



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

N° d'ordre :

N° de série :

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Ghardaïa

Faculté des Sciences et Technologies

Département des Sciences et Technologie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : *Sciences et Technologies*

Filière : *Hydraulique*

Spécialité : *Ressources hydriques*

Par : NOUACER Belkacem

Thème

**ETUDE DU COMPORTEMENT HYDRIQUE D'UN MELANGE
TUF – SABLE DE DUNE (T_{75%} SD_{25%}) AVEC ET SANS TRAITEMENT
(CAS DU SABLE ET TUF DE LA REGION DE N'GOUSSA - OUARGLA)**

NESSIL Abdelhamid	MAB	Univ. Ghardaïa	Président
AMIEUR Abdelcacer	Doctorant	Univ. Laghouat	Examineur
SALHI Imad	MAB	Univ. Ghardaïa	Examineur
DAHEUR Elhadj Guesmia	MAA	Univ. Ghardaïa	Encadreur
ACHOUR Mansour	Doctorant	Univ. Oran 2	Co-Encadreur

Remerciements

Au terme de ce travail, il nous est très agréable d'adresser mes vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, nous tenons à exprimer notre gratitude envers Monsieur **DAHEUR ELHADJ GUESMIA**, Maître de Conférences à l'université de Ghardaia, mon promoteur, qui m'a fait confiance et m'a proposé ce sujet, et a bien voulu m'encadrer. Je le remercie de m'avoir fait bénéficier de ses connaissances et de ses critiques qui m'ont beaucoup aidés à l'amélioration de ce travail. Sa méthode rigoureuse sera pour moi un bon exemple à suivre.

Je tiens à remercier pleinement Monsieur **NESSIL H.**, chargé de cours à l'université de Ghardaia, de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury

Je tiens également à remercier Messieurs **AMIEUR ABDENNACER.** et **SALHI I.** chargés de cours à l'université de Ghardaia, pour leurs encouragements et d'avoir bien voulu examiner mon mémoire.

Nous tenons aussi à remercier l'ensemble des enseignants du Département des Sciences de la Terre, en particulier ceux de la filière hydraulique, qui nous ont été d'une aide précieuse ; notamment, Mrs **OULED BELKHEIR C.** et **ACHOUR M.**

Je remercie également l'ensemble du personnel du département des sciences et technologie.

Mr. Belkacem



Resumé : Le présent travail rentre dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux qu'offre notre région saharienne et étudier le comportement de ces matériaux en prenant en compte le caractère partiellement saturé.

La formule que nous avons choisie a été basée sur des études récentes qui nous a permis de choisir la formule optimale de 75% tuf + 25% sable de dune ($T_{75\%} SD_{25\%}$), les dosages de la chaux morte ont été basées sur un choix technico-économique qui sont : 3, 6, 9 et 12%.

L'étude expérimentale que nous avons mené a été basée sur le comportement hydrique par des essais drainage – humidification et la mesure de la suction du mélange préparé initialement sous forme de pate (humide et sèche) et compacté initialement à l'OPM, avec et sans traitement à la chaux.

Les essais réalisés nous a permis d'établir les courbes de rétention de l'eau et d'estimer les fonctions des propriétés de ces sols non saturés, notamment la suction de désaturation et la suction de la limite de rétention.

Mots clés: tuf, sable de dune, matériaux locaux, suction, désaturation.

Abstract:The aim of the present work is to valorize the local materials offered by our Saharan region and to study the behavior of these materials taking into account the partially saturated character.

The chosen formula was based on recent studies that allowed choosing the optimal formula of 75% **tuff** + 25% dune sand ($T_{75\%} SD_{25\%}$), dead lime dosages were based on techno-economic choices that are: 3, 6, 9 and 12%.

The experimental study was based on the water behavior by drainage-humidification tests and the measurement of the suction of the mixture initially prepared in the form of paste (wet and dry) and compacted initially at the OPM, with and without lime treatment.

The tests carried out enabled us to establish the water retention curves and to estimate the properties functions of these unsaturated soils, in particular, the suction of desaturation and the suction of the retention limit.

المخلص : يندرج هذا العمل في إطار تقيم المواد المحلية المتوفرة في المناطق الصحراوية ودراسة خصائصها الهيدروميكانية

اعتمدنا في اختيار التركيبة على دراسة حديثة والتي من خلالها حددنا النسبة ($T_{75\%} SD_{25\%}$) الملازمة هي كالتالي 75 تيف و 25 رمل الكتاب. تحديث تركيز نسبة الجير الخامد اعتمد فيه على عامل تقني اقتصادي وكانت النسب كالتالي % (12,9,6,3)

الدراسة التجريبية التي قمنا بها اعتمد فيها على الخصائص المائية عن طريق تجارب (drainage- humidification) وكذلك بقياس نسبة الامتصاص للخليط المحضر مسبقا على شكل عينة (رطبة وجافة) والعينة المرصوفة مسبقا ب أو بدون معالجة بالجير.

سمحت لنا التجارب التي أجريناها برسم منحنيات التشبع بالماء بتقييم الخصائص الوظيفية للتربة الغير مشبعة ،خاصة الحالة اللا تشبع (المرحلة البنينة) وحالة احتباس الماء (المرحلة النهائية).
كلمات مفتاحية: تيف، رمل الكثبان، مواد محلية، الامتصاص، اللاتشبع.

Table des matières

Dédicaces

Remerciements

Résumé

ملخص

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA SUCCION DANS LES SOLS

I.1. DEFINITION	1
I.2. LES DIFFERENTS TYPES DE LA SUCCION	1
I.2.1. SUCCION MATRICIELLE	1
I.2.2. SUCCION CAPILLAIRE	2
I.2.3. SUCCION ADSORPTION	3
I.2.4. SUCCION OSMOTIQUE	3
I.2.5. SUCCION TOTALE	4
I.3. CONSEQUENCES DE LA SUCCION SUR LES GRAINS DU SOL	4
I.4. METHODES ET TECHNIQUES DE CONTROLE ET DE MESURE DE LA SUCCION	5
I.4.1. INTRODUCTION	5
I.4.2. TECHNIQUES DE CONTROLE DE LA SUCCION	5
I.4.2.1. LE CONTROLE PAR TRANSLATION D'AXE	5
I.4.2.2. LE CONTROLE PAR PLAQUE DENSITOMETRIQUE	6
I.4.2.3. LA METHODE OSMOTIQUE :	6
I.4.2.4. LA METHODE DES SOLUTIONS SALINES SATUREES	8
I.4.3. TECHNIQUES DE MESURE DE LA SUCCION	9
I.4.3.1. LA METHODE DE PAPIER FILTRE	9
I.4.3.2. MESURE PSYCHOMETRIQUE	10
I.4.3.3. LE TENSIOMETRE	12
I.4.3.4. PLAQUE DE SUCCION.....	12
I.4.3.5. METHODE DE LA SURPRESSION D'AIR	13
I.5. LA COURBE DE RETENTION DE L'EAU DU SOL	13
I.5.1. LES PARAMETRES CARACTERISTIQUES DE LA COURBE DE RETENTION	14
I.5.1.1. LE POINT D'ENTREE D'AIR :	14
I.5.1.2. LA TENEUR EN EAU A SATURATION :	14
I.5.1.3. LA TENEUR EN EAU RESIDUELLE :	15
I.5.1.4. POINT LIMITE DE RETRAIT	15

CHAPITRE II :	PREPARATION DES ECHANTILLONS ET MATERIELS UTILISES	
II.1. INTRODUCTION.....		18
II.2. LE MATERIAU		18
II.2.1. PROVENANCE.....		18
II.2.2. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES		21
II.2.3. CLASSIFICATION DU TUF DE N'GOUSSA :.....		22
II.2.3.1. CLASSIFICATION GTR (CAS DES SOLS FINS) :		22
II.2.3.2. CLASSIFICATION TRS (TECHNIQUE ROUTIERE SAHARIENNE):		22
II.3. CHOIX DES METHODES A MANIPULER.....		23
II.4. PREPARATION DES ECHANTILLONS AU LABORATOIRE.....		23
II.5. PREPARATION DES SOLUTIONS AU LABORATOIRE.....		27
II.5.1. PREPARATION DU PEG (POLYETHYLENE GLYCOL)		27
II.5.2. PREPARATION DES SOLUTIONS SALINES SATUREES.....		31
II.6. DETERMINATION DES PARAMETRES DE LA SUCCION DU SOL		
ECHANTILLONNE		33
II.6.1. INTRODUCTION		33
II.6.2. MODE OPERATOIRE DE PESEE HYDROSTATIQUE		33
CHAPITRE III : RESULTATS & DISCUSSIONS		
INTRODUCTION :		40
III.1. PATE SATUREE (CHEMIN DE DRAINAGE)		41
III.2. PATE SECHE (CHEMIN D'HUMIDIFICATION)		41
III.3.ECHANTILLON COMPACTE.....		48
III.4. INFLUENCE DE LA TENEUR EN CHAUX SUR LES DIFFERENTS PARAMETRES		54
III.4.1. ÉCHANTILLON INITIALEMENT SOUS FORME DE PATE HUMIDE ET SECHEE		54
III.4.2. ÉCHANTILLON INITIALEMENT COMPACTEE		56
CONCLUSION		58
CONCLUSION GENERALE		59
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		60
ANNEXE.....		62

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Remontée de l'eau dans un tube capillaire "effet de ménisques"	2
Figure 2 : Effets de la succion sur les grains du sol	4
Figure 3 : Contrôle de la succion par translation d'axe, selon la cellule de RICHARD	5
Figure 4 : Principe de la plaque tensiométrique	6
Figure 5 : Illustration de la technique de la mesure	7
Figure 6 : Contrôle de la succion par phase vapeur à l'aide d'un	8
Figure 7 : Méthode du papier-filtre (DELAGÉ et al., 2000)	10
Figure 8 : Psychromètres à transistor	11
Figure 9 : Courbe caractéristique du papier filtre type Whatman	11
Figure 10 : Schématisation d'un Tensiomètre	12
Figure 11 : Plaque de succion	12
Figure 12 : Schéma d'une cellule triaxiale adaptée aux sols non saturés ;	13
Figure 13 : Courbe de succion (courbe de rétention d'eau)	14
Figure 14 : Les paramètres de la courbe de succion	15
Figure 15 : les phases de la courbe de succion (VANAPALLI S., 2002)	16
Figure 16 : Cycle de Drainage-Humidification	16
Figure 17 : Localisation du site du prélèvement des échantillons	19
Figure 18 : Localisation du site d'échantillonnage	20
Figure 19 : Classification des sols fins selon GTR	22
Figure 20 : drainage – humidification sur le mélange $T_{75\%} + SD_{25\%}$	43
Figure 21 : drainage – humidification sur le mélange $T_{75\%} + SD_{25\%} + \text{Chaux}_{[3\%]}$	44
Figure 22 : drainage – humidification sur le mélange $T_{75\%} + SD_{25\%} + \text{Chaux}_{[6\%]}$	45
Figure 23 : drainage – humidification sur le mélange $T_{75\%} + SD_{25\%} + \text{Chaux}_{[9\%]}$	46
Figure 24 : drainage – humidification sur le mélange $T_{75\%} + SD_{25\%} + \text{Chaux}_{[12\%]}$	47
Figure 25 : drainage – humidification sur le mélange $T_{75\%} + SD_{25\%}$	49
Figure 26 : drainage – humidification sur le mélange $T_{75\%} + SD_{25\%} + \text{Chaux}_{[3\%]}$	50
Figure 27 : drainage – humidification sur le mélange $T_{75\%} + SD_{25\%} + \text{Chaux}_{[6\%]}$	51
Figure 28 : drainage – humidification sur le mélange $T_{75\%} + SD_{25\%} + \text{Chaux}_{[9\%]}$	52
Figure 29 : drainage – humidification sur le mélange $T_{75\%} + SD_{25\%} + \text{Chaux}_{[12\%]}$	53
Figure 30A : la succion de désaturation en fonction de la teneur en chaux.	55
Figure 30B : la succion de limite de retrait en fonction de la teneur en chaux	55
Figure 30C : la teneur en eau de désaturation en fonction de la teneur en chaux.	55

Figure 30D : la teneur en eau la limite de retrait en fonction de la teneur en chaux	55
Figure 30E : l'indice des vides de limite de retrait en fonction de la teneur en chaux.....	55
Figure 31A : la succion de désaturation en fonction de la teneur en chaux.	57
Figure 31B : la succion de limite de retrait en fonction de la teneur en chaux.....	57
Figure 31C : la teneur en eau de désaturation en fonction de la teneur en chaux.	57
Figure 31D : la teneur en eau la limite de retrait en fonction de la teneur en chaux	57
Figure 31E : l'indice des vides de limite de retrait en fonction de la teneur en chaux.....	57

LISTE DES TABLEAUX

Tableau n°1: valeur de la succion imposée en fonction de la concentration du PEG 20000..	07
Tableau n°2: la mise en œuvre de la méthode des solutions salines saturées.....	09
Tableau n°3: caractéristiques géotechniques et mécaniques du sable de dune.....	21
Tableau n°4: caractéristiques géotechniques et mécaniques du tuf de n'goussa.....	21
Tableau n°5: les étapes de préparation des échantillons.....	23
Tableau n°6: les étapes de préparation de la pâte humide et la pâte sèche.....	24
Tableau n°7: les étapes de préparation des échantillons compacts.....	25
Tableau n°8: les différentes concentrations du PEG utilisées.....	27
Tableau n°9: préparation du PEG20000.....	28
Tableau n°10: la mise en place des échantillons sur la membrane semi perméable.....	29
Tableau n°11: les différentes solutions salines utilisées et leurs caractéristiques.....	31
Tableau n°12: les étapes de la mise en place des échantillons dans les dessiccateurs aux différentes solutions salines.....	31
Tableau n°13: paramètres caractéristiques et leurs équations.....	34
Tableau n°14: étapes de la mesure des pesées hydrostatiques dans l'huile de kerdane.....	35
Tableau n°15: paramètres des chemins de drainage-humidification.....	54

INTRODUCTION GENERALE

Avec le développement socioéconomique, l'intensification de l'activité industrielle, le tourisme saharien et l'alimentation des nouveaux marchés, le Sahara algérien a connu une grande extension des infrastructures routières. Au bout de moins de dix ans, ont été construits plus de 2200 km. Ceci a créé un grand besoin en matériaux de chaussées. Avant 1950, la technique routière européenne était utilisée où seuls les matériaux qui répondent rigoureusement à certains critères géotechniques (granulométrie, dureté, propreté, qualité des fines,... etc.) étaient acceptés. Vu le besoin grandissant en matériaux de construction de chaussées, cette contrainte qui consistait à utiliser des matériaux spécifiques, particulièrement des graves « nobles », n'a pas pu être respectée car dans les régions sahariennes ces matériaux sont rares, voire même inexistantes. Par conséquent, les ingénieurs et les techniciens ont été poussés à innover en mettant à profit les particularités qu'offre les zones Sahariennes (climat, matériaux locaux, faiblesse du trafic et portance du sol support qui est différent de celui des régions humides) ; et à chercher une autre technique possédant ses propres normes et expériences, permettant d'ouvrir très largement l'éventail des matériaux utilisés en corps de chaussées, tels que les matériaux fins pour construire des routes à coût optimisé. C'est alors qu'une technique routière saharienne a pris corps sous la direction de Mr FENZY en 1965 au congrès de la route qui s'est déroulé à BENI ABBES.

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

La région d'Ouargla (800km au sud-est d'Alger) est dotée d'un gisement important de tufs et de sable de dune. Dans l'optique d'élargir les matériaux locaux qui trouve en abondance et couvre une superficie très importante de Sahara algérien, s'oriente cette recherche. Le travail expérimental est réparti en deux, La première a été réalisée par une étude précédente porte sur l'effet de l'addition de sable de dune sur les propriétés mécaniques du tuf. Les résultats ont

permis de sélectionner une formule optimale 75% de tuf + 25% de sable de dune, qui présente la meilleure résistance mécanique.

Cette partie de recherche rentre dans l'optique de valoriser ce matériau, d'investiguer la possibilité d'utiliser un mélange de sable de dune et de tuf dans le corps de chaussée. Une étude sur le comportement de ce mélange sous sollicitations hydriques (séchage – humidification) sans et avec le traitement par la chaux a été réalisée.

Les principaux objectifs de ce travail sont :

- La compréhension des phénomènes liés par l'augmentation ou la diminution de la pression capillaire ;
- Remédier aux problèmes de non-stabilité en milieu humide ;
- Étendre leur champ d'utilisation dans les chaussées routières à trafic moyen et élevé.

Ce mémoire a été organisé en deux principales parties :

La première partie présente une recherche bibliographique sur la succion dans les sols, définition, les différents types de la succion méthodes et techniques de contrôle et de mesure de la succion.

La deuxième partie est consacrée à l'étude de comportement sur chemin de drainage-humidification du mélange adopté. Le travail expérimental est déroulé au laboratoire d'hydraulique à l'université de Ghardaïa.

On termine ce travail par des conclusions générales qui résument les principaux résultats obtenus. Ainsi que des perspectives à court et à moyen termes vont être proposées.

***GENERALITES
SUR
LA SUCCION DANS LES SOLS***

I.1. DEFINITION

Le phénomène de la succion qui caractérise les sols non saturés, elle est définie comme étant la force d'attraction entre l'eau et les grains dans un sol non saturé. Selon l'auteur (SILVAI, 1966) la succion permet de mesurer la faible force de pression de l'air qui s'exerce sur l'eau à l'intérieur des grains du sol, cette force conduit au mouvement de l'eau dans les pores (Fredlund D.G., 2005).

Ce phénomène de succion permet d'expliquer ainsi la remontée de l'eau à une hauteur supérieure à celle de l'état naturel.

Les valeurs de la succion peuvent varier dans une gamme très large, entre 0 et plusieurs centaines de MPa. Mais il faut mentionner que, certains auteurs expriment le potentiel de succion en centimètres d'hauteur d'une colonne d'eau. Dans ce cas alors le potentiel de succion varie entre 0 et 107 cm d'eau pour un sol séché à l'étuve (GUEDDOUDA, 2010).

I.2. LES DIFFERENTS TYPES DE LA SUCCION

Les études du comportement des sols non saturés ont permis de distinguer trois types de succion (RICHARDS, 1974, cité par GHANEM, F., 2018) ; la succion matricielle, la succion osmotique et la succion totale.

I.2.1. Succion matricielle

La succion matricielle est la composante principale la plus dominante de la succion totale dans les sols non saturés. On distingue deux types de la succion matricielle ; succion capillaire et succion d'adsorption.

I.2.2. Succion capillaire

La succion capillaire exprime généralement la capacité de rétention d'eau de composantes du sol. En d'autre terme, c'est la différence de la pression de l'air et la pression de l'eau à l'intérieur des pores. La valeur de la succion matricielle dépend de la tension surfacique et du rayon de courbure des ménisques (**Figure 1**).

