

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOU MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



Memoire de fin d'études



*En vue de l'obtention du diplôme de Master en
Génie Civil
Option : Géotechnique:.*

Thème

*Contribution à l'étude d'un comportement en chemin séchage
humidification d'un sol (Application à une marne de Kabylie)*

Etudié par :

Mehalla chafia

Dirigé par:

M^{me} :Moubarek H.

Année 2017 / 2018

Table des matières

REMERCIEMENTS.

DEDICASES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES NOTATIONS

RESUME

INTRODUCTION GENERALE

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Nom de la roche selon le pourcentage de calcaire et d'argile.....	6
Tableau I.2 : Représente le classement en Algérie.....	7
Tableau II.1 : succion imposées par la technique osmotique	36
Tableau II.2 : L'humidité relative RH et la succion totale de différentes solutions salines saturées.	37..
Tableau II.3 : caractéristiques des solutions salines utilisées à 20°C.....	38
Tableau II.4 : Techniques de mesure et de contrôle de la succion.....	38
Tableau III.10 : la description des sols en fonction de leur teneur en eau CaCO_3	50
Tableau III. : Résultats de l'analyse chimique (LCTP).....	50
Tableau III.1 : Détermination de la teneur en eau naturelle W (%).....	51
Tableau III.2 : Détermination de la densité humide.....	53
Tableau III.3 : Détermination de la densité sèche.....	53
Tableau III.4 : Classification des masses volumiques sèches.....	54
Tableau III.5. : Résultat de l'analyse granulométrique	56
Tableau III.5 : Résultat de la sédomontométrie	58
Tableau III.9 : Détermination de la limite de plasticité.....	63
Tableau III. 10 : Présente la détermination de l'indice de plasticité.....	63
Tableau III.11 : Classification selon l'indice de plasticité.....	64
Tableau .III.12 : Plage de consistance des sols plastique d'après ATTERBERG.....	65
Tableau III.13 : plage de consistance des sols plastique d'après ATTERBERG.....	65

Tableau.III.12 : L'état de saturation du matériau (d'après TERZAGHI).....	69
Tableau VI.1 : Résultat de mesure de la teneur en eau de papier filtre Watnman42).....	74
Tableau IV.2 : Résultat de la mesure de la teneur en eau de la marne.....	75
Tableau IV.3 : Résultats de la mesure de la succion totale papier filtre.....	76
Tableau IV.3: Résultats de la mesure de la masse volumique de kerdane.....	81

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE IV

Figure IV.1:	
Figure IV.2:	
Figure IV.3:	
Figure IV.4:	
Figure IV.5 :	
Figure IV.6 :	
Figure IV.7 :	
Figure IV.8 :	
Figure IV.9 :	
Figure IV.10 :	
Figure .IV.11:	
Figure IV.12. .:	
Figure IV.13.:	

Chapitre II

Figure II.1: Sol humide et non saturé	17
Figure II.2: Sol humide et non saturé (M Callaud 2004). trois états des sols non saturés (Worth &Houlsby, 1985).....	17
Figure II.3: a : Structure de la molécule d'eau (H ₂ O)	20
FigureII.3-b : Couche d'eau adsorbée	20
Figure II.4: Cohésion entre les grains	20
FigureII.5 :Retrait et gonflement.....	21
Figure II.6: Présentation schématique de la consistance d'un sol à différents niveaux de saturation d'après Tang etc., 1979).....	22
Figure II.7 : Sollicitations de l'interface (d'après Chen, etc. 1987).....	23
Figure II.8.: Diagramme d'état de l'eau (Xiang-Ling Li, 1999).....	24
Figure II.9: Modèle physique du phénomène d'effet capillaire	26.

Figure II.10 : Effet de la succion sur les grains du sol.....	29
Figure II.11 : (a) Principe de plaque de tensiomètre.....	30
Figure II (b) Plaque de tensiomètre	30
Figure II.12 : Méthode du papier filtre	32
Figure II.13 : Cellule de Richards pour le contrôle de succion par translation d'axe	33
Figure II.14 : Mise en œuvre de la technique osmotique.....	34
Figure II.15 : Courbe de calibration e la concentration de la solution PEG en fonction de la succion.....	35.
Figure II.16 : Courbe de rétention- phénomène d'hystérésis).....	39
Figure II.17 : Les courbes de rétention pour différents types de sols	40
Figure II.18 : Comparaison des chemins de drainage sur la pâte et de compression oedométrique et isotrope sur le limon de Jossigny	44
Conclusion	

Chapitre 3

Figure III. 1 : le site sur Google Earth.....	46
Figure III. 2. La zone de prélèvement.....	47
Figure III.3 : carte géologique.....	47
Figure III. 4: échantillon intact paraffiné.....	48.
Figure III.5 : Appareille de détermination de CaCO ₃	49.
Figure III.7 : Déroulement de l'essai de la pesé hydraustatique.....	52
Figure III.8 : Matériels utilisés pour l'essai de pycnomètre.....	55
Figure III.9 : analyse granulométrique par tamisage –NP 18—560.....	56
Figure III.10 : préparation de l'échantillon.....	57
Figure III.11 :préparer le tamisat au tamis 80 µm.....	57
Figure III.12: Siphonnée l'eau une fois redevenue claire sans entrainer l'élément fins....	57
Figure III.13 : Préparation de mélange de défloquant et versé le mélange dans unet prendre les lectures l'aide d'un densimètre.....	58
Figure III.14: Courbe granulométrique.....	59
Figure III.15: Représentation des limites d'Atterberg.....	60

Figure III.16 : Détermination de la limite de liquidité.....	61
Figure III.17 : calcul de la limite de liquidité.....	61
Figure III.18 : préparation de boulette jusqu'à atteigne 3mm de diamètre et environ 10cm de largeur et avoir une fissuration.....	62
Figure III.19: abaque de plasticité de Casagrande- classification LPC des sols fins.....	64
Figure III.20 : fourchette de classification de sol selon la valeur d' I_p selon GTR92.....	64
Figure III.21 : matériel d'essai au bleu de méthylène par l'essai à la tâche.....	66
Figure III.22 : Déroulement de l'essai au bleu de méthylène.....	66
Figure III.25 : Ordre de grandeur (type de sol en fonction de la valeur VBS).....	68

Chapitre I

I. Généralité sur les sols

I.1.introduction.....	1
I.2. Définition des sols et les éléments constitutifs d'un sol.....	1
I.2.1. Définition d'un sol.....	1
I.1.1.2. Eléments constitutifs d'un sol.....	2
I.1.1.3. Propriétés des sols.....	2
I.1.1.4. Propriétés à caractère chimique.....	3
I.1.1.5. Propriétés à caractère physique.....	3
I.1.1.6. Les caractéristiques physiques des sols.....	3
I.1.1.7. Proprétés fondamentales.....	3
I.2. Définition de la marne.....	5.
I.2.1. La marne se développe suivant deux processus.....	6.
I.2.2. Formation des marnes.....	6
I.2.3. Classement des marnes en Algérie.....	7
I.2.4. Identification visuelle	8
I.2.5. Genèse des marnes.....	8
I.2.6. Caractéristiques des marnes	8

I.2.7. Comportement des marnes	9
I.2.8. Comportement des marnes en présence d'eau.....	9.
I.2.9. Les différents types de marnes.....	11
I.2.10 Caractéristiques des marnes.....	11
I.2.11. Les dégradations qui peuvent engendrer par les sols marneux.....	12
Conclusion	16

Chapitre II : la succion dans les sols non saturé

II.1 Introduction	16
II.2.Sols non saturés.....	16
II.3. Etat des connaissances sur les sols non saturés.....	17
II.4. Interactions entre les phases solides et fluides	18
II.5. Interaction eau-solide : phénomène d'adsorption de l'eau sur les particules solides.....	18
II.6. Interaction gaz-eau.....	22
II.7. Interaction air-eau-solide : capillarité	25...
II.8. Succion	27
II.9. Les différents types de la succion	27
II.9.1. La succion matricielle	27
II.9.2. La succion capillaire	27
II.9.3. La succion d'adsorption	28
II.9.4. La succion osmotique	28
II.9.5. La succion totale.....	29
II.10. Technique de mesure et de contrôle de la succion.....	29
II.10.1. Techniques de mesure de la succion	
II.10.1.1. Tensiomètre	31
II.10.1.2. Plaque de succion.....	3
II.10.1.3. Méthode psychrométrique.....	31
II.10.1.4. Méthode du papier filtre	31
II.10.2. Technique de contrôle de la succion.....	32
II.10.2.1. Méthode de la surpression d'air.....	32
II.10.2.2. Méthode osmotique.....	34
II.10.2.3. Technique de dessiccateur à vide (Méthode à pression vapeur).....	36

- Facteurs influençant sur les mesures par la méthode de la pression à vapeur.....	37
II.5. Relation teneur en eau-succion (la courbe de rétention d'eau).....	38
II.6. Chemin d'humidification drainage.....	41.

Chapitre III

III- 1. Introduction.	46
III- 2. Situation et description du site étudié.	46
III.2.1. Origine de matériau utilisé.	46
III .2 .2. Sismicité de la région.	47
III.3. Essai de laboratoire.	48
III-3. 1 Essais d'identifications	
III.3-1-1. Détermination de la teneur en carbonate de calcium CaCO ₃ (NF P94-048)- méthode de calcimètre.	50
III.3-1.2. La teneur en eau naturel W % (NF P 94-050) – méthode par étuvage.....	50
III. 3-1-4. Détermination de la masse volumique sèche (ρ_d) (NF P-94-064).	53
III.3-1-5. Détermination de la densité des particules solide (ρ_s), NF P-94-054).....	54
III .3-1-3. Analyse granulométrique.....	55
❖ Analyse granulométrie méthode par tamisage à sec après lavage (NF P 94-05658).	
❖ Analyse granulométrie par sédimentation.....	59
III.3-1-4. Les limite d'Atterberg (NF P 94-051).	59
❖ Détermination de la limite de liquidité W_L (%)	61
❖ Détermination de la limite de plasticité W_P	63
❖ Détermination de l'indice de plasticité I_P	63
❖ Calcule le l'indice de consistance I_C	65
III.3-1-5. La valeur de bleu de méthylène par l'essai à la tache (NF P 94- 068).....	67
❖ Indice des vides, degré de saturation, la porosité	
Indice des vides « e ».....	68

Degré de saturation « Sr ».....	69
La porosité	69

Chapitre IV : Techniques de mesure et d'imposition de la succion

Introduction

IV-2. Essai de mesure de la succion avec la méthode du papier filtre	71
IV-2-1. Déroulement de l'essai	72
IV-3. Calcul la teneur en eau de papier filtre et de la marne étudié	73
• Calcul de la succion totale	75
• Calcul de la succion matricielle.....	76
IV-4. Technique de contrôle par phase vapeur (technique des solutions salines saturées)	
IV-5 Détermination des paramètres d'états.....	80.
• Calcul du poids volumique de Kerdan.....	81.
• Calcul de la teneur en eau	84
• Calcule l'indice des vides.....	84
• Calcul de degré de saturation.....	84
• Chemin de drainage humidification sur une pâte.....	85
• Les paramètres qui influe sur de la précision de l'essai des solutions salines non saturées.....	

Conclusion

Liste des principales notations et indices

- W: Teneur en eau naturelle ;
- W : Teneur en limite liquidité ;
- Wp Teneur en limite de plasticité ;
- Ip : : Indice de plasticité ;
- Ic:Indice de consistance ;
- Ir: Indice de retrait ;
- γ : Poids volumique total ;

γ_w : Poids volumique de l'eau ;

γ_s : Poids volumique des grains solides ;

γ_h : Poids humide ;

γ_d : Poids volumique sèche.

S_r : Degré de saturation.

e : L'indice des vides

n : Porosité.

W_s : Teneur en eau saturé.

ρ : Masse volumique total.

M_w : Masse de l'eau.

M_s : Masse des grains solides.

V_s : volume des particules solides.

V_t : volume total.

W_l : Limite de liquidité.

W_p : Limite de plasticité.

W_r : Limite de retrait.

I_p : Indice de plasticité

I_c : indice de consistance.

S : La succion dans le sol non saturé.

R : R : la constante des gaz parfaits.

ρ_w : la masse volumique de l'eau liquide.

M_v : est la masse molaire de la vapeur l'eau.

H : est l'humidité relative de l'air.

P_v : la pression de la vapeur d'eau en équilibre avec la solution saline

P_{vs} : La pression de la vapeur saturante

γ_K : La masse volumique de Kerdane

P_{hk} : Poids humide de l'échantillon immergé

P_{imm} : Poids de l'échantillon immergé

INTRODUCTION GENERALE

La mécanique des sols et des roches s'est généralement intéressée dans le passé à l'étude de matériaux totalement saturés en eau ou parfaitement secs. Or, en génie civil, en ingénierie de l'environnement ou en ingénierie des réservoirs, on rencontre fréquemment des problèmes qui impliquent des sols ou des roches sous saturation partielle. Les ruptures dans les pentes et les talus sont souvent liées à des modifications du degré de saturation. L'interaction air – eau – solide rend le comportement mécanique ainsi que les aspects hydriques beaucoup plus compliqués que dans un sol saturé.

Parmi l'ensemble des matériaux existants, les matériaux dits évolutif non saturés (dont les propriétés physiques et mécaniques évoluent dans le temps); c'est-à-dire qui peuvent changer de nature ou structure et donc de comportement en présence d'eau et à la suite de leur extraction, et donc font l'objet d'une attention particulière.

Le but de cette étude est d'effectuer une campagne d'essai au laboratoire sur un sol non saturé en chemin drainage- humidification ;

Ce mémoire se rapporte à l'identification le comportement hydrique d'un sol marneux sur un chemin de drainage humidification ; il s'agit d'une étude qui rentre dans le projet de construction de 500/ 1000 logement AADL à **Draa El Mizan**, entreprise par Metallurgical Corporation of China ALGERIA. L'étude géotechnique est confiée au laboratoire National de l'Habitat et de la construction (LNHC), Direction Régionale Centre, Unité de Tizi-Ouzou ; qui aimablement accepté de nous fournir le matériau,

- Dans le premier et le deuxième chapitre nous avons présenté une analyse bibliographie détaillée sur les sols en générale et les sols non saturés en particulier.
- Le troisième chapitre, a pour objectif de l'identification et la caractérisation de sols étudié.
- Le quatrième chapitre est une étude expérimentale sur les méthodes de mesure et d'imposition de la succion, et basée sur l'interprétation de la courbe de drainage-humidification la marne étudié.

Dans l'intérêt de mieux maîtriser l'influence de la succion sur le comportement de sols non saturé (à l'état naturel), il y a un intérêt considérable à savoir contrôler ou imposer la succion dans les essais géotechniques dans la détermination de la courbe de rétention.

Introduction

Les sols marneux de la Grande Kabylie sont d'origine sédimentaire. Ils occupent majoritairement la dépression synclinale d'orientation Est-ouest, du bassin versant de l'oued Sébaou. Ils se présentent sous forme de dépôts massifs selon des épaisseurs pouvant atteindre 500 à 1000 mètres. Leur extension peut être estimée à 40 % de la superficie totale du bassin versant. En outre, des sols marno-calcaires stratifiés affleurent aussi dans la chaîne côtière d'Affir, selon des épaisseurs réduites de l'ordre de 20 voire 50 mètres (Raymond, 1976).

I.1.1. Définition des sols et les éléments constitutifs d'un sol

I.1.1.1. Définition d'un sol

Dans les études géotechniques les matériaux existant à la surface de l'écorce terrestre sont classés en deux grandes catégories :

- Les roches : agglomérats de grains minéraux liés par des forces de cohésion fortes et permanentes, même après immersion prolongée dans l'eau → mécanique des roches
- Les sols : agrégats de grains minéraux pouvant être séparés sous l'effet d'action mécaniques relativement faibles → mécanique des sols.

Les sols sont des matériaux meubles, poreux, hétérogènes et souvent anisotropes. Les matériaux, minéraux ou organiques, sont généralement à l'état de grains ou de particules dont les formes et les dimensions sont essentiellement variables. (Jacques Lérau).

I.1.1.2. Eléments constitutifs d'un sol

Un sol est un mélange d'éléments solides constituant le squelette solide, d'eau pouvant circuler ou non entre les particules et d'air ou de gaz. Il est donc, en général, constitué de trois phases ;

Sol = phase solide + phase liquide + phase gazeuse.

- La phase solide : est constitué par les grains minéraux de l'agrégat ;
- La phase liquide : constitué par l'eau occupe les vides des agrégats, si tous les pores sont remplis d'eau, le sol est dit saturé, si non il est partiellement saturé ;

- La phase gazeuse : dans le sol partiellement saturé une partie des pores de l'agrégat sont remplis par du gaz, essentiellement de l'air.

I.1.1.3. Propriétés des sols

D'un sol à un autre, les propriétés peuvent être très variables. Elles dépendent de la nature du mélange complexe entre les différentes fractions granulaire. Selon la quantité de cailloux, de graviers, de sable, de silts, d'argiles, de colloïdes, de matière organiques, d'eau et gaz, les propriétés de la terre sont changeantes. C'est souvent la fraction dominante d'un sol qui réagit les propriétés fondamentales du matériau (Eléments de Géotechnique).

I.1.1.4. Propriétés à caractère chimique

Ces propriétés sont également tributaire de la nature minéralogique et de leur chimie constitutive, de la nature et de quantité des matières organiques. La quantité en oxyde de fer, de magnésium ou de calcium, en carbonates et en sulfates peut caractériser la terre d'un point de vue chimique. Le sulfate de calcium, particulièrement gonflant à l'hydratation peut être très néfaste ; sa solubilité dans l'eau peut augmenter la sensibilité des argiles (Guillaud, 1989).

I.1.1.5. Propriétés à caractère physique

Elles sont nombreuses et permettent de préciser la quantité d'un sol pour la construction (Guillaud, 1989).

- **Ameublissement** : C'est l'aptitude d'un sol, pour un certain degré d'humidité, à adhérer aux objets, notamment aux outils elle augmente avec l'humidité jusqu'à un maximum pour être ensuite diminuer.
- **Masse volumique des grains solides** : elle exprime en Kg/m^3 ; par exemple, les micas et les feldspaths ont une masse volumique de 2600 à 2700 KN/m^3 , les sable de 2600 à 3000 Kg/m^3 , les argiles de 2500 KN/m^3 .
- **Teneur en eau** ; c'est la rapport de la quantité d'eau contenue dans le sol sur la quantité de sol sec, elle s'exprime en pourcentage pondéral et définit les différents états hydrique du sol

Pouvoir absorbant :

I.1.1.6. Les caractéristiques physiques des sols

Nous verrons que c'est le matériau tri-phasique formé de grains solides, d'eau et d'air, les phases non solides jouent un rôle fondamental.

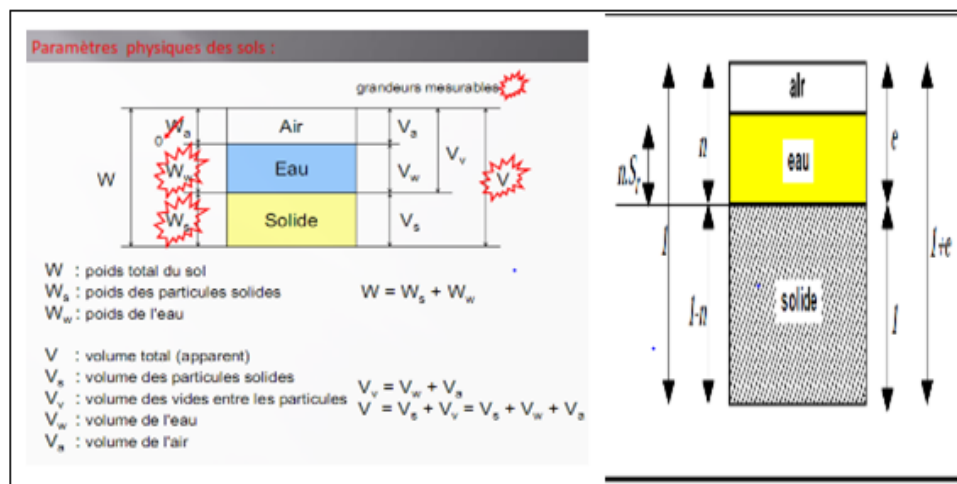


Figure I.1: Schémas simplifié des trois phases du sol (Jacques Lérau).

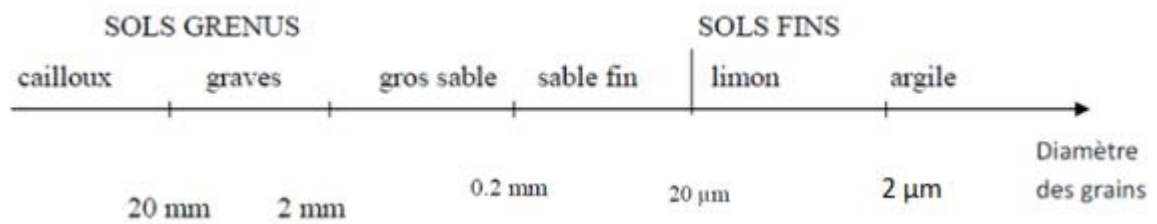
1.1.1.7. Propriétés fondamentales

L'étude exhaustive des propriétés de sol n'est pas toujours nécessaire. Il convient surtout de connaître quelques propriétés fondamentales qui sont :

- ✓ La texture ;
- ✓ La plasticité ;
- ✓ La cohésion ;
- ✓ Texture des sols.

La texture fait référence à l'apparence extérieure d'un sol ; elle peut varier suivant les dimensions et la forme des particules, ainsi que selon la distribution relative des grosseurs des grains. Par conséquent, les sols à grains grossiers comme les sables et les graviers, ont une texture grossière ; les sols à texture fin, tels que les silts et les argiles, sont constitués essentiellement de grains de minéraux très petits, invisibles à l'œil nu. (A.KOMAR, 1976)

La texture d'un sol se mesure par l'analyse granulométrique pour les fractions de grains grossiers ; cailloux, graviers, sables et limons et par un grand nombre de laboratoires et se référant aux normes American Society for Testing Material (A.S.T.M., AFNOR) est la suivante :



La plasticité

La plasticité se définit comme la propriété d'un sol à subir des déformations sans réaction élastique notable caractérisé par une fissuration ou une pulvérisation.

La plasticité d'un sol ainsi que les limites entre différents états de consistance sont déterminées par les mesures des limites d'Atterberg. Elles s'effectuent sur la fraction du sol dont le diamètre des particules $< 0,4$ mm, la quantité d'eau exprimée en pourcentage, qui correspond à la limite de transition entre l'état de consistance fluide et l'état plastique est nommé à la limite de liquidité W_L . Entre l'état plastique et l'état solide la transition est nommée limite de plasticité W_p . A W_L , le sol commence à manifester une certaine résistance au cisaillement. A W_p le sol cesse d'être plastique et devient cassant.

L'indice de plasticité I_p égal à $W_L - W_p$ précise la plage de comportement plastique d'un sol. La combinaison de W_L et W_p précise la sensibilité d'un sol aux variations d'humidité. (Ghendoud.M 2016)

La cohésion

La cohésion d'un sol exprime la capacité de ces particules à se maintenir ensemble lorsque l'on exerce sur le matériau contrainte de traction. (Ghendoud.M 2016)

I.2. Définition de la marne

En géologie ;

Les marnes sont des roches meubles, dont les principaux constituants sont des argiles d'une part, des carbonates de chaux d'autre part. Les propriétés sont très variables selon les proportions de l'un et de l'autre. Elles forment une famille de sol qui se situe entre les argiles et les calcaires

- Les argiles franches : 0% < carbonates < 10 %
- Argiles marneuse : 10% < carbonates < 70%
- Les marnes : 30% < carbonates > 90%
- Calcaire marneux : 70% < carbonates > 90%

Les argiles marneuses et les marnes sont de propriétés voisines de celles des argiles.

Leur sensibilité à l'eau diminue lorsque la proportion de calcium augmente.

En géotechnique

Les marnes sont dites évolutives. Elles présentent une résistance élevée à l'état sec mais leur comportement est différent en contact avec l'eau ; elles deviennent gonflantes et non durables, ce qui limite leur utilisation comme matériaux de remblais dans les travaux de génie civil et infrastructures. Néanmoins, cette dernière demeure assez faible pour céder aux manipulations de mise en œuvre. (K. MEHIDI, 1997)

On peut résumer dans le tableau suivant que la marne est le terme moyen d'une série continue qui va du calcaire à l'argile (d'après Mehidi, 1997) :

Tableau. I.1 : Nom de la roche selon le pourcentage de calcaire et d'argile.

% CaCo3	% argiles	Nom de la roche	Comportement
0	100	Argile	Plastique
10	90	Argile	Plastique
35	65	Marne argileuse	Plus au moins raide
65	35	Marne	Plus au moins raide
90	10	Calcaire marneux	Rigide
100	0	Calcaire	Rigide

I.2.1. La marne se développe suivant deux processus

- ✓ **Par l'action mécanique (écrasement, attribution)**

Cela se produit durant l'exécution des travaux, sous l'effet des engins de chantier ou alors au sein d'un remblai, sous l'effet de charges statiques ou dynamiques.

- ✓ **Par modification interne**

Les liaisons sont détruites au sien du matériau par dissolution du ciment ou par des phénomènes physico-chimiques.

L'évolution des marnes peut causer une modification des caractéristiques géotechniques du sol pouvant ne pas correspondre aux conditions dans les quelles, elle est réutilisée (sensible à l'eau, compactage, propriétés mécaniques que requière la stabilité des remblais...).

I.2.2. Formation des marnes

Les marnes contiennent des argiles provenant soit de l'altération des massifs émergés, ce sont des argiles héritées soit de la reprise des sols ou se matant les argiles héritées et les argiles néoformées. Acheminées par un réseau hydrographique, les niveaux argileux se déposent dans le bassin de sédimentation. Les marnes auront une origine détritique ou l'héritage domine ou alors une origine chimique ou les minéraux argileux s'étaient, dans le cas, à partir d'ions en solution dans l'eau.

Pendant et après le dépôt, les phénomènes de diagenèse interviennent, aboutissant ainsi à la formation du matériau dit « marne ».

I.2.3. Classement des marnes en Algérie

Le tableau suivant nous montre les différents types des marnes qui existent sur le pays d'Algérie par rapport à les caractéristiques minéralogiques, granulométriques et comportement des types de marnes ;

Tableau I.2 : Représente le classement en Algérie (MOUKRANI LYNDA, 2012-2013).

