la compression non confinée et la résistance au cisaillement diminuent avec l'augmentation du nombre de cycles D-W. cependant les composantes de la succion ont été affectées aussi par le nombre croissant de cycles D-W, les composantes de la succion à savoir totale, matricielle et osmotique diminuent avec l'augmentation du nombre de cycles D-W.

---

## Conclusion générale

L'étude du comportement des sols salés demeure un phénomène complexe pour les géotechniciens. A travers cette étude expérimentale on a pu apporter des informations concernant l'effet des cycles de séchage-mouillage (D-W) sur le comportement mécanique et la salinité de ces sols. Des conclusions ont été tirées comme suit :

- Les résultats des essais des caractérisations chimiques, minéralogiques, thermiques et géotechniques, montrent que notre sol de sebkha d'Ain M'Lila présente une conductivité électrique très élevée ce qui rend le sol classé comme un sol fortement salin. Ce sol présente des valeurs élevées de teneur en éléments majeurs de  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ , ce sol est classé comme un sol chloruro-sulfaté neutre. Les phases minérales responsables de cette salinité sont le gypse ( $\text{CaCO}_3, 2\text{H}_2\text{O}$ ) et l'halite ( $\text{NaCl}$ ). Ce sol est classé selon le diagramme de Casagrande dans la famille des argiles peu plastiques. Il s'agit d'un sol de type **A2** selon la classification du Guide des Techniques Routières (**GTR**) (sables fins argileux, limons).
- Les cycles de séchage-mouillage affectent considérablement la salinité du sol de sebkha d'Ain M'Lila, avec un nombre croissant de cycles, la salinité diminue et le sol passe de l'état fortement salin à l'état faiblement salin après quatre cycles de séchage-mouillage. Cependant le pH du sol reste toujours neutre avec la croissance du nombre de cycle, car ce sol étudié contient des sels neutres (gypse et halite). Cette réduction de la salinité est liée à la lixiviation des sels précipités en surface des échantillons de sol pendant les événements de saturation, notamment le gypse et l'halite, aux quatrième cycle une disparition totale d'halite et une réduction importante du gypse a été constatée.
- La résistance à la compression non confinée est affectée par les cycles de séchage-mouillage. Pour chaque cycle de séchage, la rigidité et la résistance du sol augmentent avec la diminution de la teneur en eau et ce à cause de la cristallisation des sels dans le sol. Aussi on peut noter que la résistance à la compression non confinée diminue avec l'augmentation du nombre de cycles, l'effet de ces derniers devient très significatif pour une teneur en eau faible ( $w = 7\%$ ), pour cette dernière, au cours de trois premiers cycles la diminution de la résistance est très importante, avant d'être stable au 4<sup>ème</sup> cycle. Une relation entre la salinité du sol et la résistance à la compression non confinée a été constatée, cette dernière diminue avec la diminution de la salinité du sol. Cette relation salinité et résistance à la compression non confinée est très significative pour une teneur en eau faible  $w = 7\%$ . Donc

la raison de diminution de la résistance à la compression non confinée du sol avec l'augmentation du nombre de cycles de séchage-mouillage est due à la diminution de la salinité de ce sol.

- La succion est affectée par l'effet des cycles de séchage-mouillage. A cet effet les trois composantes de succion à savoir la succion totale, matricielle et osmotique diminuent lorsque la salinité décroît sous l'effet des cycles. La diminution de la succion osmotique est liée à la diminution de la concentration des sels dans l'eau interstitielle du sol lorsque le nombre de cycles augmente. La diminution de la succion matricielle avec la diminution de la salinité est due à la dissipation des sels sous l'effet des cycles conduisant à l'augmentation de l'indice des vides des sols sebkha. Cette augmentation de l'indice des vides engendre des augmentations dans le potentiel d'effondrement  $C_p$ . IL est bien entendu que l'augmentation de  $C_p$  est liée aussi à la diminution de la teneur en eau initiale car lorsque cette dernière est faible conduit à des succions importantes cependant une inondation engendre une réduction importante de ces succions provoquant une augmentation du  $C_p$ .
- Les propriétés de la résistance au cisaillement des sols sebkha ont été touchées par l'effet des cycles de séchage-mouillage ainsi que par la salinité. Cependant durant chaque cycle de séchage à l'intérieur de la structure du sol une augmentation des liaisons inter granulaires est obtenue à cause de la cristallisation des sels et l'augmentation de la succion par contre en surface une création d'une croûte saline engendrant une augmentation de la contrainte de confinement. Ces deux résultats conduisent à l'augmentation de la résistance au cisaillement pendant le séchage. Tandis que lorsque le nombre de cycle augmente la cohésion du sol sebkha diminue et l'angle de frottement interne augmente.