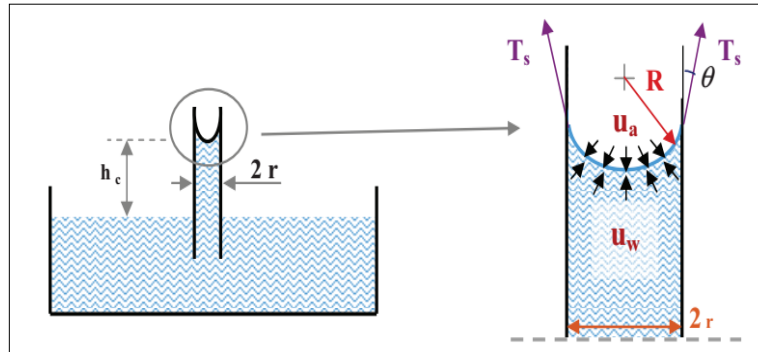


Figure 1 :Remontée de l'eau dans un tube capillaire "effet de ménisques"

Ce type de la composante de la succion appelée " succion matricielle " (CHEN, 1988), qui est une pression négative, parce qu'elle est inférieure à la pression atmosphérique, peut être exprimé dans le cas d'un tube capillaire cylindrique par la loi de Jurin :

$$\psi = u_a - u_w = \frac{2T_s \cos\theta}{r}$$

$$h_c \gamma_w = u_a - u_w = \frac{2T_s}{R}$$

T_s : tension de surface (interfaciale eau-air, pour l'eau $T_s = 73 \cdot 10^{-3} \text{N/m}$ à 20°C)

R : rayon de l'interface

γ_w : densité de l'eau

h_c : hauteur d'ascension capillaire

u_a : pression d'air dans les pores

u_w : pression de l'eau dans les pores

θ : angle de contact solide interface eau-air (pour l'eau $\cos \theta = 1$)

D'après les formules précédentes nous remarquons que ;

- La succion capillaire est inversement proportionnelle au rayon de courbure de l'interface R .
- Cette relation est fortement liée à la structure et l'agencement des grains du sol étudié.

I.2.3. Succion adsorption

Ce type de succion caractérise les sols fins non saturés par les effets physico-chimiques sur les particules. C'est le cas des argiles qui ont des charges négatives c'est ainsi qu'elles adsorbent fortement les eaux sur leur surface. D'après les travaux du géotechnicien (MASKANYA J. P., 2008), le phénomène de l'adsorption est le résultat de la conjugaison de plusieurs facteurs-forces, entre autre il y a :

- Les forces d'adsorption des minéraux argileux (forces de type électrique) ;
- La présence des ions superficiels développées par les particules d'un sol (forces de type Van de Waals);

L'eau peut être attirée par l'effet osmotique, due à l'effet de la concentration des cations au voisinage des feuillets argileux.

L'effet d'adsorption est donc relativement non significatif pour ces types de sol. La succion matricielle résulte donc principalement de l'effet capillaire (HILLEL; 1998, TULLER et OR, 2003).

I.2.4. Succion osmotique

La succion osmotique selon les auteurs (SNETHEN,1980 et CHEN,1988), est attribuées à la pression qui en résulte de la différence des concentrations en sels solubles dans l'eau du sol. Donc c'est la capacité de rétention d'eau par les sels présents sous forme dissoute dans l'eau des interstices. Cette pression osmotique existe lorsque l'eau est une solution saline. Dans le cas de sable qui ne contient pas de sels, la composante de la succion osmotique est considérée comme négligeable.

La succion osmotique ou pression osmotique est fortement liée à la concentration des sels solubles dans l'eau interstitielle. Elle est exprimée par la relation suivante ;

$$\pi = -\frac{\rho_w RT}{\omega_w} \ln x_w$$

- R : la constant des gaz parfaits ($R = 8,31432 \text{ J}/(\text{mol K})$)
 T : la temperature absolue ($^{\circ}\text{K}$)
 ρ_w : la masse volumique de l'eau (kg/m^3)
 ω_w : la masse molaire de la vapeur d'eau ($18,016 \text{ kg}/\text{kmol}$)
 x_w : la fraction molaire d'eau dans la solution.

Les travaux de (HOSTON, 1994) cité par (ALSHIHABI, 2002), montrent que cette succion osmotique diminue lorsque le degré de la saturation augmente.

I.2.5. Succion totale

La succion totale est la somme de deux composantes principales : une composante matricielle ψ_m et une autre osmotique ψ_{os} (FREDLUND et RAHARDJO, 1993).

$$\psi = \psi_{os} + \psi_m = \psi_m$$

Il faut noter que, les changements de volume induits par la succion matricielle sont plus importants que ceux induits par la succion osmotique et en général, la succion osmotique est souvent négligée.

Dans les applications pratiques en géotechnique, (CHEN, 1988) considère que les forces osmotiques sont relativement constantes, et les changements dans la succion totale sont dus seulement aux changements de la succion matricielle.

I.3. CONSEQUENCES DE LA SUCCION SUR LES GRAINS DU SOL

En géotechnique, il est souvent considéré les pores dans les sols non saturés comme étant des tubes capillaires. L'effet de la pression superficielle jouée par les ménisques provoque certaines contraintes sur les grains solides, et modifie par la suite le squelette et le comportement mécanique du sol (**Figure 2**).

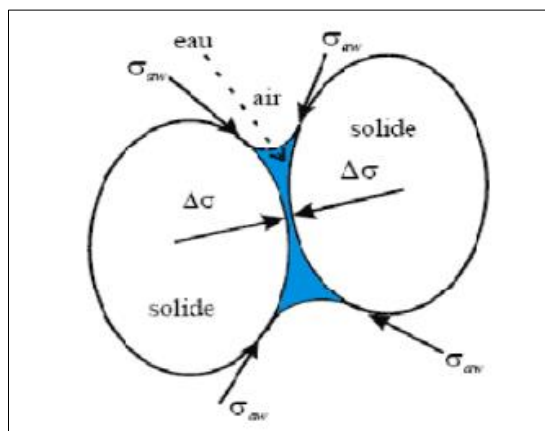


Figure 2 : Effets de la succion sur les grains du sol

I.4. METHODES ET TECHNIQUES DE CONTROLE ET DE MESURE DE LA SUCCION

I.4.1. Introduction

Dans le domaine de la géotechnique, il faut dire qu'il existe de nombreuses méthodes pour mesurer la succion. Ces méthodes sont regroupées en deux catégories selon qu'il s'agit d'une méthode de mesure proprement dite ou d'une méthode d'imposition et de maintien de la succion à une valeur prédéterminée.

Il faut noter que, le phénomène de la succion est une grandeur physique difficile à mesurer, et diverses approches sont nécessaires pour couvrir toute la gamme des succions rencontrées dans les sols et qui peuvent atteindre plusieurs centaines de méga Pascals (MPascal). Cette difficulté technique est probablement l'une des causes du manque de données expérimentales relatives au comportement des sols non saturés.

I.4.2. Techniques de contrôle de la succion

I.4.2.1. Le contrôle par translation d'axe

Cette technique a été développée par (RICHARDS, 1974) ; le principe consiste de placer un échantillon dans une cellule à base de pierre poreuse de céramique (porosité fine) immergée dans l'eau (**Figure 3**).

Une pression sera appliquée jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint dans quelques jours. A l'équilibre la pression sera relâchée et on extrait rapidement l'échantillon de la cellule, l'échantillon sera pesé pour déterminer la teneur en eau sous cette succion imposée (pression). Le maximum de l'ordre de grandeur de la succion imposée avec cette technique est de 1,5MPa (DELAGE et al., 2000).

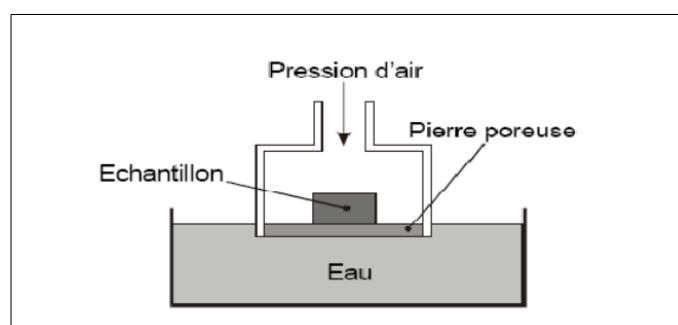


Figure 3 : Contrôle de la succion par translation d'axe, selon la cellule de RICHARD (DELAGE et al., 2000)

I.4.2.2. Le contrôle par plaque tensiométrique

Cette technique d'imposition de la succion est parmi les plus anciennes et utilisée largement dans les laboratoires ; elle consiste à mettre l'eau de l'échantillon sous pression (**Figure 4**). Un récipient placé plus bas que l'échantillon permet d'appliquer une sous pression égale à la hauteur d'eau.

La méthode est valable pour des valeurs faibles de la succion entre 0 et 10 kPa, soit d'environ de 1m d'eau (MESEKANYA, 2008).

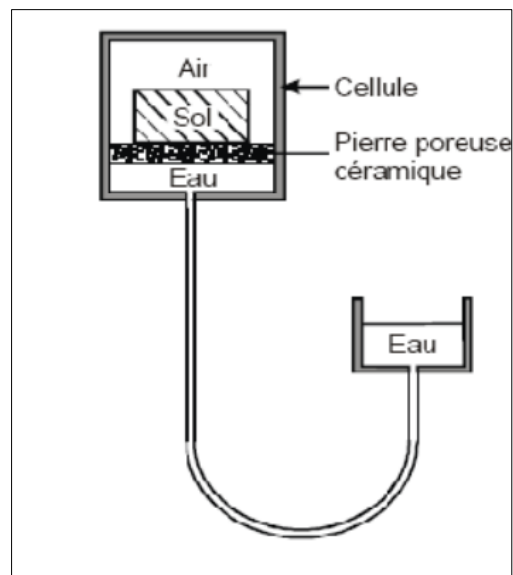


Figure 4 : Principe de la plaque tensiométrique
(DELAGE *et al.* 2000)

I.4.2.3. La méthode osmotique :

Le phénomène d'osmose s'observe lorsque deux solutions de concentrations différentes sont en contact à travers une membrane, perméable à l'un des solutés des phases en présence (Fleureau J.M. et Siba K.S., cité par Ghanem F., 2011).

Cette méthode consiste à mettre l'échantillon de sol en contact avec une solution de polyéthylène glycol PEG 20000 à travers une membrane semi perméable en triacétate de cellulose (membrane de dialyse avec une faible porosité de l'ordre de 5nm) Spectra/Por® N°3, de poids moléculaire obstacle MWCO (Mass of Water Cut Off) égal à 14000Da (Dalton). Cette technique permet de balayer une gamme de succion variant de 50 kPa à 9 MPa (**Figure 5**).

La concentration qui est indépendante de la masse molaire du PEG, sera déterminée à partir de la relation linéaire suivante ;

$$S = 11 C^2 \quad (C \text{ en g PEG/g eau})$$

Selon (DELAGE et al, 1998) cette relation est valable seulement pour des valeurs des succions inférieure à 6.25 MPa (*Tableau n°1*).

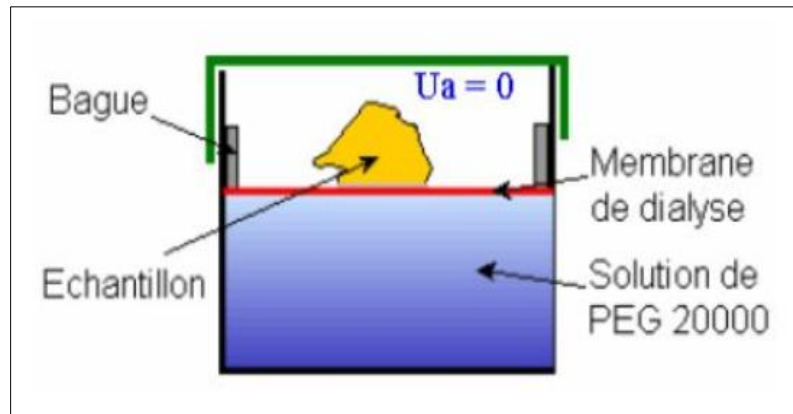


Figure 5 : Illustration de la technique de la mesure de la succion osmotique

Concentration g de PEG20000 /100 gd'eau	Succion (kPa)
2,5	30,2
5	48,5
7,5	87,7
10	151
12,5	241,7
15	363,1
17,5	518,3
20	710,7
22,5	943,5
25	1220

Tableau n°1 : valeur de la succion imposée en fonction de la Concentration du PEG 20000

I.4.2.4. La méthode des solutions salines saturées

La méthode repose sur le principe qu'une solution saline saturée en équilibre thermodynamique avec sa vapeur, l'humidité relative de l'atmosphère environnante reste constante pour une valeur donnée T de la température.

L'échantillon est placé dans un dessiccateur hermétiquement fermé et rempli d'une solution saline générant une humidité relative connue. Les transferts hydriques se font ici en phase vapeur et sont donc beaucoup plus lents qu'avec les deux autres méthodes (**Figure 6**).

Cette méthode est plus simple d'emploi et moins dangereuse, mais les échanges par phase vapeur sont plus lentes et il faut environ 1 à 3 mois pour atteindre l'équilibre (GUEDDOUDA, 2015). La détermination des succions est déduite de la loi de Kelvin ;

$$\frac{S}{\gamma_w} = \frac{RT}{gM} \ln \frac{H}{100}$$

- R : constante des gaz parfaits [= 8.32 J/°K]
- T : température absolue [°K].
- M : masse moléculaire de l'eau [= 1.8*10⁻³ kg].
- H : humidité relative en %.

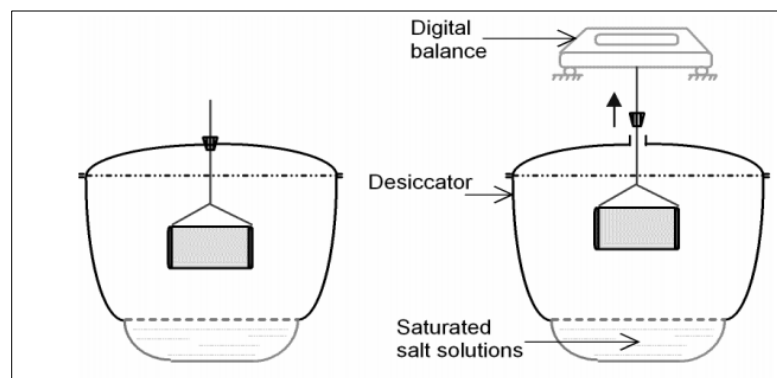


Figure 6 : Contrôle de la succion par phase vapeur à l'aide d'un dessiccateur et de solution saline saturée (SAYAD GAIDI., 2003)

Les solutions salines saturées utilisées et leurs succions en fonction de la température et l'humidité relative sont présentées dans le **tableau n°2**.

Tableau n°2 :La mise en œuvre de la méthode des solutions salines saturées

N	Solution saline	Concentration (g de sel/ 500 ml d'eau)	Equivalente en concentration de NaCl (g de sel/500 ml d'eau)	Succion (MPa)
1	K ₂ SO ₄	111 g	-	4,23
2	KH ₂ PO ₂	-	38g de NaCl	6,3
3	KNO ₃		54g de NaCl	9
4	ZnSO ₄ ,7H ₂ O	-	75,5g de NaCl	12,6
5	Na ₂ SO ₃ , 7H ₂ O	-	82,5 g de NaCl	13,7
6	(NH ₄) ₂ SO ₄	375,66 g	-	29,29
7	NaCl	360 g	-	38,15
8	NaNO ₂	410,75 g	-	57,76
9	CH ₃ COOH	1 Litre	-	102,02
10	CaCl ₂ , 2H ₂ O	730 g		156,22
11	H ₂ SO ₄	1 Litre	-	342,64

I.4.3. Techniques de mesure de la succion

Pour mesurer la succion, plusieurs méthodes ont été développées allant du plus simple aux méthodes les plus compliquées.

I.4.3.1. La méthode de papier filtre

le principe de cette méthode consiste à l'utilisation d'un papier filtre suivant la norme ASTM D 5298- 94. L'échantillon du sol place dans un moule est compacté jusqu'à environ 60mm, puis un papier filtre de type Whatmann 42 sera placé entre deux papiers filtres nourmaux. Puis, les papiers filtres sont surmontés par une quantité correspond à 15mm de sol compacté. Finalement, la quantité globale de l'échantillon est compactée en une seule fois dans le moule (**Figure 7 et 9**).

les échantillons sont couverts par une couche de parafilm et stockés pendant 24 heures jusqu'à l'équilibre. Par la suite, on extrait le papier filtre et on détermine leur teneur en eau par une pesée à la précision de 10^{-4} . A la fin, la succion du sol sera déterminée selon la norme ASTM.

Cette technique permet de mesurer les pressions de succion variant entre 30 et 100.000 kPa. En outre, cette méthode est simple et praticable dans les laboratoires (Guedouda, 2010).

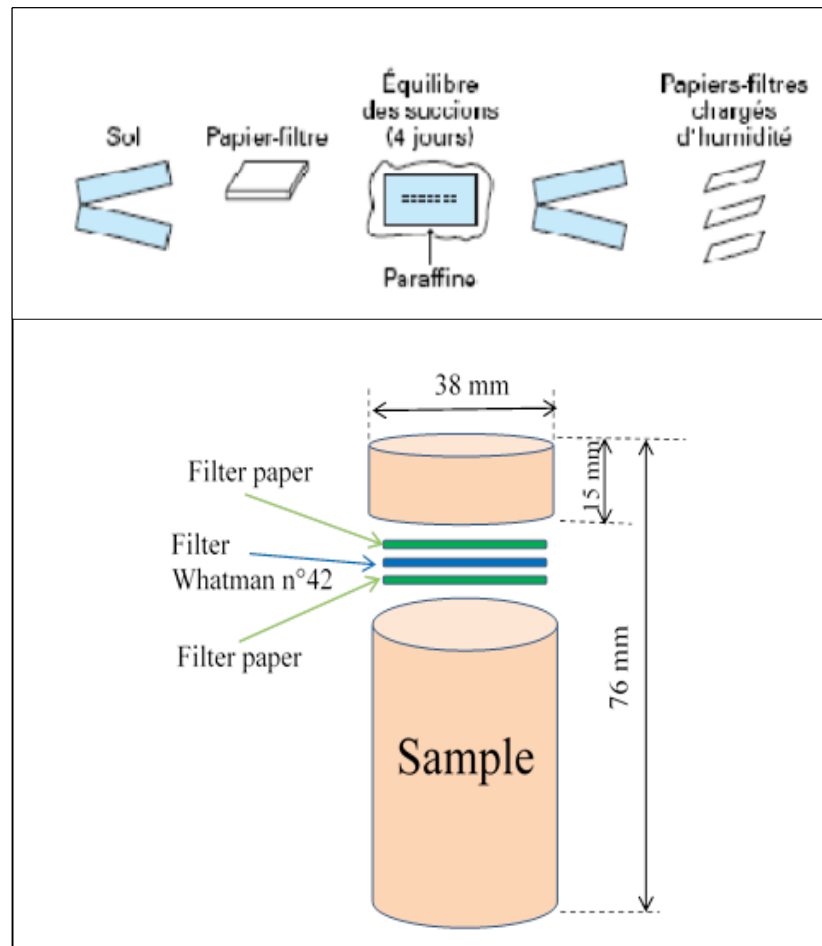


Figure 7 : Méthode du papier-filtre (DELAGE et al., 2000)

I.4.3.2. Mesure psychométrique

Les psychromètres permettent de mesurer l'humidité relative de l'air qui se trouve dans l'échantillon, laquelle est liée à la succion et à la température. Cette mesure se fait de différentes façons, soit à l'aide d'un thermocouple, soit en utilisant un transistor, ou encore en mesurant la température du point de rosée.