Ordre	Types de marnes	Minéraux argileux dominants	Texture	Sensibilité à la battance	Sensibilité à la Fissuration
1	Vert-clair grises	Interstratifiés (30 à 85%)	Limono-argileuse Limono-argileuse	Limitée Limitée	Moyenne à excellente Excellente
2	Vert-clair armées	Interstratifiés (30 à 85%)	Limono-argileuse	Limitée	Moyenne à excellente
3	Brunes épaisses	Interstratifiés (45 à 85%)	Argilo-limoneuse	limitée	Moyenne
4	Bleues compactes brunes armées	Illite (35%) Interstratifiés (25%) Interstratifiés (45 à 85%)	Argileuse Argilo-limoneuse	Faible Limitée	Excellente Moyenne

I.2.4. Identification visuelle

- Les marnes saines

Elles se présentent sous forme de massifs de couleur grisâtre. Elles sont compactes et n'ont pas subi un quelconque chargement concernant leurs caractéristiques physiques et mécaniques.

- Les marnes altérées

Leur couleur est jaune. Elles ont subi une modification de leurs caractéristiques physiques et chimiques causant par conséquent une dégradation des propriétés mécaniques.

I.2.5. Genèse des marnes

Dans les étapes proprement chimiques du cycle sédimentaire, les néoformations dominent (carbonates, silice, phosphate). Au cours du dépôt, et après celui-ci, interviennent les phénomènes de diagenèse (somme de processus de formation des roches à partir des boues). (Dunoyer, 1969) a distingué les phénomènes suivants :

- Diagenèse des carbonates

Dans l'étude de la sédimentologie des carbonates, on a distingué deux types de phénomènes diagnostiques :

- o Ceux qui affectent la composition minéralogique et chimique (remplacement, recristallisation, dissolution, cimentation, formation de nodules).

- Ceux qui altèrent la structure (fracturation, déformation, plastique, tassement par dessiccation), (Schmidt, 1965).

- **Diagenèse des minéraux argileux**

Les transformations dia-génétiques affectent particulièrement les minéraux argileux en raison de leur taille, de leur surface spécifique élevée, de leur structure feuilletée facilitant les échanges d'ions entre le minéral et son entourage.

L'ensemble des phénomènes dia-génétiques conduit à la formation d'un matériau dont les propriétés dépendront, en grande partie de l'intensité des phénomènes qui se sont produits.

I.2.6. Caractéristiques des marnes

Les marnes sont constituées de trois phases : phase carbonatée, phase sableuse et phase argileuse. Les caractéristiques mécaniques sont liées à l'importance respective de chacune des phases, mais aussi à la nature minéralogique de la phase argileuse. La présence d'argile montmorillonitique ou encore d'argiles fibreuses induit des caractéristiques mécaniques mauvaises.

Cependant, cette influence particulière des argiles peut être tempérée ou au contraire exacerbée suivant les types de texture. Si les liaisons entre carbonates sont abondantes et fortes, le matériau aura un comportement de roche. Au contraire si les carbonates sont noyés dans une matrice argileuse, le matériau aura un comportement d'un sol.

Le comportement du matériau dépend des proportions des composantes, de la texture initiale et de la nature de la fraction argileuse. (HAMMAR ET MEZIANI, 1996).

I.2.7. Comportement des marnes

Le comportement des roches argileuses peut être influencés par l'eau et ou par la minéralogie et la texture de ces roches. En présence d'eau, ces roches montrent des comportements qui peuvent être sensiblement différents et qui peuvent être aussi additionnés aux caractéristiques minéralogiques et texturales des roches. Par exemple, les minéraux accessoires comme la pyrite qui, par oxydation, contribue à la dégradation des minéraux argileux et par voie de conséquence à l'évolution des textures générant une dégradation des caractéristiques mécaniques. (Pejon et al 1997).

Les marnes, aux proportions des smectites variables, présentent une faible résistance au cisaillement et une forte aptitude aux processus de retrait gonflement (Derriche et Cheikh Lounis, 2004).

I.2.8. Comportement des marnes en présence d'eau

Les études réalisées par Pejonet al (1997) sur cinq (5) échantillons de marne dans le but d'étudier leur gonflement libre, ont montré que les marnes des terres noires (TN) sont les moins gonflantes et que les marnes de Limagne (CF) présentent le plus grand gonflement expliqué par la présence de 30 % de smectite. Quant aux marnes de Banassac (BNA), elles ont un gonflement intermédiaire comme le montre la figure suivante :

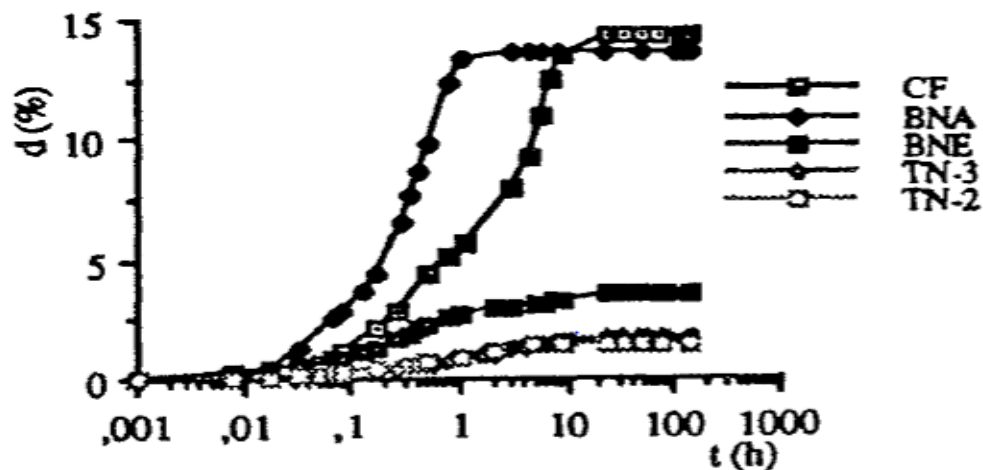


Figure I.2 : Gonflement libre – un seul cycle d'imbibition (Pejon et al 1997).

Les différences de comportement au gonflement constatées pour ces matériaux ne peuvent pas avoir pour cause uniquement la présence d'argiles. Si on observe les paramètres physiques de ces matériaux les différences sont nettes. Les terres Noires qui présentent le gonflement le plus faible sont des roches presque saturées, avec un indice des vides et une porosité très faibles, des masses volumiques sèches γ_d et humide (γ), élevées. Les marnes de Banassac, par contre présentent un faible degré de saturation, une forte porosité, un indice des vides intermédiaire et des masses volumiques plus faibles. Ces caractéristiques indiquent déjà que cette roche présentera un gonflement plus important que les Terres Noires.

Au niveau de la pression de gonflement, les résultats obtenus ne montrent pas les mêmes différences entre les matériaux que pour le gonflement libre. Le matériau de

Banassec et les Terres Noires présentent des valeurs semblables de pression de gonflement, qui varient entre 300KPa à 400KPa, alors que les valeurs de gonflement libre présentent beaucoup plus de différences. Déjà les marnes de Limagne qui contiennent de smectites dans la fraction argileuse développent une pression de gonflement plus importante, de près de 800KPa. En fonction de ces résultats, on peut dire que, apparemment, les pressions de gonflement sont plus fortement influencées par la minéralogie des argiles que le gonflement libre.

Pejon et al (1997), ont conclu que pour les roches les plus résistantes qui sont aussi, les plus consolidées, avec un faible pourcentage d'argile peu actives, comme les Terre Noires, la texture a une importance prépondérante. Le gonflement se produit par l'ouverture de fractures successives, qui augmentent à chaque nouveau cycle d'imbibition et de séchage. Ainsi que, les argiles même en faibles quantités et peu actives, peuvent avoir une grande importance sur le gonflement de la roche. Cet effet étant en relation avec la micro texture.

I.2.9. Les différents types de marnes

Ces différents éléments responsables de la couleur et de l'aspect permettent de définir la marne rencontrée par une appellation. On parle ainsi :

➤ **La couleur**

- Des marnes vertes du bassin de Paris,
- Des marnes bleues d'Argenteuil,
- Des marnes rouges de Marseille,

➤ **Les constituants remarquables**

- De marnes dolomitiques,
- De marnes micacées,
- De marnes sableuses,
- De marnes glauconieuses,
- De marnes bitumineuses,
- De marnes gypseuses, etc.

➤ **L'intérêt stratigraphique et paléontologique**

- Des marnes à foraminifères,
- Des marnes à pholadomyies,
- Des marnes à spongiaires,

- Des marnes à radiolaires, etc.

Ces appellations qui compliquent singulièrement le problème amènent à la genèse de ces matériaux

I.2.10 Caractéristiques des marnes

Les marnes sont constituées de trois phases : phase carbonatée, phase sableuse et phase argileuse. Les caractéristiques mécaniques sont liées à l'importance respective de chacune des phases, mais aussi à la nature minéralogique de la phase argileuse. La présence d'argile montmorillonitique ou encore d'argiles fibreuses induit des caractéristiques mécaniques mauvaises.

Cependant, cette influence particulière des argiles peut être tempérée ou au contraire exacerbée suivant les types de texture. Si les liaisons entre carbonates sont abondantes et fortes, le matériau aura un comportement de roche. Au contraire si les carbonates sont noyés dans une matrice argileuse, le matériau aura un comportement d'un sol.

Le comportement du matériau dépend des proportions des composantes, de la texture initiale et de la nature de la fraction argileuse. (*Hammar et Meziani, 1996*).

I.2.11. Les dégradations qui peuvent engendrer par les sols marneux

Le problème principal est le gonflement / retrait qui cause des fissures apparaissant clairement sur les constructions et sur les routes. Ces fissures occasionnent des ouvertures dans les fenêtres et les portes et elles se propagent dans la maçonnerie et la structure de l'ouvrage.

Les ouvrages sont sujets au gonflement principalement dans la maçonnerie et la structure du bâtiment. Parmi ces derniers, les maisons individuelles, construites sans mesure de précaution de construction sur ce type de sol, sont sujettes à des dégradations et des fissures au niveau des poteaux, des murs de remplissage et des fondations (radier, semelle superficielle, ou filante, et les pieux).

Ces désordres résultent du caractère différentiel que prennent les mouvements du sol de fondation (tassement ou gonflement) sollicitant la structure en flexion ou en cisaillement.(figure I.1).

Ces différences relatives de mouvement proviennent par ailleurs de l'hétérogénéité des sols de fondation, de celle des forces appliquées par la structure sur le sol, ainsi

que des perturbations hydriques que le bâtiment peut engendrer (Mouroux et al. 1987). Les dégâts causés aux structures des bâtiments reposant sur des sols fins gonflants aux U.S.A (1976) ont été chiffrés à environ 2.25 milliards de dollars.



Figure I.3: Fissure sur les murs et fissures diagonales (Derriche Z et al.2002)

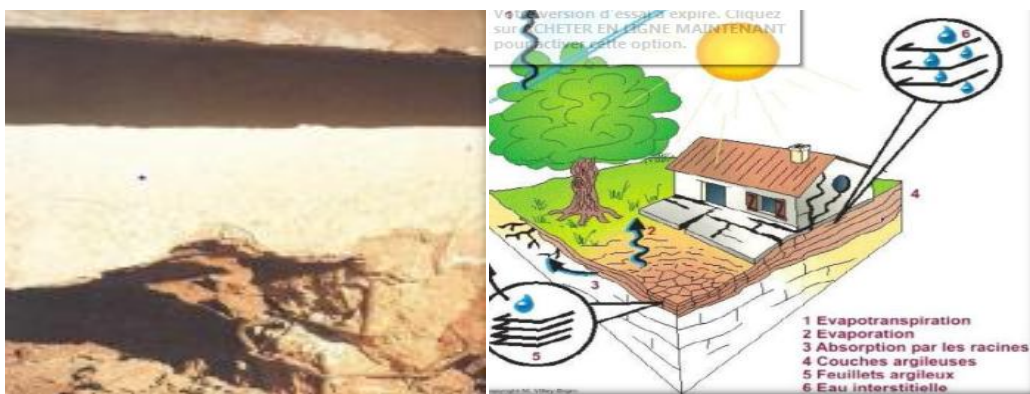


Figure I.4 : Cisaillement au niveau des nœuds (derriche Zet al.2002).

Figure I.5 : Risque à prendre en compte lors de la construction (Freeah 2006).

Les figures suivantes illustrent les différents types de dégâts causés à un bâtiment qui repose sur un sol sujet au gonflement ou au retrait. (Freeh 2006 et Mouroux et al, 1988).

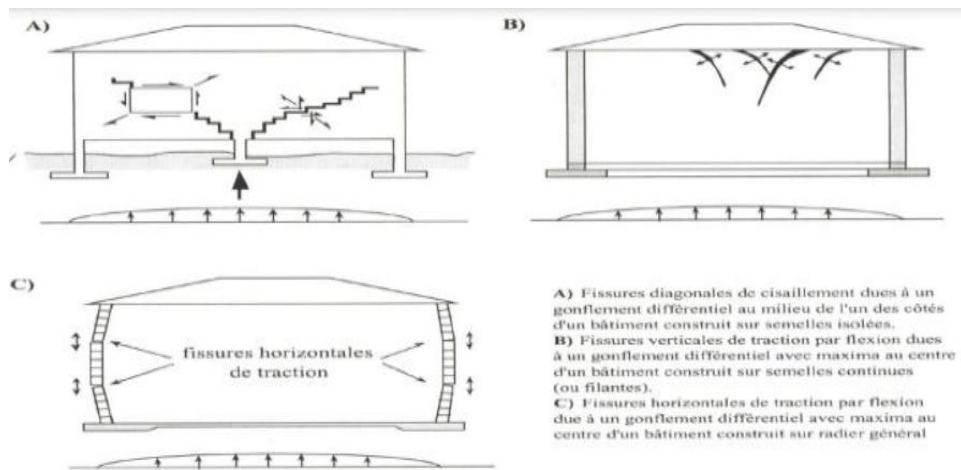


Figure I.6 : Formes et directions de fissuration. (Mouroux et al, 1988).

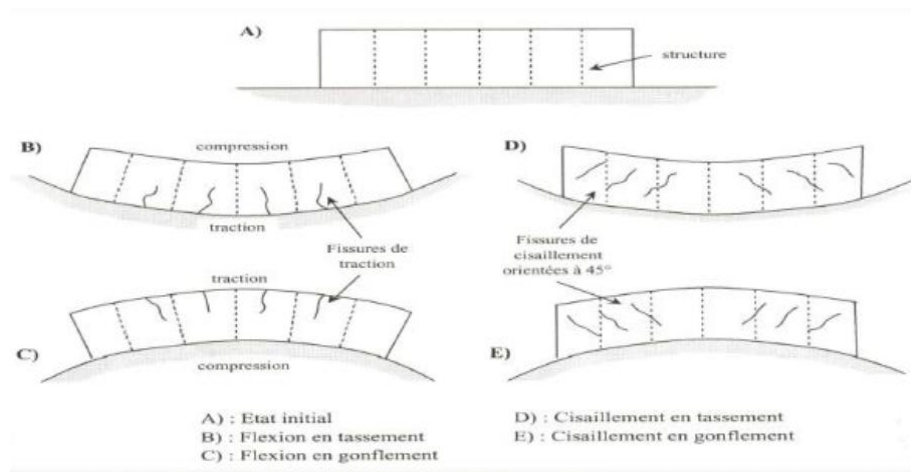


Figure I.7 : Forme de dégâts sur des bâtiments reposant sur des terrains gonflants

- **Cas des chaussées**

Le gonflement peut provoquer des désordres importants à la structure de la chaussée.

Ce phénomène est causé par des variations de teneur en eau du sous sol. D'après (Jennings 1962), il peut être attribué au climat et à la surcharge. D'autre auteur signalent que sur les routes d'importance moyenne, il ya apparition de divers type de fissures. Les désordres subits par la chaussée se résument (Freeah 2006).



Figure I.8 : Dégradation des routes (Freeah2006).



Figure .I.9 : Dégradation de chaussées (Jennings .1962).

Le bassin versant marneux de la région des Terres noires est responsable de plus de 40% des apports de sédiments fins (Brochet 1993), la figure ci-dessus montre que les matériaux solides transportés par les rivières (la taille des matériaux sont des fins transportés par les cours d'eau), et la fragilité des matériaux (marne noire) lorsque il ya un contact avec une quantité importante d'eau qui a subi un écoulement entre 700 et 800 g/l. ces observations ont été constatées en 1993 par (Antone et al).



Figure I.10 : La marne noire –Draix (Brochot 1993)



Figure I.11 : Un écoulement marneux –Draix de 700 à 800 g/l (Antoine et al. 13 aout 1993)

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à donner la description des marnes en particulier des sols fins. Le sol comme matériau hétérogène, présente lors de son étude un comportement complexe, cette complexité s'accroît d'avantage dans le cas savoir les comportements mécaniques et physiques de sol. Notre but est d'étudier expérimentalement le matériau marne de notre région (Grande Kabylie). L'identification de ces matériaux fera l'objet du chapitre suivant.

II.1 Introduction

Dans le domaine de la mécanique des sols, la succion est utilisée de plus en plus pour l'étude des sols non saturés. La connaissance de la succion dans un sol non saturé a de multiples intérêts. En effet, la succion conditionne les mouvements et l'équilibre de l'eau dans la zone non saturée. En outre, elle influence fortement le comportement mécanique des sols. Il est donc indispensable de pouvoir mesurer la succion lorsqu'un sol est en état non saturé (succion importante qui peut atteindre jusqu'à 10^3 MPa). (M.Callaud 2004)

Pour mieux maîtriser l'influence de la succion sur le comportement hydromécanique des sols (à l'état naturel), il y a un intérêt considérable à savoir contrôler ou imposer la succion dans les essais géotechniques dans la détermination de la courbe de rétention (ASTM).....à définir

II.2.Sols non saturés

L'hypothèse qui consiste à considérer que le sol se trouve soit dans un état sec, soit dans un état saturé, néglige l'effet de la succion qui se développe au sein d'un sol non saturé et qui conditionne largement son comportement mécanique.

Le domaine des sols non saturés couvre :

- Soit des ouvrages réalisés par compactage tels que les remblais, les digues, les barrages en terre et les barrières géologiques d'étanchéité de centre de stockage de déchets.
- Soit des sols naturels dans les régions arides à semi arides et même dans des régions tempérées ou les couches de surface sont très souvent non saturées (figure II.1)

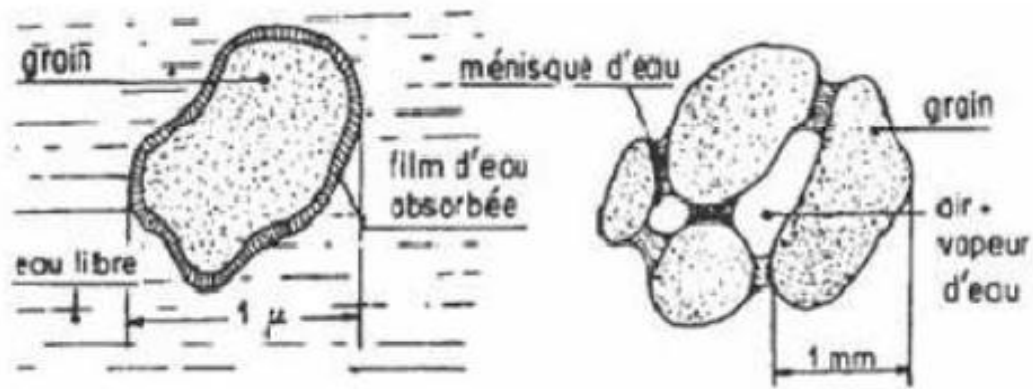


Figure II.1 : Sol humide et non saturé (M Callaud 2004).

Fredlund et Rahadjo (1993), proposent d'ajouter à ces trois phases, un autre système qui présente des propriétés physiques différentes des autres notamment par le pouvoir d'exercer une tension superficielle (Tensil pull). Il s'agit de l'interface eau-air (Contractil Skin). Le comportement mécanique des sols non saturés est ainsi régi par l'interaction entre ces différentes phases. (Cité par CHIKHI K, 2011)

II.3. Etat des connaissances sur les sols non saturés

Dans les sols non saturés coexiste trois phases et l'on observe en général que l'eau « mouille » la surface des particules, c'est-à-dire la recouvre tandis que l'air est plutôt situé au milieu des pores (figure II.2). Suivant le degré de saturation du sol, nous distinguons trois modes d'interaction entre les phases (Worth & Houlsby, 1985) :

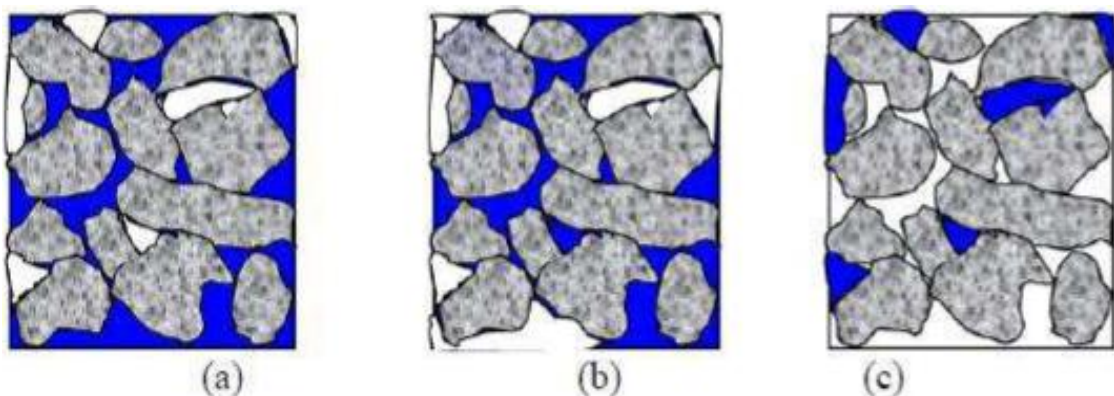


Figure II.2 : Les trois états des sols non saturés (Worth & Houlsby, 1985).

- ✓ **Sol quasi saturé** : la phase liquide est continue et l'eau et l'air peut circuler sous l'influence de la pesanteur. La phase gazeuse est discontinue et ne se déplace pas de façon autonome. Les sols sont « quasi saturés » pour des degrés de saturation supérieurs à 85 (%) (Figure II.2(a)).

- ✓ **Sol à la saturation d'équilibre** : la phase liquide est encore continue mais l'eau ne peut plus se déplacer sous la seule influence de la pesanteur. La phase gazeuse est également continue, mais ne circule pas en général (figure II.2.b).
- ✓ **Sol faiblement saturé** : l'eau entoure les particules et occupe des volumes discontinus à leurs points de contact sous forme de ménisque. La phase liquide est toujours continue par l'intermédiaire des pellicules d'eau adsorbée mais ne se déplace que très lentement. La phase gazeuse est continue, mais généralement immobile. L'évaporation de l'eau à l'intérieur des pores du sol peut devenir un phénomène important (Figure II.2.C). (Cui Y. J., 2000)

II.4. Interactions entre les phases solides et fluides

L'élément essentiel qui conditionne les propriétés des sols non saturés est l'existence de la succion, due à l'interaction entre les trois phases constituant le sol, qui est liée à la capacité de rétention d'eau du sol. Dans le cas de sols fins non saturés, l'interaction eau-solide n'est pas seulement due à la succion, mais également à l'adsorption de l'eau sur les particules solides, à cause des propriétés colloïdales des particules fines.

Il est donc important de bien comprendre les interactions entre les trois phases d'un sol et, en particulier, le développement des ménisques capillaires, entraînant la succion au sein de la structure du sol, ainsi que le phénomène d'adsorption d'eau dans les sols fins. (Cité par : Xiang-Ling Li, 1999)

II.4.1. Interaction eau-solide : phénomène d'adsorption de l'eau sur les particules solides

Selon la théorie chimique des colloïdes, lorsque le diamètre d'une particule solide est inférieur à $2\mu\text{m}$, cette particule possède des propriétés colloïdales. A cette très petite taille, il existe certains atomes et ions libre sur la surface des particules. Par conséquent, les particules sont dans un champ électrostatique non symétrique. Il en résulte que les particules colloïdales ont tendance à adsorbé des molécules polaires ou des ions venant du monde extérieur afin d'atteindre un équilibre électrique. On appelle cette capacité d'adsorption la charge surfacique. C'est essentiellement cette charge surfacique qui provoque, autours des plaquettes d'argiles, le phénomène d'adsorption qui influence fortement le comportement hydromécanique des sols argileux. (Xiang-Ling Li, 1999)

Les minéraux argileux ont une autre caractéristique importante : une partie de Si et ou Al (ou Mg) peut être remplacée par certains cations de basse valence. La conséquence directe de cette substitution isomorphe est de créer un déficit de charges positives dans la structure des minéraux. Ce déficit peut être compensé par l'adsorption d'un nombre équivalent de cations (Ca, Mg, K, Na etc.....) présents dans la solution. Cette capacité d'échange d'ion est la deuxième cause du phénomène d'adsorption autour des plaquettes d'argile.

Comme on l'a évoqué ci avant, les grains d'argile sont constitués d'empilements de minéraux argileux qui sont des phyllosilicates. A cause de la structure de ceux-ci, les grains ainsi formés sont de forme aplatie. Leurs faces sont généralement chargées négativement. Dans certaines conditions, des charges positives peuvent exister localement. (Xiang-Ling Li, 1999)

Les théories les plus couramment utilisées conduisent à représenter les plaquettes d'argile avec des charges négatives sur les grandes faces et des charges positives sur les petites (Andrei 1977), ce qui permet de neutraliser la charge globale (Bolle, 1993). Certains ions sont attirés et retenus à proximité immédiate de la plaquette et constituent ainsi une couche de contre-ions. La concentration de contre-ions diminue avec la distance par rapport à la surface de plaquette. De ce fait, on peut distinguer deux couches de contre-ions. La première est très dense et bien fixée sur la surface : on appelle la couche fixe. La deuxième est maintenue à une certaine distance : on la nomme la couche diffuse. L'ensemble des charges négatives sur les faces de la plaquette et la couche de contre-ions est connu sous le nom de double couche électrique. C'est ainsi qu'on parvient à expliquer la présence, à proximité de la plaquette, d'une couche d'eau adsorbée constituée par une auréole d'ions et de molécules d'eau. Il y a deux raisons pour lesquelles l'eau est adsorbée sur les faces de la plaque :

- La première est que la structure de la molécule d'eau est dipolaire (figure II.3-a) et, en conséquence, la molécule d'eau s'oriente facilement dans un champ électrique et peut être adsorbée par les plaquettes
- La deuxième est qu'elle peut aussi être attirée par les plaquettes. La figure III.3-b) présente schématiquement la présence d'une couche d'eau adsorbée autour d'une plaquette. Plus la distance des ions ou dipôles par rapport à la plaquette est petite, plus grandes sont les forces de rétention qui empêchent leurs mouvements. Par conséquent,

le mouvement de l'eau adsorbée est plus ou moins restreint. Les propriétés de l'eau adsorbée sont alors proches de celle d'un solide du point de vue mécanique.