---

## Références

- Abbeche, K., Bahloul, O., Ayadat, T., Bahloul, A., 2010. Treatment of collapsible soils by salts using the double consolidation method, in: *Experimental and Applied Modeling of Unsaturated Soils*. pp. 69–78.
- Abduljawwad S.N., Bayomi F., Al-Sheikh A.K., Al-Amoudi O.S.B. Influence of geotextiles on performance of saline sabkha soils. *J. Geotech. Eng. ASCE* 1994;120 (11):1939-1959.
- Abduljawwad, S.N., Al-Amoudi, O.S.B., 1995. Geotechnical behaviour of saline sabkha soils. *Géotechnique*, 45, 425-445.
- Abuelgasim, A., Ammad, R., 2019. Mapping soil salinity in arid and semi-arid regions using Landsat 8 OLI satellite data. *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.* 13, 415–425.
- Abu-Taleb, M., Egeli, I., 1981. Some geotechnical problems in the Eastern Province of Saudi Arabia, *Proceedings of the Symposium on Geotechnical Problems in Saudi Arabia*. King Saud University, Riyadh, pp. 799-811.
- Agus, S. S. et T. Schanz (2007). Errors in total suction measurements . In : *Experimental Unsaturated soil mechanics*. T. schanz. Springer, p. 59–70.
- Ahmed, I., 1997. Improvement of eastern Saudi Sabkha soil for road construction. Thesis Master of Science in civil engineering. King Fahd University of Petroleum, Minerals. Dhahran, Saudi Arabia..
- Aiban, S.A., 1994. A study of sand stabilization in Eastern Saudi Arabia. *Engineering Geology*, 38, 65-79.
- Aiban, S.A., Al-Ahmadi, H.M., Asi, I.M., Siddique, Z.U., Al-Amoudi, O.S.B., 2006. Effect of geotextile and cement on the performance of sabkha subgrade. *Building and Environment*, 41, 807-820.
- Aitchison G.D. (1956). The strength of quasi-saturated and unsaturated soil in relation to the pressure deficiency in the pore water. *Proc. Of the 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundations Engineering*, Londres, pp. 135-139.
- Akili W. On Sabkha of Eastern Saudi Arabia. In: *Proceedings of Symposium on Geotechnical Problems in Saudi Arabia*, Riyadh, 1981, 775-798.
- Akili W., Fletcher E.H. Ground conditions for housing foundations in Dhahran region, Eastern Province, Saudi Arabia. In: *Proceedings of First International Conference on Housing Problems in Developing Countries*, Dhahran, 1978, 533-546.

- Akili W., Torrance J.K. The Development and Geotechnical Problems of Sabkha, with preliminary experiments on the static penetration resistance of cemented sands. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 1981;14(1):59-73.
- Akili, W., Ahmed, N., 1983. THE SABKHAS OF EASTERN SAUDI ARABIA, Geotechnical consideration. Proc. 1st Saudi Engineering Conf, Jeddah, pp. 300-322.
- Al-Amoudi O.S.B. Soil Stabilization and durability of reinforced concrete in sabkha environments. In: Proceedings of 4th Saudi Engineering Conference, King Abdulaziz University, Jeddah, 1995, 53-72.
- Al-Amoudi O.S.B. Studies on Soil-Foundation interaction in the sabkha environment of Eastern Province of Saudi Arabia. PhD Dissertation, Department of Civil Engineering, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudi Arabia, 1992.
- Al-Amoudi O.S.B., Abduljawwad S.N. Compressibility and collapse characteristics of arid saline sabkha soils. *Engineering Geology* 1995;39:185-202.
- Al-Amoudi O.S.B., Abduljawwad S.N. Laboratory and field leaching tests on coastal salt-bearing soils. *Journal of Geotechnical Engineering ASCE* 1994;120(10):1900-1902.
- Al-Amoudi, O.S.B., 2008. Testing and stabilization of saline sabkha soils: a review, Sixth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, paper.
- Al-Amoudi, O.S.B., Abduljawwad, S.N., El-Naggar, Z.R., Rasheeduzzafar, 1992. Response of sabkha to laboratory tests: A case study. *Engineering Geology*, 33, 111-125.
- Al-Amoudi, O.S.B., Asi, I.M., El-Naggar, Z.R., 1995. Stabilization of an arid, saline sabkha soil using additives. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 28, 369-379.
- AL-AMOUDI, Omar Saeed Baghabra, ABDULJAUWAD, Sahel N., EL-NAGGAR, Zaghoul R., *et al.* Response of sabkha to laboratory tests: a case study. *Engineering Geology*, 1992, vol. 33, no 2, p. 111-125.
- Al-Ayedi, E.S., 1996. Chemical Stabilization of Al-Qurayyah Eastern Saudi Sabkha Soil. Thesis Master of Science in civil engineering. King Fahd University of Petroleum, Minerals. Dhahran, Saudi Arabia.
- Al-Homidy, A.A., Dahim, M.H., Abd El Aal, A.K., 2017. Improvement of geotechnical properties of sabkha soil utilizing cement kiln dust. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9, 749-760.
- Ali, M.M., 2011. Identifying and analyzing problematic soils. *Geotech. Geol. Eng.* 29, 343–350.