Dans les thermocouples, la goutte à évaporer est formée sur la jonction par effet Peltier à partir de l'humidité déjà présente dans le sol, ce qui limite la mesure à une succion de 5 MPa environ.

Dans les psychromètres à transistor (*Figure 8*), le domaine de succions est beaucoup plus important et atteint 400 MPa, mais l'eau à évaporer doit être apportée de l'extérieur (par exemple, en utilisant une microseringue). Le domaine de mesure est sensiblement le même pour les psychromètres à point de rosée mais le principe de l'appareil ne permet pas de l'utiliser dans des essais.

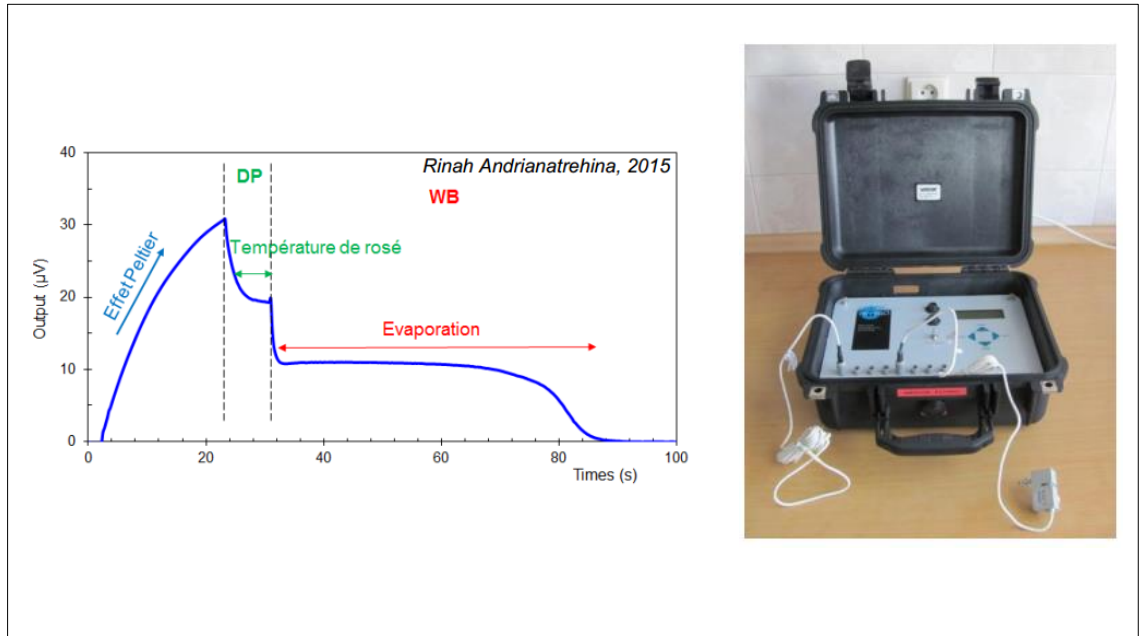


Figure 8 :Psychromètres à transistor

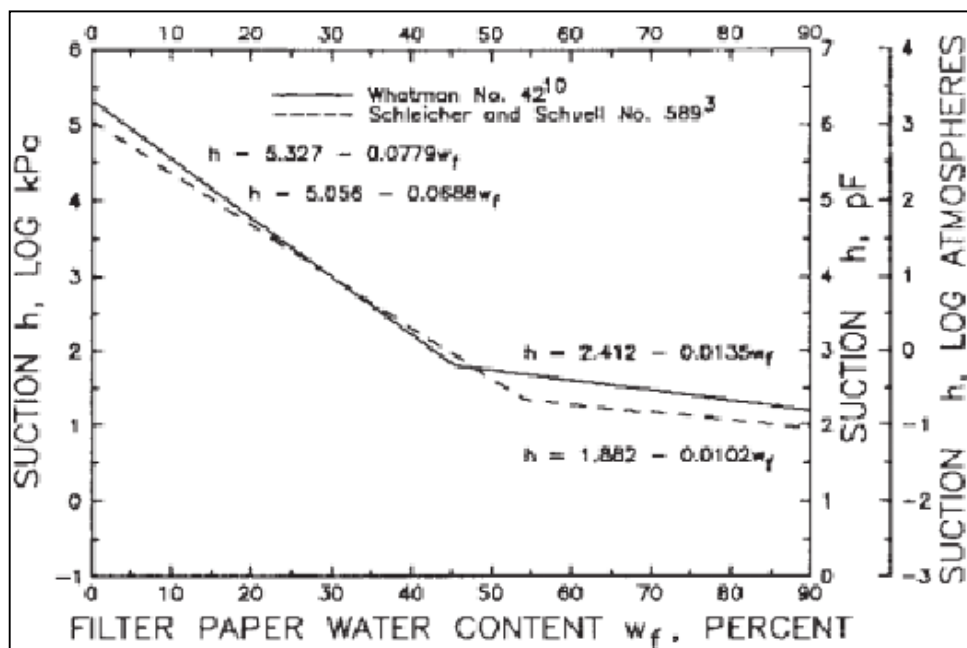


Figure 9 :Courbe caractéristique du papier filtre type Whatman (ASTM D 5298- 94)

I.4.3.3. Le tensiomètre

Cet appareil est conçu pour la mesure *in situ* de la succion du sol. Il est composé d'un petit réservoir d'eau désaérée avec une extrémité couverte d'une couche de céramique poreuse ; perméable à l'eau et impénétrable à l'air. Le réservoir est relié à un manomètre via un tube rempli par de l'eau désaérée (**Figure 10**).

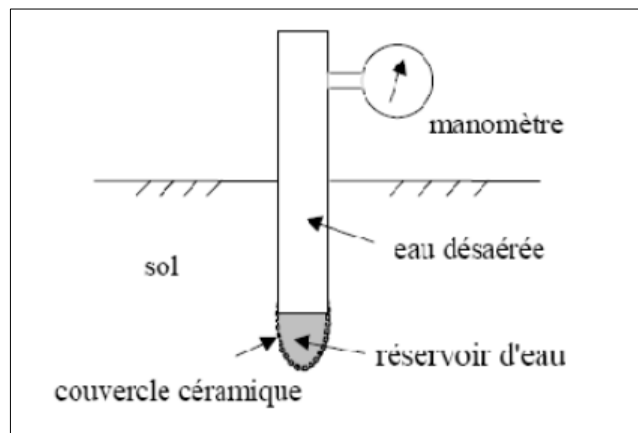


Figure 10 : Schématisation d'un Tensiomètre (in Ghanem F., 2011)

Pour prendre la mesure sur terrain, il faut introduire l'appareil dans un trou foré dans le sol. Une fois l'équilibre atteint entre l'eau du réservoir et celle du sol, le manomètre indique directement la pression négative de l'eau du sol. La pression négative maximale que peut donner cet appareil est de l'ordre de 90 kPa.

I.4.3.4. Plaque de succion

Cette technique est pratiquée généralement dans les laboratoires, son principe repose sur le même que celui du tensiomètre, avec la seule différence que la pression négative de l'eau du sol mesurée est soumise à la pression atmosphérique (**Figure 11**).

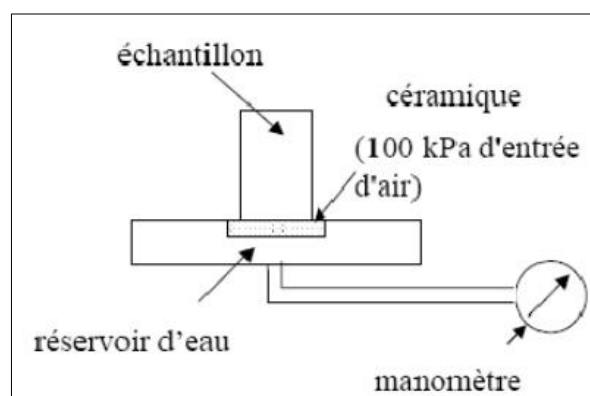


Figure 11 : Plaque de succion (cité par Ghanem F., 2011)

I.4.3.5. Méthode de la surpression d'air

Cette technique ressemble à celle utilisée dans les essais mécaniques tri-axiaux classiques. La méthode consiste d'appliquer une pression d'air dans une cellule triaxiale à travers une pierre poreuse à sa extrémité supérieure, tandis que l'autre extrémité une pression d'eau positive est maintenue grâce à un disque en céramique (*Figure 12*).

La sollicitation mécanique peut être ainsi appliquée comme dans les essais classiques.

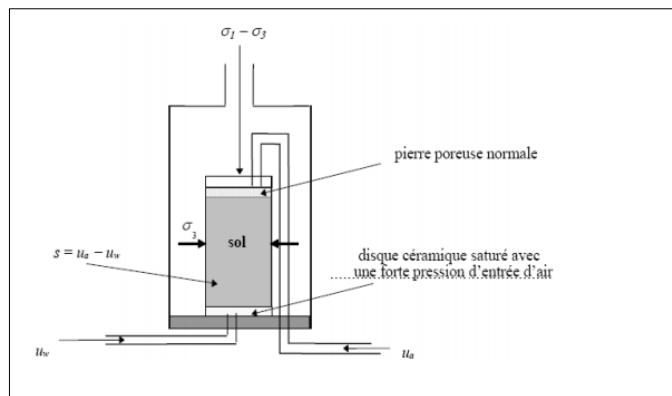


Figure 12 :Schéma d'une cellule triaxiale adaptée aux sols non saturés ;
(*méthode de la surpression d'air*),(cité par Ghanem F., 2011)

I.5. LA COURBE DE RETENTION DE L'EAU DU SOL

La courbe qui représente la relation entre le potentiel d'un sol et sa teneur en eau est appelée "*courbe de rétention de l'humidité du sol*" ou "*courbe caractéristique du sol*", elle représente les variations de la succion en fonction de la teneur en eau.

Cette relation n'est pas unique, elle peut être obtenue par *drainage* ou par *mouillage* d'un échantillon de sol.

Dans le premier cas, des accroissements de succion sont appliqués à l'échantillon initialement saturé afin de sécher le sol graduellement. Des mesures successives de la teneur en eau en fonction de la succion sont faites. Dans le deuxième cas, la succion est réduite graduellement en partant d'un échantillon de sol sec.

L'observation du comportement hydrique d'un sol non saturé, a montré que plus on augmente la succion, plus la quantité d'eau drainée est significative. Dans ce cas, les pores ne pouvant pas retenir l'eau commencent à se vider, ou les grandes pores sont les premières à se vider (*Figure 13*).

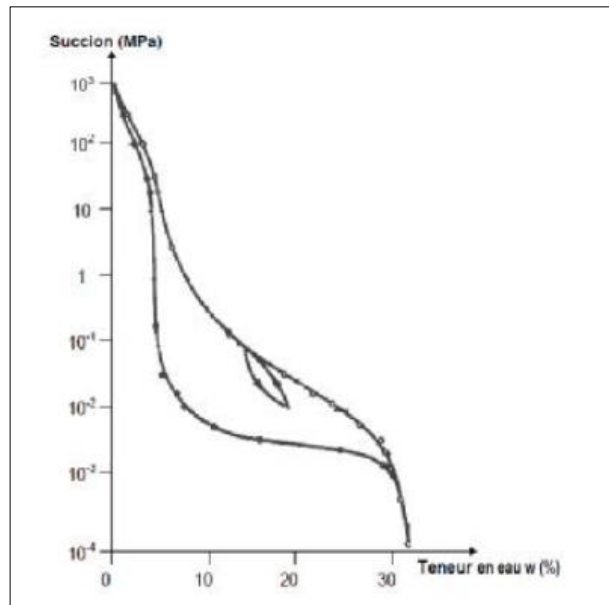


Figure 13 : Courbe de succion (courbe de rétention d'eau)
(cité par Ghanem F., 2011)

Par contre, l'application d'une faible succion sur un sol saturé provoque une réduction de sa teneur en eau. Cette réduction commence à partir d'une valeur critique où les grandes pores du sol commencent à se vider. Il faut noter que chaque matériau possède sa propre courbe de succion, et la pente de la courbe exprime en général l'effort de drainage pour faire varier la teneur en eau.

I.5.1. Les paramètres caractéristiques de la courbe de rétention

La courbe de rétention d'un sol met en évidence les paramètres caractéristiques suivants ;

I.5.1.1. Le point d'entrée d'air :

Il correspond à la succion à partir de laquelle le sol n'est plus saturé et les pores les plus grands commencent à se vider.

I.5.1.2. La teneur en eau à saturation :

Elle correspond à l'intervalle intermédiaire où les deux phases eau-air sont continues.

I.5.1.3. La teneur en eau résiduelle :

Elle correspond à la phase où la connectivité hydraulique est pratiquement nulle. L'eau reste piégée dans les pores et ne circule pas.

I.5.1.4. Point limite de retrait

Il correspond à la limite où l'indice des vides tend vers une valeur constante à laquelle correspond une teneur en eau.

L'allure de la courbe (*Figure 14 – 15 - 16*) permet aussi de distinguer trois phases caractéristiques ;

- **Phase 1** : correspond à la partie de la courbe qui est presque horizontale, c'est la phase d'effet limite. Le sol est proche de la teneur en eau à saturation.
- **Phase 2** : c'est la partie de la courbe où la pente est forte, elle correspond à la phase de transition.
- **Phase 3** : c'est la partie de la courbe de succion qui présente une droite de faible pente. C'est la phase de l'effet résiduel, c'est-à-dire que l'on se rapproche de la teneur en eau résiduelle.

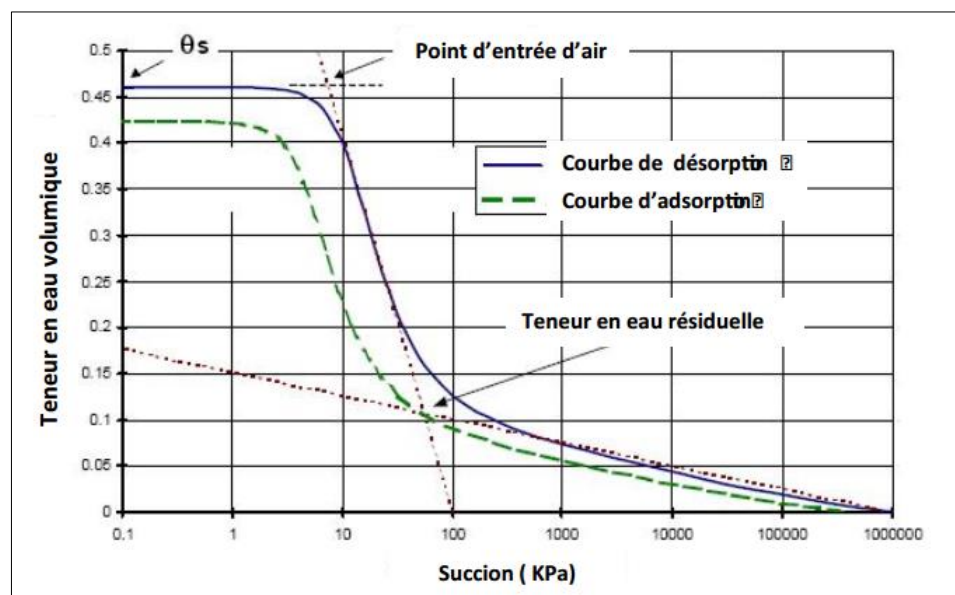


Figure 14 : Les paramètres de la courbe de succion, (Fredlund, 1997, cité par Ghanem F., 2011)

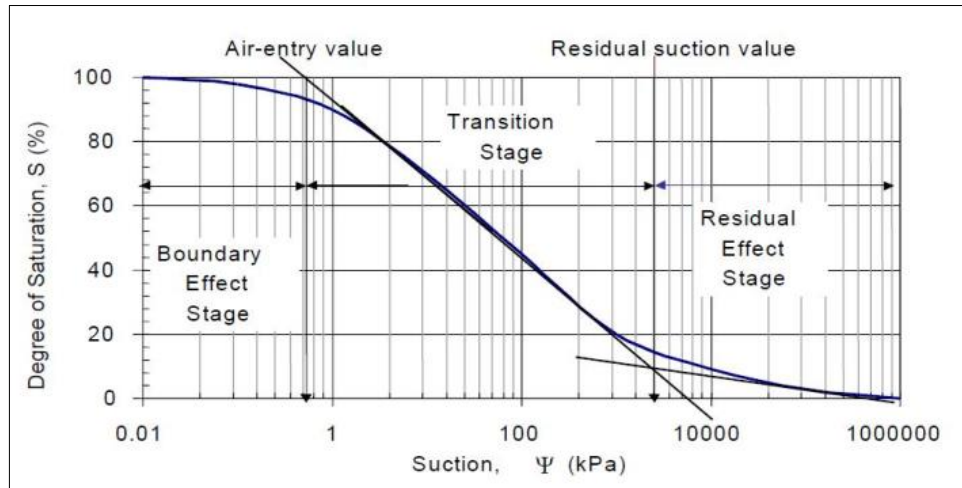


Figure 15 :les phases de la courbe de succion (VANAPALLI S., 2002)

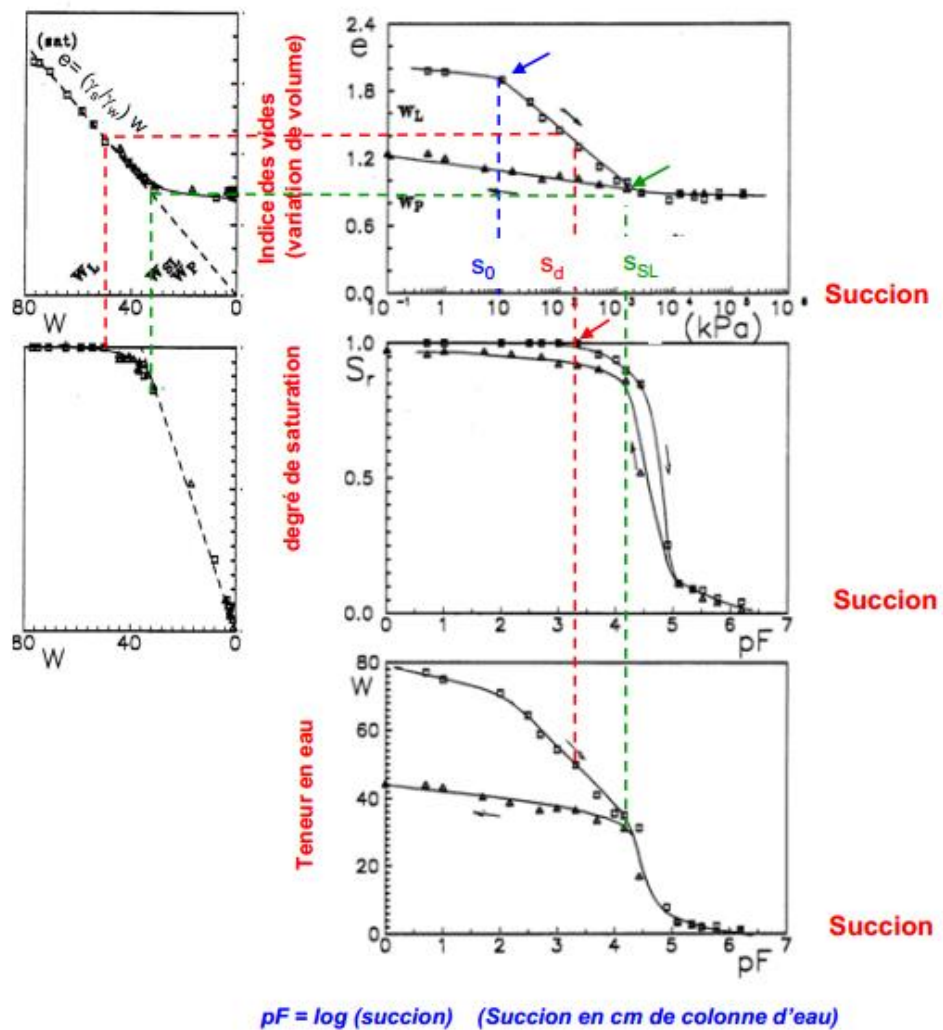


Figure 16 :Cycle de Drainage-Humidification (Taibi S., 2015)

***PREPARATION DES
ECHANTILLONS
ET
MATERIELS UTILISES***

II.1. INTRODUCTION

La partie expérimentale de notre travail, consiste à étudier le comportement hydrique par la détermination de la succion d'un mélange de matériaux composé de sable de dune et tuf qui ont été extrait du gisement de la région de N'goussa, wilaya de Ouargla. Tout en ajoutant de la chaux à des doses croissantes.