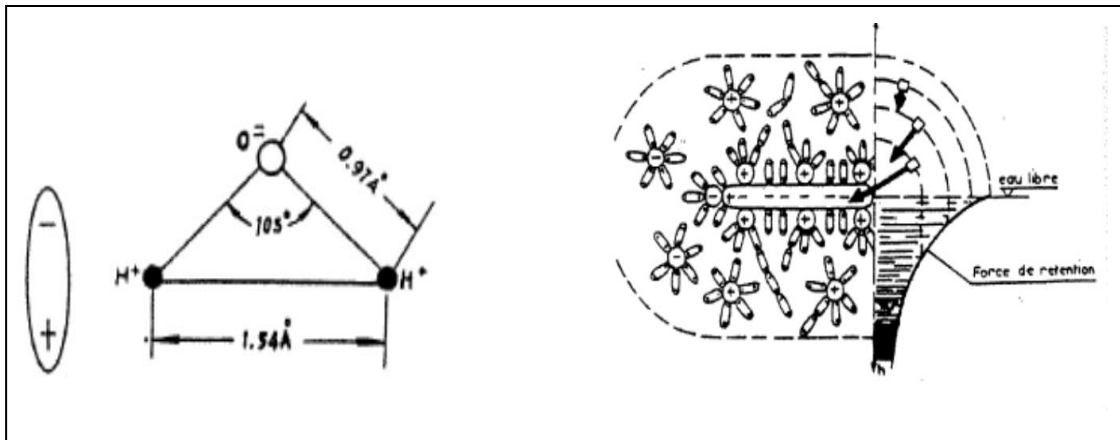


Figure II.3-a : Structure de la molécule d'eau (H_2O) adsorbée.

Figure II.3-b : Couche d'eau (D'après Andrei, 1977)

L'épaisseur de la couche d'eau dépend de la nature et de la charge électrique des ions. Plus les charges sont grandes, plus l'épaisseur est réduite.

Le phénomène d'adsorption facilite l'établissement de ponts de liaison constitués par les ions et les dipôles d'eau. Ces ponts sont l'origine principale de la cohésion des sols fins (figure III.4), grâce à laquelle ils ont la capacité de résister à des contraintes de traction ou de cisaillement. (Xiang-Ling Li, 1999)

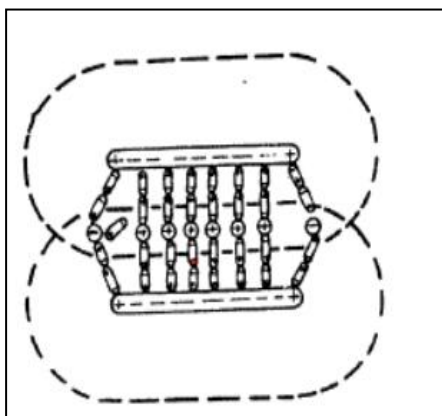


Figure II.4 : Cohésion (d'après Andrei, 1977).

La présence de couche d'eau adsorbée peut également influencer la microstructure des sols fins. La modification de l'épaisseur des couches d'eau adsorbée est aussi la cause essentielle du gonflement et du retrait des sols fins soumis à mouillage ou à séchage (figure II.5)

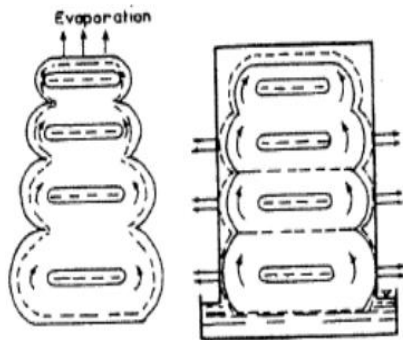


Figure II.5 : Retrait et gonflement (d'après Andrei, 1977).

Pour un même sol et une teneur en eau, lorsque l'épaisseur des couches d'eau adsorbée est plus grande, les pores occupés par l'eau libre sont plus petits et par conséquent, la perméabilité hydraulique est plus faible. Ceci implique que la perméabilité d'un sol peut varier en fonction de l'environnement ou il se trouve.

D'une manière analogue, on peut expliquer le fait que la consistance d'un sol fin soit conditionnée par la variation de la saturation (et de la teneur en eau) (figure II.6, Tang etc., 1979).

Lorsque la teneur en eau est extrêmement basse, il n'y a que l'eau adsorbée de la couche fixe dans le sol et l'épaisseur de cette-ci est extrêmement fine ; les liaisons constituées par les couches d'eau adsorbée communes entre les grains sont extrêmement forte : le sol se comporte alors comme un solide. Quand la teneur en eau est très grande, les particules sont écartées complètement par l'eau libre, il n'y a plus aucune résistance et se comporte comme un liquide : c'est l'état semi-solide, la teneur en eau est encore faible, mais les couches d'eau adsorbée de la couche diffuse sont présentes et elles sont mises en commun. Les liaisons entre les particules sont encore suffisamment fortes ce qui rend le sol difficilement déformable. Si la teneur en eau continue à augmenter, le sol entre en état plastique. La plasticité dépend du degré de saturation. L'effet de la succion peut alors entrer en jeu (ce point fait l'objet des paragraphes qui suivent).

La compressibilité, la résistance au cisaillement, la perméabilité varient selon la consistance qui peut être caractérisée par les limites d'Atterberg au niveau macroscopique. L'indice de plasticité est une mesure relative de la plasticité du sol.

L'exposé qui précède témoigne que seule la connaissance des phénomènes d'interaction entre les phases constituant le sol permet d'expliquer certaines propriétés et de prévoir le comportement sous l'action de contraintes mécaniques ou de chemins hydriques (séchage ou mouillage). (Xiang-Ling Li, 1999)

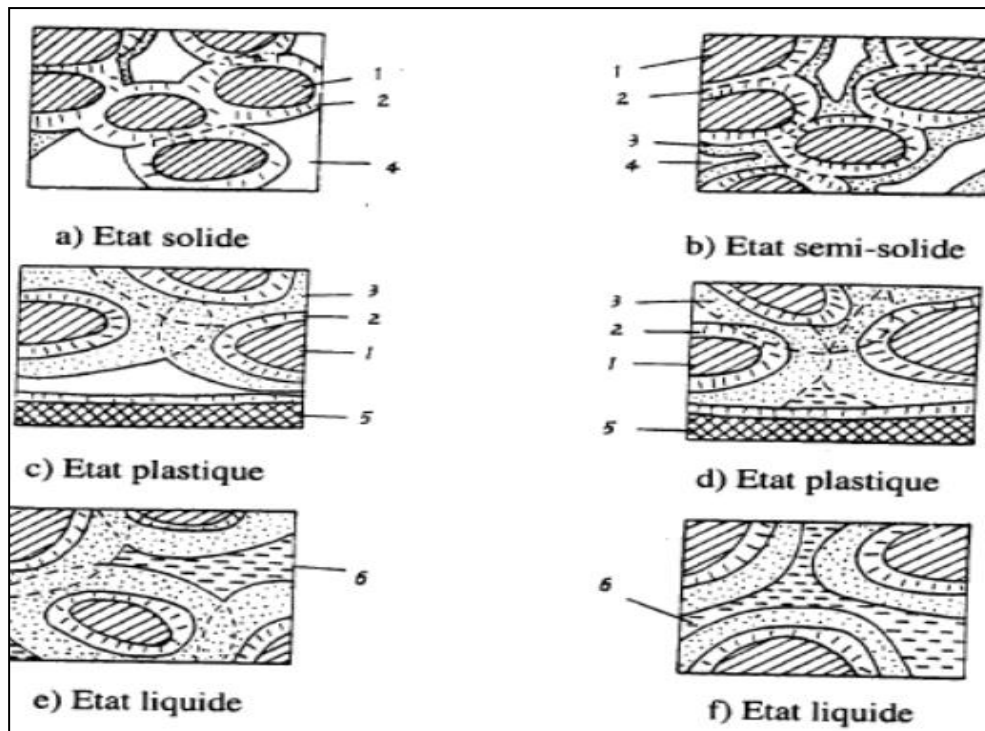


Figure II.6 : Présentation schématique de la consistance d'un sol à différents niveaux de saturation d'après Tang etc., 1979)

Avec :

- 1 : particules solides (assemblage de plaquettes)
- 2 : eau adsorbée de la couche fixe
- 3 : eau adsorbée de couche diffuse
- 4 : air
- 5 : autres matériaux solides
- 6 : eau non adsorbée.

II.4.2. Interaction gaz-eau

▪ Interface Gaz- eau : Tension superficielle

Avant d'adsorber le thème de la succion dans un sol non-saturé, il est nécessaire d'évoquer certaines caractéristiques fondamentales relatives à l'interaction gaz-eau-solide. L'interface entre le gaz et eau possède une propriété fondamentale : la tension superficielle.

Du point de vue moléculaire, une molécule à l'intérieur de la masse d'eau est en équilibre puisque toutes les forces d'attraction qui agissent sur cette molécule ont une résultante nulle, tandis qu'une molécule sur l'interface, à cause des forces d'attraction

des molécules à l'intérieur de l'eau, est soumise à une résultante non nulle (figure II.7-a). Cette résultante des forces en chaque point est perpendiculaire à l'interface et orientée vers l'intérieur de l'eau. Pour l'équilibre, une tension superficielle σ_{aw} se produit le long de l'interface (figure II.7-b).

Elle agit tangentielllement à l'interface. Elle a la dimension d'une force par unité de longueur [N/m] (Fredlund etc., 1993).

Du point de vue macroscopique, l'interface est soumise à une pression différente de ses deux côté : pression d'air U_a d'un côté, pression d'eau U_w de l'autre. Dans un sol non saturé, la pression d'eau toujours plus faible que la pression de l'air (si l'air est à pression nulle, l'eau est sous tension). Donc, il faut une force supplémentaire pour équilibrer l'interface. Grâce à la tension superficielle, l'équilibre est assuré.

Considérons une petite portion de l'interface. La résultante des tensions superficielles σ_{aw} sur cette petite surface fournit l'effort supplémentaire nécessaire pour l'équilibre de l'interface (figure II.7-b). L'interface se comporte comme une membrane souple à cause de la tension superficielle : elle prend une forme concave. On trouve une similitude dans le comportement d'une bulle de savon pour laquelle la pression à l'intérieur est plus grande qu'à l'extérieur. La forme concave de la bulle assure, grâce aux tensions superficielles, une force supplémentaire vers l'intérieur et maintient l'équilibre (figure II.7-c) (Léreau J., (2006).

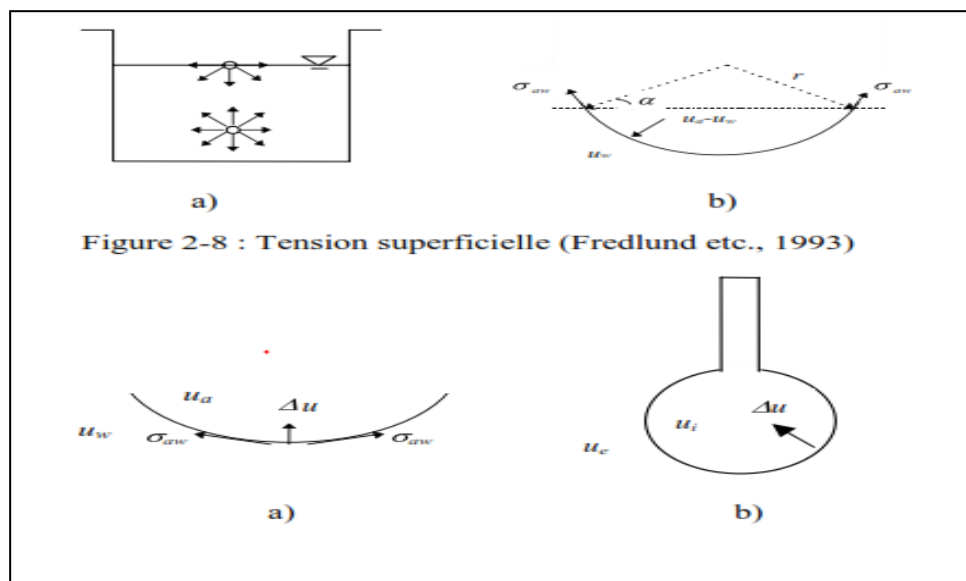


Figure 2-8 : Tension superficielle (Fredlund etc., 1993)

Figure II.7: Sollicitations de l'interface (d'après Chen, etc. 1987).

- **Humidification relative (diagramme d'état de l'eau)**

Dans la nature, l'état de l'eau varie en fonction de la pression et de la température. Le diagramme de la (figure II.8) montre que l'eau peut exister sous trois états : solide (glace), liquide (eau) et gazeux (vapeur d'eau). Les trois courbes dans le diagramme représentent les états d'équilibre du système. Deux états peuvent coexister en équilibre lorsque les variables d'état se trouvent sur l'une des trois courbes dans le diagramme : l'état solide et l'état liquide peuvent coexister sur la courbe (AC) (courbe de fusion), les états solide et gazeux coexistent sur la courbe AD (courbe de sublimation), et en fin, lorsque l'état se trouve sur la courbe AB (courbe de vaporisation), un équilibre s'établit entre les états liquide et gazeux. On dit alors que le système est en état saturant. L'eau, dans un tel système, s'appelle eau saturante, tandis que la vapeur d'eau s'appelle vapeur d'eau saturante. La pression correspondante s'appelle la pression de la pression de la vapeur d'eau saturante que l'on note U_{v0} . Bien entendu, lorsque la pression et la température se trouvent au point A, les trois états peuvent coexister en équilibre. (Xiang-Ling Li, 1999)

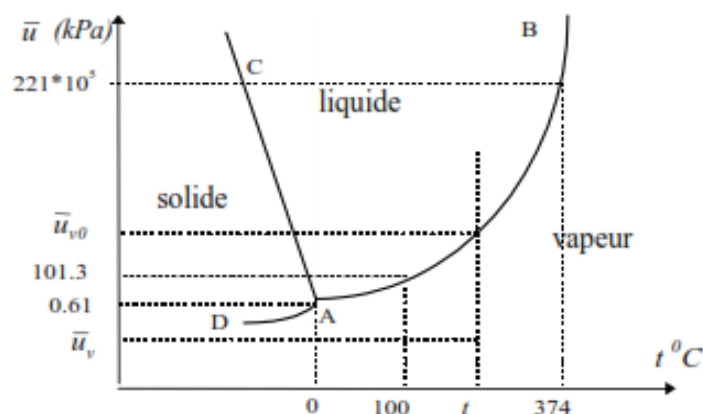


Figure II.8 : Diagramme d'état de l'eau (Xiang-Ling Li, 1999).

Dans la nature, la vapeur d'eau est mélangée à l'air. Mais la vapeur d'eau dans l'air n'est pas toujours en équilibre avec l'eau environnante et dès lors, la pression partielle de la vapeur U_v n'est pas nécessairement égale à celle de la vapeur saturante U_{v0} à la température correspondante. La quantité de vapeur d'eau dans l'air peut être modifiée soit par condensation, soit par vaporisation. Dès lors, la pression partielle de la vapeur d'eau U_v à une température donnée traduit en quelque sorte l'état d'humidité de l'air. C'est ainsi qu'on définit l'humidité relative de l'air par :

$$RH = \frac{U_v}{U_{v0}} (\%)$$

Remarquons que la notion d'humidité relative de l'air ainsi définie constitue une mesure relative, alors que la pression de vapeur saturante U_{v0} au-dessus d'une surface plane est une pression de référence mesurée dans un système qui ne contient que l'eau pure.

La présence d'air dans l'atmosphère n'a pas d'effet sur le comportement de la vapeur d'eau d'après la loi de Dalton. Cette loi déclare que la pression d'un mélange de plusieurs gaz est égale à la somme des pressions partielles que chacun des gaz exercerait s'il occupait, seul la totalité du volume. Si le gaz considéré est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau, la loi de Dalton s'écrit :

$$U_g = U_{as} + U_v$$

Où U_g est la pression de gaz (un mélange d'air sec et de vapeur d'eau), U_{as} est la pression partielle de l'air sec.

Autrement dit, le comportement de chacun des gaz dans un mélange est indépendant de celui des autres. Par conséquent, la présence de l'air ne change pas l'état d'équilibre de l'eau (courbe AB de la figure II.8).

La pression partielle de la vapeur d'eau dépend de nombreux facteurs physico-chimiques du système qui contient la vapeur et l'eau.

II.4.3. Interaction air-eau-solide : capillarité

Lorsque l'eau est mise en contact avec l'air et un solide, une tension superficielle σ_{aw} se produit le long de la ligne de contact au solide à cause de la différence entre les pressions de l'eau U_w et de l'air U_a agissant sur la l'interface. Physiquement, cette tension superficielle se traduit par le phénomène capillarité qu'illustre-la (figure II.9).

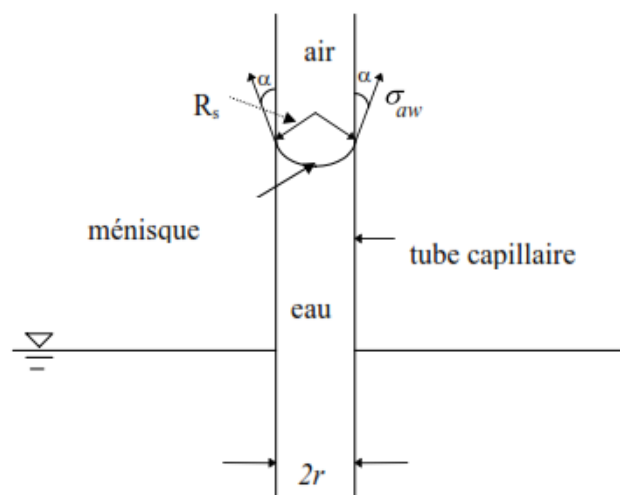


Figure II.9 : Modèle physique du phénomène d'effet capillaire (Xiang-Ling Li, 1999).

Un tube de rayon « r » est plongé dans un bassin d'eau. Sous l'effet de tension superficielle, l'eau monte dans le tube à tendance à mouiller la paroi du tube. Ainsi, l'interface air-eau dans le tube prend une courbure et forme ménisque. La différence entre la pression de l'air et celle de l'eau est généralement appelée pression capillaire. La relation entre la tension superficielle et la pression capillaire peut être décrite par la loi de Jurin (simplification de la loi de Laplace basée sur l'hypothèse que l'interface est de forme sphérique) (figure II.11) :

$$U_a - U_w = \frac{2\sigma_{aw}}{R_s} = \frac{2\sigma_{aw} \cos \alpha}{r}$$

Avec R_s est le rayon de courbure du ménisque et α l'angle de raccordement (ou de contact) du ménisque avec la surface du solide. L'angle de contact α est égal à zéro lorsque l'eau est pure. Dans ce cas, le ménisque forme une demi sphère parfaite, le rayon de courbure du ménisque R_s est égal à celui du tube r , on a alors :

$$U_a - U_w = \frac{\sigma_{aw}}{r}$$

De manière plus générale, l'angle de contact est l'angle de l'interface de contact des deux fluides non miscibles avec la surface du solide. Il dépend des caractéristiques physico- chimiques et de la composition chimique des fluides et du solide de la mouillabilité, etc. Dès lors, dans un sol non saturé, la pression capillaire n'est pas

seulement influencée par les fluides, mais aussi par les caractéristiques physico-chimiques du sol lui-même. (Xiang-Ling Li, 1999).

II.5. Succion

Le terme succion ou potentiel de l'eau, désigne l'état intégrant de tension qui tient en compte tous les effets de surface capable de retenir l'eau à l'intérieur de la structure de sol.

Plusieurs définitions ont été données à la succion :

- ✓ Pour Bligh (1965), l'effet de succion dans un sol non saturé est équivalent à une pression extérieure appliquée.
- ✓ O'Neill et Poormoayed (1980), ont défini la succion comme la tension exercée par le sol sur l'eau, laquelle est responsable de la rétention de l'eau dans le sol.
- ✓ Scheiner (1987), a défini la succion totale comme la pression négative exercée sur l'eau du sol de manière qu'un plan d'eau pure soit en équilibre avec l'eau du sol à travers une membrane semi perméable.
- ✓ La succion d'un sol peut être décrite par l'affinité du sol pour l'eau. Plus le sol est sec, plus la succion est importante (Chen 1988).

II.6. Les différents types de la succion

Richards (1974) (Blatz J. A et al 2008) à énuméré trois composantes de succion dans les sols non saturés, à savoir ; la succion matricielle, adsorption dans le cas des minéraux argileux, et la succion osmotique.

II.6.1. La succion matricielle

La succion matricielle exprime la capacité de rétention d'eau de composants du sol, elle est dépendante des propriétés capillaires du milieu et des propriétés d'adsorption développées par les particules d'un sol.

Elle est généralement considérée comme la composante dominante de la succion totale dans le cas des sols non- plastique.

II.6.2. La succion capillaire

Lorsqu'un liquide et un gaz sont en contact, l'interface entre les deux phases est le siège d'une tension de surface T_s . En effet, une molécule à l'intérieur du liquide n'est pas soumise aux mêmes forces d'interaction intermoléculaires qu'une molécule se situant à

l'interface liquide-gaz. Cette propriété permet d'expliquer le phénomène d'ascension capillaire.

II.6.3. La succion d'adsorption :

Dans les sols fins non saturés, contrairement aux sols grenus, l'action d'attraction de l'eau par le sol n'est pas seulement due à la capillarité, mais aussi aux actions d'adsorption physico-chimique car les argiles sont des particules chargées négativement, de ce fait ont tendance à adsorber de l'eau à la surface. Les forces en jeu sont de type hydrogène, liées à l'hydratation des cations du sol, ce phénomène est à l'origine de la succion d'adsorption.

II.6.4. La succion osmotique :

La succion osmotique ou pression osmotique est la capacité de rétention d'eau par les sels présents sous forme dissoute dans l'eau interstitielle. Elle existe lorsque l'eau est une solution saline. Si la concentration de sel est faible, ou dans le cas de sable qui ne contient généralement pas de sels cette composante peut être négligée et la succion totale se réduit à la succion matricielle.

La succion osmotique est identique à la pression osmotique. Elle est créée par la force liées à la répulsion osmotique lorsque des sels solubles sont présents dans l'eau, elle dépend de leur concentration.

La succion osmotique
$$\pi = \frac{\rho_w R T}{\omega_w} \ln X_w$$

Avec : R : la constante des gaz parfaits (R= 8,31432 J/mol K)

T : la température absolue (°K)

ρ_w = la masse volumique de l'eau (kg/ m³)

ω_w = la masse molaire de la vapeur d'eau (18.016 kg / kmol)

X_w = la fraction molaire d'eau dans la solution.

Houston et al. 194 (cité par alshihabi O, 2002) confirment que la succion osmotique diminue quand le degré de saturation augmente.

En géotechnique elle n'est en général pas pris en compte, car son influence serait négligeable (Fredlund et Raharjo 1993 ; Delage 1991).

II.6.5. La succion totale

La succion totale du sol peut être vue comme la somme de deux composantes principales : la succion matricielle et la succion osmotique (Aitchison, 1965 cité par MEKKI L2009)

- La succion matricielle qui est liée au phénomène de capillarité et d'adsorption ;
- La succion osmotique.

$$\text{La succion totale} = \Sigma \text{ succion matricielle} + \text{succion osmotique}$$

➤ Effet de la succion sur les particules solides :

Dans un sol non saturé, les pores jouent un rôle semblable aux tubes capillaires. Les tensions superficielles dues aux ménisques trouvent une réaction sur les particules solides. Ces réactions engendrent certaines contraintes supplémentaires sur le squelette du sol.

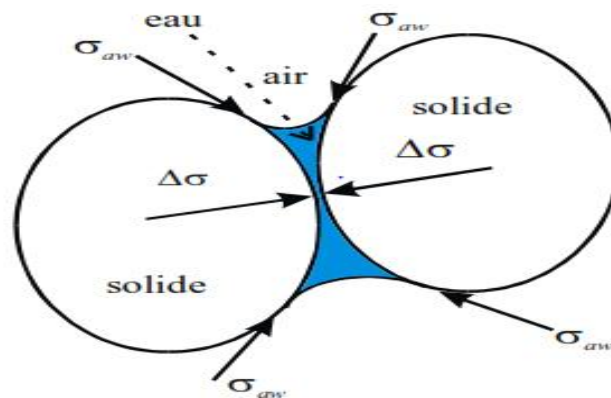


Figure. II.10 : Effet de la succion sur les grains du sol.

II.7. Technique de mesure et de contrôle de la succion

II.7.1. Techniques de mesure de la succion

Actuellement, il existe plusieurs méthodes pour mesurer la succion dans un sol. La succion totale peut être déterminée par mesure de la pression de vapeur ou de l'humidité relative à l'aide de la méthode psychrométrique ainsi que par la méthode du papier filtre. La succion matricielle peut être obtenue directement ou indirectement.

L'objet de cette partie est de présenter des différentes techniques d'imposition et de mesure de la succion d'un le sol intact (à l'état naturel).

II.7.1.1. Tensiomètre

Par définition, la succion matricielle est donné par :

$$S = U_a - U_w$$

Lorsque la pression d'air est égale à la pression atmosphérique prise comme référence, on a $S = -U_w$ avec $U_w < 0$

Le tensiomètre est destiné à mesurer cette pression négative de l'eau directement dans le sol. C'est une technique essentiellement utilisée in-situ. Le tensiomètre est constitué par un petit réservoir d'eau désaérée une extrémité est recouverte par une couche de céramique poreuse imperméable à l'air, mais perméable à l'eau, afin d'empêcher le passage d'air. Il est connecté à un manomètre via un tube remplis d'eau désaérée. Pour mesurer la pression négative du sol, on introduit le tensiomètre dans un trou foré préalablement dans le sol ou pression négative du tensiomètre, mesurée par le manomètre, fournit directement la pression négative de l'eau du sol.