- Alonso E.E., Gens A., Hight D.W. (1987). Special problems soils, General Report. Proc. 9<sup>th</sup> Eur. Conf. on Soil Mech. Found. Eng., Dublin, Vol. 3, pp. 1087-1146.
- Al-Shamrani M.A., Dhowian A.W. Preloading for reduction of the compressibility characteristics of sabkha soil profiles. *Engineering Geology* 1997;48:19-41.
- Alshihabi, O., 2002. Étude en laboratoire du comportement d'un sol compacté non saturé: influence des cycles de séchage-humidification, Lille 1, Lille France.
- Arifuzzaman, M., Habib, M., Al-Turki, M., Khan, M., Ali, M., 2016. Improvement and characterization of sabkha soil of Saudi Arabia: A review. *Jurnal Teknologi*, 78.
- Arsenie, I. M. (2009). Interprétation en contraintes effectives du comportement réversible des matériaux granulaires compactés non-saturés sous sollicitation triaxiales cycliques. Rapp. tech. Projet de fin d'étude. INSA Strasbourg.
- ASTM (1999). Standard Test Method for Pore Size Characteristics of Membrane Filters Using Automated Liquid Porosimeter. ASTM E1294-89. — (2010). Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. D-5298-10.
- ASTM D2487-00, 2000. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D3080-98, 2003. Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. ASTM Int. West Conshohocken.
- ASTM D4318-00, 2000. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D5298-10, 2010. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper, ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM D5333-92, 2002. Standard Test Method for Measurement of Collapse Potential of Soils. ASTM Int. West Conshohocken
- Ayeldeen, M., Negm, A., El-Sawwaf, M., Kitazume, M., 2017. Enhancing mechanical behaviors of collapsible soil using two biopolymers. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 9, 329–339.
- Azam, S., 2003. Influence of mineralogy on swelling and consolidation of soils in eastern Saudi Arabia. *Can. Geotech. J.* 40, 964–975.
- Baize, D. et al., 1995. Référentiel pédologique 1995, Techniques et Pratiques. INRA, Paris, pp. 332.
- Barden, L., McGown, A., Collins, K., 1973. The collapse mechanism in partly saturated soil. *Eng. Geol.* 7, 49–60.