Dans cette étude nous allons nous intéresser de contrôler et d'essayer de mesurer ce paramètre de succion sur un mélange Tuf-Sable de dune provient de la région de N'goussa, wilaya de Ouargla, avec et sans traitement par la chaux morte.

La formule choisie est basée sur des études récentes qui nous a permis de choisir une formule optimale de 75% tuf + 25% sable de dune ($T_{75\%} SD_{25\%}$) confère des meilleures performances mécaniques par apport aux formules choisies.

Les dosages de la chaux morte ont été basées sur un choix technico-économique se sont : 3, 6,9 et 12%.

Les essais géotechniques que nous avons mené au sein du laboratoire de l'hydraulique de l'université de Ghardaïa et le laboratoire des travaux public du Sud (LTPS) ; nous a permis d'établir les courbes de rétention de l'eau et d'estimer les fonctions des propriétés de ces sols non saturés, notamment la succion de désaturation et la succion de la limite de rétention.

II.2. LE MATERIAU

II.2.1. Provenance

Le matériau que nous avons utilisé dans notre travail est composé d'un mélange de sable de dune et de tuf en provenance de la région de N'goussa, située au nord de la ville de Ouargla, à environ de 20km, de coordonnées géographiques (**Figure 17 et 18**) ;

$$X = 05^{\circ} 18' 26''$$

$$Y = 32^{\circ} 10' 44''$$

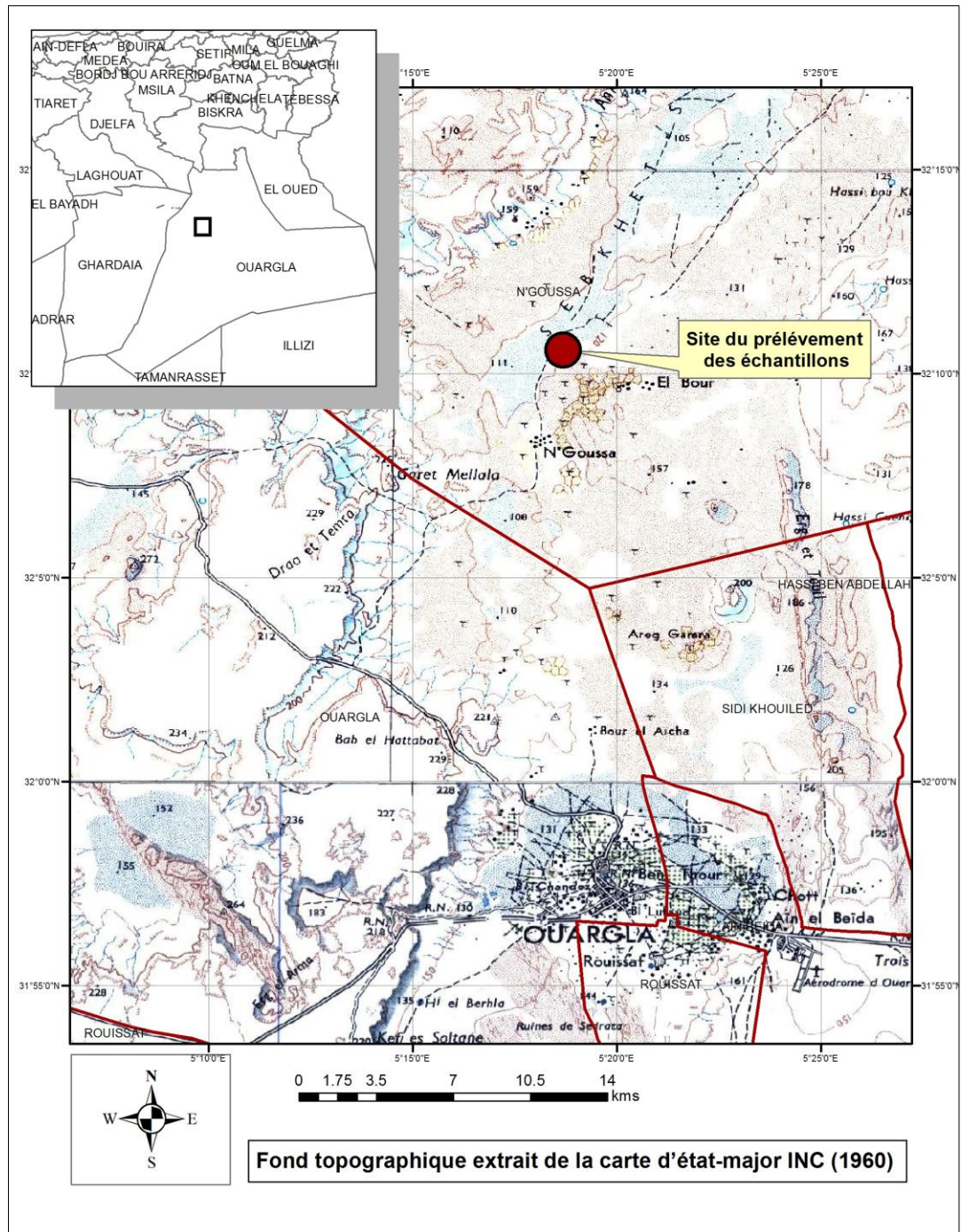


Figure 17 :Localisation du site du prélèvement des échantillons

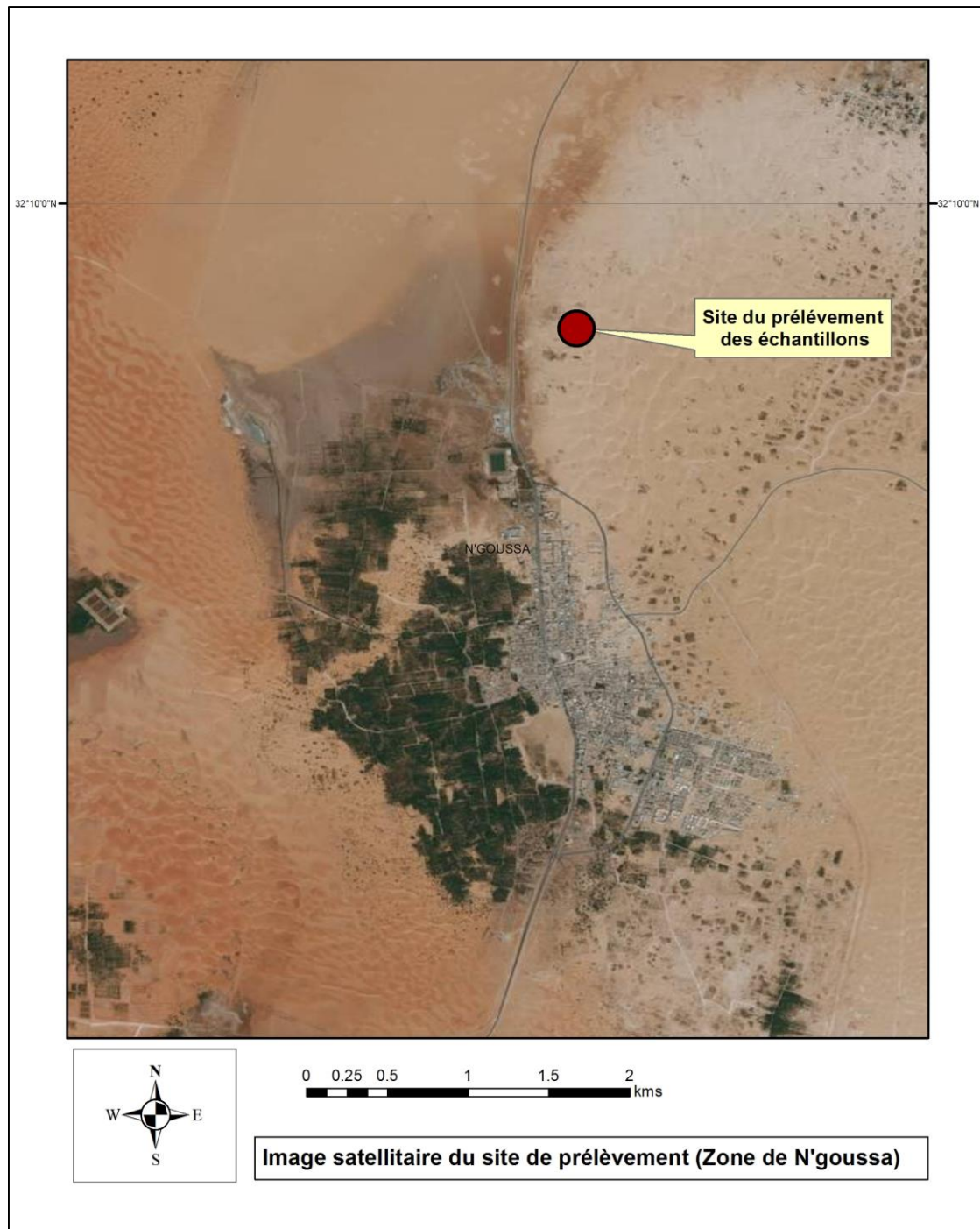


Figure 18 :Localisation du site d'échantillonnage (Google earth, 2018)

II.2.2. Caractéristiques géotechniques

Tableau n°3 :Caractéristiques géotechniques et mécaniques du Sable de dune.

Fines (%)	IP (%)	ES (%)	VB	w_{opm} (%)	γ_{dmax} (g/cm ²)	ICBR _{imed} (%)	ICBR _{imb} (%)	R _{c98} (bars)	Insolubles (%)
3,35	/	75	/	7,4	1,67	5,9	5	negligeable	95,4

- **IP** : Non misérable.

Tableau n°4 :Caractéristiques géotechniques et mécaniques du tuf de N'goussa

Fines (%)	IP (%)	ES (%)	VB	w_{opm} (%)	γ_{dmax} (g/cm ²)	ICBR _{imed} (%)	ICBR _{imb} (%)	R _{c98} (bars)	CaCO ₃	CaSO ₄ , 2H ₂ O
35	24,8	4,5	0,7	11,75	1,89	51,48	41,59	17,4	29	25

- **IP** : Indice de plasticité
- **ES** : L'équivalent de sable
- **VB** : valeur au bleu
- w_{opm} : teneur en eau optimale Proctor modifiée
- γ_{dmax} : densité sèche optimale Proctor modifiée
- **ICBR_{imed}** : Indice CBR immédiat
- **ICBR_{imb}** : Indice CBR imbibé
- **Rc98** : résistance à la compression simple à 98% de la densité sèche maximale
- **CaSO₄** : gypse
- **CaCO₃** : calcaire

Nous constatons d'après ce tableau que si on adoptant les spécifications proposés pour l'Algérie par ALLOUL et STRUILLLOU, l'utilisation en corps de chaussée du tuf étudié est limitée en couche de fondation en zone climatique IV à faible trafic (<130 PL/ jour).

II.2.3. Classification du tuf de N'goussa :

II.2.3.1. Classification GTR (cas des sols fins) :

Selon la Classification du Groupe Technique Routiere (**GTR**, NF P 11-300) (cas des sols fins), on peut classer le tuf comme suit :

$$D_{\max} < 50\text{mm} ; \text{passant à } 80\mu\text{m} = 35\% ; \quad I_p > 12\% ;$$

Danc selon ces valeurs les caractéristiques géotechniques de notre matériau est de classification **A3**, sachant que la classe A3 est « Sols fins» (**Figure 19**).

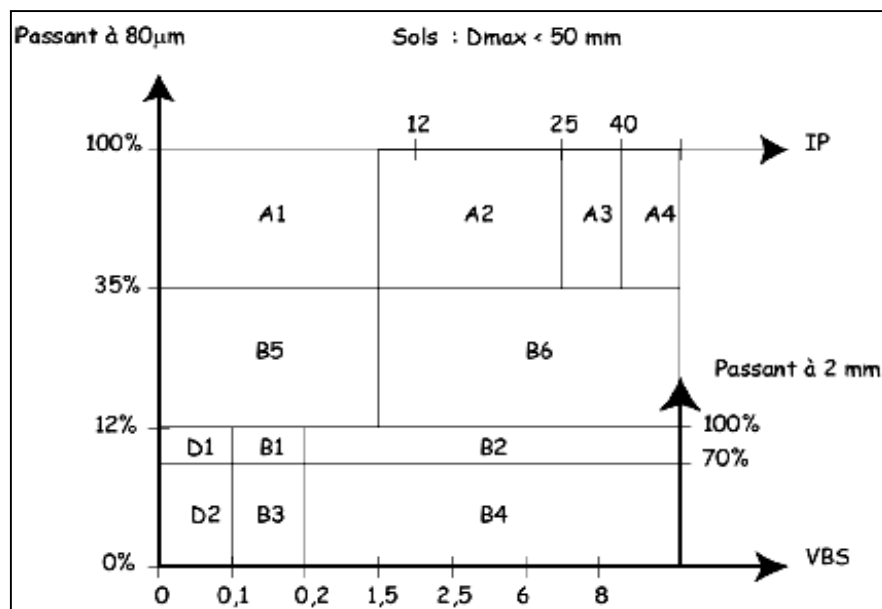


Figure 19 : Classification des sols fins selon GTR

II.2.3.2. Classification TRS (Technique Routière Saharienne):

Suite a notre analyse granulometrique selon la classification TRS (Technique Routière Saharienne), notre matériau est classé comme : tuf gypso-calcaire de famille des matériaux fins.

II.3. CHOIX DES METHODES A MANIPULER

La plus part des techniques de contrôle et de mesure de la succion citées dans ce chapitre ; présentent de grandes difficultés pour leur mode opératoire. D'une part, elles ne sont pas adaptées à notre but de travail, et d'autre part, les laboratoires dans lesquels nous avons mené notre experimentation, à savoir, le laboratoire de LTPS et de l'hydraulique de l'Université de Ghardaia, ne disposent pas de moyens pour la mise en marche de ces techniques.

Par contre, les deux techniques : la technique osmotique et la technique des solutions salines saturées, se rapprochent des conditions d'écoulement dans les sols non-saturés. En plus, les deux méthodes peuvent être manipuler avec un simple materiel au laboratoire et sans courir un danger des hautes pressions.

II.4. PREPARATION DES ECHANTILLONS AU LABORATOIRE

Tableau n°5 :Les étapes de préparation des échantillons.

- Un échantillon de 4kg est préparé de la façon suivante :
 75% de tuf et **25%** de sable de dune (T_{75%}+SD_{25%}).
- Les pourcentages de ce mélange ont été déterminé selon des études récentes.



Photo 1

- Répartition du mélange en échantillons égaux.

**Photo 2**

- Ajout de la chaux morte pour les quatre échantillons avec un pourcentage de: 3%, 6%, 9% et 12% ($T_{75\%}+SD_{25\%}+ \text{Chaux}_{[0\%]}$).
- Le cinquième échantillon est de 0% de la chaux ($T_{75\%}+SD_{25\%}$).

**Photo 3**

Tableau n°6 : Les étapes de préparation de la pâte humide et la pâte sèche

- Ajout de l'eau aux échantillons jusqu'à saturation, et avoir une pâte homogène (teneur en eau initiale égale à une fois et demi sa limite de liquidité

$$W_0 = 1,5 \times W_L$$
- Les échantillons sont laissés au repôt pendant 24 heures.

**Photo 4**

- Préparation des moules pour les échantillons ; de sorte d'avoir une forme de petits échantillons d'environ 1cm^3 de volume pour chaque échantillon.



Photo 5

- ❖ **La pâte humide :**
 - La mise de la pâte humide dans les moules pour prendre la forme pendant 20 minutes pour l'homogénéisation.
- ❖ **La pâte sèche :**
 - La pâte sèche est obtenue par la mise des échantillons dans l'étuve à 55°C pendant 48 heures



Photo 6

Tableau n°7 : Les étapes de préparation des échantillons compactés

- L'appareil de la compression simple utilisé dans le laboratoire avec un moule double piston de dimension :

- Une hauteur de 10cm
- Un volume de $196,25\text{cm}^3$
- Un diamètre intérieur de 5cm.



Photo 7

- La mise de l'intégralité des échantillons dans les moules de la compression simple.



Photo 8

- L'opération de la compression simple a été effectuée pour les cinq échantillons (3%, 6%, 9% et 12%) de sorte que les mélanges sont confectionnés à la teneur en eau optimale du Proctor modifié.



Photo 9

- La mise en place dans le moule sous forme de couches (cylindres) d'égale poids, de sorte que la première couche est surmontée par un papier filtre type **Whatmann 42** placé entre deux papiers filtres normaux sur un cylindre de 15mm d'hauteur de la base.
- Le reste des couches sont séparées par des papiers filtres normaux.