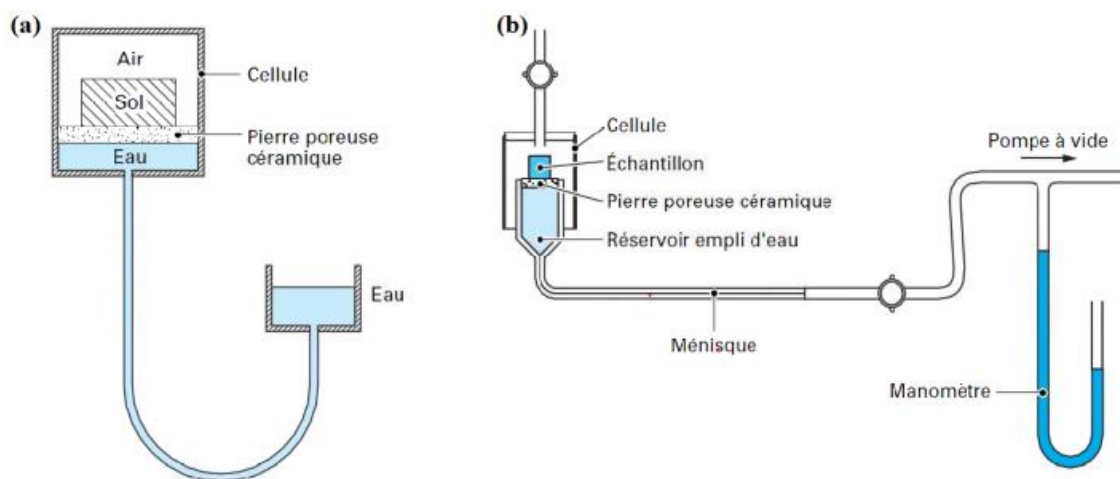


Figure II.11 : (a) Principe de plaque de tensiomètre, (b) Plaque de tensiomètre (Cui et Delage (2000)).

Cette méthode est limitée à une succion maximale de l'ordre de 500Kpa à cause de la cavitation. En pratique, le tensiomètre doit être placé dans une éprouvette ou dans le sol préalablement foré. Donc, il est nécessaire d'assurer à tout moment un bon contact entre le sol et le réservoir d'eau, au travers de la céramique poreuse, afin d'assurer une

continuité de la phase d'eau entre le réservoir et le sol, et cela malgré le retrait éventuel du sol.

II.7.1.2. Plaque de succion

Le principe de la plaque de succion est le même que celui du tensiomètre ; elle sert aussi à mesurer la pression négative de l'eau d'un sol dont l'air est à la pression atmosphérique. Par contre, cette technique est essentiellement utilisée en laboratoire. (La figure II.10(b)). Représente une coupe schématique de cet appareil. Cette méthode est généralement limitée à une succion maximale de l'ordre de 500 KPa.

II.7.1.3. Méthode psychrométrique

Un psychromètre est un dispositif qui permet de mesurer l'humidité relative d'un sol, et par conséquent, sa succion totale. Le principe de l'appareil est de mesurer la température d'une goutte d'eau qui s'évapore, cette température étant inférieure à la température ambiante. La différence entre les deux températures est une fonction de l'humidité relative. Il existe deux types de capteurs utilisant chacun un principe physique différent pour mesurer la température d'évaporation de la goutte d'eau. Il y a les psychromètres à transistors décrits par Richards (1958) cité par Yalçin (1992), et les psychromètres à thermocouple utilisant l'effet Peltier introduits par Spanner (1951).

Cette technique est utilisable pour des succions comprises entre 0,1 et 80 MPa.

II.7.1.4. Méthode du papier filtre

Le papier filtre est également utilisé pour mesurer la succion. La courbe de rétention d'eau du papier filtre est calibrée à l'avance. Lorsque le papier (sec au départ) est mis en contact avec le sol, l'équilibre hydraulique entre le papier et le sol s'établit au bout d'un certain temps par transfert d'eau ou de vapeur. On peut considérer dès lors que la succion est égale à la succion du sol. La succion du papier filtre est donnée par sa courbe de rétention d'eau en mesurant sa teneur en eau après l'équilibre. Donc, la mesure est indirecte. Théoriquement, elle permet de mesurer aussi bien la succion totale que la succion matricielle (Fredlund, et al., 1993). Si le papier est mis en contact direct avec le sol, l'équilibre se fait par transfert d'eau. Dans ce cas on mesure la succion matricielle. Si le papier est suspendu au dessus du sol, l'équilibre sera fait par transfert de vapeur d'eau, on mesure alors la succion totale. Dans ce dernier cas,

l'équilibre est en fait contrôlé par l'humidité relative de la phase gazeuse autour du sol.

Cette méthode est simple et facile à mettre en œuvre. Elle est utilisée couramment en laboratoire. Un défaut réside dans sa sensibilité à l'effet d'hystérésis du papier filtre. Normalement, on utilise le papier initialement sec et la courbe de séchage. La température est bien entendu un facteur important pour la précision de la mesure. D'autre part, une balance de haute précision est nécessaire. Enfin, si le papier a été mis en contact avec le sol, il faut s'assurer qu'aucun grain ne reste collé dessus.



Figure II12 : Méthode du papier filtre (Dellage et All).

D'après Gardner la gamme de succion accessible par cette technique est comprise entre quelques Kpa (30kpa) et plusieurs centaines de Mpa (100000Kpa).

II.7.2. Technique de contrôle de la succion

Les techniques de contrôle sont conçues de telle manière qu'on puisse imposer une succion au sol et mesurer la teneur en eau correspondant à l'équilibre hydrique..

Il existe essentiellement trois techniques : la méthode de surpression d'air, la méthode osmotique et la méthode à pression de vapeur. Cette dernière méthode permet d'imposer des suctions très élevées. Le principe est le même que celui de la dessiccation à vide.

II.7.2.1. Méthode de la surpression d'air

La méthode de surpression d'air est basée sur le principe de la translation d'axe décrit brièvement ci-dessus. On travaille avec l'eau pure, de sorte qu'il n'y a pas de succion osmotique. Dans les essais ordinaire, si l'on prend la pression atmosphérique comme référence (égale à zéro), la succion matricielle est égale à la pression d'eau changée de signe : si l'on veut imposer une certaine succion à l'éprouvette au cours d'essai dans lesquels l'air est à pression atmosphérique, il faut appliquer une pression d'eau négative

à l'éprouvette. Mais des difficultés sont rencontrées dans ces conditions à cause de la cavitation : lorsque la pression d'eau se trouve aux environs de 100Kpa, la cavitation apparaît dans le système de mesure. Par conséquent, le système de mesure se remplit de gaz (vapeur d'eau essentiellement) et l'eau est poussée par le gaz dans l'éprouvette. On perd alors le contrôle des essais. Pour éviter ce genre de problème pratique, on recourt à la technique de translation d'axe sur laquelle repose la méthode de surpression d'air r. l'objectif de la translation d'axe consiste à appliquer au sol une pression d'air plus haute que la pression atmosphérique (une surpression), tandis que la pression d'eau reste constante. Par exemple, pour avoir $s=100\text{Kpa}$ on peut appliquer une pression d'air $U_a=200\text{Kpa}$ tandis que $U_w=100\text{Kpa}$.

Ainsi, la pression d'eau reste positive, ce qui ne pose pas de difficulté expérimentale.

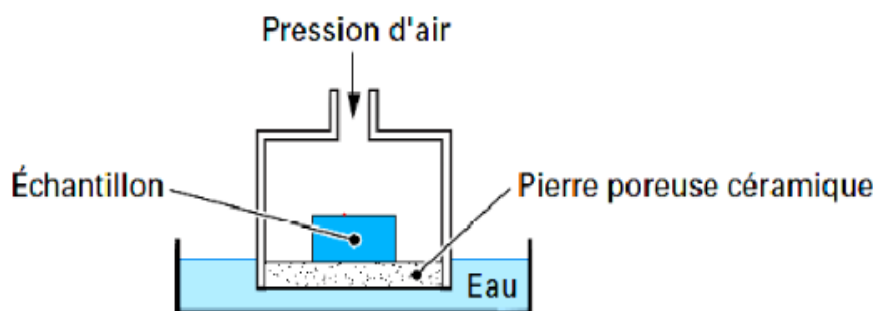


Figure II.13 : Cellule de Richards pour le contrôle de succion par translation d'axe (Delage et Al.)

Un disque en céramique avec une forte valeur d'entrée d'air permet d'éviter l'entrée d'air dans le circuit d'eau. Il s'agit d'une sorte de pierre poreuse perméable à l'eau, mais peu perméable à l'air, à condition que la pression d'air appliquée soit inférieure à la valeur d'entrée d'air. Cela permet de contrôler séparément la pression d'air appliquée soit inférieure à la valeur d'entrée d'air. Cela permet de contrôler séparément la pression d'air U_a et celle d'eau U_w . On peut trouver dans le commerce des disques en céramique ayant de différentes valeurs d'entrées d'air. Le principe de translation d'axe est illustré par la figure II.13.

La méthode de surpression d'air est fréquemment utilisée dans l'étude du comportement hydromécanique du sol non saturé : détermination de la courbe de rétention d'eau (la teneur en eau en fonction de la succion), détermination du coefficient de perméabilité hydraulique à une succion donnée, essais œdométrique à succion contrôlée, essais triaxiaux à succion contrôlée, etc. cette méthode est limitée à une succion inférieure à

1500kpa pour des problèmes de résistance de l'équipement d'essai. D'autre part, la pression d'air appliquée doit toujours être inférieure à la valeur d'entrée d'air de la pierre poreuse, si non, l'air entrerait dans le système de mesure et on perdrait alors le contrôle de la succion. (Delage et al).

II.7.2.2. Méthode osmotique

- **Principe de la méthode osmotique**

Le principe de la méthode osmotique est illustré sur la figure II.11. L'eau pure est mise en contact avec une solution à travers une membrane semi-perméable qui laisse les molécules d'eau mais pas grosses molécules du soluté.

Par la suite de la différence de concentration entre l'eau et la solution, l'eau pure a tendance à s'écouler vers la solution à travers la membrane afin d'obtenir un équilibre. Si l'écoulement d'eau est restreint, il y a une différence de potentiel chimique entre l'eau et la solution. Pour équilibrer cette différence de potentiel, une différence de pression entre l'eau et la solution apparaît. Cette différence de pression est la succion osmotique. Par contre, si l'écoulement d'eau n'est pas empêché, un échange d'eau se produit. Il s'arrête lorsque l'équilibre des potentiels chimiques est atteint. Bien entendu, le volume d'eau échangé dépend de la concentration de la solution. (Xiang-Ling LI,1999).

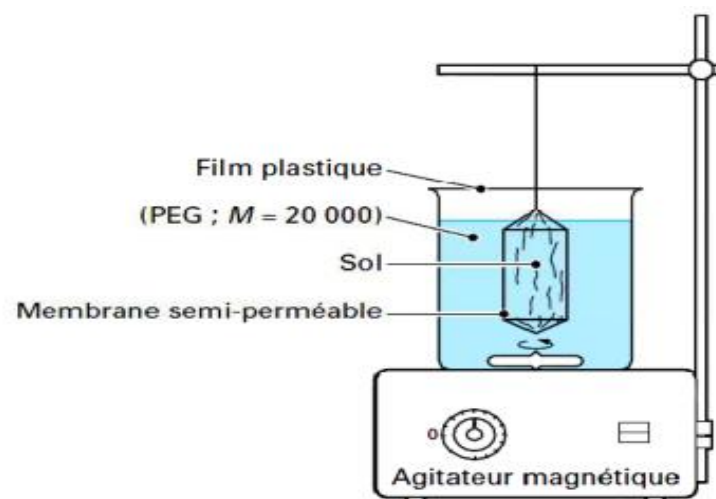


Figure II.14 : Mise en œuvre de la technique osmotique

- **Imposition de la succion par la méthode osmotique**

Cette méthode repose sur le mécanisme de la pression osmotique créée dans le sol à l'aide d'une membrane semi-perméable et d'une solution.

Le soluté utilisé est le polyéthylène glycol 20000 (PEG 20000). La taille des molécules de PEG 20000 est plus grande que la taille des pores de la membrane semi-perméable utilisée. De ce fait, la membrane est perméable à l'eau mais pas aux grosses molécules de PEG 20000.

Lorsque le sol est mis en contact à travers une membrane semi-perméable avec la solution de PEG préparée préalablement à une concentration bien déterminée, du fait qu'il existe une différence de potentiel chimique entre l'eau interstitielle du sol et la solution de PEG, un échange d'eau entre la solution et le sol va se produire (tendance à l'équilibre). Si la solution est contenue dans un flacon relativement grand, on peut considérer que cet échange d'eau ne modifie guère la concentration de la solution. Par conséquent, lorsque l'équilibre est établi entre l'eau dans le sol et la solution, on peut considérer que le potentiel chimique de la solution représente la succion dans le sol.

La relation entre la concentration et la succion pour la solution de PEG à 25°C a été calibrée expérimentalement (figure 11.12). Ainsi, à l'aide de la courbe d'étalonnage de la solution de PEG 20000 (concentration- succion) de Williams et Shaykewish (Vicol, 1990), on peut imposer une succion donnée au sol en fonction de la concentration de la solution. (Xiang-Ling LI, 1999).

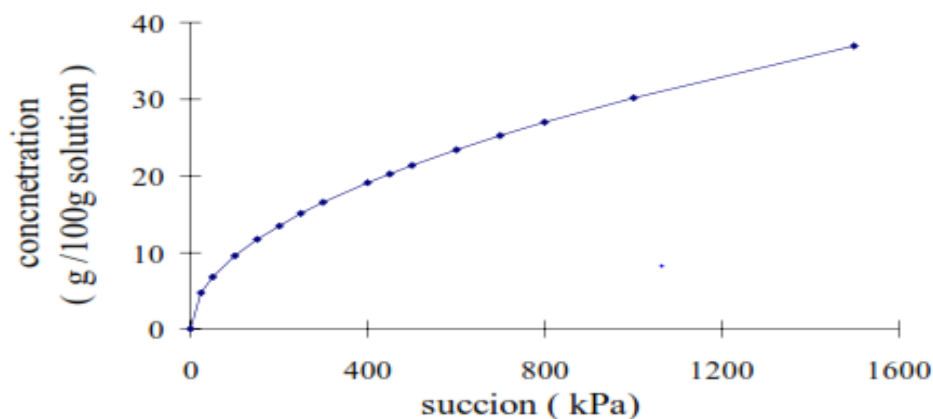


Figure II.15 : Courbe de calibration de la concentration de la solution PEG en fonction de la succion (à 25°C). (Xiang-Ling LI, 1999).

Tableau II.1: Succion imposées par la technique osmotique (Derfouf-M)

Technique Osmotique		
Type de PEG	Succion (MPa)	Masse du PEG(g)/500 ml de solution
20 000	0.05	33.71
	0.1	47.67
	0.2	67.48
	0.4	95.35
	0.6	116.75
	0.8	134.85
	1	150.76
	1.5	184.64
6000	2	213.2
	3	261.1
	6	369.25
	8	426.4

Il faut noter que la succion imposé dépend également de la température

II.7.2.3. Technique de dessiccateur à vide (Méthode à pression vapeur)

- **Principe de la méthode du dessiccateur à vide**

Cette technique est également basée sur l'équation de Kelvin. On impose l'humidité relative constante à l'aide de solution saline saturée dont les concentrations sont connues. L'échantillon de sol est placé dans une enceinte sous vide contenant une solution de composition chimique connue. Chaque type de solution saline saturée correspond à une humidité relative connue en fonction de ses propriétés physico-chimiques. Lorsque l'équilibre entre le sol et la solution est atteint par transfert de vapeur d'eau, la succion du sol est équivalente à l'humidité relative de la solution (loi de Kelvin). Le tableau (II.1) fournit les valeurs d'humidité relative mesurées et les succions équivalentes correspondant à différentes solutions salines saturées (Delage et Al., 1996).

Tableau II.2 : L'humidité relative RH et la succion totale de différentes solutions salines saturées. (Xiang-Ling LI, 1999).

Solutions saturées	Température = 20 °C		Température = 30 °C	
	RH (%)	Succion (MPa)	RH (%)	Succion (MPa)
K ₂ SO ₄	97	4.113	96	5.512
KNO ₃	93	9.8	91	12.734
KCl	86	20.364	85	21.943
NaCl	76	37.055	75	38.843
NaNO ₂	66	56.104	63	62.385
Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	55	80.721	52	88.294
K ₂ CO ₃ · 2H ₂ O	44	110.85	43	113.954
KCH ₃ CO ₂	20	217.31	22	204.44
KOH	9	325.125	7	359.059

Tableau II.3 : Caractéristiques des solutions salines utilisées à 20°C.

Technique de contrôle par phase vapeur			
Solution saline saturée	Humidité relative Hr (%) ^o	Succion (MPa)	Masse du sel(g)/500ml de solution
Eau distillée	100	0	
NaCl	37.7	137.3	179.45
KCl	85	22.59	345
(NH ₄) ₂ SO ₄	81	29.9	375.65
NaCl	76	38.15	360
MgCl ₂ · 6H ₂ O	32.5	156.22	730
KOH	9	326	1000
H ₂ SO ₄	8.5	500	1litre ⁽¹⁾

Nota : (1) : solution concentrée à 98%

- **Facteurs influençant sur les mesures par la méthode de la pression à vapeur**

La température est un paramètre fort sensible ici, ici non seulement parce qu'elle intervient directement dans la loi de Kelvin, mais aussi à cause de son influence sur les propriétés physiques et chimiques des solutions. C'est pourquoi l'utilisation d'un bain thermostatique est conseillée.

Delage et Al. (1996) démontent que 1% d'erreur sur la mesure d'humidité relative peut donner une valeur de 1,38MPa d'incertitude sur la mesure de la succion.

Dès lors, cette technique a certaines limites pour une succion inférieure à 10MPa. D'autre part, la mise en équilibre est d'autant plus lente que les éprouvettes sont volumineuses. En conséquence, la durée d'essai est importante.

Les techniques de mesure et de contrôle (ou d'imposition) de la succion présentées ci-dessus sont couramment utilisées dans les recherches sur le comportement hydromécanique des sols non saturés.

Tableau II.4 : Techniques de mesure et de contrôle de la succion.

Méthode	Succion mesurée	Domaine d'application (kPa)	Temps d'équilibre	Paramètres sensibles
Psychromètre	totale	100-8000	des heures	Température
Dessiccateur à vide	totale	>1500	des mois	Température
Papier filtre	totale ou matricielle	100-10000	des semaines 1 semaine	Température
Plaque de succion	matricielle	<90	des heures	bon contact
Tensiomètre	matricielle	<90	des heures	bon contact
Suppression d'air	matricielle	0-1500	des jours	Température
Osmotique	matricielle	0-1500	des jours	Température

La détermination du moment où l'équilibre est atteint est fort délicate et dépend souvent du mode opératoire utilisé. Dans certains cas (méthode de la suppression d'air, plaque de succion, dessiccateur à vide, etc.), elle se fait par pesée des éprouvettes à intervalles réguliers. Ceci présente le risque d'altérer l'éprouvette et le contact entre la pierre poreuse ou la membrane et le sol, par conséquent, apporte une certaine imprécision. Par contre, le psychromètre permet aisément la détermination du moment où l'équilibre est atteint, sans devoir manipuler l'éprouvette. Il suffit de faire des mesures à intervalles réguliers. Lorsque les lectures cessent d'évoluer, l'équilibre est atteint.

La longue durée nécessaire pour atteindre l'équilibre provoque aussi certaines difficultés expérimentales. Par exemple, la membrane semi-perméable utilisée dans la méthode osmotique risque d'être défectueuse au bout d'un certain temps à cause des bactéries se développant dans la solution.

La température conditionne les mesures dans plupart des techniques. Il faut donc prendre plus de précautions que lors d'essais traditionnels

Une analyse détaillée de la validité des résultats fournis par différentes techniques a été proposée par Verbrugge (1975).

II.5. Relation teneur en eau-succion (la courbe de rétention d'eau)

Considérons un sol initialement saturé en eau. Si on lui applique une pression d'air, à partir d'une valeur de pression critique appelée pression d'entrée d'air du sol, les charges pores commencent à se vider. La loi de Jurin Laplace permet d'affirmer qu'une augmentation de la pression d'air appliquée au sol entraîne un drainage de pore de taille de plus en plus petite.

La succion du sol est reliée à la quantité d'eau qui y est présente à cause d'interactions de type capillaire ou d'adsorption entre l'eau et les particules du sol. Cette relation est une caractéristique spécifique d'un type de sol et peut être déterminée expérimentalement par les méthodes de contrôle de la succion présentées dans ce chapitre. Elle est représentée par une courbe appelée « **courbe de rétention** » (ASTM).

La relation succion – teneur en eau n'est pas univoque. La figure II.13, montre que le sol est plus humide à la dessiccation qu'à l'humidification pour une même valeur de succion.

Il résulte que le sol présente un comportement non univoque, qui fait intervenir à priori l'histoire hydrique du sol, complique singulièrement la description des écoulements dans les sols non saturés. Cette non-unicité est liée au phénomène d'hystérésis qui signifie que les caractéristiques hydrique pour un sol en séchage et en humidification ne sont pas les mêmes.

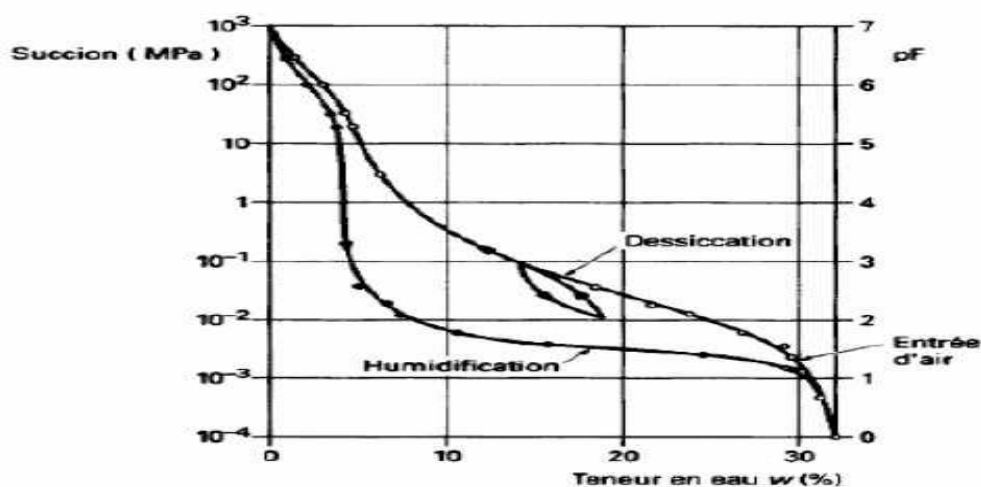


Figure II.16: Courbe de rétention- phénomène d'hystérésis (Ghanem F 2011).

Une courbe de succion est propre à un matériau. La pente de cette courbe indique l'effort de drainage pour faire varier la teneur en eau $W(\%)$.

N.B : pF est le logarithme décimal de la valeur absolue de la succion, exprimée en cm d'eau. Il est utilisé pour éviter la manipulation des chiffres aussi importants.

[1Mpa = 10000 cm d'eau = pF] (Schroeder C, 2002) et (Arsenie I-M, 2009).

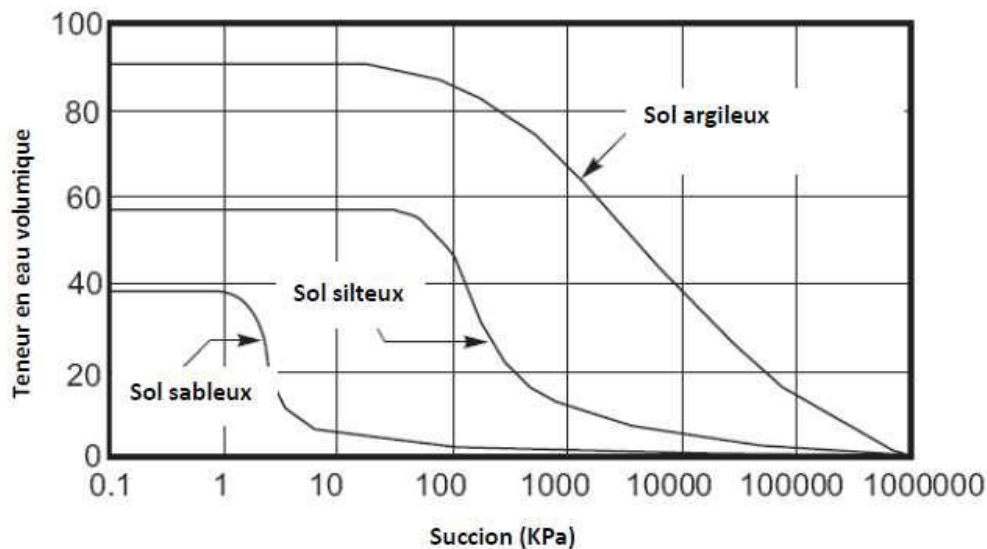


Figure II.17 : Les courbes de rétention pour différents types de sols (D. G. Fredlund et al. 1994)

✚ Les paramètres d'environnements qui influent sur la précision des essais

▪ La température

Le flux de l'eau dans le matériau est directement lié à la viscosité de l'eau de plus la valeur de la viscosité est élevée, plus le débit est faible. De façon la viscosité est très sensible à la température ; quand on élève la température, la viscosité diminue pour les liquides et augmente pour le gaz (Joulié 1998). en effet dans les liquides l'élévation de la température, provoque une augmentation des distances intermoléculaires qui génère des frottements plus faible au sein du fluide donc une viscosité plus faible. A l'inverse dans le gaz l'augmentation de température entraîne une augmentation de vitesse des molécules et donc une augmentation du taux de collision. La viscosité augmente donc la température augmente (BOUROKBA MRABET).