- Blight G.E. (1983). Aspects of the capillary model for unsaturated soils. Proc. 7<sup>th</sup> Asian Conf. SMFE 1, Haifa, pp.3-7.
- Boutonnier L. (2007). Comportement hydromécanique des sols fins proches de la saturation cas des ouvrages en terre : coefficient B, déformations instantanées et différées, retrait/gonflement. Thèse de L'INP Grenoble.
- Broström, M., Enestam, S., Backman, R., Mäkelä, K., 2013. Condensation in the KCl–NaCl system. *Fuel Process. Technol.* 105, 142–148.
- Bulut, R., Lytton, R.L., Wray, W.K., 2001. Soil suction measurements by filter paper, in: *Expansive Clay Soils and Vegetative Influence on Shallow Foundations*. pp. 243–261.
- Chandler, R. J. et C. I. Gutierrez (1986). The filter-paper method of suction measurement . In : *Geotechnique* 36.2. Sous la dir. de Telford, p. 265–268.
- Cherbuy B, 1991-les sols salés et leur réhabilitation. Etude bibliographique, C.E.M.A.G.R.E.F 124P.
- Cui, Y.J., Delage, P., Schlosser, F., Wonarowcz, M., 1999. Etude du comportement volumique d'un loess du nord de la France. *XII<sup>ème</sup> Congrès Eur. mécanique des sols géotechnique Amsterdam* 1, 337–342.
- Cuisinier O. (2002). Comportement hydromécanique des sols gonflants compactés. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Ecole Nationale Supérieure de Géologie, Nancy.
- Dao, V.N.T., Morris, P.H., Dux, P.F., 2008. On equations for the total suction and its matric and osmotic components. *Cem. Concr. Res.* 38, 1302–1305.
- Daoud Y. 1993- Contribution à l'étude des sols des plaines du Cheliff. Le phénomène de salinisation, conséquences sur les propriétés physiques des sols argileux, Thèses Doct d'Eta. INA Alger, 233p.
- DERDOUR, Hamid. Contribution à l'étude de l'influence du taux de sodium échangeable sur le comportement des sols au compactage. 1981. Thèse de doctorat.
- DHOWIAN, A. W., EROL, A. O., et SULTAN, S. Settlement predictions in complex sabkha soil profiles. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 1987, vol. 36, no 1, p. 11-21.
- Dhowian, A.W., Erol, A., Sultan, S.M., 1987. Settlement predictions in complex sabkha soil profiles. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 36, 11-21.
- Duchaufour P, 1977-Pédologie. Pédogenèse et classification. Tome 1, Ed. Masson, Paris, 477p.
- Dudley J.H. (1970). Review of collapsing soils. *J. Soil Mech. Fdn Engng, Am. Soc. Civ. Engrs* 96, SM3. 925-947. (1.1), (1.2.7), (1.4), (1.4.2).
- Durand J.H 1983-les sols irrigables. Étude pédologique. ED. Imprimerie Boudin, Paris 339p.

- Dutta, A. (2014). A discussion on soil water characteristic curve and its measurements techniques. North East Students Geo Congress on advances in geotechnical engineering 18th October 2014, IIT-Guwahati.
- El Howayek, A., Huang, P.-T., Bisnett, R., Santagata, M.C., 2011. Identification and behavior of collapsible soils. Purdue University. Joint Transportation Research Program.
- Elgabou, H. M. (2013). Critical evaluation of some suction measurement techniques, A PhD. Thesis, Cardiff University.
- Estabragh, A.R., Moghadas, M., Javadi, A.A., 2013. Effect of different types of wetting fluids on the behaviour of expansive soil during wetting and drying. *Soils Found.* 53, 617–627.
- Fleureau, J.-M., Kheirbek-Saoud, S., Soemitro, R., Taibi, S., 1993. Behavior of clayey soils on drying–wetting paths. *Canadian Geotechnical Journal*, 30, 287-296.
- Foncea, C., Acevedo, P., Olguin, R., 2005. Geotechnical characterization of saline soils, Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. IOS Press, pp. 503-506.
- Fookes P.G., French W.J., Rice S.M.M. The influence of ground and groundwater geochemistry on Construction in the Middle East. *Q. J. Eng. Geol.* 1985;18:101-128.
- FORGES, M. Irrigation et salinité. *CIHEAM, options méditerranéennes*, 1972, p. 40-45.
- Fredlund D.G., Rahardjo H. (1993). *Soils mechanics for unsaturated soils*. New York : John Wiley et Sons. ISBN : 0-471-85008-X.517p.
- Goh, S.G., Rahardjo, H., Leong, E.C., 2014. Shear strength of unsaturated soils under multiple drying-wetting cycles. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 140, 6013001.
- Hafhouf, I., Bahloul, O., Abbeche, K., 2022. Effects of drying-wetting cycles on the salinity and the mechanical behavior of sebkha soils. A case study from Ain M’Lila, Algeria. *CATENA* 212, 106099.
- Heurteaux, P., Servant, J., 1979. Transferts et stockage de l’eau et des sels dans le profil pédologique des sols halomorphes camarguais. *La Terre et la vie*.
- Hoang, N.L., 2017. Etudes des propriétés hydromécaniques d’un sable limoneux: de la saturation partielle à la saturation complète, Université de Lyon.
- Hu, Z. et al., 2019. Effect of Wetting-Drying Cycles on Mechanical Behaviour and Electrical Resistivity of Unsaturated Subgrade Soil. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 3465327.
- Hullin M, 1983- Cours de drainage. Partie consacrée aux sols salés. Cours photocopié, Vol. 3, INA, Algerie, 139p.