Photo 10

- Les cinq échantillons compactés :
 - T75%+SD25%
 - T75%+SD25%+ Chaux [3%]
 - T75%+SD25%+ Chaux [6%]
 - T75%+SD25%+ Chaux [9%]
 - T75%+SD25%+ Chaux [12%]



Photo 11

II.5. PREPARATION DES SOLUTIONS AU LABORATOIRE



II.5.1. Préparation du PEG (POLYETHYLENE GLYCOL)

La solution du PEG sera préparée en différentes concentrations ; suivant le tableau ci-dessous (Tableau n°4), étant donné que la méthode repose sur la connaissance de la relation qui lie la concentration du PEG (polyéthylène glycol) avec la succion imposée. :

Tableau n°8 : Les différentes concentrations du PEG utilisées

Concentration g de PEG20000 /500 ml eau	Succion (kPa)
12,5	30,2
25	48,5
37,5	87,7
50	151
62,5	241,7
75	363,1
87,5	518,3
100	710,7
112,5	943,5
125	1220

Tableau n°9 : Les étapes de préparation du PEG20000

<ul style="list-style-type: none">○ On prend 12,5g du PEG 20000 dans un bécher contenant 500ml d'eau ce qui nous donne une succion imposée de 30,2 kPa.○ On ajoute de l'acide benzoïque pour éviter la dégradation de la membrane par les bactéries○ On mis le bécher dans un agitateur jusqu'à une parfaite dissolution du PEG20000.	 <p><i>Photo 12</i></p>
<ul style="list-style-type: none">○ On procède aux même étapes pour obtenir les autres concentrations du PEG20000.○ Les différentes concentrations obtenues seront mises au repos pendant 24 heures, en mettant un couvercle (un parafilm) pour éviter l'évaporation.	 <p><i>Photo 13</i></p>

Les étapes de la mises en place de la membrane semi perméable en triacétate de cellulose(membrane de dialyse)sont resumés dans le tableau suivant ;

Tableau n°10 :Les étapes de la mise en place des échantillons sur la membrane semi permèable

- On fixe la membrane semi-perméable dans le bécher contenant le PEG par l'intermédiaire d'une bague en PVC

*Photo 14*

- La bague est ensuite glissée sur les parois du bécher jusqu'à ce que le contact entre la solution et la membrane sera parfaite (pas de bulles d'air)

*Photo 15*

- Préparation des échantillons pour la mise dans les béchers du PEG20000 : trois échantillons (pâte humide, pâte sèche et échantillon compacté) pour chaque pourcentage de la chaux ; 0%3%, 6%, 9% et 12% (T75%+SD25%+ Chaux [%]).



Photo 16

- Les échantillons seront ensuite posés sur la membrane du bécher.
- On laisse les béchers fermés par un couvercle (parafilm) pendant 15 jours pour atteindre l'équilibre osmotique (la stabilisation du transfert).



Photo 17

II.5.2. Préparation des solutions salines saturées

Les solutions salines saturées utilisées en fonction de la température (25°C) sont présentées dans le tableau n 5.

Tableau n°11 : les différentes solutions salines utilisées et leurs caractéristiques

N	Solution saline	Concentration (g de sel/ 500 ml d'eau)	Equivalente en concentration de NaCl (g de sel/500 ml d'eau)	Succion (MPa)
1	K ₂ SO ₄	111 g	-	4,23
2	KH ₂ PO ₂	-	38g de NaCl	6,3
3	Na ₂ SO ₃ , 7H ₂ O	-	82,5 g de NaCl	13,7
4	(NH ₄) ₂ SO ₄	375,66	-	29,29

Tableau n°12 : Les étapes de la mise en place des échantillons dans les dessiccateurs aux différentes solutions salines

- On prend 111g du Sulfate de Potassium (**K₂SO₄**) dans un bécher contenant 500ml d'eau ce qui nous donne une succion imposée de **4,23MPa**.
- On place le bécher dans un agitateur jusqu'à une parfaite dissolution du sel.



Photo 18

- On procède aux même étapes pour obtenir les autres concentrations des sels (KH_2PO_2 , $\text{Na}_2\text{SO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$).
- Les différentes concentrations obtenues seront mises au repos pendant 24 heures, en mettant un couvercle (un parafilm) pour éviter l'évaporation.

*Photo 19*

- La mise des solutions salines préparées dans les dessiccateurs

*Photo 20*

- La mise des échantillons dans les dessiccateurs : trois échantillons (pâte humide, pâte sèche et échantillon compacté) pour chaque pourcentage de la chaux ; 0% 3%, 6%, 9% et 12% (T75% + SD25% + Chaux [%]).
- On ferme hermétiquement les dessiccateurs et on les laisse pendant 90 jours afin d'atteindre le temps d'équilibre.

*Photo 21*

II.6. DETERMINATION DES PARAMETRES DE LA SUCCION DU SOL ECHANTILLONNE

II.6.1. Introduction

Les mesures du volume et la teneur en eau des échantillons, nous permet de déterminer les principaux paramètres de la succion qui sont : l'indice des vides e , le degré de saturation S_r et la teneur en eau massique w ou volumique θ . La méthode de détermination des volumes externes (totaux) des échantillons après l'équilibre est délicate et nécessite beaucoup de patience (Ghembaza et al., 2007, in Guedouda, 2010).

La méthode que nous avons utilisé est basée sur une mesure hydrostatique dans le Kerdane (huile des lampes) dont la densité est de l'ordre de : $\gamma_k/\gamma_w=0,785$.

Cet huile s'évapore à l'étuve à une température de 105°C. le matériel que nous avons utilisé lors de notre travail au laboratoire est ;

- 1- l'huile de Kerdane
- 2- une balance avec une précision de 10^{-4} g ;
- 3- une étuve;
- 4- un support / éleveur pour la pesée sous le Kerdane.

II.6.2. Mode opératoire de pesée hydrostatique

Après que les échantillons atteignent leur équilibre osmotique (stabilisation), on pèse chaque échantillon avec toute précaution, pour déterminer leur poids humide (P_h).

Par la suite on immerge les échantillons dans l'huile de Kerdane jusqu'à saturation, ce qui permet de remplir les pores vides de l'échantillon et de chasser les bulles d'air existants. On mesure de nouveau le poids immergé (P_{imm}) dans l'huile de Kerdane pour chaque échantillon.

En suite on retire l'échantillon de l'huile de Kerdane ; on l'essuie superficiellement par un papier filtre pour éliminer l'huile en excès et on pèse l'échantillon de nouveau, ce qui nous permet de déterminer son poids humide (P_h) + le poids de l'huile du Kerdane (P_{h_k}).

On met l'échantillon dans l'étuve à une température de 55 °C pendant 48 heures. Après rafraîchissement on procède à la pesée de l'échantillon ce qui nous permet de déterminer son poids sec (P_s).

En général, nous avons calculé le volume total de l'échantillon par la formule suivante ;

$$V = ((P_{h_k} - P_{imm})/\gamma_k)/\gamma_w$$

Par contre les autres paramètres caractéristiques ont été déterminés selon les équations du tableau suivant:

Tableau n°13 :paramètres caractéristiques et leur équations

Paramètre caractéristique	Equation
Le poids volumique humide	$\gamma_h = \frac{P_h}{V}$
Le teneur en eau	$w = \frac{(P_h - P_s)}{P_s}$
Le poids volumique sec	$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{(1 + w)}$
L'indice des vides	$e = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_d}\right) - 1$
Le degré de saturation	$S_r = \frac{w(\gamma_s/\gamma_w)}{e}$

NB : γ_s représente le poids volumique des grains solides.

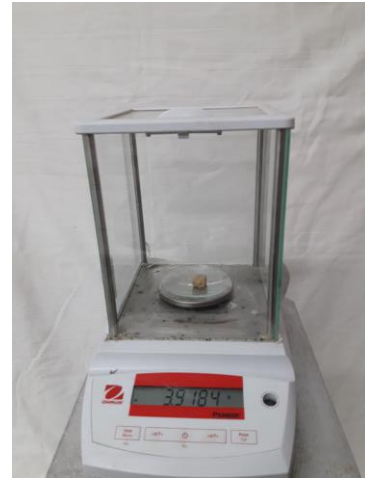
Les étapes de la manipulation des pesées hydrostatiques dans l'huile du Kerdane sont montrées dans le tableau des figures suivant :

Tableau n°14 :étapes de la mesure des pesées hydrostatiques dans l'huile de Kerdane

- Balance d'une précision de 10^{-4} g
- Huile de Kerdane
- support / élévateur pour la pesée sous l'huile de Kerdane.

*Photo 22*

- Mesure du poids humide de l'échantillon (P_h).

*Photo 23*

- Immersion de l'échantillon dans l'huile de Kerdane jusqu'à saturation (pour remplir les vides et chasser les bulles d'air).

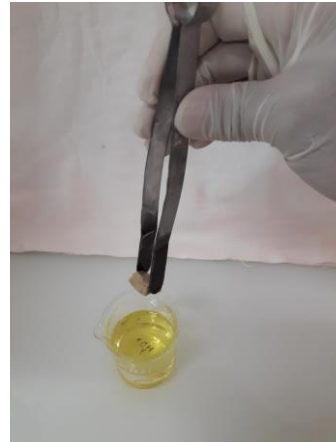


Photo 24

- mesure du poids immergé de l'échantillon dans l'huile du Kerdane (P_{imm}).



Photo 25

- essuyage de l'échantillon.



Photo 26

- mesure du poids de l'échantillon humide (P_h) + poids de l'huile de Kerdane (P_{h_k}).

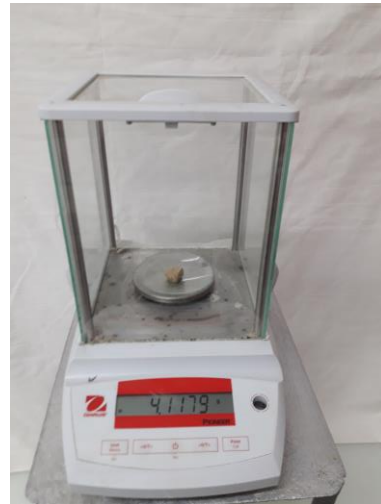


Photo 27

- préparation des échantillons à la pesée après séchage dans l'étuve.

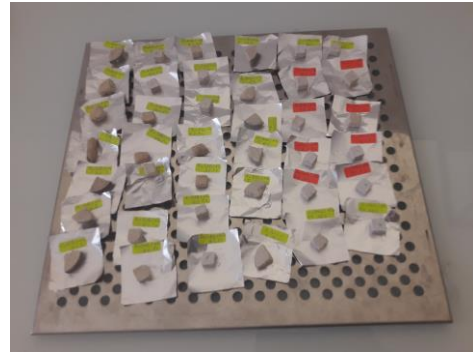


Photo 28

- mesure du poids sec (P_s) de l'échantillon

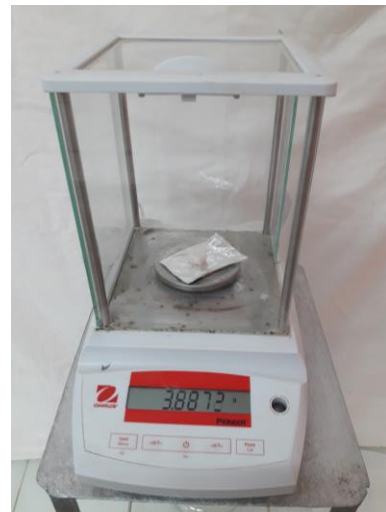


Photo 29

RESULTATS
&
DISCUSSIONS

INTRODUCTION :

Nous désignons par chemins de drainage-humidification des chemins dans lesquels le paramètre essentiel est la succion ou la pression interstitielle négative, en l'absence de contrainte extérieure.

L'étude des chemins de drainage -humidification présente un double intérêt, d'une part parce qu'elle permet de mettre en évidence le rôle de la pression capillaire à laquelle est soumis le sol et de comprendre cet aspect important de son comportement, d'autre part parce que de nombreux phénomènes réels suivent, en première approximation, des chemins de drainage ou d'humidification : géotechnique routière, retrait-gonflement des sols à faible profondeur lors de variations du niveau de la nappe phréatique, ... etc. (ABOU-BEKR, 1995 ; cité par Geddouda ; 2010).

Dans un sol support de chaussée, l'augmentation ou la diminution de la pression capillaire résultera soit d'un séchage ou d'une humidification du sol par la surface, soit de l'abaissement ou de la remontée du niveau de la nappe phréatique. Si, dans le second cas, les variations restent relativement limitées (quelques centaines de kPa au maximum), celles-ci peuvent atteindre des valeurs considérables dans le premier cas, notamment en été dans les zones arides et en l'absence de protection de l'ouvrage (chaussées non revêtues, barrages, ... etc.).

On peut alors observer des augmentations de pression capillaire de plusieurs dizaines de MPa liées à une forte désaturation du sol (Octavio, 2005 ; cité par Geddouda ; 2010).

Dans cette partie, ne sont présentés que les protocoles des différentes méthodes expérimentales d'imposition et de mesure de succion utilisés dans cette étude.

Pour mener à bien notre étude nous avons établi expérimentalement, pour le sol étudié sans et avec le traitement par la chaux et dans différents états : pâte saturée, pâte sèche et compacté, les courbes suivantes :

- 1- La variation de l'indice des vides en fonction de la succion ;
- 2- La variation du degré de saturation en fonction de la succion ;
- 3- La variation de l'indice des vides en fonction de la teneur en eau.

Et cela pour les pâtes humides et sèches et des échantillons compactés.

Les chemins de drainage-humidification des mélanges étudiés, initialement préparés sous forme de pâte à $w_i = 1,5 w_L$, sont représentés sur les figures 20-23. Les chemins de drainage-humidification des mélanges compactés sont représentés dans les figures 25-29.

Dans le cas général, l'application d'une pression interstitielle négative à un échantillon de sol (succion) 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.

III.1. Pate saturée (chemin de drainage)

Le plan $[\log(s), e]$ (quadrant supérieur droit) présente la courbe de compressibilité hydrique. On observe, au début, une variation importante d'indice des vides avec la succion. Lorsque la succion devient supérieure à une valeur seuil notée « S_{SL} » (succion de retrait), la variation d'indice des vides présente un palier quasi-horizontale. Elle varie entre 6000 et 1300kPa.

La variation du degré de saturation en fonction de la succion est présentée dans le plan $[\log(s), S_r]$ (quadrant inférieur droit). Sur un chemin de drainage, le sol reste quasi saturé jusqu'à une succion appelée succion de désaturation « S_d ». La valeur de S_d varie entre 300 et 120 kPa. Après cette valeur, le degré de saturation décroît rapidement jusqu'à la valeur de la succion de retrait « S_{SL} », puis il se stabilise. On note une forte irréversibilité entre le drainage et l'humidification avant le palier, et une quasi-réversibilité sur le palier.

Le plan $[w, e]$ (quadrant supérieur gauche) présente la courbe de retrait usuelle. Sur un chemin de dessiccation, le sol suit d'abord la droite de saturation d'équation : $e = (\gamma_s/\gamma_w) \times w$. Lorsque la teneur en eau décroît, l'indice des vides tend vers une valeur constante. Cette courbe, nous a permis de déterminer la limite de retrait « w_{SL} » et la teneur en eau de désaturation « w_d ». La limite de retrait w_{SL} varie entre 29 et 12% correspondant à l'indice des vides de limite de retrait « e_{SL} » varie entre 0,81 et 0,34. Concernant la teneur en eau de désaturation elle varie entre 51 et 36%.

III.2. Pate seche (chemin d'humidification)

Si l'on considère à présenter le chemin d'humidification dans les 3 graphes des figures 20-23. L'échantillon est séché initialement dans l'étuve à 55° pendant 48 heures, on signale les remarques suivantes :

Dans les deux plans de côté droit (indice des vides et le degré de saturation en fonction de la succion), dans le domaine où la succion est supérieure à la succion de la limite de retrait, on constate l'apparition de deux paliers traduits par une quasi-réversibilité entre les chemins de drainage et les chemins d'humidification.

Dans le domaine où la succion est inférieure à la succion de désaturation, l'augmentation de la teneur en eau et du degré de saturation est sensiblement plus importante, suivie d'une augmentation de l'indice des vides. Il s'agit d'une phase intermédiaire de saturation où les gros pores se désaturent progressivement.

Dans le domaine intermédiaire où la succion est comprise entre la succion de désaturation et la succion de la limite de retrait, on constate une grande irréversibilité qui est clairement visible dans les deux plans $[\log(s), S_r]$ et $[\log(s), e]$ caractérisés par la variation globale de volume du sol et du remplissage des pores

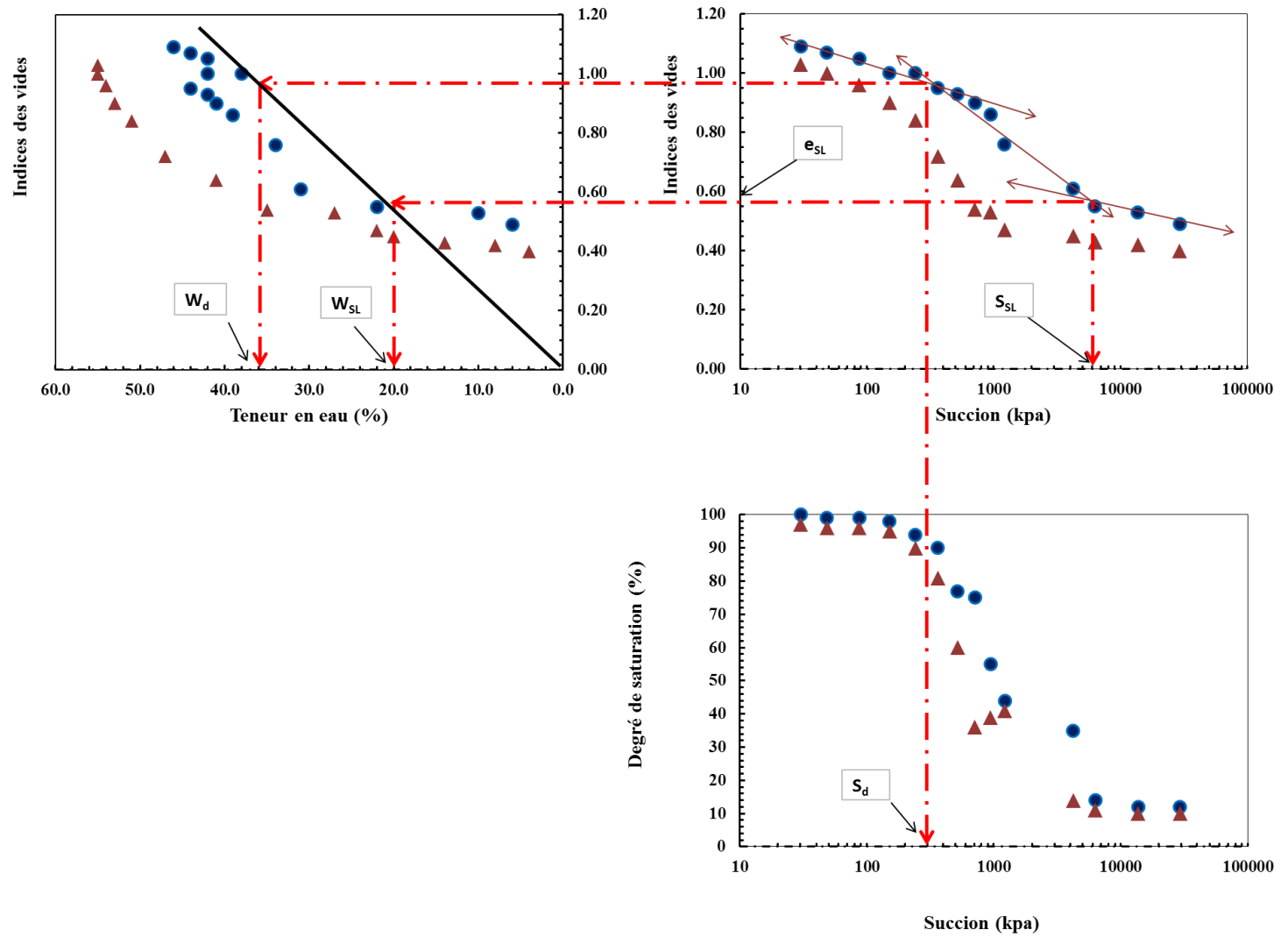


Figure 20 : Chemin de drainage – humidification sur le mélange T_{75%} + SD_{25%} préparé initialement sous forme de pâte.