▪ Les cycles Dessiccation- Humidification

Les alternances de dessiccation et d'humidification provoquent dans la masse de sol des tensions qui fissurent le sol en tous sens et de plus en plus finement. Lorsque le sol humide se dessèche, l'eau s'évapore et les colloïdes se contractent, créant dans la matrice soit des fissures apparentes, soit des zones de moindre résistance : le sol se brise facilement. C'est l'effet de retrait qui généralement progressif (BOUROKBA MRABET).

- **Nature du percolât**

L'utilisation de l'eau distillée peut causer une augmentation du gonflement et/ou une dispersion, ce qui a pour conséquence de diminuer la valeur de la conductivité hydraulique. C'est pourquoi il est préférable d'utiliser le fluide que l'on trouve in-situ, afin de limiter tous les risques d'erreurs sur les résultats dus à ce paramètre (Oslen 1965 ; Dunn et Mitchell 1984).

II.8. Chemin d'humidification drainage

L'action de la pression capillaire ($U_c = U_a - U_w$) est mise en relief sur un chemin de drainage humidification, dans lequel l'échantillon n'est soumis à aucune contrainte extérieure.

Dans la pratique, de nombreux phénomènes suivent en première approximation ce type de chemin : retrait- gonflement dans les sols superficiels lors des variations au niveau de la nappe phréatique ou dans la géotechnique routière.

Ce chemin est obtenu par des essais dont le principe est d'imposer au sol une suite de pressions capillaires croissantes jusqu'à séchage complet (drainage), puis appliquer ensuite de pressions décroissantes afin de le ré- humidifier (imbibition).

Chaque point de la courbe expérimentale correspond à la moyenne de deux échantillons de sol.

Une représentation englobant en même temps, la variation des paramètres (pression capillaire, indice des vides, degré de saturation et teneur en eau) est nécessaire. Cette représentation permettra de mettre en évidence les correspondances entre les variations de ces paramètres.

II.6.1. Chemin humidification drainage sur une pâte

Les chemins de drainage- humidification sont étudiés pour un matériau, initialement préparé sous forme de pâte $W_p = 1.5 W_L$. Dans le cas général, l'application d'une pression interstitielle négative à un échantillon de sol se traduira simultanément par une variation de volume et de teneur en eau, ou encore d'indice des vides et de degré de saturation. C'est pourquoi il est nécessaire de disposer d'une représentation globale de l'état du matériau incluant tous ces paramètres.

La présentation constituée par les graphes $[W, e]$ et $[S_r, W]$ est à rapprocher des abaques proposés par Fredlund et Morgenstern(1976), Biarez et al. (1988) et Zerhouni (19971), qui permettent de définir l'état du sol à partir d'une figure unique, paramétrée par les différentes variables. Il apparaît néanmoins qu'une représentation explicite est plus claire et plus facile à utiliser qu'une représentation groupée.

La figure (II.15) représente les résultats d'un essai de drainage humidification sur un limon naturel moyennement plastique (le limon de Jossigny, $W_L = 37\%$, $I_p = 21\%$), (Fleureau et Indarto 1993).

Sur le chemin de drainage (de l'état saturé à l'état sec on peut retirer les comportements repères suivant :

✓ Du point initial A au point d'entrée d'air B correspondant à une pression capillaire

$(U_a - U_w)$ de 0.8 MPa, le sol reste saturé et se comporte de façon analogue à un sol saturé normalement consolidé sur un chemin de consolidation isotrope, avec une variation sensiblement linéaire de l'indice des vides en fonction du logarithme de la pression capillaire.

✓ Du point B au point C, le sol se désature légèrement, mais cela n'affecte pas sa compressibilité. On note sur le diagramme $[w, e]$ que le point C, dont la pression capillaire $(U_a - U_w)$ SL est de l'ordre de 2 MPa, correspond à la limite de retrait conventionnelle du sol définie par l'intersection de la droite de saturation (d'équation $[e = G_s \cdot w]$.

Où : G_s représente la densité des grains solides) et de l'asymptote horizontale au palier de retrait pour $w=0$.

✓ De C à D, le matériau ne se déforme pratiquement plus, tandis que son degré de saturation diminue très rapidement jusqu'à 0. On constate, sur le graphe $[w, S_r]$, que,

pendant cette phase de forte dé-saturation, la variation du degré de saturation est sensiblement proportionnelle à celle de la teneur en eau.

Le chemin d'humidification met en évidence une caractéristique fondamentale du comportement du sol non saturé à savoir l'hystérésis des courbes de variation des différents paramètres en fonction de la pression capillaire. Cette hystérésis est liée à plusieurs facteurs :

- La présence d'air piégé dans le sol ;
- Une variation de l'angle de mouillage en fonction du processus (humidification ou dessiccation). En effet le rayon de courbure est plus grand pour un ménisque qui avance que pour celui qui recule ;
- La non uniformité géométrique des pores (effet « ink-bottle ») : Durant le drainage, les vides restent remplis d'eau jusqu'à ce que la succion soit suffisamment grande pour que le plus petit des pores se désature. Tandis qu'en humidification les vides se remplissent d'eau pour une succion plus faible puisque celle-ci correspond au seuil du plus grand des pores ;
- Le phénomène de retrait affectant la phase solide sous l'effet de l'augmentation de la pression interstitielle négative est un comportement plastique dans le domaine saturé ou quasi saturé, par conséquent, ce phénomène de retrait n'est pas réversible d'où l'hystérésis observé dans le plan $[\log U_c, e]$.

On retrouve les mêmes phases de comportement :

- De D à C', le comportement volumique est parfaitement réversible, mais on observe une hystérésis importante du degré de saturation.
- De C' à B', le matériau se résature, mais présente une forte irréversibilité dans le plan $[U_a - U_w, e]$; la pression capillaire de ré-saturation $(U_a - U_w)_r$ est sensiblement plus faible que la pression de dé-saturation.
- Enfin, entre B' et A', le sol se comporte comme un sol saturé sur consolidé.

La description du premier cycle d'humidification drainage du limon de Jossigny met en évidence trois phases dans le comportement du matériau, que l'on retrouve dans tous les types d'argile, y-compris les argiles gonflantes (Fleureau et Kheirbek-Saoud, 1993) :

Pour $U_c < (U_a - U_w)_d$: un domaine saturé où le sol subit des déformations plastiques, importantes,

- Pour $U_C > (U_a - U_w)_{SL}$: un domaine non saturé dans lequel le sol se déforme très peu et de façon élastique ; c'est dans ce domaine que l'on observe la plus forte irréversibilité des variations de degré de saturation.

- Dans le domaine intermédiaire entre B et C ($(U_a - U_w)_d < U_C < (U_a - U_w)$) : le sol reste quasi-saturé ($S_r > 85\%$) et son comportement est peu différent de celui du sol saturé ; la phase eau reste généralement continue, mais présente des bulles d'air dispersées.

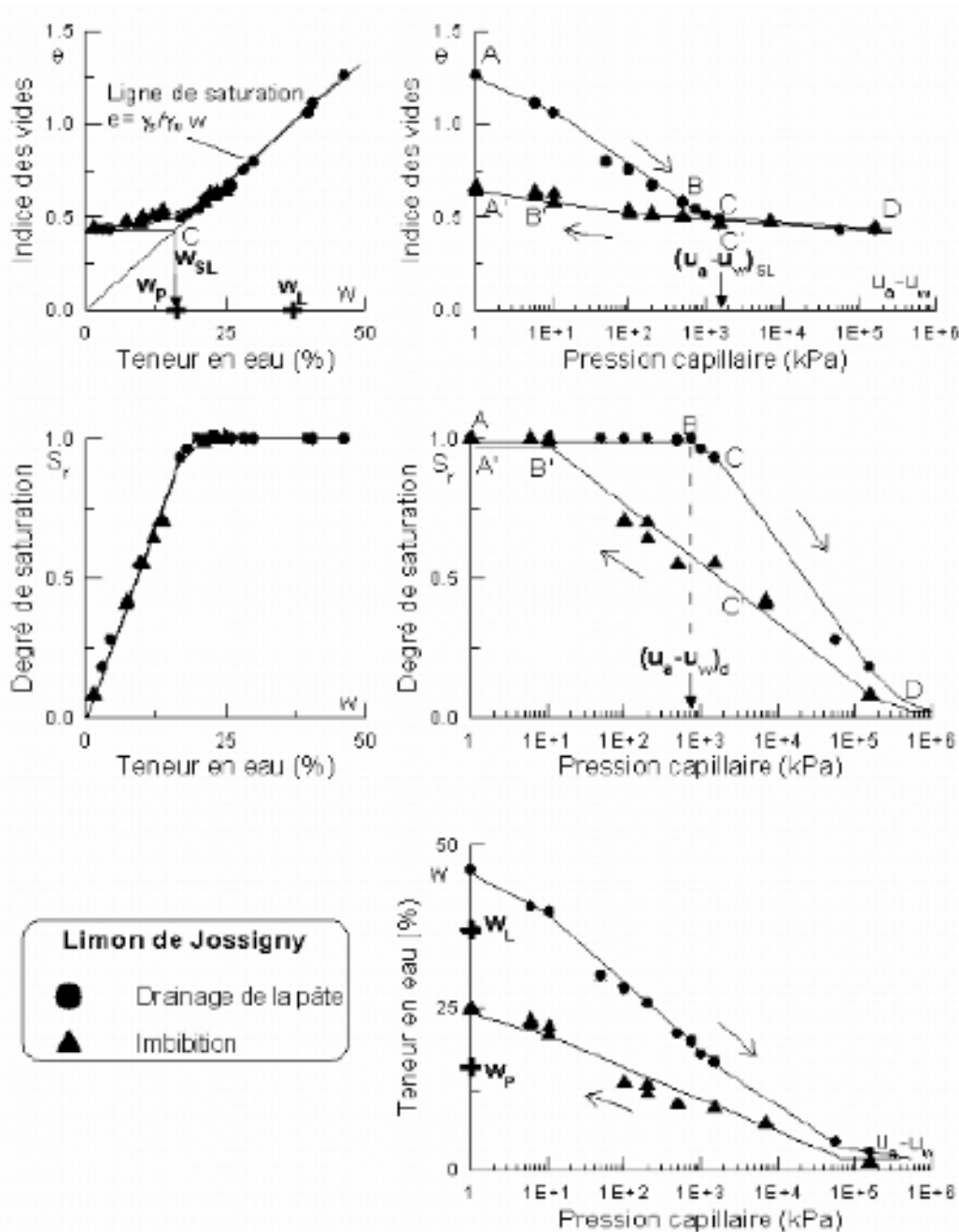


Figure II.18: Comparaison des chemins de drainage sur la pâte et de compression oedométrique et isotrope sur le limon de Jossigny (Fleureau, 1993).

Donc dans le domaine saturé, les chemins de drainage sur la pâte d'argile sont parallèles aux chemins de compression oedométrique et isotrope normalement consolidé (NC).

La pente de la droite NC de drainage dans le plan $[\log p', e]$ est égale au coefficient de compressibilité habituel C , tant que le sol reste saturé (fleureau, 1993).

Conclusion

Des nombreuses études expérimentales du comportement des sols non saturés ont été réalisées, ce qui a permis la mise en évidence de leurs caractéristiques principales. Ainsi l'ensemble des études démontrent que la présence de la succion rigidifie le sol et augmente sa résistance (Ghanem.F.2011).

Chaque technique présentée a des avantages et des inconvénients. Elle convient à différentes gammes de succion, selon le principe utilisé. On donne au tableau II-2 un ordre de grandeur de la succion applicable pour diverses méthodes (Fredlund, 1993). Le psychromètre et le tensiomètre permettent de mesurer réellement la succion dans l'éprouvette. Par contre, les autres techniques (surpression d'air, méthode osmotique, dessiccateur à vide) imposent une variation de succion ou sa mise en équilibre à une valeur donnée.

Par ailleurs, la plupart des techniques donnent une réponse lente (au mieux quelques heures, mais souvent des semaines ou des mois). En fait, quelle que soit la méthode utilisée, la mesure n'est correcte que si l'éprouvette atteint un état équilibre correspondant aux conditions d'essais.

Ceci demande souvent un temps considérable. Au tableau II-2, on donne aussi l'ordre de grandeur du temps nécessaire pour chaque technique. De plus, la durée de mise en équilibre dépend des types de sols et de la taille des éprouvettes. Il est incontestable qu'une argile demande plus de temps qu'un sable pour atteindre l'équilibre (Zerhouni (19971)).

III- 1. Introduction

Tout projet de construction, que ce soit une route, un pont ou un bâtiment doit être étudié avec des données complètes, ce qui suppose une bonne reconnaissance du sol donc la géotechnique est le domaine d'étude des propriétés physiques, mécaniques et hydrauliques des sols en vue de leurs applications en construction civile. C'est une science basée sur les données recueillies lors des essais en laboratoire et in-situ.

Le travail présenté dans la première partie de ce chapitre est la caractérisation physique, mécanique de la marne naturelle de **DRAA EL MIZAN**. Cette caractérisation à pour objectif la classification géotechnique de ce sol.

III- 2. Situation et description du site étudié

Le terrain d'assiette au projet occupe deux parcelles en forme rectangulaire, le terrain étudié est légèrement en pente, le site ne présente aucun signe apparent d'instabilité, pour preuve les immeuble mitoyens ne présentent aucun désordre apparent. Le terrain est délimité comme suit : au nord, sud, ouest et l'est par une route (voir figure III.1).



Figure III. 1 : Le site sur Google Earth.

III.2.1. Origine de matériau utilisé

Le matériau étudié dans ce travail est un matériau local souvent rencontré dans la région de la **Grande Kabylie**. La marne étudiée est prélevée de site à une profondeur comprise entre 15 et 16 m.

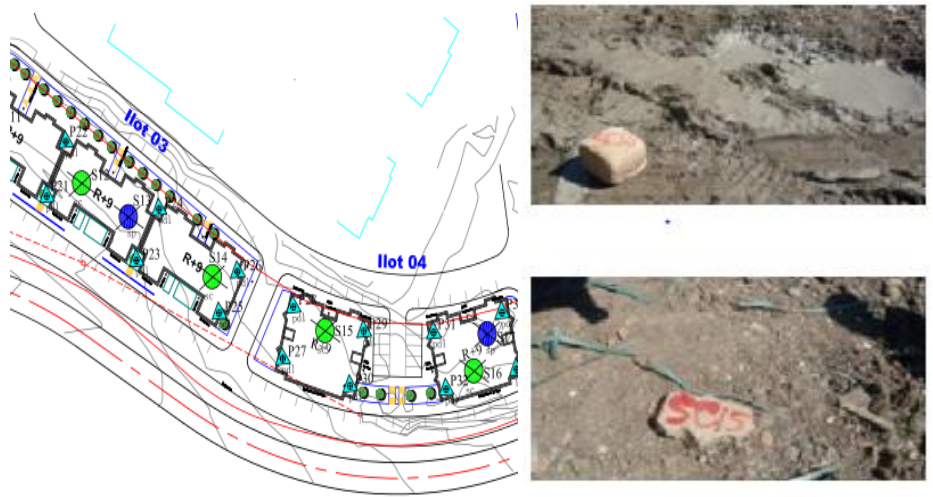


Figure III. 2. La zone de prélèvement.

III .2 .2. Sismicité de la région

D'après la nouvelle classification sismique des Wilaya d'Algérie faite par le Centre National de Recherche en Génie Parasismique C.G.S 2003 la commune de DRAA EL MIZAN est classée dans une zone de *moyenne sismicité II-a*.



Figure III.3 : Carte géologique.

III-2.3. CONTEXTE GEOLOGIQUE

Géologiquement, le territoire de la wilaya de TiziOuzou (d'après Ziani et Arkoub 1994), s'inscrit dans l'orogénèse alpine périméditerranéenne de la chaîne littorale d'Afrique du Nord.

Les terrains qui affleurent sur ce territoire sont :

- ❖ le socle kabyle et sa couverture paléozoïque.
- ❖ la dorsale kabyle.
- ❖ l'Oligo-Miocène kabyle.

- ❖ les nappes de flyschs.
- ❖ le Miocène post-nappe.
- ❖ le Quaternaire.

III.3. Essai de laboratoire

Nous avons procédé aux essais de détermination des caractéristiques physiques et mécaniques.

Des essais de laboratoire sont conduits sur des échantillons intacts (paraffinés) recueillis à une profondeur allant plus de 10 m.



Figure III. 4: Echantillon intact paraffiné.

Les essais d'identification sont réalisés au laboratoire de la faculté de Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU, nous avons réalisé une série d'essais permettant l'identification de matériau à étudier :

- Granulométrie ;
- Teneur en eau naturelle W_n ;
- Limites d'Atterberg (W_L , W_P) ;
- Poids volumique humide ;
- Poids volumique sec ;
- Poids volumique des grains solides ;
- Indice des vides ;
- Degré de saturation ;
- Valeur de bleu de méthylène

III-3. 1 Essais d'identifications

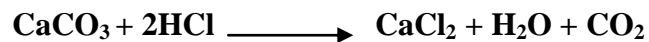
III.3-1-1. Détermination de la teneur en carbonate de calcium CaCO_3 (NF P94-048)- méthode de calcimètre

La détermination de la teneur en eau en CaCO_3 s'effectue au calcimètre Dietrich-FÜLING.

❖ Principe de l'essai

L'essai consiste à déterminer le volume de dioxyde de carbone (CO_2) dégagé sous l'action d'acide chlorhydrique en excès (dans des conditions de température et de pression atmosphérique connues) par un échantillon préparé pour l'essai.

L'acide chlorhydrique dilué décompose le carbonate de calcium selon la réaction suivante :



❖ Préparation de l'échantillon

Après séchage préalable, le matériau est broyé dans le mortier afin d'obtenir une poudre passant en totalité à un tamis d'ouverture de maille inférieure ou égale à **400 μm** . le séchage du matériau est pour suivi, à une température de 105 °C.



Figure III.5 : Appareil de détermination de CaCO_3



Figure III.6 : Principaux étapes de la méthode de calcimètre

La teneur en CaCO₃ d'un sol fin est un bon indice de sa résistance mécanique et de sa sensibilité à l'eau. Suivant la valeur de cette teneur, le comportement du sol évolue depuis celui d'une argile jusqu'à celui d'une roche.

Tableau III.1 : La description des sols en fonction de leur teneur en eau CaCO₃ (Géotechnique 1- J. Lérau).

Teneur en CaCO ₃ (%)	Désignation du sol
0 - 10	Argile
10 - 30	Argile marneuse
30 - 70	Marne
70 - 90	Calcaire marneux
90 - 100	Calcaire

D'après l'analyse chimique de notre échantillon effectué dans laboratoire d'Alger (laboratoire central des travaux public LCTP), on a le résultat suivant :

Tableau III.2 : Résultats de l'analyse chimique (LCTP)

composantes	Pourcentage (%)
Sulfates (CaSO ₄ , 2H ₂ O)	Traces
Chlorures (NaCl)	0.32 (%)
Carbonates (CaCO ₃)	35,12
Anhydride Carbonique (CO ₂)	8.03

D'après la classification des sols selon en fonction de la teneur en CaCO₃ (tableau III.10), et le résultat obtenu de la teneur en carbonate de calcium de sol étudié (35.12%) le sol étudié dans notre projet est un « marne ».

III.3-1.2. La teneur en eau naturel W % (NF P 94-050) – méthode par étuvage

La norme NF P90-050 a pour objet la détermination de la teneur en eau pondérale, par la méthode de l'étuvage. La teneur en eau pondérale (W) est le rapport de la masse de l'eau interstitielle M_w par la masse des grains solides M_s.

$$W (\%) = \frac{M_h - M_s}{M_s} = \frac{M_w}{M_s} * 100$$

La connaissance de la teneur en eau d'un sol est très importante car elle permet, avec d'autres caractéristiques, d'apprécier l'état dans lequel se trouve le sol.

- **Principe de la détermination de la teneur en eau**

La perte d'eau d'un échantillon de matériau est provoquée par étuvage, les masses de l'échantillon et de l'eau évaporée sont mesurées par pesage.

- **Méthode de détermination de la teneur en eau**

L'échantillon est pesé, puis placé dans une étuve à température à 50 °C, une fois la dessiccation réalisée, l'échantillon est pesé à nouveau. Les deux pesées donnent par différence la masse d'eau évaporée. (NF P 94-050).

Dans le cas de matériau étudiés, les résultats obtenus sont dans le tableau suivant :

Tableau III.3 : Détermination de la teneur en eau naturelle W (%)

Echantillon	01	02	03
Masse totale du sol humide Mh (g)	547.00	512.00	447.00
Masse totale du sol sec (g)	525.00	489.00	423.00
Masse de la tare (g)	325.00	297.00	246.00
Masse d'eau (g)	22.00	23.00	24.00
Masse du sol sec (g)	200	192.00	177.00
Teneur en eau (%)	11.00	11.98	13.56
Teneur en eau moyenne (%)	12.18		

Interprétation de résultat

La teneur en eau naturelle W % est de 12.18%, on remarque que la teneur en eau est très élevée. Ceci peut être expliqué par le fait qu'elle soit prélevée en période hivernale (échantillon humide).

III. 3-1-3.Masse volumique humide (ρ_h) (NF P 94-053) méthode par immersion dans l'eau

La masse volumique humide est déterminée par pesée hydrostatique (avec échantillon paraffiné), selon la norme NF P 94-053.

La prise d'essai, après taille éventuelle, est immédiatement pesée, et est paraffinée aussitôt après.

Une fois revenue à la température de la salle d'essai, elle est pesée à l'air libre, puis est placée dans le panier suspendu à l'étrier de la balance et est immergée afin d'être pesée avec la balance hydrostatique.

Pendant la durée des essais, la température de la salle d'essai ne doit pas varier de plus de 3°C (norme NF P94-053).

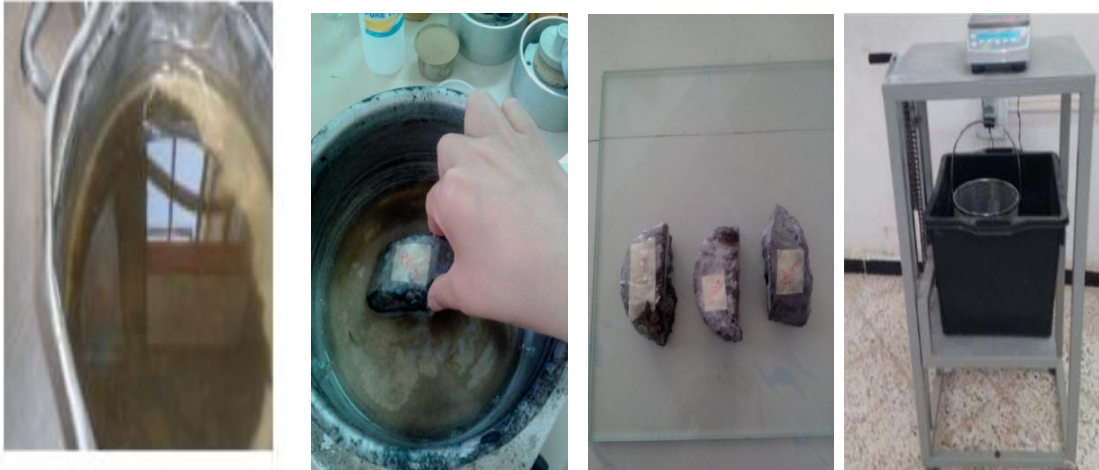


Figure III.7 : Déroulement de l'essai de la pesé hydrostatique.

$$P_{\text{Paraffine}} = p_{\text{humide} + \text{paraffine}} - P_{\text{humide}}$$

$$\text{Volume brut} = p_{\text{humide} + \text{paraffine}} - P_{\text{matériau dans l'eau}}$$

$$\text{Volume de la paraffine} = \frac{P_{\text{Paraffine}}}{\text{Densité de la paraffine}} = \frac{P_{\text{Paraffine}}}{0.88}$$

$$\text{Volume net} = (\text{volume brut}) - (\text{volume de la paraffine})$$

$$\text{Densité humide } \gamma_h = \frac{\text{poids humide}}{\text{volume net}} \text{ (t/ m}^3\text{)}$$

$$\text{Densité sèche : } \gamma_s = \frac{\gamma_h}{W+100} * 100 \left(\frac{t}{m^3} \right)$$

$$\text{La teneur en eau de saturation } W_s = \left(\frac{1}{\gamma_d \text{ moyen}} - \frac{1}{\gamma_s} \right) * 100 \text{ avec } \gamma_s = 2.7 \text{ (t/m}^3\text{) ou } \left[\frac{1}{\gamma_d} - 0.37 \right] * 100$$

Tableau III.4 : Détermination de la densité humide.

Echantillon	1	2	3
Masse de l'échantillon humide (g)	189	194	197
Masse humide d'échantillon paraffiné à l'air (g)	193	197	201
Masse de l'échantillon paraffiné immergé (g)	102,2	104.4	105.00
Masse de la paraffine (g)	4	3	4
Volume brut (cm3)	90.8	92.6	96
Volume de la paraffine (cm3)	4.44	3.33	4.44
Volume net (cm3)	86.36	88.67	91.56
ρh (g/cm3)	2.19	2.15	2.19
ρh moyenne (g/cm3)	2.18		

III. 3-1-4. Détermination de la masse volumique sèche (ρd) (NF P-94-064)

La masse volumique sèche d'un échantillon de roche est le quotient de sa masse (ms) sèche par le volume totale (Vt) qu'il occupe.

$$\rho d = m_s / V$$

$$P_s = P_h / (1 + W)$$

L'essai consiste à sécher puis à mesurer la masse et le volume d'un échantillon de roche.

La masse de l'échantillon est obtenue par pesage, après séchage dans une étuve portée à 105 °C jusqu'à masse constante, et son volume est déduit de pesées dont une est hydrostatique

Tableau III.5 : Détermination de la densité sèche.

Volume totale Vt (cm3)	90.8	92	96
Masse humide Ph (g)	189	197	194
Masse des grains solides Ps (g)	168.75	175.610	172.936
Densité sèche (g/ cm3)	1.97	1.93	1.92
ρd moyennes (g/cm3)	1,85		

Interprétation des résultats

D'après le tableau ci-dessus (Tableau III.4), on peut classer la masse volumique calculée pour l'échantillon étudié.

Tableau III.6 : Classification des masses volumiques sèches selon Terzaghi.

$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	Appréciation
<1.6	Faible
1.6 – 1.8	Moyenne
>1.8	Dense

➤ Donc l'appréciation de notre sol est **Dense**.

III.3-1-5. Détermination de la densité des particules solide (ρ_s), NF P-94-054).