- Jennings J.E., Knight K. - A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain-structure -. Proc. 6th Regional Conf. for Africa on SMFE, Durban, South Africa, 1975, p. 99-105.
- Johnson H., Kamal M.R., Pierson G.D. Ramsay J.B. Sabkhas of eastern Saudi Arabia. in: Al-Sayani, S.S. and Zotl, J.G. (Ed.), Quaternary Period in Saudi Arabia, Springer-Verlag, Austria, 1978;84-93.
- Kafodya, I., Okonta, F., 2018. Density control method for compression test of compacted lime-flyash stabilised fiber-soil mixtures. *MethodsX*, 5, 848-856.
- Kasangaki, G. J. (2012). Experimental Study of Hydro-Mechanical Behaviour of Granular Materials, A PhD. Thesis, Heriot-Watt University
- Kholghifard, M., Ahmad, K., Ali, N., Kassim, A., Kalatehjari, R., 2014. Collapse/swell potential of residual laterite soil due to wetting and drying-wetting cycles. *Natl. Acad. Sci. Lett.* 37, 147–153.
- Knight K. (1963). The origin and occurrence of collapsing soils. Proc. 3rd Reg. African CSMFE 1. 127-130. (1.4.1)
- Krahn J., Fredlund D. G. (1972). On total, matric and osmotic suction. *Soil Science*, 114(5), pp. 339-348.
- Kumar, N., Singh, S.K., Pandey, H.K., 2018. Drainage morphometric analysis using open access earth observation datasets in a drought-affected part of Bundelkhand, India. *Appl. Geomatics* 10, 173–189.
- Li, G. et al., 2018. Variations in strength and deformation of compacted loess exposed to wetting-drying and freeze-thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*, 151, 159-167.
- Likos, W. J. et N. Lu (2002). Filter paper technique for measuring total soil suction . In : Transportation research record 1786. Sous la dir. de National Research Council, p. 120–128.
- Liu, J., Zhang, L., 2014. The Microstructure Characters of Saline Soil in Qarhan Salt Lake Area and Its Behaviors of Mechanics and Compressive Strength. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 8649-8658.
- Liu, P., Chen, R.-P., Wu, K., Kang, X., 2020. Effects of drying-wetting cycles on the mechanical behavior of reconstituted granite-residual soils. *J. Mater. Civ. Eng.* 32, 4020199.
- Loiseau, C., Cui, Y.J., De Laure, E., 2001. Etude du comportement des lœss sur le tracé du TGV Est. Rapp. Rech. TERRASOL.
- Loyer, J.-Y., 1991. Classification des sols salés: les sols Salic. Cah. ORSTOM, sér. Pédol, 26.