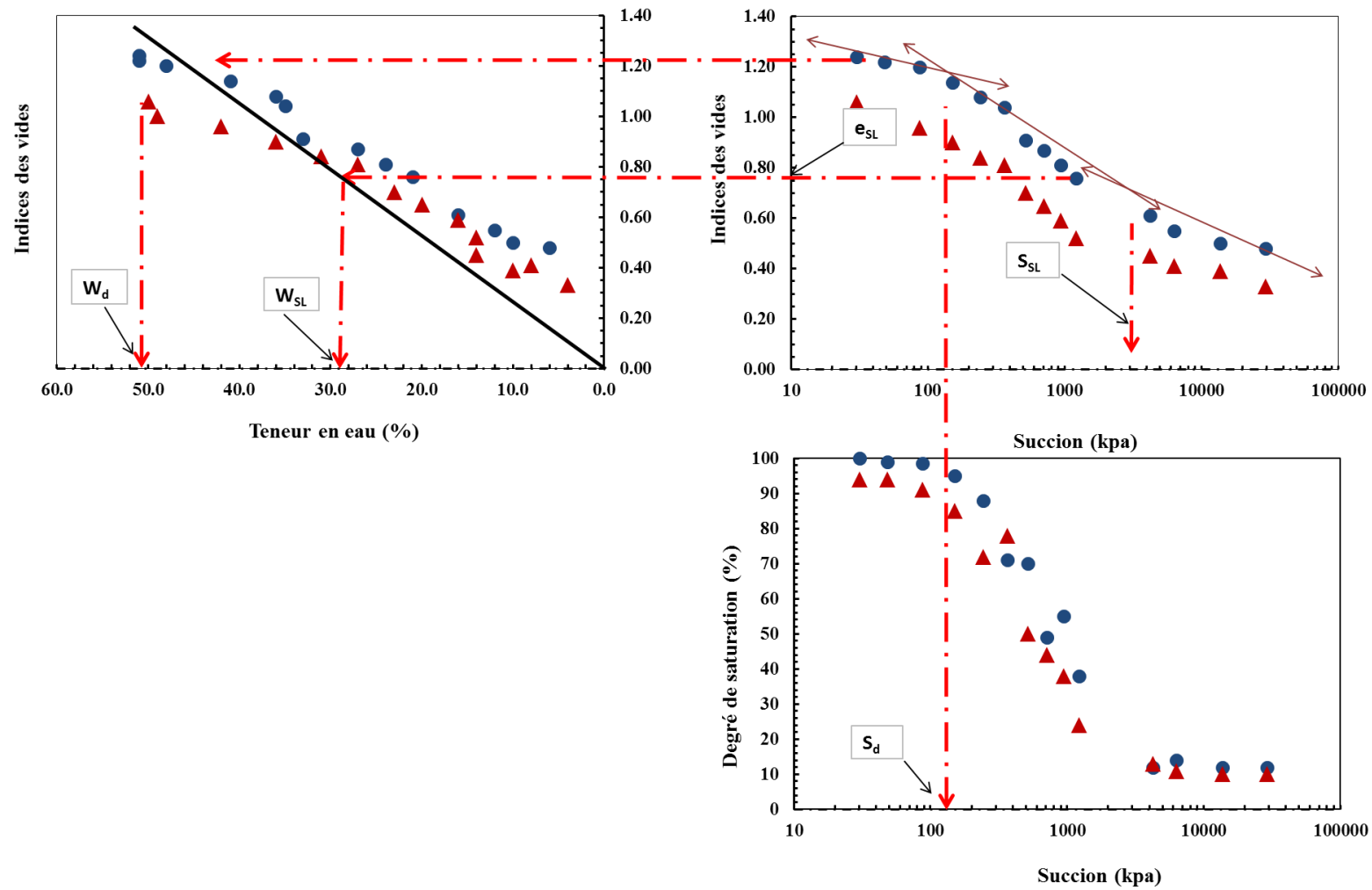


Figure 21 : Chemin de drainage – humidification sur le mélange T_{75%} + SD_{25%} + Chaux [3%] préparé initialement sous forme de pâte.

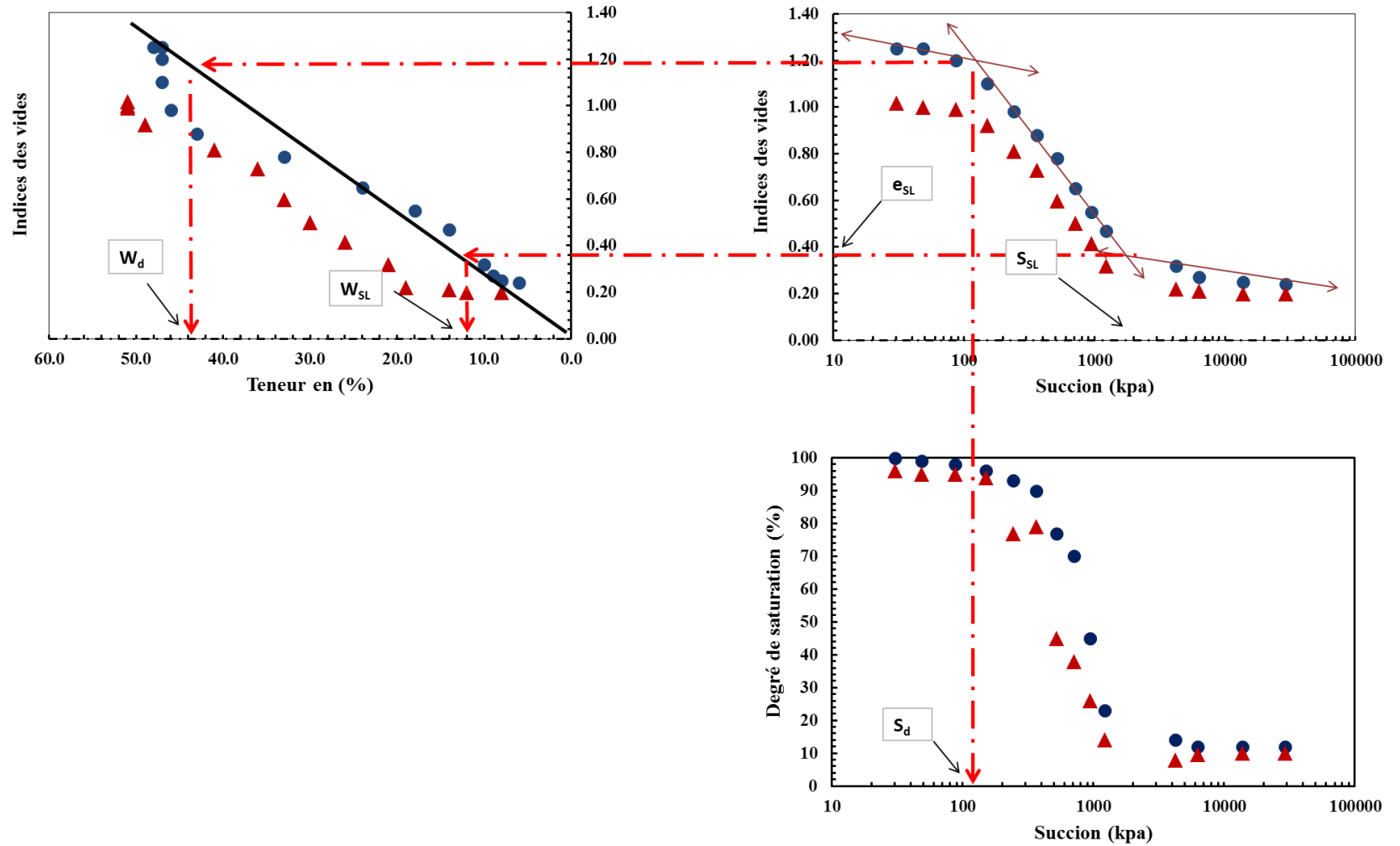


Figure22 : Chemin de drainage – humidification sur le mélange T_{75%} + SD_{25%} + Chaux [6%] préparé initialement sous forme de pâte.

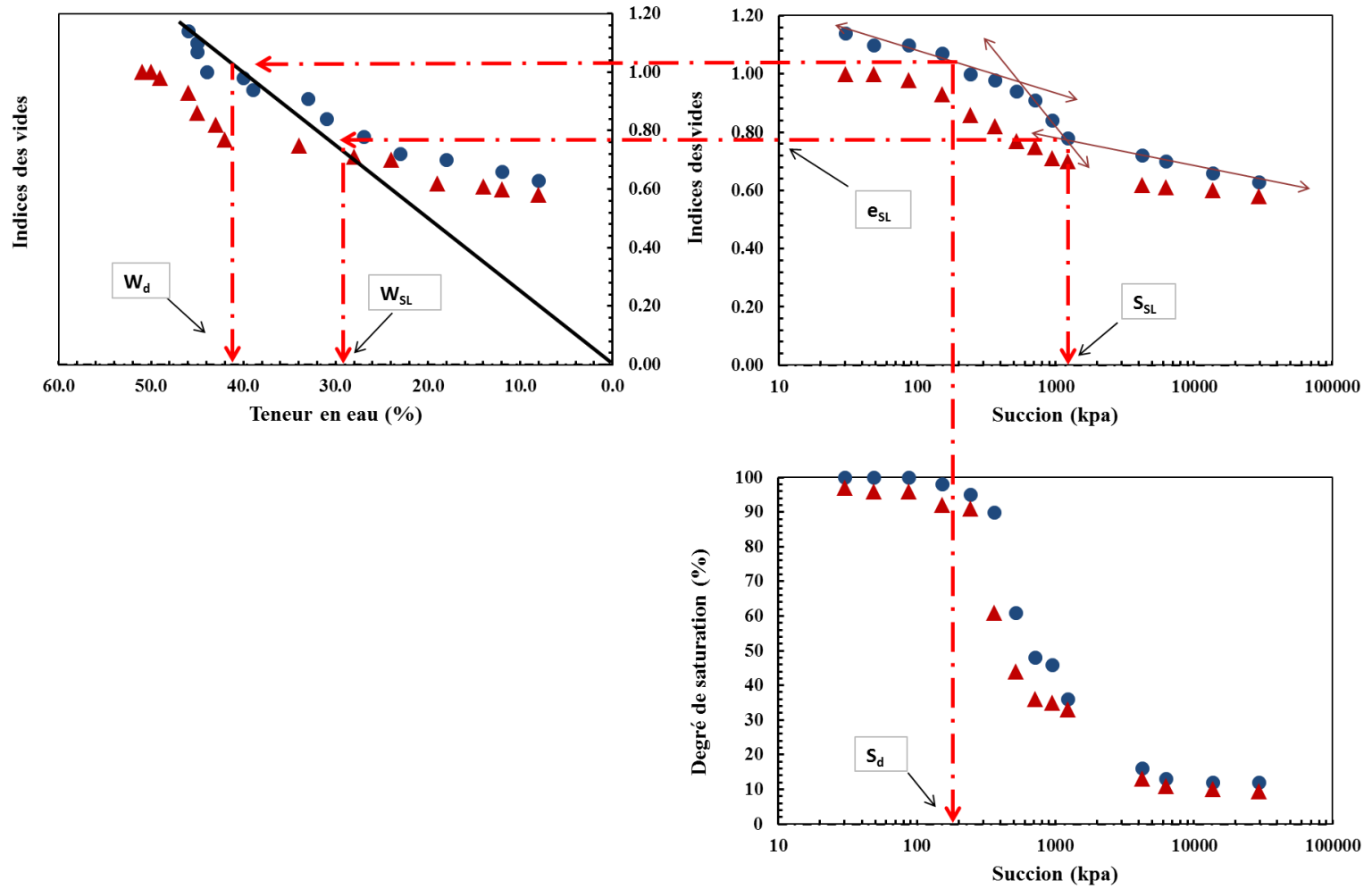


Figure 23 : Chemin de drainage – humidification sur le mélange $T_{75\%} + SD_{25\%} + \text{Chaux}_{[9\%]}$ préparé initialement sous forme de pâte.

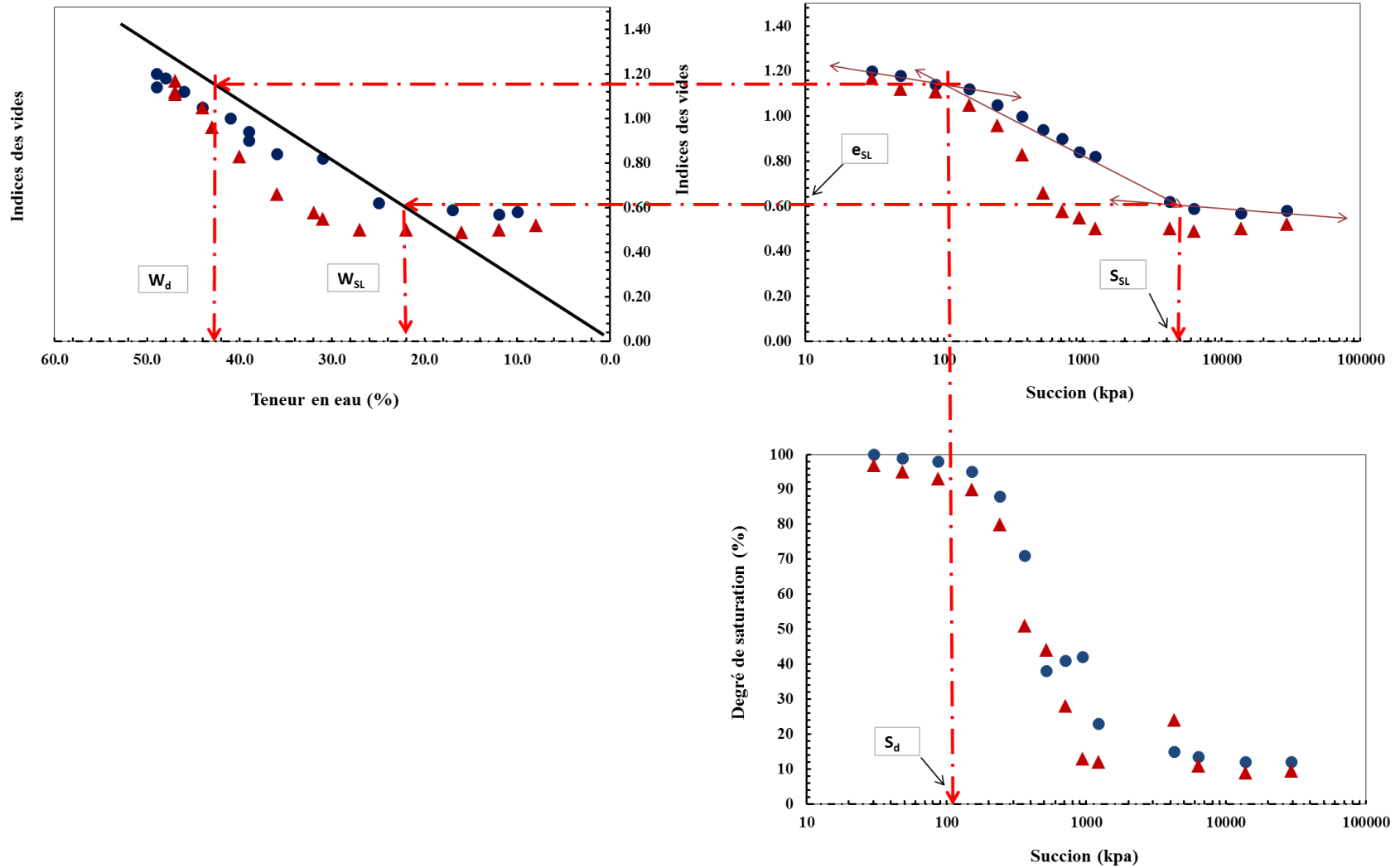


Figure 24 : Chemin de drainage – humidification sur le mélange T_{75%} + SD_{25%} + Chaux [12%] préparé initialement sous forme de pâte.

III.3. Echantillon compacté

Les figures 25-29 représentent le cycle de drainage-humidification des échantillons compactés (compactage statique) à l'OPM, et cela pour tous les mélanges étudiés. Rappelons que l'état OPM est caractérisé par une teneur en eau correspondant à une succion (pression interstitielle négative), déterminée par la méthode des papiers filtres W N°42.

On constate que les échantillons suivent un chemin de drainage à partir des succions qui correspondent à l'OPM et un chemin d'humidification pour des valeurs inférieures à ces dernières.

Dans le plan $[\log(s), Sr]$, le degré de saturation chute rapidement à partir de cette pression pour atteindre des valeurs très faible. Pour des fortes succions, l'allure des courbes tend vers un palier.

Dans le plan $[\log(s), e]$, on constate que les échantillons présentent un palier pour des succions supérieures à la limite de retrait.

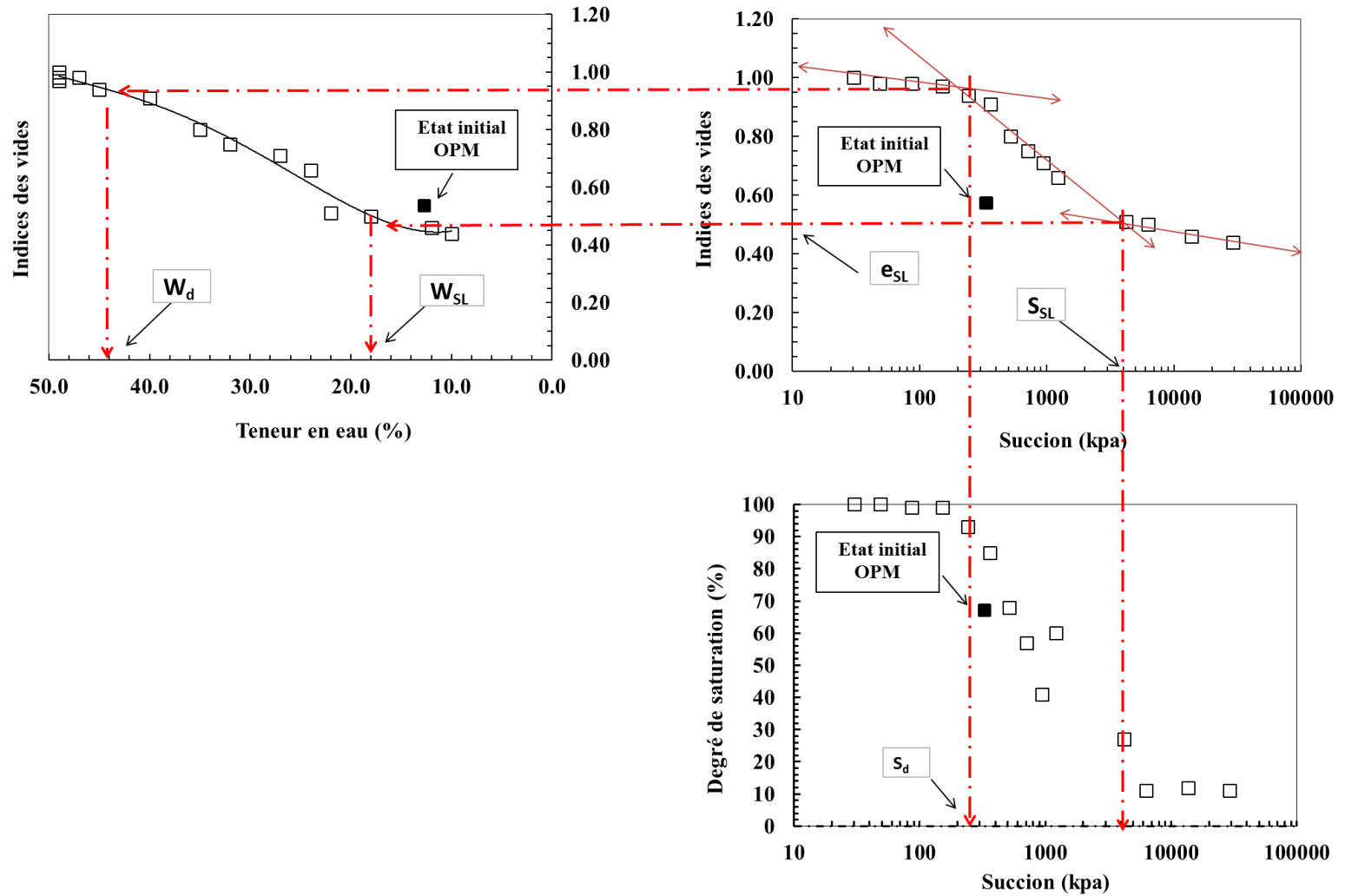


Figure 25 : Chemin de drainage – humidification sur le mélange $T_{75\%} + SD_{25\%}$ préparé initialement sous forme d'un échantillon compacté.