La masse volumique des particules solides du sol (ρ_s) est le quotient de la masse de ces particules solides (m_s) par le volume (V_s).

$$\rho_s = m_s / V_s$$

L'essai a pour objet la détermination, au pycnomètre à eau, de la masse volumique des grains solides de sol. Elle s'applique sur échantillons d'éléments de dimension inférieure à **2 mm**.

La densité des particules solides est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\rho_s = \rho_w * \frac{m_2 - m_1}{m_4 + m_2 - m_1 - m_3}$$

Avec :

- m_1 : masse du pycnomètre vide ;
- m_2 : masse de pycnomètre avec échantillon ;
- m_3 : masse de pycnomètre + eau + échantillon ;
- m_4 : masse du pycnomètre plein d'eau ;
- ρ_w : masse volumique de l'eau égale à 1000 Kg / m³.



Figure III.8 : Matériels utilisés pour l'essai de pycnomètre.

Le résultat de l'essai est le suivant :

- m_1 : masse du pycnomètre vide = 202.4 g
- m_2 : masse de pycnomètre avec échantillon = 265,8 g
- m_3 : masse de pycnomètre + eau + échantillon = 802,5
- m_4 : masse du pycnomètre plein d'eau = 761.6 g
- p_w : masse volumique de l'eau égale à 1000 Kg / m³.

D'où la masse volumique des grains solides : $\rho_s = 2,626 \text{ (g / cm}^3\text{)}$

La phase solide des sols est constituée principalement de silice et d'Alumine. Les éléments simples Si et Al ayant des masses atomiques très voisines, le poids volumique des sols évolue dans une plage très étroite. Les sols organiques et les sols métallifères font exception à ces valeurs, dans le chapitre précédent (la bibliographie) le poids volumique des grains solides varie entre 26 à 27 KN/ m³ pour les sables et l'argile, dans le cas de la marne étudié la masse volumiques des grains solides trouvé est dans la fourchette d'après (J. Lérau)

III .3-1-3. Analyse granulométrique

❖ Analyse granulométrie méthode par tamisage à sec après lavage (NF P 94-056)

Principe de l'essai

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché, au moyen d'une série de tamis et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulée sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse.



Figure III.9 : Analyse granulométrique par tamisage –NP 18--560

Tableau III.7. : Résultat de l'analyse granulométrique :

Tamis (mm)	Tamisât (%)
5.00	97.06
2.00	95.58
1.00	94.66
0.4	93.90
0.20	93.60
0.10	93.47
0.08	93.58

❖ Analyse granulométrique par sédimentation

L'analyse granulométrique de la marne pour les particules inférieure ou égale à **80mm** se fait par la sédimentation.

La sédimentation c'est un essai complète l'analyse granulométrique par tamisage du sol (Norme NF P 94-056) ce qui peut être nécessaire à la description et la classification.

But de l'essai

C'est la détermination de la distribution pondérale de la taille des particules de sols de dimension inférieure à 0,08mm

Principe de l'essai

- Tamiser l'échantillon de sol par lavage (passant au tamis 0.08mm), et récupérer le tamisât ;
- Sécher l'échantillon dans une étuve jusqu'au poids constant ;
- Prendre 70g de tamisât sec ;

- Imbiber la prise d'essai dans une éprouvette cylindrique en verre de 2 litre contenant un mélange d'eau distillée ou déminéralisée et solution à 5% d'hexamétaphosphate de sodium ($\text{Na}_6(\text{PO}_3)_6, 10 \text{H}_2\text{O}$).
- Laisser imbiber pendant au moins 15 heures à température ambiante ;
- Agiter vigoureusement la suspension au moyen d'un agitateur manuel,
- Retirer l'agitateur manuel, et déclencher au même instant le chronomètre (début de l'essai) ;
- Plonger le thermomètre avec précaution dans la suspension immédiatement après le déclenchement du chronomètre ; procéder à la prise des lectures du densimètre et de la température aux temps suivants (en minute) (0.5-1-2-5-10-20-40-80-240-1440).
- Calculer le pourcentage des tamis et compléter la courbe granulométrique.

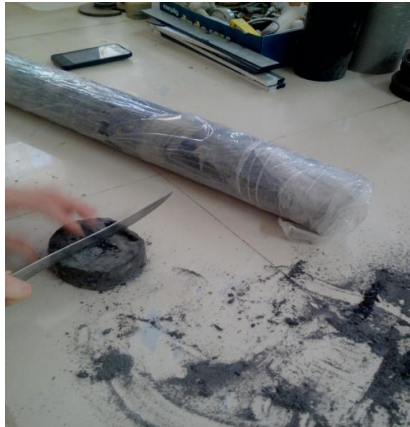


Figure III.10 : Préparation de l'échantillon



Figure III.11 : Préparer le tamisat au tamis 80 µm



Figure III.12: Siphonnée l'eau une fois redevenue claire sans entraîner l'élément fins.



Figure III.13 : Déroulement de l'essai de la sédimentométrie

Tableau III.8 : Résultat de la sédimentométrie .

Diamètre équivalent (μm)	Tamisât (%)
73.00	84.51
52.10	80.05
37.40	75.59
24.10	68.15
17.30	62.20
12.40	56.24
8.90	50.29
6.40	41.36
3.80	26.49
1.60	16.07

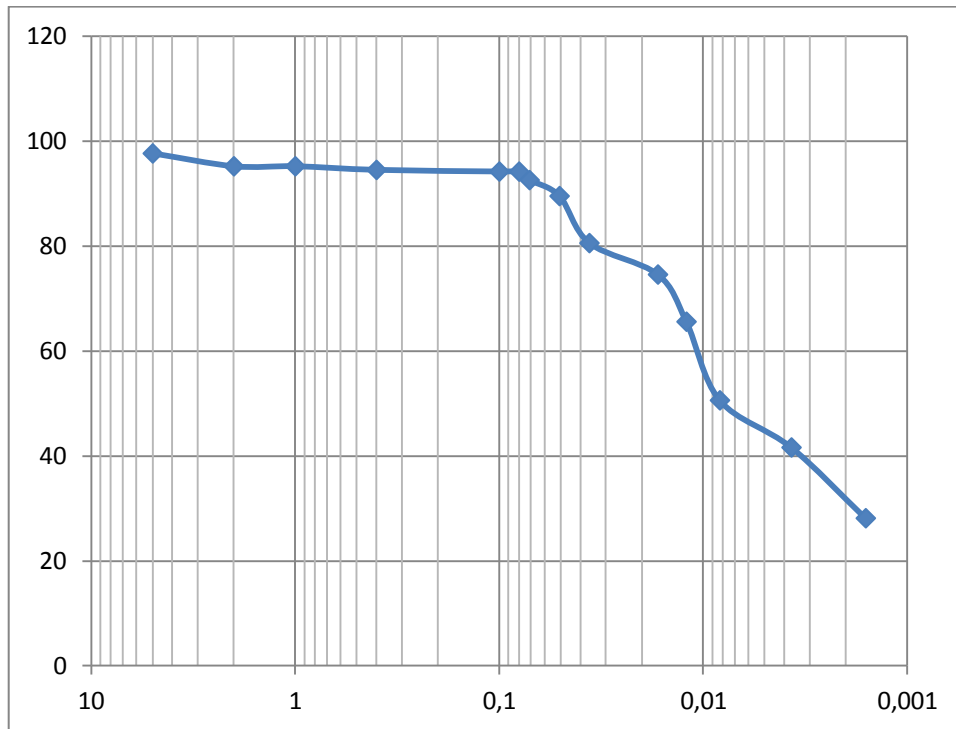


Figure III.14: Courbe granulométrique.

III.3-1-4. Les limite d'Atterberg (NF P 94-051)

Les limites d'Atterberg (limite de liquidité et de plasticité) : se sont les teneurs en eau pondérales correspondant à des états particuliers d'un sol.

- **Limite de liquidité (W_L)**: Teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique.
- **Limite de plasticité (W_P)**: Teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états plastique et solide.
- **Indice de plasticité (I_P)**: Différence entre les limites de liquidité et de plasticité, cet indice définit l'étendue du domaine plastique.

$$I_P = W_L - W_P$$

- **Indice de consistance I_C** : D'après les valeurs des limites d'Atterberg (la limite de liquidité, la limite de plasticité) ainsi le degré de plasticité ; nous pouvons

déterminer l'indice de consistance I_C qui permet d'apprécier la consistance des sols plastiques, est le rapport défini par la formule suivante :

$$I_C = \frac{Wl - W}{I_p}$$

Les teneurs en eau étant exprimées en pourcentage, l'indice de plasticité est un nombre sans dimension.

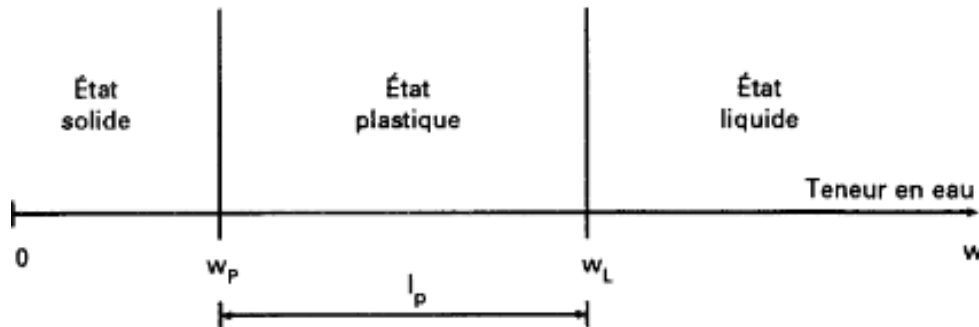


Figure III.15: Représentation des limites d'Atterberg (mécanique des sols)

▪ Préparation du sol

Après échantillonnage du sol et homogénéisation par brassage, une masse de matériau **m** est mise à imbiber dans un récipient d'eau à une température ambiante, pendant au moins 24 heures.

Cette masse **m**, exprimée en grammes, doit être supérieure à 200 fois la dimension des plus gros éléments de sol appréciée visuellement et exprimée en millimètre. De même elle doit être telle que le tamisât au tamis de **400 μm** donne au moins 200 g de particules solides.

Une fois imbibé, le matériau est tamisé par voie humide au tamis 400 μm . L'eau de lavage et le tamisât sont recueillis dans un bac.

Après une durée de décantation d'au moins 12 heures, sans aucun additif destiné à accélérer le dépôt ni sans utilisation d'un procédé quelconque de centrifugation, l'eau claire du bac est siphonnée sans entrainer de particules solides. L'eau excédentaire est évaporée à une température ne dépassant pas 50° C.

▪ Détermination de la limite de liquidité W_L (%)

- ✓ La totalité du tamisât est malaxée afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide.

- ✓ Répartir avec une spatule, dans la coupelle propre et sèche, une masse d'environ de 70 g de pate
- ✓ Etalée la pate en plusieurs couches afin d'éviter d'emprisonner des bulles d'air
- ✓ Présente en fin d'opération un aspect symétrique comme indiqué sur la figure (III.10.)
- ✓

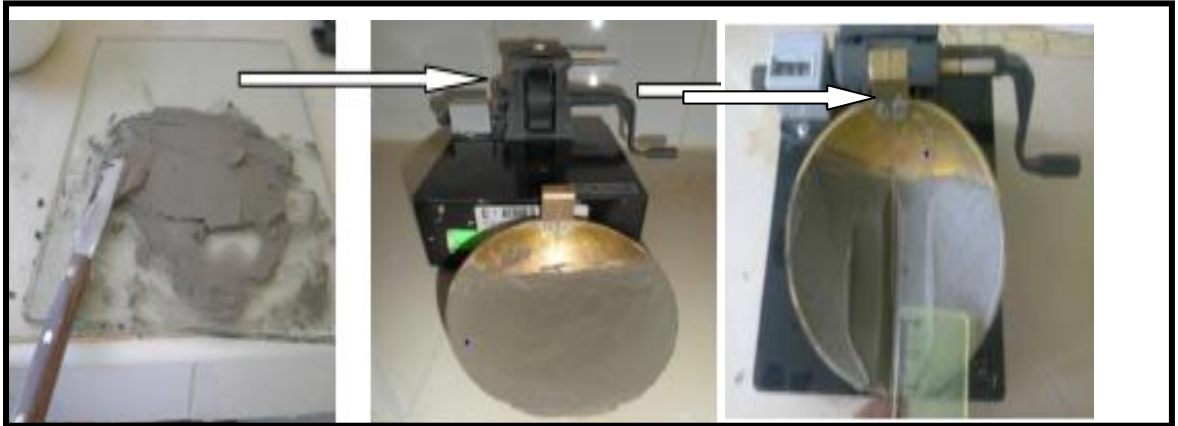
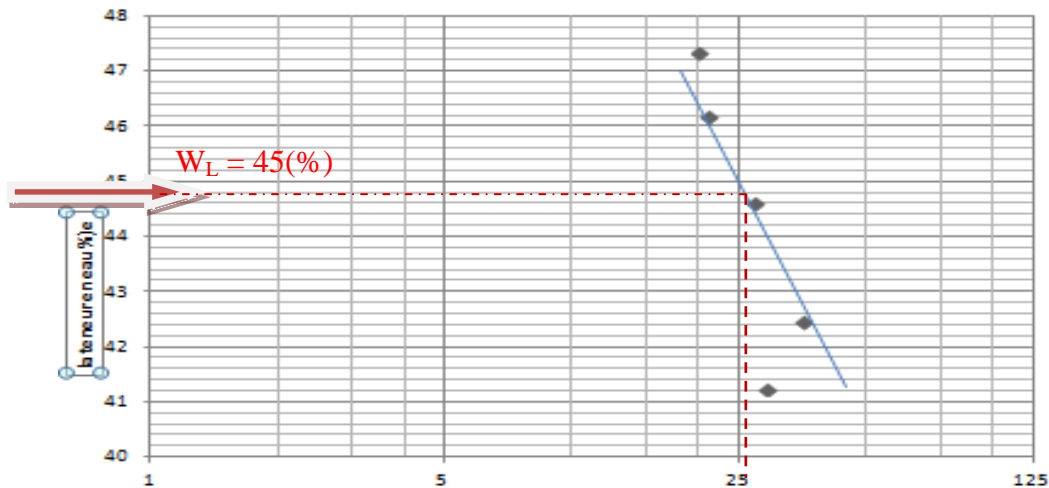


Figure III.16 : Détermination de la limite de liquidité.

Les résultats obtenus sur l'échantillon étudiés sont présenté comme suit :



. Figure III.17 : Calcul de la limite de liquidité

▪ Détermination de la limite de plasticité W_p

- ✓ Former une boulette à partir de la pate préparée
- ✓ Rouler la boulette sur une plaque lisse, à la main ou éventuellement à l'aide d'une plaquette, de façon à obtenir un rouleau qui est aminci progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne 3 mm de diamètre ;

- ✓ La cadence du mouvement de la main doit être régulière ;
- ✓ L'amincissement du rouleau se fait de manière continue et sans effectuer de coupure dans le sens de sa longueur ;
- ✓ Le rouleau au moment où il atteint un diamètre de $3 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ doit avoir environ 10 cm de longueur et ne doit pas être creux
- ✓ La limite de plasticité est obtenue lorsque, simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteint $3 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$
- ✓ Si aucune fissure n'apparaît, le rouleau est réintégré à la boulette, la pâte est malaxée tout en étant séchée légèrement, éventuellement sous un flux d'air chaud à une température inférieure à $50 \text{ }^\circ\text{C}$
- ✓ Reformuler un nouveau rouleau

Prélever, une fois les fissures apparues la partie centrale du rouleau et placer dans une boîte de masse connue, et peser immédiatement et l'introduire dans l'étuve, afin de déterminer sa teneur en eau (norme **NF P 94-050**)

Effectuer un deuxième essai sur une nouvelle boulette.

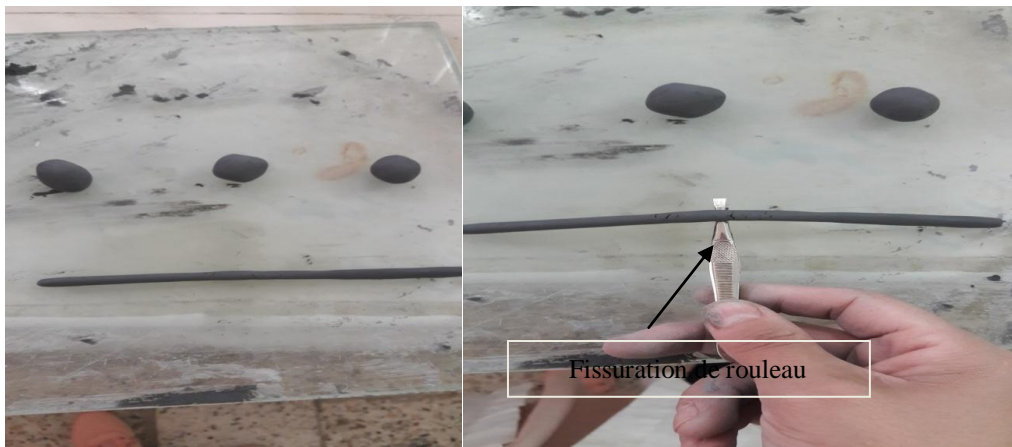


Figure III.18 : Préparation de boulette jusqu'à atteindre 3mm de diamètre et environ 10cm de largeur et avoir une fissuration.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.9: Détermination de la limite de plasticité.

Echantillon	1	2	3
Masse totale humide (g)	9.8	19.4	25.40
Masse totale sec (g)	9.20	18.90	25.10
Masse de la tare	7.4	17.50	24.01

(g)			
Masse d'eau (g)	0.60	0.50	0.300
Masse de sol sec (g)	1.8	1.4	1.00
Teneur en eau (%)	33.33	35.71	30.00
W _P moyenne (%)	33.02		

Donc :

$$W_P (\%) = 33.02 (\%)$$

▪ **Détermination de l'indice de plasticité I_P**

L'indice de plasticité permet de définir le degré de plasticité d'un sol.

Tableau III. 10 : Présente la détermination de l'indice de plasticité.

Limite Atterberg (%)	Echantillon
La limite de liquidité (W _L)	45
La limite de plasticité (W _P)	W _P = 33.02
L'indice de plasticité (I _P)	I _P = W _L - W _P I _P = 11.98

De ces valeurs, on peut déterminer l'indice de consistance I_C qui permet d'apprécier la consistance des sols plastique en se référant aux plages de valeurs présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.11 : Classification selon l'indice de plasticité(ATTERBERG)

Indice de plasticité	Degré de plasticité
0 < I _p < 5	Sol non plastique
5 < I _p < 30	Sol peu plastique
30 < I _p < 50	Sol plastique
50 < I _p	Sol très plastique

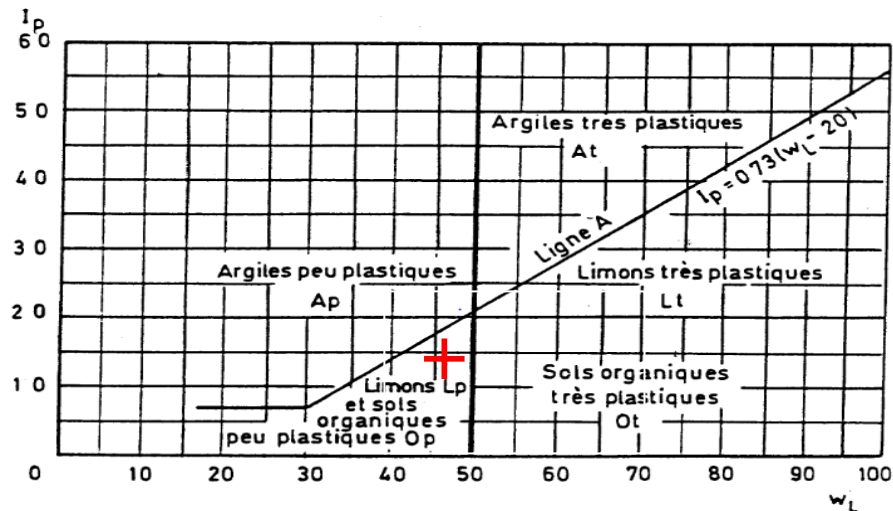


Figure III.19: Abaque de plasticité de Casagrande- classification LPC des sols fins (Géotechnique 1-J. Lérau P18).

Interprétation :

D'après le tableau de classification de l'indice de plasticité (ARERBERG), le sol étudié est **un sol peu plastique**.

Et selon la classification GTR 92 (Guide Technique pour Réalisation des remblais des couche de forme septembre 1992) retient pour I_p les seuils d'argilosité suivants :

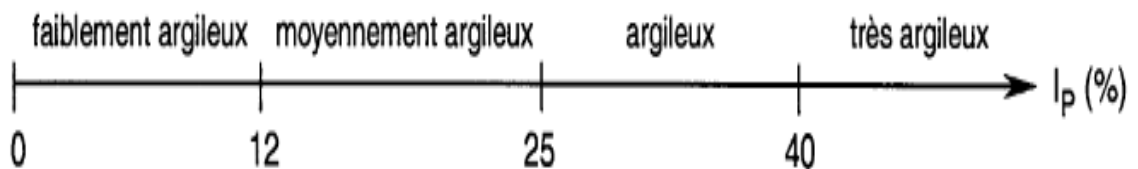


Figure III.20 : Fourchette de classification de sol selon la valeur d' I_p selon GTR92 (Géotechnique 1-J. Lérau P16).

- Calcule le l'indice de consistance I_c

$$I_C = W_L - W / I_P$$

$$I_c = 2.71$$

Interprétation de résultat

Les limites d'ATTERBERG sont des paramètres géotechniques destinés à identifier un sol et à caractériser son état au moyen de son indice de consistance comme le montre le tableau :

Tableau .III.12 : Plage de consistance des sols plastique d'après ATTERBERG.

Ic	Appréciation
0 - 0.25	Pâteux
0.25 - 0.50	Mou
0.5 - 0.75	Ferme
0.75 - 1	Mi dur
>1	Dur

D'après le tableau de la classification de l'indice de consistance l'état du sol étudié est **solide**.

III.3-1-5. La valeur de bleu de méthylène par l'essai à la tache (NF P 94- 068)

Cet essai permet de mesurer la quantité et l'activité de la fraction argileuse contenue dans le sol.

L'essai s'effectue sur 70 g de matériau trempé dans 0,5 L d'eau distillé et maintenus en permanence sous agitation.

Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène et en contrôlant l'adsorption après chaque ajout. Pour ce faire, on prélève une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre, ce qui provoque la création d'une tache.



Figure III.21 : Matériel d'essai au bleu de méthylène par l'essai à la tâche

L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par le matériau mis en suspension dans l'eau.

La valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol.

Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène et en contrôlant l'adsorption après chaque ajout.

Pour ce faire, on prélève une goutte de suspension que l'on dépose sur un papier filtre.

Plus la fraction argileuse est importante plus elle adsorbe du bleu de méthylène.



Figure III.22 : Déroulement de l'essai au bleu de méthylène.

- Si la goutte centrale bleu est entouré d'une zone humide incolore le test est négatif, donc le sol n'est pas encore saturé, on continue alors le dosage au bleu de méthylène (figure III.14.).



Figure III.23 : Teste au bleu de méthylène négatif.

- Si le test est positif est le sol est totalement saturé, la zone humide est teintée de bleu c'est-à-dire on arrête le dosage.



Figure III.24 : Test au bleu de méthylène positif.

La valeur au bleu de méthylène su sol est donnée par la relation suivante :

$$VBS = Mb / Ms * 100 \text{ et } Mb = V * 100$$

Avec : Mb : la masse de bleu permettant la saturation par adsorption (g).

Ms : la masse sèche de la prise d'essai (g).

V : le volume de solution de bleu de méthylène utilisée (cm³).

La valeur de bleu méthylène pour l'échantillon testé est :

$$VBS = 5.15$$

Interprétation de résultat

Le VBS traduit globalement la quantité et la qualité de la fraction argileuse du sol. Elle s'exprime en grammes de bleu pour 100 g de sol

Ordre e grandeur :

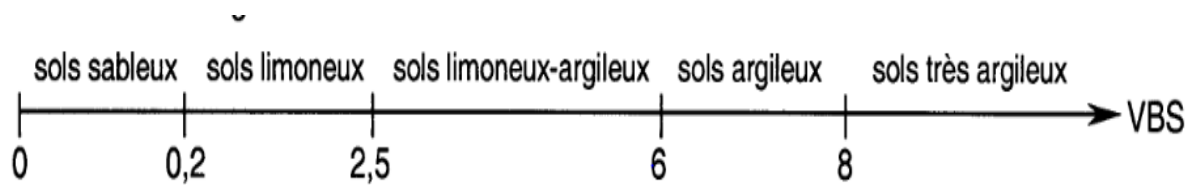


Figure III.25 : Ordre de grandeur (type de sol en fonction de la valeur VBS) (Léreau 2005 :- INSA-Institut National Des Science Appliqués De Toulouse.P16).

Donc le sol testé est **un sol limoneux – argileux**

❖ **Indice des vides, degré de saturation, la porosité**

○ **Indice des vides « e »**

L'indice des vides permet de savoir si les vides sont importants ou non, c'est-à-dire, si le matériau étudié est dans l'état serré ou lâche.

L'indice des vides est défini comme étant le rapport du volume des vides (V_v) au volume des grains solides (V_s).

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Sachant que l'indice des vides dépend aussi des paramètres déjà déterminés ρ_s et ρ_d selon la formule suivante :

$$e = [\rho_s / \rho_d] - 1$$

Donc l'indice des vides est :

$$e = 0,3505 = 35,05\%$$

- **Interprétation de résultat**

Dans le chapitre précédent on constate que l'indice des vides peut varier de 0.30 à 1 (30(%) à 100(%)), et dans des cas extrêmes des argiles de Mexico la valeur de l'indice des vides peuvent atteindre la valeur de 13 (130%). (Géotechnique 1 J-Léreau).

○ **Degré de saturation « Sr »**

Le degré de saturation indique dans laquelle proportion les vides sont remplis par l'eau. Il est défini comme le rapport du volume de l'eau (V_e) au volume des vides (V_v).