- Lu, Z.H., Chen, Z.H., Pu, Y.B., 2002. A CT study on the crack evolution of expansive soil during drying and wetting cycles. *Rock Soil Mech.* 23 (4), 417–422 (in Chinese).
- Lutenegger AJ., and Saber RT. (1988). Determination of collapse potential of soils. *Geotechnical Testing J*, vol 11, 3:173-178.
- MARC, L. Le contrôle de la salinité dans les rizières. *Mémento Technique de Riziculture*, 2001, p. 6-12.
- MD Arifuzzaman, Mohammad A. Habib, Mohammed k.AL-Turkib, M.I.Khan, M.M, ALI. Improvement and characterization of Sabkha soil of Saudi Arabia. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)* 78:6 (2016) 1–11.
- Md, S.H., Ling-wei, K., Song, Y., 2016. Effect of drying-wetting cycles on saturated shear strength of undisturbed residual soils. *Am. J. Civ. Eng.* 4, 143–150.
- Medero, G.M., Schnaid, F., Gehling, W.Y., 2010. Closure to “Oedometer Behavior of an Artificial Cemented Highly Collapsible Soil” by GM Medero, F. Schnaid and WYY Gehling. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 136, 772.
- Mermoud.A., 2006. Cours physique du sol, Maitrise de la salinité des sols, pp 1-14.
- Mitchell J.K. (1993). *Fundamentals of soil behavior*. 2ème ed., John Wiley et Sons, New York, 437p.
- Mohamedzein, Y.E.A., Al-Rawas, A.A., 2011. Cement-Stabilization of Sabkha Soils from Al-Auzayba, Sultanate of Oman. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29, 999.
- Mohamedzein, Y.E.A., Al-Rawas, A.A., 2011. Cement-Stabilization of Sabkha Soils from Al-Auzayba, Sultanate of Oman. *Geotech. Geol. Eng.* 29, 999–1008.
- Nasr, A.M.A., 2015. Geotechnical Characteristics of Stabilized Sabkha Soils from the Egyptian–Libyan Coast. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33, 893-911.
- NF P94-048, 1996. Determination of the carbonate content - Calcimeter method, AFNOR, Paris France.
- NF P94-050, 1995. Determination of moisture content. Oven drying method, AFNOR, Paris France.
- NF P94-056, 1996. Granulometric analysis - Dry sieving method after washing, AFNOR, Paris France.
- NF P94-057, 1992. Granulometric analysis - Hydrometer method, AFNOR, Paris France.
- NF P94-071-1, 1994. Direct shear test with shearbox apparatus - Part 1 : Direct shear, AFNOR, Paris France.
- NF P94-077, 1997. Uniaxial compressive test, AFNOR, Paris France.
- NF P94-093, 1999. Determination of the compaction characteristics of a soil - Standards Proctor test - Modified Proctor test, AFNOR, Paris France.

- O.S. B. Al-Amoudi, S.A. Aiban & H. I. Al-Abdul Wahhab. Variability and characteristics of eastern Saudi Sabkha soils. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (14 ; Hamburg 1997-09-06).
- Omar Saeed Baghabra Al-Amoudi. Testing and Stabilization of Saline Sabkha Soils: A Review. (2008) - Sixth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering.
- Pan, H., Qing, Y., and Pei-yong, L. (2010). Direct and Indirect Measurement of Soil Suction in the Laboratory. *EDGE*, Vol. 15, pp. 1-14.
- Pansu, M., Gautheyrou, J., 2007. Handbook of soil analysis: mineralogical, organic and inorganic methods. Springer Science & Business Media.
- Prost R. (1990). Relation eau-argile: structure et gonflement des matériaux argileux. Dans A. Decarreau (dir), *Matériaux argileux : Structure, propriétés et applications*, Soc. Fr. Min. Cristall., Paris, PP.343-386.
- Rahardjo, H., Aung, K.K., Leong, E.C., Rezaur, R.B., 2004. Characteristics of residual soils in Singapore as formed by weathering. *Eng. Geol.* 73, 157–169.
- Rao, S.M., Revanasiddappa, K., 2006. Influence of cyclic wetting drying on collapse behaviour of compacted residual soil. *Geotech. Geol. Eng.* 24, 725–734.
- Renfro, A., 1974. Genesis of evaporite-associated stratiform metalliferous deposits; a Sabkha process. *Econ. Geol.* 69, 33–45.
- Richards B.G., Peter P. Martin R. (1984). Finite element analysis of volume change in expansive clays. *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. Exp. Soil.* Adelaide, pp. 141-148.
- S.N. Abduljawad, and O.S.B. Al-Amoudi. Geotechnical behaviour of saline sabkha soils. Volume 45 Issue 3, September 1995, pp. 425-445.
- Sabtani A., Al-Saifi M., Kazi A. Moisture retention characteristics of coastal sabkhas. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 1995;28(1):37-46.
- Sadeghi, H., Kiani, M., Sadeghi, M., Jafarzadeh, F., 2019. Geotechnical characterization and collapsibility of a natural dispersive loess. *Eng. Geol.* 250, 89–100.
- Sadhakar M. R., Shivananda P. (2005). Role of osmotic suction in swelling of salt-amended clays. *Note in Can Geotech J*, 42., pp 307-315.
- SERVANT, Jean. Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes: l'exemple des sols sales du sud et du sud-ouest de la France. 1975. Thèse de doctorat. université des sciences et techniques, Languedoc.
- Shehata, W., Bader, T., Harari, Z., 1990. Principal geological hazards along the Arabian Gulf coast. *J. King Abdul Aziz University*, 3, 289-302.
- Soltani, A., Raeesi, R., O'Kelly, B.C., 2020. Cyclic swell–shrink behaviour of an expansive soil treated with a sulfonated oil. *Proc. Inst. Civ. Eng. Improv.* 1–14.