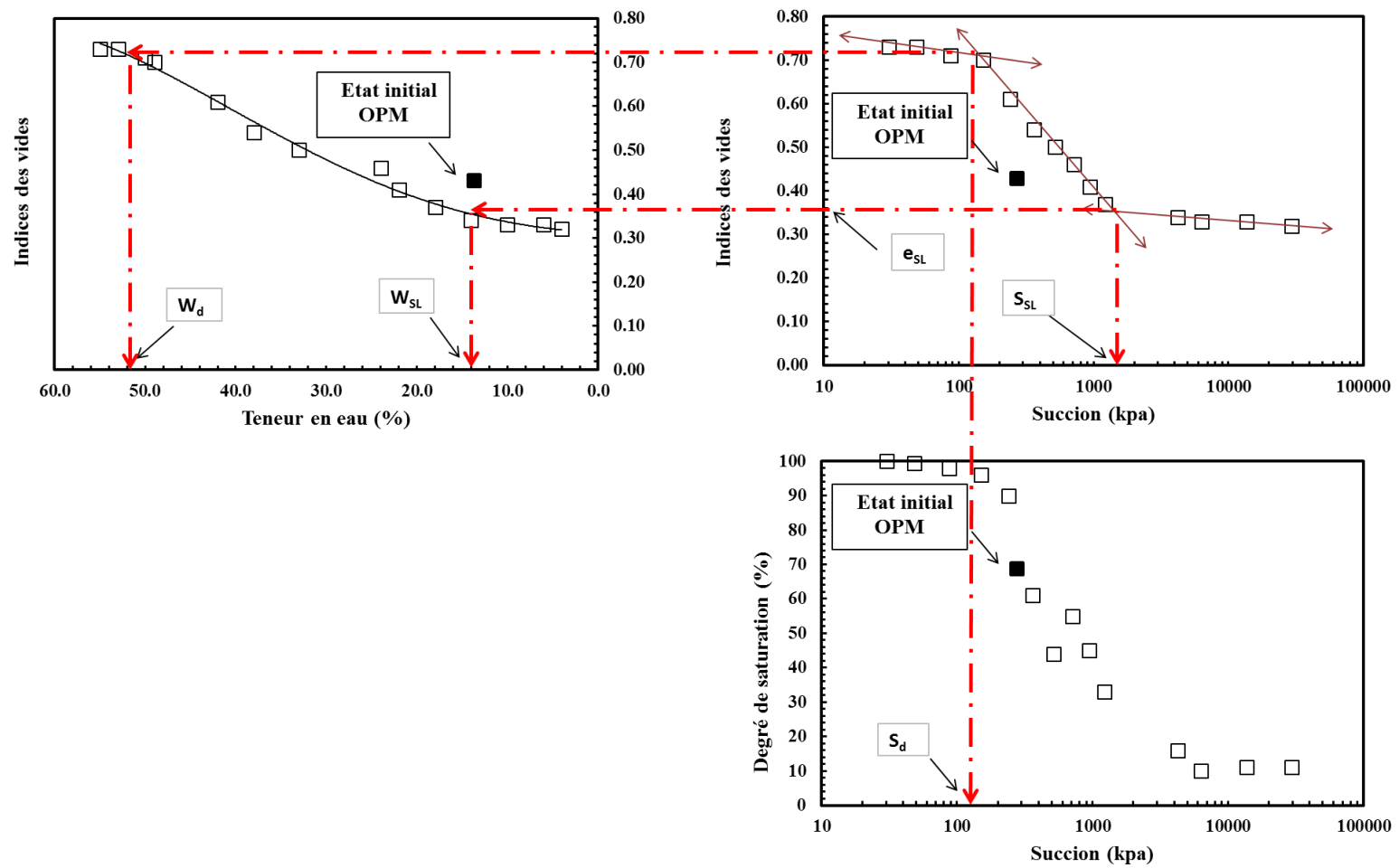


Figure 26 :Chemin de drainage – humidification sur le mélange T_{75%}+ SD_{25%}+ Chaux [3%] préparé initialement sous forme d’un échantillon compacté.

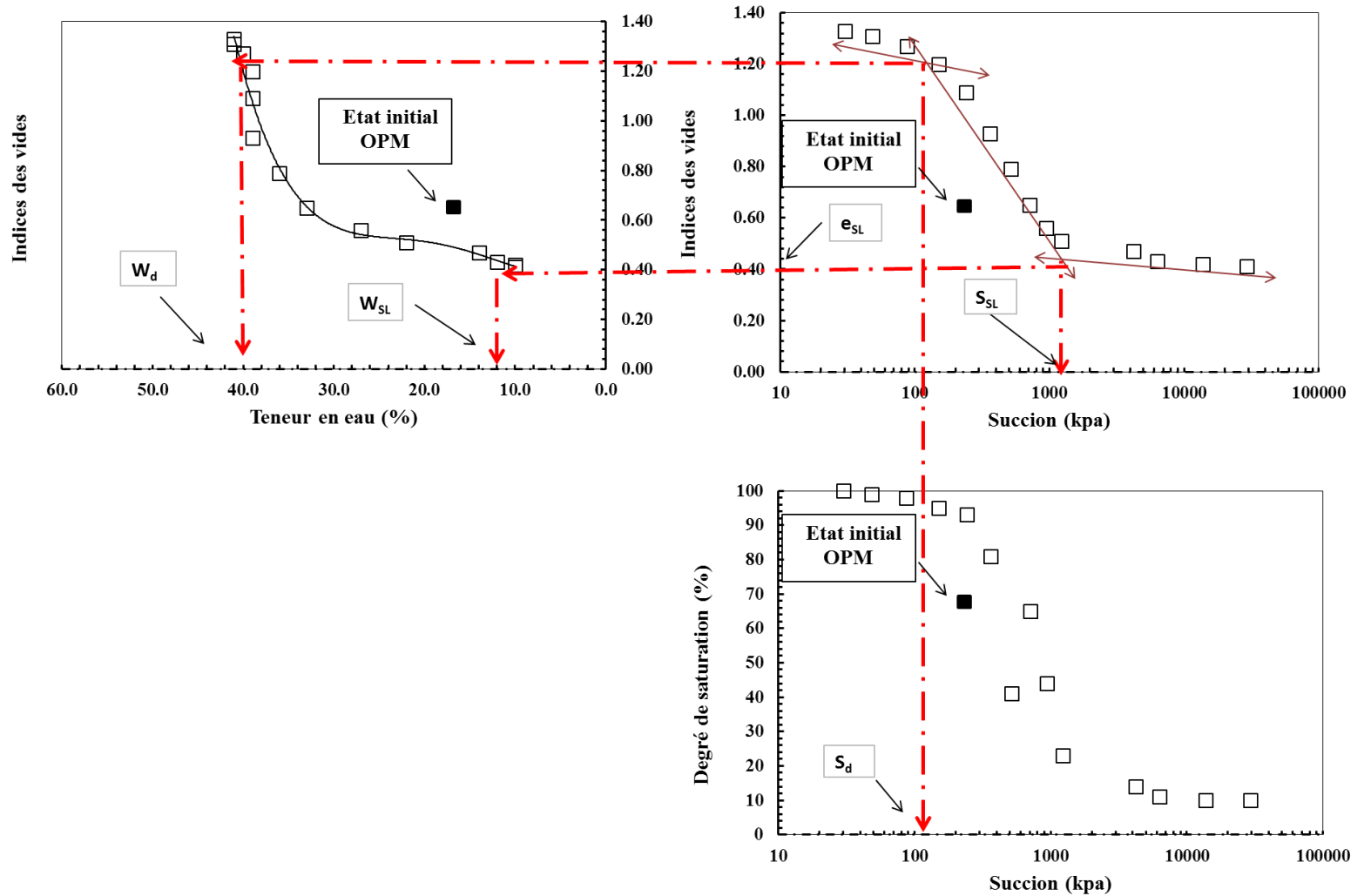


Figure 27:Chemin de drainage – humidification sur le mélange T_{75%}+ SD_{25%} + Chaux [6%] préparé initialement sous forme d’un échantillon compacté.

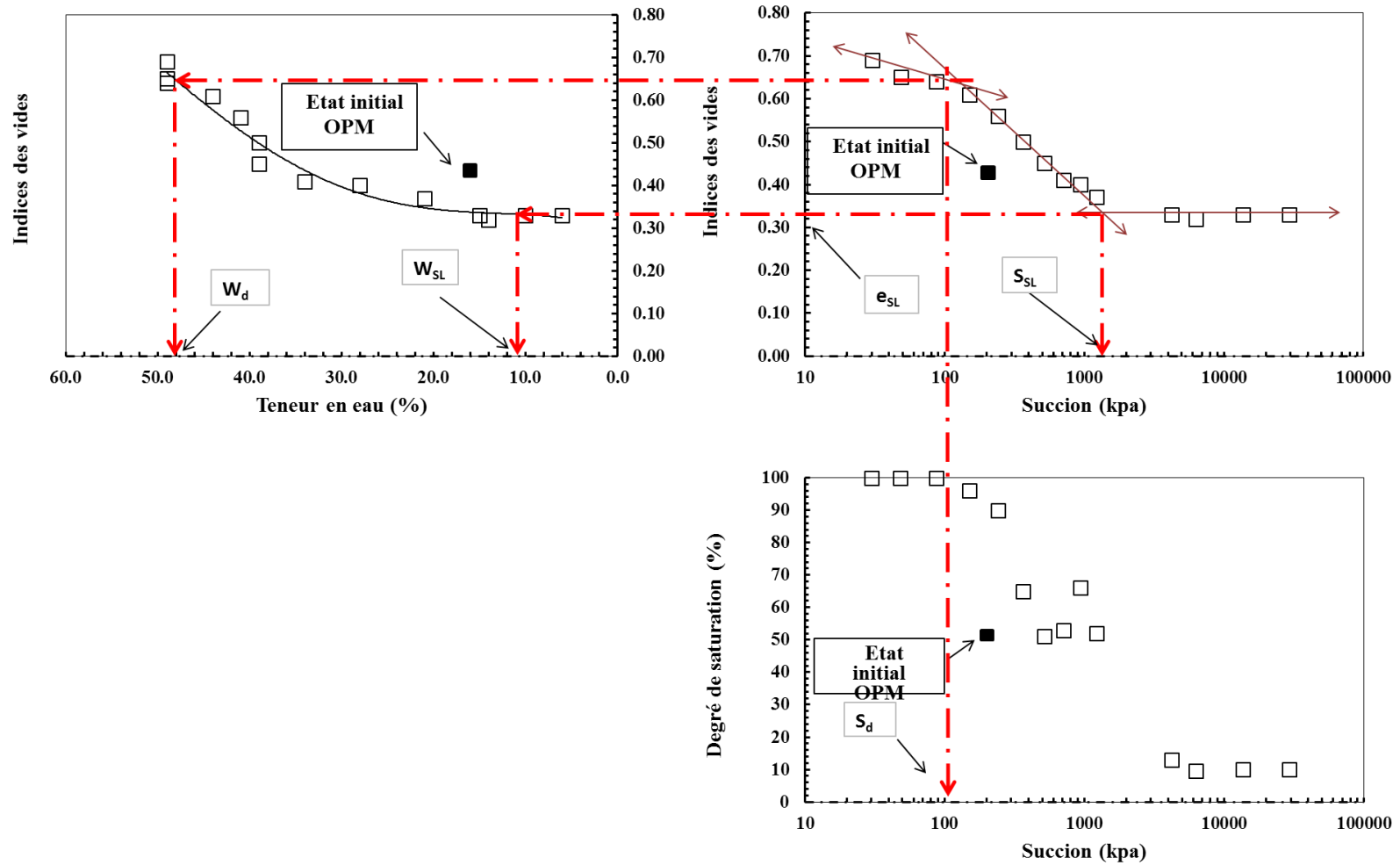


Figure 28 :Chemin de drainage – humidification sur le mélange T_{75%}+ SD_{25%}+ Chaux [9%] préparé initialement sous forme d’un échantillon compacté.

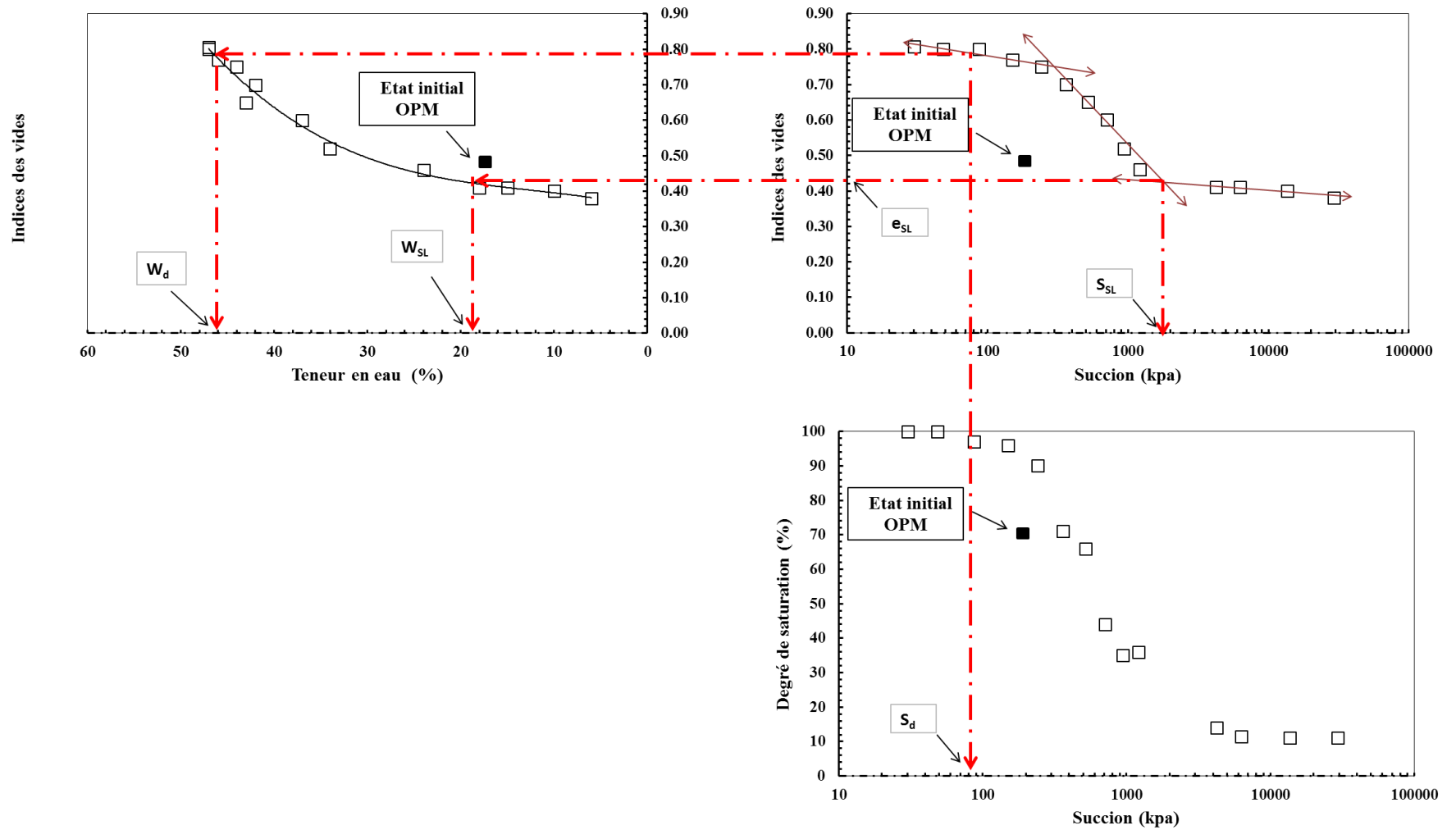


Figure 29 : Chemin de drainage – humidification sur le mélange T_{75%}+ SD_{25%}+ Chaux [12%] préparé initialement sous forme d’un échantillon compacté.

III.4. Influence de la teneur en chaux sur les différents paramètres

Le tableau 15 résume les valeurs des différents paramètres déduits dans les figures précédentes.

Tableau n°15 : Paramètres des chemins de drainage-humidification

	Paramètres	Unités	Teneur de la chaux dans le mélange T _{75%} + SD _{25%}					
			0%	3%	6%	9%	12%	
Chemin de drainage - humidification	Pate humide et sèche	S _d	kPa	300	140	120	190	125
		S _{SL}	kPa	6000	3002	1800	1300	5000
		W _d	%	36	51	44	41	43
		W _{SL}	%	20	29	12	29,5	22
		e _{SL}	/	0,56	0,77	0,34	0,81	0,61
	Echantillon compacte	S _d	kPa	202	135	120	110	80
		S _{SL}	kPa	4000	1550	1300	1400	1850
		W _d	%	45	52	41	48	46
		W _{SL}	%	18,5	14	12	11,5	18,5
		e _{SL}	/	0,53	0,56	0,45	0,34	0,44

- S_d : la succion de désaturation
 S_{SL} : la succion à la limite de retrait
 W_d : la teneur en eau de désaturation
 W_{SL} : la teneur en eau à la limite de retrait
 e_{SL} : l'indice des vides de limite de retrait

III.4.1. Échantillon initialement sous forme de pate humide et séchée

Les figures 30 représentent l'influence de dosage de la chaux sur les différents paramètres déduits des courbes de chemins de drainage – humidification pour les échantillons préparés sous forme de pates humides et séchées.