Le degré de saturation exprime en pourcentage

$$Sr = \frac{Ve}{Vv} * 100$$

Lorsque le sol est totalement saturé, $Sr = 100\%$

La dépendance du degré de saturation des paramètres connus (ρ_s , ρ_w , et e) est illustrée par la formule :

$$Sr = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w}\right) * \left(\frac{W}{e}\right)$$

Donc le degré de saturation est :

$$Sr = 83.73\%$$

Interprétation de résultat

D'après TERZAGHI le tableau suivant présente l'état de saturation du matériau ;

Tableau.III.12 : L'état de saturation du matériau (d'après TERZAGHI).

Sr (%)	Appréciation
100	Saturé
76 - 99	Détrempé
51 - 75	Mouillé
26 - 50	Humide
1 - 25	Légèrement humide
0	Sec

o La porosité

La porosité a une signification analogue à celle de l'indice des vides. Elle est le rapport du volume des vides (Vv) au volume total (V).

La porosité peut s'exprimer en pourcentage ou sans dimension.

$$n = \frac{Vv}{V}$$

La porosité et l'indice des vides sont liés par la formule :

$$n = \frac{e}{(e + 1)}$$

Donc la porosité est égal à :

$$n = 25.95 \%$$

Tableau III. 13: Récapitulatif des résultats d'identification de matériau

Paramètres	Valeurs
La teneur en eau naturelle W(%)	12.18
Masse volumique humide ρ_h (g/cm ³)	2.18
Masse volumique de masse sèche ρ_d (g/cm ³)	1.85
Masse volumique solide ρ_s (g/cm ³)	2.62
La limite de liquidité (%)	45
La limite de plasticité (%)	33.02
L'indice de consistance I_c (%)	2.71
Indice de plasticité I_p (%)	11.98
Tamisât <80 μm '(%)	94.20
Tamisât < 2 μm '(%)	28.16
VBS (gr /100g de sol)	5.15
Le degré de saturation S_r (%)	83.73
L'indice des vides e (%)	35.05
La porosité n (%)	25.95
La teneur en CaCO_3	35.12

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats d'essais d'identification réalisés au laboratoire, ce qui a permis d'avoir une idée sur la nature physique, chimique.

D'après les résultats de l'analyse chimique, le taux de carbonates (CaCO_3) est de 35.12(%) ce qui nous permet de classer notre sol comme étant « Marne ».

L'analyse granulométrique réalisée donne un pourcentage des passants à 80 μm égale à 94.20 %. Cette valeur indique que le sol présente une granulométrie très fine.

La valeur de bleu VBS est égale à 5.15, d'après la norme française (NF P11-300), il s'agit d'un sol limoneux.

Dans le chapitre qui suit, nous allons entamer des essais expérimentaux pour voir le comportement de sol marneux identifié sur le chemin drainage-humidification.

Introduction

La recherche bibliographique réalisée dans le chapitre précédent (la succion dans les sols non saturés), a montré la nécessité d'étudier le comportement d'un matériau sur une gamme étendue de la succion, de la saturation jusqu'à plusieurs centaines de MPa. La réalisation d'une telle méthode nécessite l'utilisation de méthode de mesure ou d'imposition de la succion.

Deux méthodes sont donc été choisies une pour la mesure et une autre pour imposer la valeur de la succion. la technique de papier filtre pour la mesure de la valeur de la succion dans le sol intact (à l'état naturel), et la technique des solution salines qui permet l'imposition de très forte succions et a donc, été également retenue, d'après la figure cité par (Cuisinier. Olivier2002).

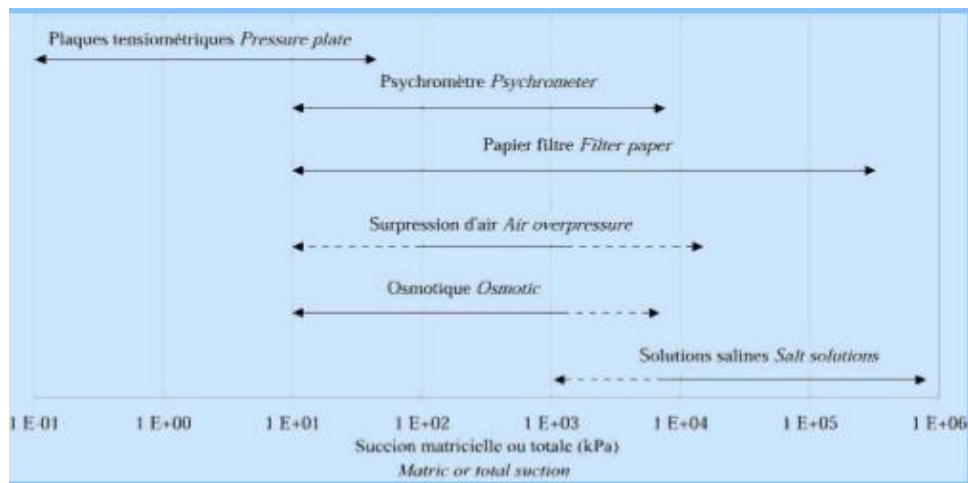


Figure IV.1 : Gamme accessible par les techniques de mesure ou d'imposition de la succion (Cuisinier. Olivier2002).

IV-1. Essai de mesure de la succion avec la méthode du papier filtre

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la succion, on a utilisé dans ce travail, la technique de papier filtre (**Whatman n° 42**) papier filtres, (figure IV.1)



Figure IV.1 : Papier filtre whatman.

L'essai est réalisé au laboratoire pédagogique à l'université de Mouloud Mammeri (MDS), selon la norme anglaise (D5298- 03). On a utilisé le papier filtre **Whatman N° 42**, pour le quel, il existe des courbe d'étalonnage. La courbe d'étalonnage n'est autre que la relation entre la teneur en eau et la succion initiale du sol.

IV-2.1. Déroulement de l'essai de la succion matricielle

La succion initiale de l'échantillon a été mesurée à l'aide de la technique du papier filtre (ASTM D 5298-94), selon le protocole ci-après :

- Une éprouvette de matériau de 2 cm de hauteur ;
- Séparé l'éprouvette pour avoir deux couches (échantillon) de hauteur de 1 cm ;
- Trois papier filtre étant insérés entre les deux couches ;

Placé l'ensemble en suite dans un récipient hermétique (ou une boîte fermé pour éviter le contact avec l'atmosphère), pour une durée de 15 jours.

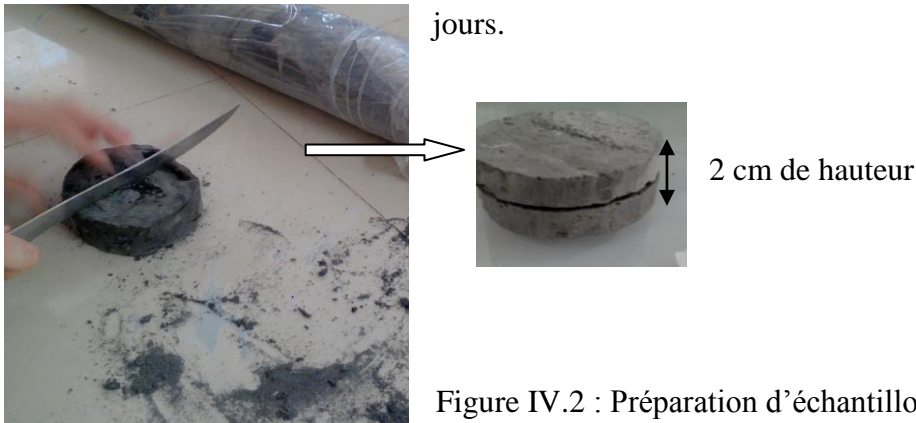


Figure IV.2 : Préparation d'échantillon de 2 cm de hauteur.



Figure IV.3: Détermination du poids du papier filtre.

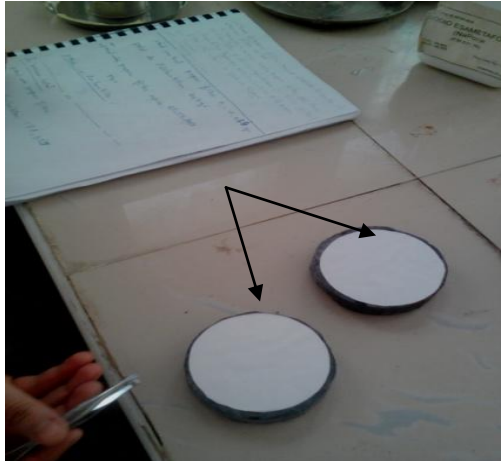


Figure IV.4 Disposition du papier filtre pour la mesure de la succion matricielle.



Figure IV.5 : Dispositif de conservation.

Après 15 jours on pèse le papier filtre, et on met l'échantillon à l'étuve pour calculer la teneur en eau.

➤ **Calcul de la teneur en eau de papier filtre pour la mesure de la succion matricielle**

Tableau VI.1 : Résultat de mesure de la teneur en eau de papier filtre (Watanman N°42).

Echantillon	01	02
La masse de papier filtre initial (g)	0.449	0.449
La masse humide de papier filtre (g)	0.527	0.528
La masse sèche de papier filtre (g)	0.431	0.432
La teneur en eau de papier filtre (%)	22.27	22.22
La teneur en eau moyenne (%)	22.24	

➤ **Détermination de la teneur en eau de la marne**

Les résultats de la mesure de la teneur en eau de la marne sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.2 : Résultat de la mesure de la teneur en eau de la marne.

Echantillon	01	02
La masse initiale de la marne (g)	447.	400
La masse humide de la marne (g)	446.2	398.8
La masse sèche de la marne (g)	399.5	362.07
La teneur en eau (%)	11.689	10.144
La teneur en eau moyenne (%)	10.916	

➤ **Calcul de la succion totale :**

Un autre papier filtre dans une boîte sans contact avec le sol pour la mesure la **suction totale** (figure IV.7).



Figure IV.7.a : Détermination du poids du papier filtre.



Rondelle plastique.

Figure IV.7.b: La disposition du joint entre le papier filtre et le sol.

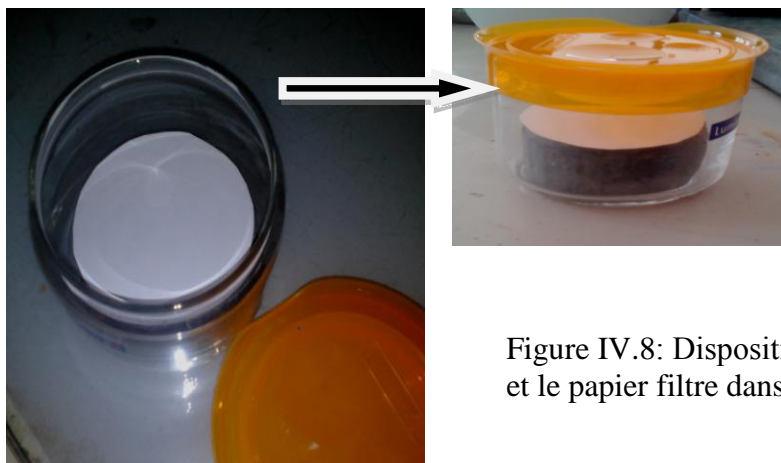


Figure IV.8: Disposition de l'échantillon et le papier filtre dans une boîte fermée.

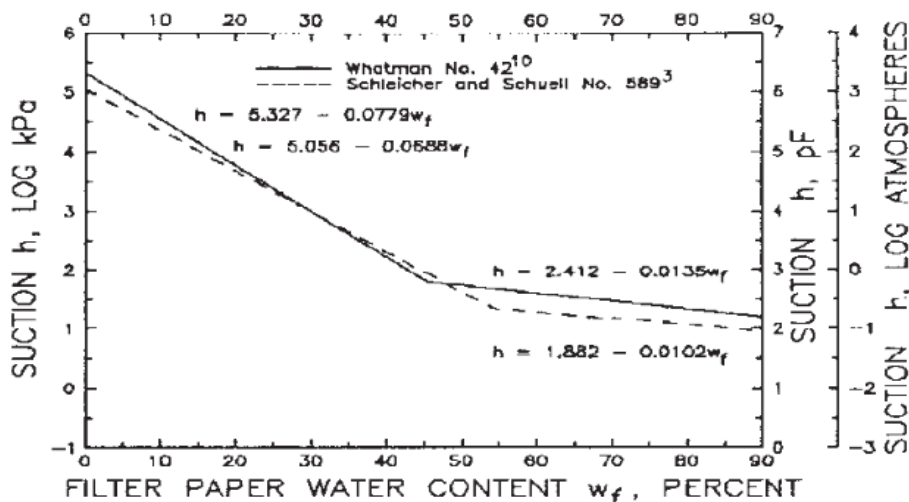
Les calculs de la teneur en eau de papier filtre et de l'échantillon sont présentés dans le tableau (IV.3) :

Tableau IV.3 : Résultats de la mesure de la succion totale papier filtre.

Echantillon	1
Masse humide de l'échantillon (g)	370
Masse sèche de l'échantillon(g)	339.591
La masse d'eau adsorbée(g)	30.409
La teneur en eau de l'échantillon (%)	8.954
La masse initiale de papier filtre (g)	0.458
La masse humide de papier filtre (g)	0.581
La masse sèche de papier filtre(g)	0.504
La masse d'eau absorbée par le papier filtre (g)	0.123
La teneur en eau de papier filtre (%)	24.404

Après avoir calculé la teneur en eau de papier filtre et celle de l'échantillon la succion matricielle correspond à cette teneur en eau, évaluée en utilisant la courbe d'étalonnage ASTM

- **Détermination de la courbe d'étalonnage (succion en fonction de la teneur en eau) :**



NOTE 1—Coefficient of determination $r > 0.99$.

Figure IV.6 : Courbe d'étalonnage du papier filtre (Wathman N°42), ASTM.

On projet la valeur de la teneur en eau calculer sur la courbe d'étalonnage du papier filtre est, on trouve que la valeur de la succion totale est de 36.59 Kpa et la succion matricielle est de 24.530KPa.

• Méthode d'imposition de la succion

L'étude du comportement séchage humidification des sols intacts requiert l'utilisation de dispositifs expérimentaux permettant d'imposé la succion dans une très large gamme, entre zéro (0) et plusieurs centaines de (MPa). Pou atteindre cet objectif, il est nécessaire d'employer au moins deux techniques d'imposition. Dans le cadre des essais qui seront présentés dans ce mémoire, la méthode des solutions salines ont été sélectionnées (Olivier cuisinier 2002).

1- Technique de contrôle par phase vapeur (technique des solutions salines saturées)

Cette technique est généralement utilisée pour l'imposition de succion allant de quelques MPa jusqu'à des centaines de MPa. Elle est basée sur la loi de Kelvin :

$$S = \rho_w \rho_w * R * T / M_V \ln H_r$$

Avec :

R : la constante des gaz parfaits

Mv : est la masse molaire de la vapeur l'eau

Hr : est l'humidité relative de l'air

ρ_w : la masse volumique de l'eau liquide à la température T.

- **Le principe de l'essai**

Le principe général de cette méthode consiste à placer un échantillon du sol dans une enceinte hermétique (appelée dessiccateur) (voir figure IV.9), contenant une solution saline. A l'intérieur du dessiccateur, le taux d'humidité relative de l'air Hr est fixé par la solution saline saturée.

La solution est imposée au niveau des bords de l'échantillon par l'intermédiaire du taux d'humidité relative de l'air, Hr. Au- dessus d'une solution saline saturée, l'humidité relative de l'air Hr, est définie comme étant le rapport entre la pression de la vapeur d'eau en équilibre avec la solution saline P_v , et la pression de la vapeur saturante, P_{vs} .

$$H_r = P_v / P_{vs} (T)$$

La valeur de Hr dépend à la fois de la solution employée (sel et concentration) et la température.

- **Mode opératoire**

Avant de commencer l'essai on doit d'abords préparer les solutions salines saturées Vu que le nombre des dessiccateurs disponibles dans laboratoire de mécanique des sols, est insuffisant pour manipuler le nombre important des échantillons, on a utilisé cinq solutions pour réaliser l'essai.

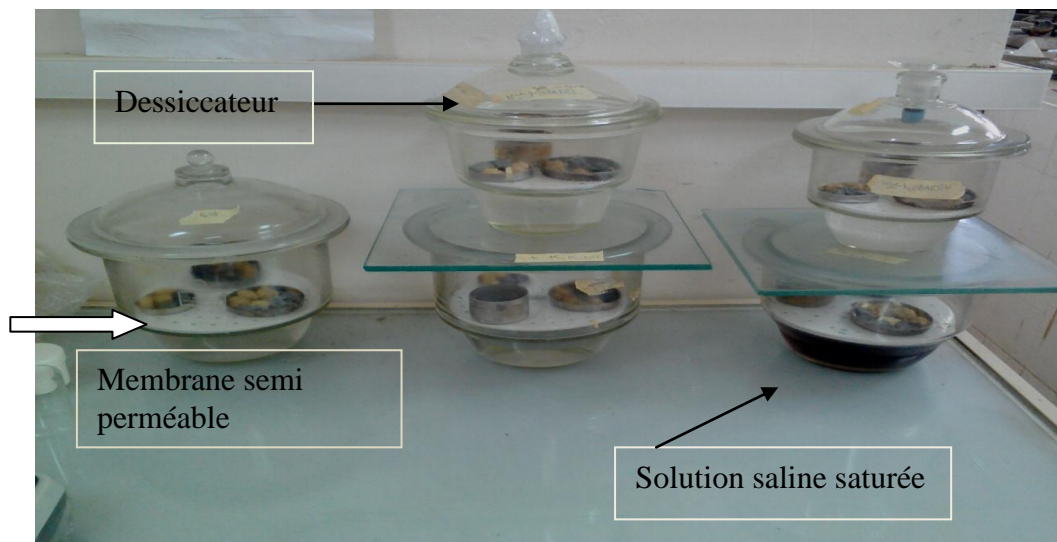


Figure IV.9 : Déroulement de l'essai des solutions salines saturées

➤ Préparation des solutions salines saturées

Les solutions salines saturées utilisées dans ce travail expérimental pour l'imposition des succions, sont préparées dans le laboratoire pédagogique à l'université de Mouloud Mammeri à Tizi-Ouzou à des concentrations connues (g de sel / 500 ml d'eau distillée).

On utilise les membranes semi-perméables à cause des pores qui permettent de l'échange entre le matériau et les solutions salines par phases vapeur.

Après avoir préparé les solutions salines saturées on place la membrane semi-perméable aux bouts de 45 jours pour atteindre l'équilibre.

Tableau IV.4 : Concentrations des solutions salines saturées

Les solutions	La succion (MPa)
SO ₄	12.6
MgCl ₂	156.22
KOH	326
H ₂ SO ₄	500
K ₂ CO ₃	113.2

• Préparation des échantillons

Dans le cadre de cette étude, les échantillons ont été préparés :

- Sous forme de petits morceaux pour l'échantillon intact;
- Sous forme de pâte saturée à $1,2W_i \leq W_i \leq 1,5W_i$;
- Pour préparer l'échantillon sous forme de pâte à $1,4 W_i$, on pèse une portion suffisante du matériau ($M = 200$ g), puis on la malaxe avec une quantité d'eau distillée nécessaire à l'obtention de la teneur en eau désirée ;
- Mettre la pâte saturée à l'étuve à une température de 105°C avant de la mettre dans le dessiccateur pour le chemin humidification ;
- Mettre la pâte saturée tel quel est ($W = 1.3W_i$), pour le chemin séchage ;
- Mettre les échantillons sur la grille du dessiccateur (figure IV.12) ou de bocaux (aucun contact n'est permis entre la solution et les échantillons (échange par vapeur) ;
- Bien sceller les dessiccateurs afin que l'air ambiant n'y pénètre pas (aucun échange d'air avec le milieu extérieur).



Figure IV.11: Echantillon étuvé



Figure IV.12 : Dispositif des échantillons dans les dessiccateurs.

La comparaison entre les mesures effectuées après 20 jours dans l'intervalle de 5 jours la variation de la masse mesuré est de 10^{-2} et après avoir tracé les courbes, on remarque la stabilisation de la masse mesuré en fonction de temps. (Figures IV.13-14-15)

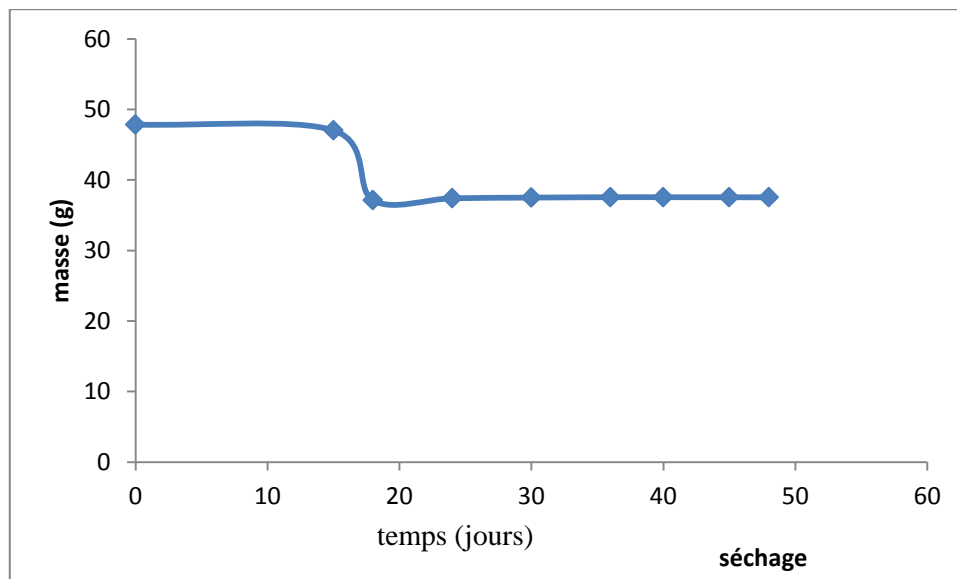


Figure IV.13 : courbe de mesure de la masse en cycle séchage en fonction du temps.

Figure IV.13 : courbe de masse de l'échantillon humide en fonction de temps, (dans la solution $MgCl_2$)

Le palier

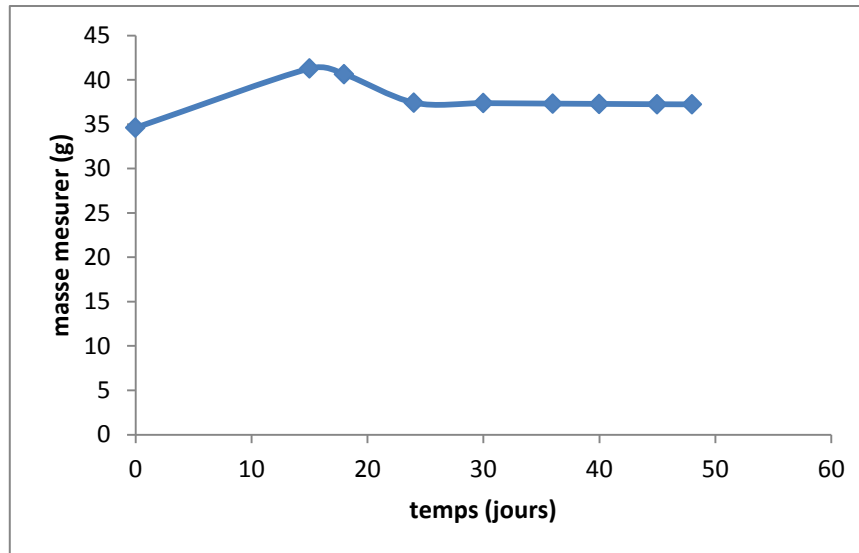


Figure IV.14 : Courbe de mesure de la masse humide dans la succion SO4, en fonction de temps.

Figure IV.15 : Courbe de la masse humide mesurée en fonction de temps

Une fois l'équilibre est atteint, on détermine les paramètres d'état de l'échantillon (e , w , S_r) par la pesées immergées dans le KERDANE.

IV.2.1 Détermination des paramètres d'états

La présentation des chemins drainage humidification nécessite la connaissance des paramètres d'état des différents échantillons, à connaître : la teneur en eau (W), le degré de saturation (S_r) et l'indice des vides, qui sont déterminés par la pesée immergée dans une huile non mouillante utilisée pour remplir les gros pores sans gonfler l'échantillon et sans changé ces caractéristiques initiaux (physiques, mécaniques).cette méthode à été dérivée par Zerhouni (1991) de celle décrite par Tessier (1975).

La principale inconnue du programme expérimentale est le volume de l'échantillon, sa détermination permettra de déduire les autres paramètres. On procèdera par pesée hydrostatique dans une huile non mouillante qui est le Kerdane.

L'huile utilisée généralement du Kerdane (pétrole lampant) dont la densité γ_K / γ_w est de l'ordre de **0.78** (cité par BOUROUKBA-M et SOUAD – A).

Cette huile est non miscible avec l'eau et s'évapore par l'étuvage à 105°C (pour 24 heures de temps). Vu que le poids volumique dépend de la température on doit d'abord calculer le poids volumique Kerdane.

- **Détermination de la masse volumique de Kerdane**

La masse volumique de Kerdane est déterminé au laboratoire à partir de la formule

$$\gamma_K = \frac{MK}{V}$$

les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.5: Résultats de la mesure de la masse volumique de kerdane.

Echantillon	1	2	3
La masse de Kerdane (g)	7.860	11.912	3.745
Le volume de kerdane(cm ³)	10	15	5
La masse volumique (g/cm ³)	0.786	0.794	0.49
La masse volumique moyenne (g/cm ³)	0.776		

On remarque que la masse volumique d'huile citée par Zerhouni (1991), et celle mesurée pendant notre programme expérimental, sont dans la marge d'erreur de **10⁻² g (0.04)**.

Après avoir atteint l'équilibre, et calculer la masse volumique de Kerdane, on suivra les étapes ci-après :

- Peser les échantillons avec une balance de précision 10⁻³ g ;
- Immerger l'échantillon dans du Kerdane, pendant 4h, afin que les pores superficiels se remplissent ;
- Immerger l'échantillon du kerdane et l'essuyer superficiellement pour retirer le surplus d'huile.
- Peser l'échantillon une seconde fois P_{hk} (poids humide + poids du Kerdane absorbé ;) après l'avoir essuyé pour retirer le surplus d'huile ;
- Peser l'échantillon dans le Kerdane P_{imm} (poids immergé) ;
- Mettre à l'étuve les échantillons après immersion pendant 24 h (105°C) pour obtenir le poids sec ;
- Calculer le volume total de l'échantillon avec la formule suivante :

$$V = \frac{P_{hk} - P_{imm}}{\gamma_k}$$

Avec : $\gamma_k / \gamma_w = 0.776$ (densité du kerdane)

Les autres paramètres (W, e, Sr) sont déduits à l'aide des relations élémentaires de la mécanique des sols. Cet essai est destructif : chaque échantillon représente un point de la courbe.