- Sonnenfeld P. Brines and evaporites. Academic Press, Inc., London, 1984.
- Sreedeeep, S., Singh, D.N., 2006. Methodology for determination of osmotic suction of soils. *Geotech. Geol. Eng.* 24, 1469–1479.
- Tang, C.-S. et al., 2020. Effects of wetting-drying cycles and desiccation cracks on mechanical behavior of an unsaturated soil. *CATENA*, 194, 104721.
- Tang, C.S., Cui, Y.J., Shi, B., Tang, A.M., Liu, C., 2011b. Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting–drying cycles. *Geoderma* 166 (1), 111–118.
- Terzaghi K. et Fröhlich O.K. (1936). *Theorie der Setzung von Tonschichten*. F. Deuticke, Leipzig-Wien. (1.1), (1.2.3).
- US Salinity Laboratory Staff, 1954. *US Salinity Lab. Diagnosis and Improvements of Saline and Alkali soils- USDA Handbook*.
- USDA, 1987. *Soil Mechanics Level 1 Module 3 USDA Textural Soil Classification*
- Wan, A.W.L., Gray, M.N., Graham, J., 1995. On the relations of suction, moisture content and soil structure in compacted clays, in: *Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated Soils, Paris, France*. pp. 215–222.
- Wang, C., Zhang, Z.Y., Liu, Y., Fan, S.M., 2017. Geometric and fractal analysis of dynamic cracking patterns subjected to wetting-drying cycles. *Soil Till Res.* 170, 1–13.
- Wang, S., Ding, J., Xu, J., Ren, J., Yang, Y., 2019. Shear Strength Behavior of Coarse-Grained Saline Soils after Freeze-Thaw. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23, 2437-2452.
- Wroth C.P., Houlsby G.T. (1985). *Soil mechanics- Property characterization and analysis procedures*. Proc. 11<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mech. Found. Eng., San Francisco. ISBN : 90-6191560-0, pp. 1-55.
- XP P94-011, 1999. *Description - Identification - Appellation of soils - Terminology - Terms of classification*, AFNOR, Paris France.
- XP P94-090-1, 1997. *Oedometric test- Part 1: Compressibility test on quasi saturated fine grained soil with loading in increments* AFNOR, Paris France.
- Xu, J., Li, Y., Ren, C., Lan, W., 2020. Damage of saline intact loess after dry-wet and its interpretation based on SEM and NMR. *Soils Found.* 60, 911–928.
- Yesiller, N., Miller, C.J., Inci, G., Yaldo, K., 2000. Desiccation and cracking behavior of three compacted landfill liner soils. *Eng. Geol.* 57, 105–121.
- Ying, Z., Benahmed, N., Cui, Y.-J., Duc, M., 2022. Determining osmotic suction through electrical conductivity for unsaturated low-plasticity soils. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*

- Ying, Z., Cui, Y.-J., Benahmed, N., Duc, M., 2021. Salinity effect on the compaction behaviour, matric suction, stiffness and microstructure of a silty soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13, 855-863.
- Ying, Z., Duc, M., Cui, Y.-J., Benahmed, N., 2020. Salinity assessment for salted soil considering both dissolved and precipitated salts. *Geotechnical Testing Journal*, 44, 130-147.
- Ying, Z., Duc, M., Cui, Y.-J., Benahmed, N., 2021. Salinity assessment for salted soil considering both dissolved and precipitated salts. *Geotech. Test. J.* 44.
- Zhang, X.W., Kong, L.W., Yin, S., Chen, C., 2017. Engineering geology of basaltic residual soil in Leiqiong, southern China. *Engineering Geology*, 220, 196-207.
- Ziani, H., Abbèche, K., Messaoudene, I., Andrade Pais, L.J., 2019. Treatment of collapsible soils by additions of granulated slag and natural pozzolan. *KSCE J. Civ. Eng.* 23, 1028–1042.
- Zielinski, M., Sánchez, M., Romero, E., Sentenac, P., 2011. Assessment of water retention behaviour in compacted fills. *Proc. Inst. Civ. Eng. Eng.* 164, 139–148.