Donc on peut prendre les masses des échantillons et réaliser la pesée hydrostatique pour déterminer les paramètres d'état, le protocole de la pesée hydrostatique est détaillé sur les figures ci-dessous :

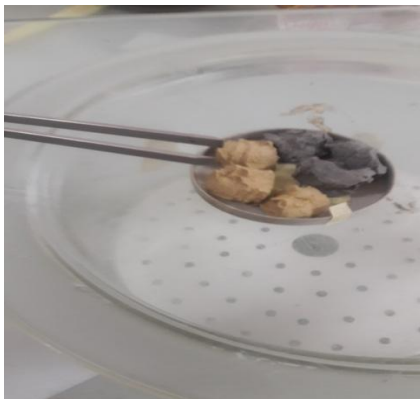


Figure IV.16 : On enlève l'échantillon après stabilisation



Figure IV.17 : Peser l'échantillon après l'avoir essuyé avec du papier absorbant



Figure IV.18 : Mettre les échantillons dans la huile de Kerdane jusqu'au on aura plus de bulle d'air

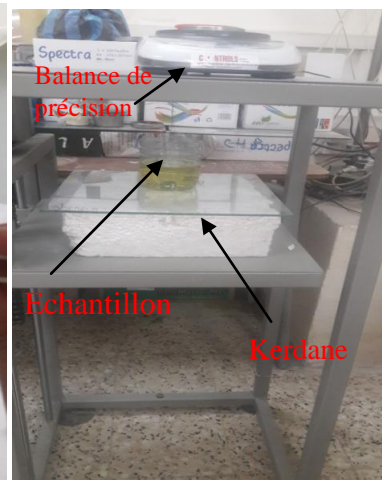


Figure IV.19 : La pesée hydrostatique des



Figure IV.21 : Etuvage des échantillons à 105°C.

Après l'étuvage complet des échantillons immergés on calcule la masse sèche des échantillons pour avoir calculé les paramètres d'état (la teneur en eau, le degré de saturation et l'indice des vides).

IV.2.1.1 Calcul de la teneur en eau, le degré de saturation et indice des vides

Les autres paramètres (W , e , S_r) sont déduits à l'aide des relations élémentaires de la mécanique des sols.

- Calcul de la teneur en eau

Les résultats obtenus pour les calculs des teneurs en eau après l'étuvage complet des échantillons selon la norme **NF P-94 050**, à une température de 105°C, on aboutit à les résultats suivantes :

- Calcul de l'indice des vides
- Calcul de degré de saturation
- Calcul le volume total.

La détermination des paramètres d'état nous permis de dessiner les cinq plans

➤ **Chemin séchage-humidification sur une pâte**

Les résultats obtenus de l'étude du chemin séchage- humidification sur une marne de Draa El-Mizan sous forme de pâte ($W = 1.4W_L$) avec $W_L = 45\%$) a permis de tracer les courbes dressées sur la figure (IV-22).

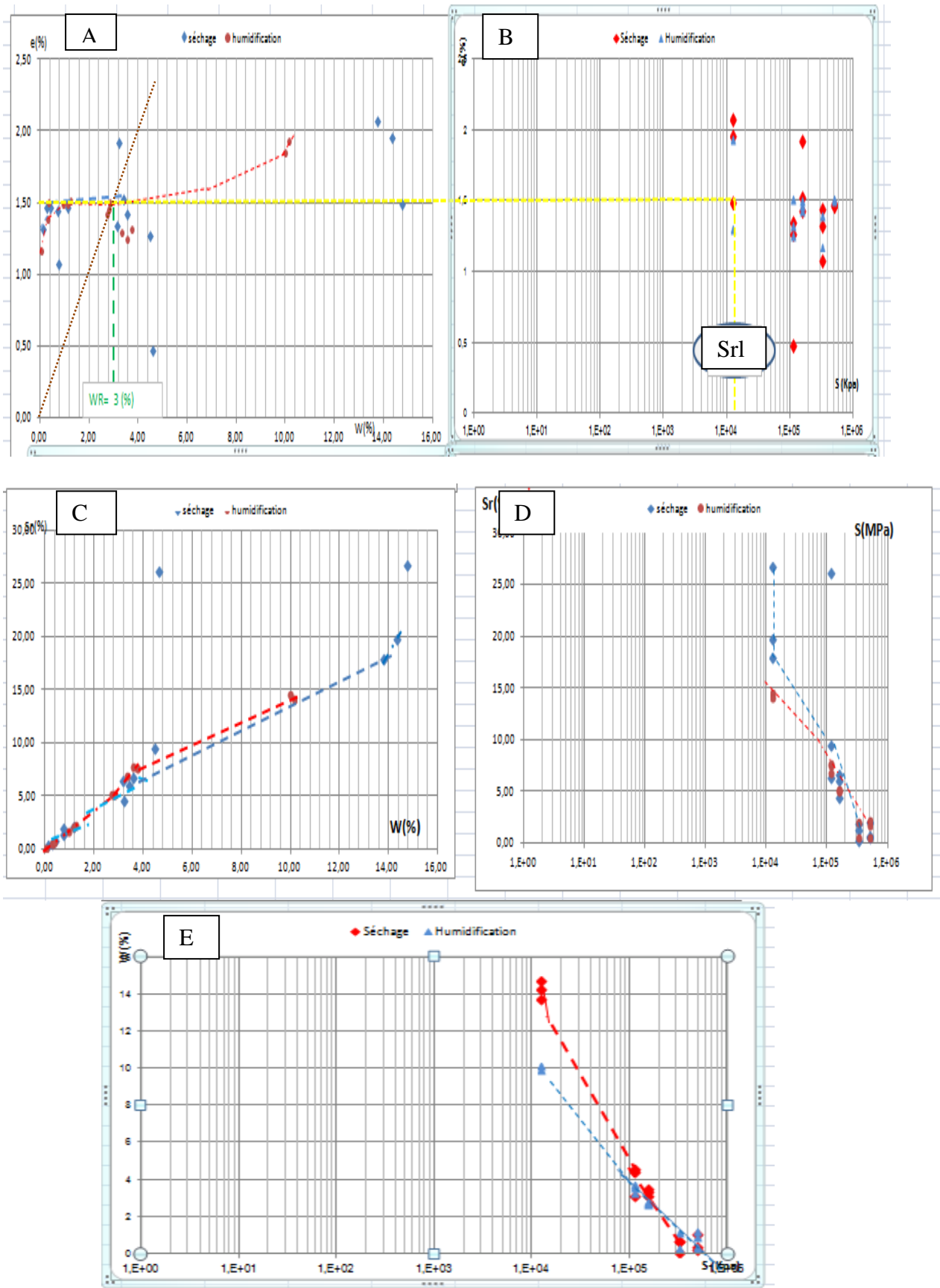


Figure IV.22 : Représentation de comportement de la marne testé chemin séchage-humidification sous forme de pâte.

Dans le plan $[W, e]$, les échantillons suivent dans un premier temps, la droite de saturation, d'équation $e = (\gamma_s / \gamma_w) * w$. En suite lorsque la teneur en eau décroît, l'indice des vides tendent vers une valeur constante.

La limite de retrait W_r , qui présente le point d'intersection de la droite de saturation de l'asymptote horizontale au palier de retrait pour $W = 0$, est de 3 % correspondant à un indice des vides $e =$ de l'ordre de (1.5 %). Cette limite de retrait correspond par analogie, dans la figure (22-B), à une pression capillaire de limite de retrait notée $S_{rl} = 4,00\text{MPa}$.

Au-delà de la pression capillaire de retrait (S_{rl}), l'indice des vides ne varie plus en revanche le degré de saturation diminue rapidement (graphe D) jusqu'à s'annuler.

D'autre part, cette variation de S_r est pratiquement proportionnelle à la teneur en eau (graphe c).

Sur le chemin d'humidification :

On remarque que l'augmentation de la teneur en eau et le degré de saturation sont sensiblement plus importants suivie d'une légère augmentation de l'indice des vides ; il s'agit d'une phase intermédiaire de saturation ou les gros pores se re-saturent progressivement, dans ce domaine l'hystérésis entre le chemin de drainage et d'humidification est plus important dans le plan (S_r, S).

Chemin séchage humidification sur le matériau étudié à l'état naturelle

Les résultats des essais effectués aux cycles séchage humidification sur le sol marneux extrait du site de Draa El Mizan à leur état naturelle (intact) sont présentés sur la figure (IV.23).

On remarque que le volume de vides ne varie pas en fonction de la teneur en eau, (augmentation de la teneur e eau le volume des vides reste constant), et que la limite de retrait pour l'état intact et pour la pâte ce que nous confirme que le sol ne se comporte pas de la même manière.

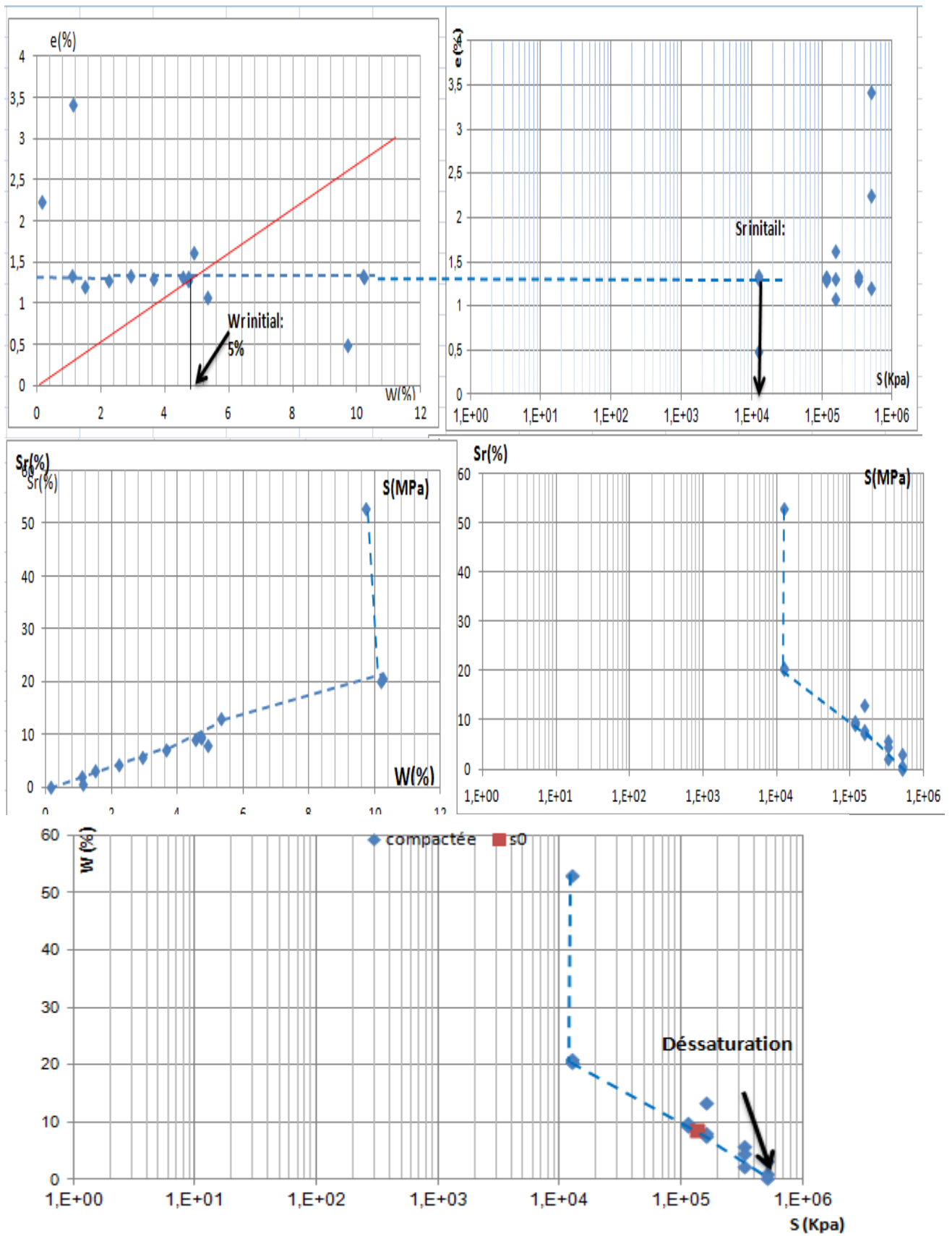


Figure IV.23 : Représentation du comportement de la marne étudié sous forme intact.

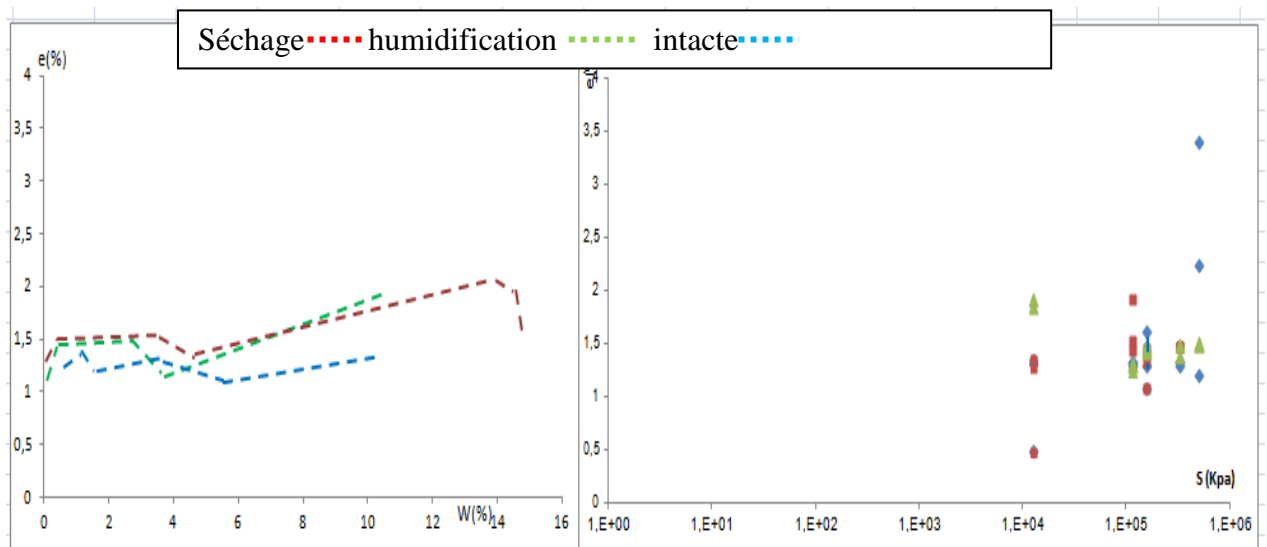
A l'état naturel, la succion mesurée par la méthode du papier filtre, selon la norme ASTM D 5298-94, est de 137064Kpa. Les résultats suivent un chemin de drainage (séchage), pour les valeurs supérieures de succion et un chemin d'humidification pour les valeurs inférieures à celle-ci.

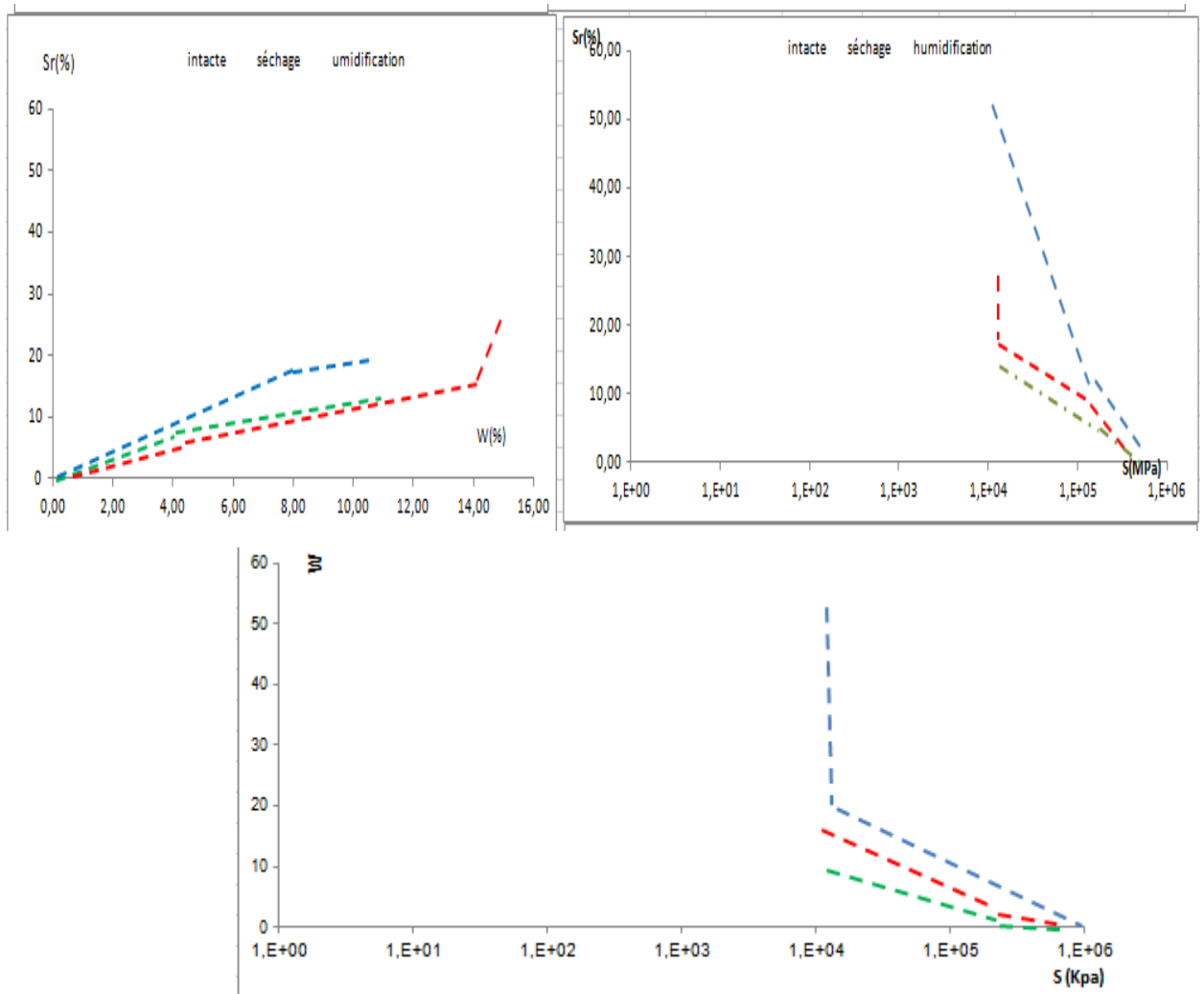
Dans le plan [w,e] ; les échantillons suivent dans un premier temps une droite de saturation d'équation $e = (\gamma_s / \gamma_w) * w$. En suite, lorsque la teneur en eau décroît, l'indice des vides tend vers une valeur constante.

La limite de retrait W_r , qui représente le point d'interaction de la droite de saturation et de l'asymptote horizontale au palier de retrait à $W = 3.5$ (%), correspond à un indice des vides $e = 1.15$ (%). Cette limite de retrait correspond, dans le graphe (IV.23. b), à une succion de limite de retrait, noté S_{lr} , d'une valeur de 5MPa environ.

Dans le plan présentant la variation du degré de saturation en fonction de la succion, la pression de dénaturation est environ.

Comparaison entre le chemin séchage humidification sur le matériau sous forme de pâte et à l'état naturel (intact)





Après avoir tracé le chemin séchage humidification on remarque que le sol étudiée ne se comporte pas de la même façon, ce qui nous permet de dire que le comportement de sol étudié est irréversible.

Courbe de la succion

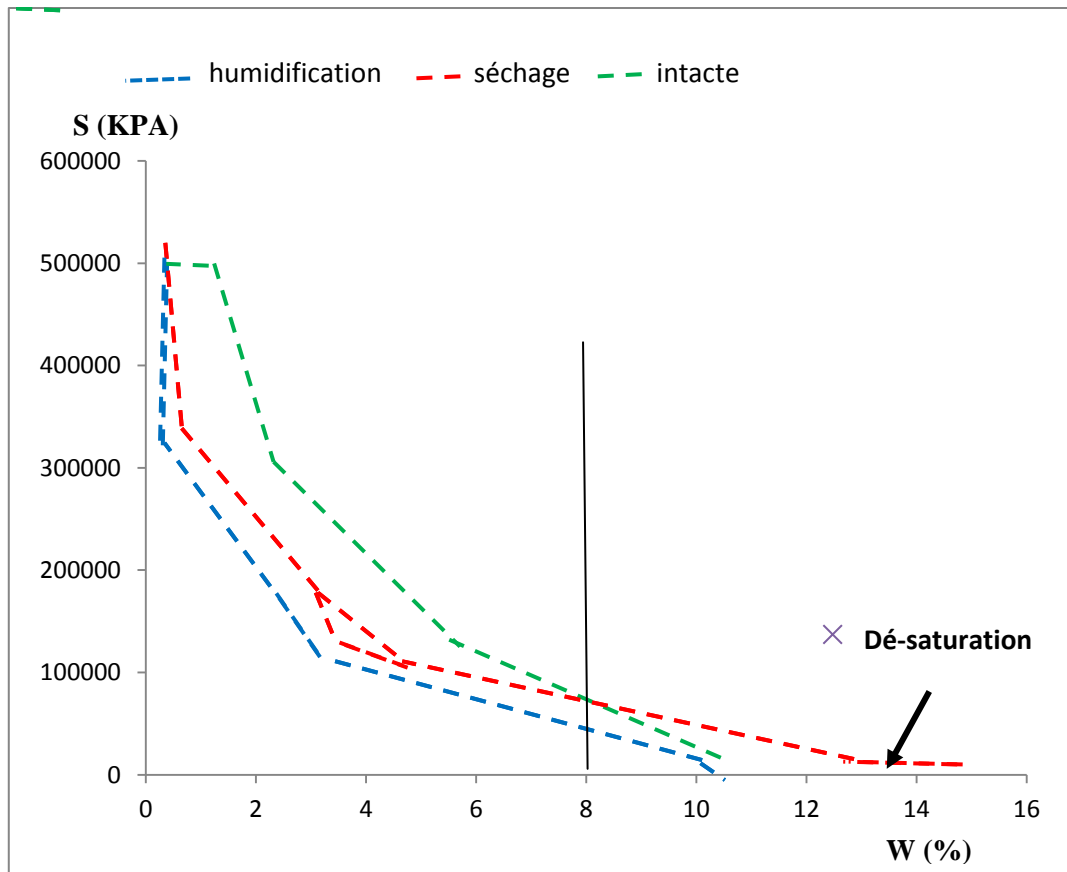


Figure IV.24 : Courbe de la succion

La courbe de rétention d'un sol est très dépendante des conditions dans lesquelles s'effectue sa détermination.

Le sol étudié est un sol fin, on remarque que le sol étudié est suivi un chemin de dessiccation, lorsque la teneur en eau est importante le sol commence à présenter une succion faible inférieure à 10 KPa. Donc on peut considérer que le point de la succion initiale comme point d'entrée d'air. Cette phase de petite perturbation s'arrête au point de saturation $W = 15.5\%$, et d'une succion de 12.6 KPa.

Dans la deuxième phase la succion présente une variation importante pour des teneurs en eau très faible, la succion peut aller jusqu'à 500 MPa.

D'après les courbes des échantillons intacts et la courbe de succion le comportement de la marne à l'état naturel et la pâte (son histoire), le comportement de même sol n'est pas le même.

Conclusion

Cette étude a permis de présenter globalement l'état du la marne de site de Draa El Mizan au cours de cycle de drainage séchage humidification. Les essais ont montré l'existence d'un domaine de pression interstitielle négative ou le sol reste quasiment saturé.

De ses cinq plans on peut déduire :

- Le comportement du sol étudié est irréversible dans le cycle séchage humidification.
- Plus la teneur en eau est faible plus la valeur de succion est très importante
- Plus la teneur en eau diminue, le degré de saturation tend vers une valeur constante, l'eau commence à entrer dans les pores de l'échantillon à cette valeur on obtient la succion de dés-saturation.

Conclusion Générale

A l'issue de ce travail, nous pouvons tirer les principales conclusions, qui sont en accord avec des observations déjà établies par d'autres auteurs :

- L'identification géotechnique de ces matériaux s'appuie essentiellement sur des données relatives à la granulométrie, aux limites d'Atterberg, la valeur de bleu de Méthylène et les essais chimiques et leur propriété, l'échantillon s'agit d'une marne.

La gamme de pressions capillaires balayées par les essais d'humidification drainage expérimentaux mis en place (de 50KPa à 500 MPa) a permis de ressortir les principales caractéristiques sur la marne de Draa El Mizane.

Sur le sol sous forme de pâte

Dans le domaine non saturé, nous avons utilisé deux techniques pour :

- La mesure de la succion avec la méthode du papier filtre, qui nous a permis de calculer la succion totale et la succion matricielle.
- Et une autre pour imposer la succion en utilisant la technique des solutions salines saturées qui est basée sur la mesure des échanges d'eau entre l'échantillon et l'environnement ambiant, nous a permis d'atteindre une valeur de succion très élevée qui est de 500MPa.
- L'imposition de la succion par la méthode des solutions salines saturées [12.6 à 500 MPa], nous a permis d'atteindre une valeur de succion très élevée de l'ordre 500MPa et de pouvoir dé-saturer l'échantillon à une très faible teneur en eau.

A la fin on arrive à déterminer la courbe de rétention d'eau qui nous permet de déterminer la limite de retrait.

- A partir de la limite de retrait, l'accroissement de la pression capillaire n'influe plus sur la variation de volume mais elle continue à accroître les forces de contact entre les grains.

Recommandations

Dans la perspective de poursuivre cette recherche, nous préconisons quelques axes à développer dans futures travaux :

- *Utiliser la méthode osmotique pour les petites valeurs de succion*
- *Développer des dispositifs expérimentaux afin d'obtenir des chemins drainage humidification avec contrainte extérieure comme des oedomètres et des triaxiaux à succion contrôlées.*