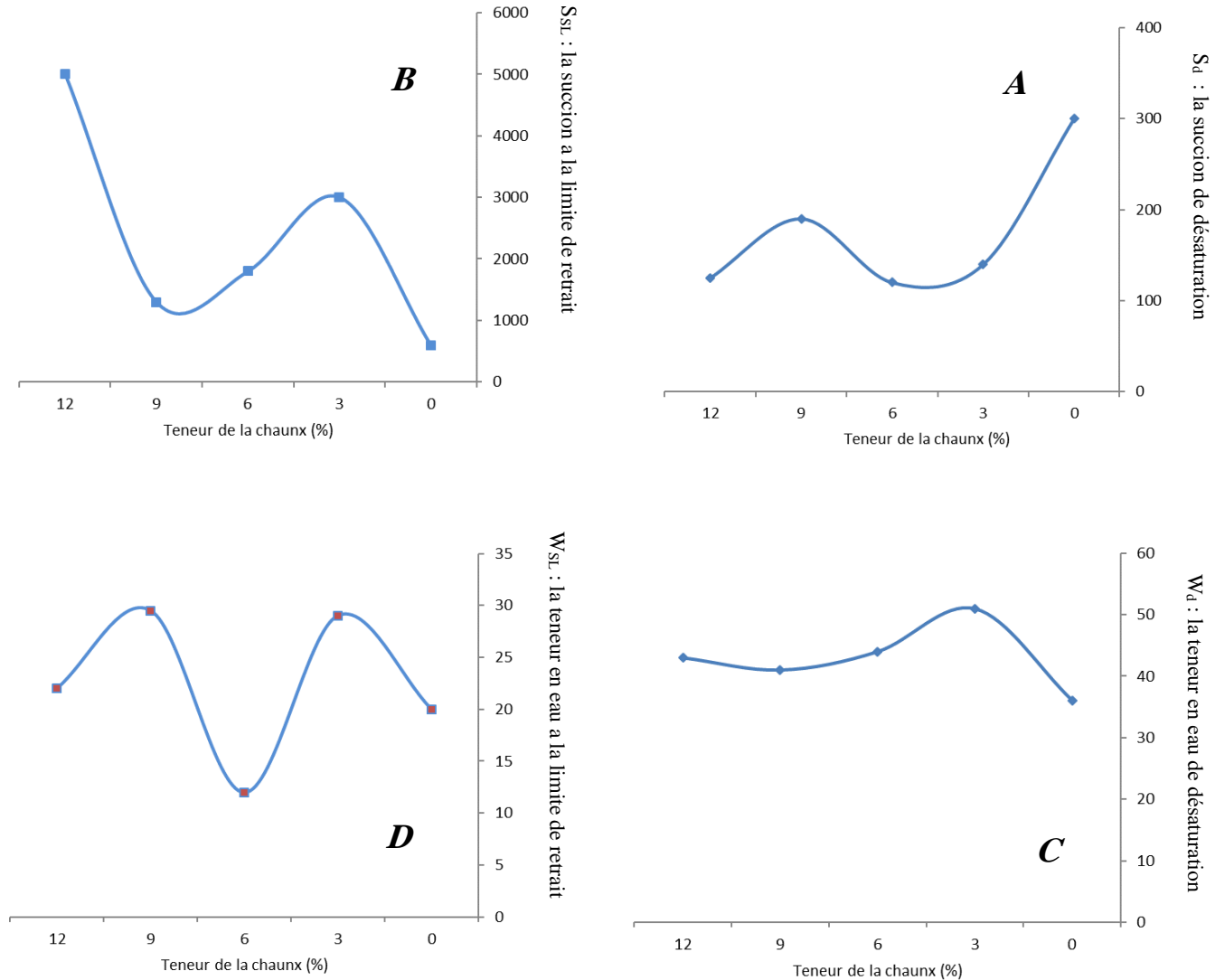


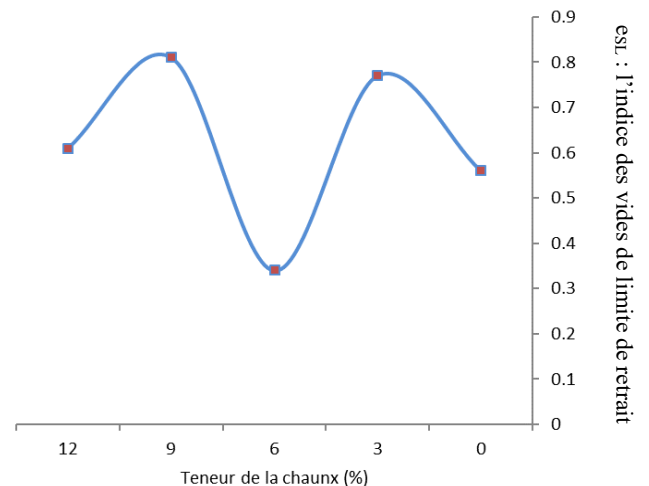
Figure - 30A : Variation de la succion de désaturation en fonction de la teneur en chaux.

Figure - 30B : Variation de la succion de limite de retrait en fonction de la teneur en chaux

Figure - 30C : Variation de la teneur en eau de désaturation en fonction de la teneur en chaux.

Figure -30D : Variation de la teneur en eau la limite de retrait en fonction de la teneur en chaux

Figure -30E : Variation de l'indice des vides de limite de retrait en fonction de la teneur en chaux.



D'après ces résultats, nous pouvons faire les constatations suivantes :

- La succion de désaturation S_d diminue en fonction de l'augmentation de dosage de la chaux, excepter le cas de traitement par 9% chaux ou S_d subit une augmentation ;
- La valeur maximale et minimale de la succion de retrait S_{SL} est atteint pour le matériau sans ajout (6000 kPa) et avec l'ajout de 9% de la chaux (1300 kPa) respectivement ;
- L'ajout de 3% de la chaux conduit à une augmentation de la teneur en eau de désaturation w_d , puis elle diminue suite à l'augmentation de la teneur en chaux ;
- Les valeurs minimales de la teneur en eau de retrait w_{SL} (12%) et l'indice des vides de retrait e_{SL} (0,34), sont atteints pour le cas de l'ajout de 6% de la chaux.

III.4.2. Échantillon initialement compactée

Les figures 31 présentent l'influence de dosage de la chaux sur les différents paramètres déduits des courbes de chemins de drainage – humidification pour les échantillons compactés

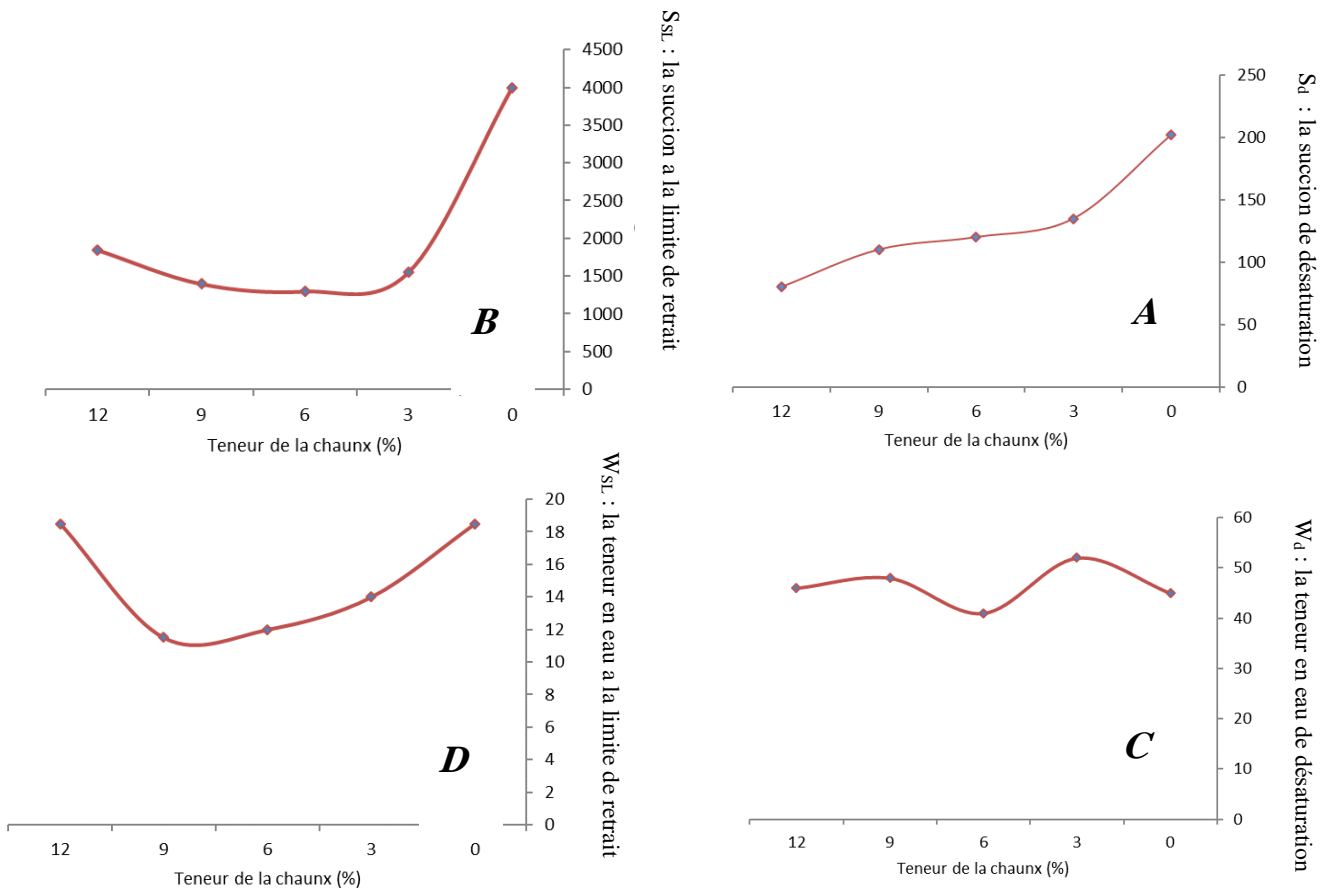


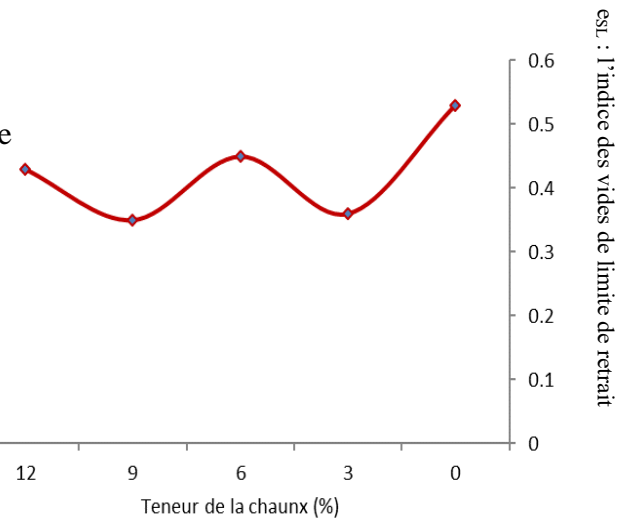
Figure - 31A : Variation de la succion de désaturation en fonction de la teneur en chaux.

Figure - 31B : Variation de la succion de limite de retrait en fonction de la teneur en chaux

Figure - 31C : Variation de la teneur en eau de désaturation en fonction de la teneur en chaux.

Figure -31D : Variation de la teneur en eau la limite de retrait en fonction de la teneur en chaux

Figure -31E : Variation de l'indice des vides de limite de retrait en fonction de la teneur en chaux.



D'après les figures, nous pouvons tirer les remarques suivantes :

- S_d diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux, cette diminution est énorme au début, elle passe de 202 kPa (échantillon sans ajout) à 135 kPa dans le cas de 3%.
- L'effet de l'ajout de la chaux sur S_{SL} est apparu immédiatement dès le début, avec une chute considérable dans le cas de l'ajout de 3% de la chaux elle est de l'ordre de 60%, après ce pourcentage, S_{SL} est en décroissance lente. S_{SL} subit une légère augmentation dans le cas de 12% chaux.
- La valeur maximale de w_d est atteinte dans le cas de 3% chaux.
- w_{SL} diminue suite à l'augmentation de dosage de la chaux jusqu'à atteint une valeur minimale de 11.5% pour 9% chaux, puis elle augmente.
- Le dosage de la chaux n'influe pas de façon sensible sur e_{SL} .

CONCLUSION

Les chemins de drainage et d'humidification sur le mélange 75% T+ 25% SD sans et avec l'ajout de la chaux, préparé initialement sous forme de pâte, font apparaître un domaine quasi-saturé jusqu'à une succion S_d . Au-delà de ce domaine, on observe une diminution importante d'indice des vides, du degré de saturation et de la teneur en eau jusqu'à une succion de limite de retrait SSL . Sur le chemin d'humidification, on observe une hystérésis entre le chemin de drainage et le chemin d'humidification lorsque la succion devient inférieure à SSL . Dans le domaine des fortes succions ($S > SSL$), on observe une quasi-réversibilité entre les deux chemins.

Dans le cas du même matériau compacté initialement à l'OPM, dans le plan $[\log(s), S_r]$, le degré de saturation chute rapidement à partir de la succion qui correspond à l'OPM pour atteindre des valeurs très faible. Pour des fortes succions, l'allure des courbes tend vers un palier. Dans le plan $[\log(s), e]$, on constate que les échantillons présentent un palier pour des succions supérieures à la limite de retrait.

CONCLUSION GENERALE

L'utilisation du mélange 75% tuf + 25% sable de dune compacté dans les assises de chaussées nécessite la connaissance de son comportement en prenant en compte le caractère partiellement saturé. Le chargement hydrique (séchage –humidification) a une importance particulière sur le comportement de ce type de matériau.

L'étude de l'influence de dosage de la chaux sur les différents paramètres du mélange préparé initialement sous forme de pate humide et séchée permis de conclure que :

- La succion de désaturation S_d diminue en fonction de l'augmentation de dosage de la chaux, excepter le cas de traitement par 9% chaux ou S_d subit une augmentation ;
- La valeur maximale et minimale de la succion de retrait S_{SL} est atteint pour le matériau sans ajout (6000 kPa) et avec l'ajout de 9% de la chaux (1300 kPa) respectivement ;
- L'ajout de 3% de la chaux conduit à une augmentation de la teneur en eau de désaturation w_d , puis elle diminue suite à l'augmentation de la teneur en chaux ;
- Les valeurs minimales de la teneur en eau de retrait w_{SL} et l'indice des vides de retrait e_{SL} sont respectivement 12% et 0,34.

Pour le même matériau compacté initialement à l'OPM, L'étude de l'influence de dosage de la chaux permis de retirer les constatations suivantes :

- S_d diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux.
- L'effet de l'ajout de la chaux sur S_{SL} est apparu immédiatement dès le début, avec une chute considérable dans le cas de l'ajout de 3% de la chaux, après ce pourcentage, S_{SL} est en décroissance lente.
- La valeur maximale de w_d est atteinte dans le cas de 3% chaux.
- w_{SL} diminue suite à l'augmentation de dosage de la chaux jusqu'à atteint une valeur minimale de 11.5% pour 9% chaux, puis elle augmente.
- Le dosage de la chaux n'influe pas de façon sensible sur e_{SL} .

La conception et le dimensionnement des ouvrages en mélange de tuf et sable de dune compacté nécessitent l'étude de l'influence de la succion sur les paramètres de résistance et de déformation de ce matériau. Une étude doit être envisagée en perspective dans ce sens.

Cette étude présente un travail original et un grand intérêt scientifique du fait que le comportement hydrique de ce genre de matériau (tuf et sable de dune) est très rare dans la littérature.

Références Bibliographiques

- [1] E. Fenzy, "Particularité de la technique routière au Sahara", *Rev. Générale Routes Aérodr.*, 411 p1966 ,71–57 .
- [2] J. A. Silva et J. M. Bremner, "Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soils: 5. Fixed ammonium 1", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 30 vol ,5 p1966 ,594–587 .
- [3] M. K. GUEDDOUDA, "Comportement hydro-mécanique des sols compactés: Application à la conception d'une barrière ouvragée «sable de dune–bentonite»", PhD Thesis, 2013.
- [4] Richards, B. G, "Behavior of Unsaturated Soils", *Soil Mechanics– New Horizons*, I. K. Lee, Ed., American Elsevier, New York, 1974 ,157–112.
- [5] L. B. Chen, "Mitochondrial membrane potential in living cells", *Annu. Rev. Cell Biol.*, 4 vol ,1 p1988 ,181–155 .
- [6] J. P. Masekanya, "Stabilité des pentes et saturation partielle-Etude expérimentale et modélisation numérique", Doctorat en sciences de l'ingénieur, UNIVERSITE DE LIEGE, france, 2008.
- [7] D. Hillel, *Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations*. Elsevier, 1998.
- [8] M. Tuller, D. Or, et D. Hillel, "Retention of water in soil and the soil water characteristic curve", *Encycl. Soils Environ.*, 4 p2004 ,289–278 .
- [9] D. R. Snethen, "Characterization of expansive soils using soil suction data", *Expansive Soils*, 1980, p75–54 .
- [10] G. A. Hoston, *The state, identity, and the national question in China and Japan*. Princeton University Press, 1994.
- [11] O Alshihabi, *Étude en laboratoire du comportement d'un sol compacté non saturé: influence des cycles de séchage-humidification*. Thèse doctorat Ecole Polytechnique, Université de Lille, 2002.
- [12] Fredlund, D.G et Rahardjo, H, "Soil Mechanics for unsaturated soils", *Interscience Publication, John Wiley and Sons*, 1993.
- [13] Delage, P ., Howat, M.D., et Cui, Y.J, "The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay", 1998.

- [14] Sayad-Gaidi,C., "Ecoulement dans les milieux poreux peu perméables saturés et non saturés", PhD Thesis, Thèse de Docteur, France, 2003.
- [15] S. K. Vanapalli et J. J. Lane, "A simple technique for determining the shear strength of finegrained unsaturated soils using the conventional direct shear apparatus", *2nd Canadian Specialty Conference on Computer Applications in Geotechnique, Winnipeg*, 2002, p253–245 .
- [16] Ghembaza,, M.S., Taibi, S, et Fleureau, J.M, "Influence of temperature on drying-wetting paths on remoulded sandy clay and on natural argillite", 2007.
- [17] said taibi et nabil ABOU-BEKR, "Cours doctoral sur les sols non saturés". 2015.
- [18] I. GOUAL, "Comportement mécanique et hydrique d'un mélange de tuf et de sable calcaire de la région de Laghouat: Application en construction routière", PhD Thesis, 2012.

Annexes

Tableau 1 : Détermination des caractéristiques des sols par pesées immergées dans de l'huile (Système de pesées au Kerdane) T_{75%} + SD_{25%} + Chaux [0%]

	Mesurées
	calculées

Type de matériau	Tuf + sable
Type de manipulation	retrait-gonflement
Gamma S (g/ cm3)	2.7
Densité de l'huile (g/ cm3)	0.785

	Succion (KPa)	Tare (g)	Ph+tare (g)	Ph+tare+huile immerg (Ph+k imm)	Tare (g)	Ph+tare+huile (Ph+k)	Tare	Ps+tare (g)	Gamma h (KN/m3)	Gamma D (KN/m3)	w (%)	e	Sr (%)	n (%)
C	30.200	0.155	4.629	2.796	0.155	4.496	0.155	3.541	22.29	16.87	49.00	1.00	100.00	50.00
	48.500	0.159	2.132	1.218	0.159	2.154	0.159	1.916	19.57	17.42	49.00	0.98	100.00	49.49
	87.000	0.158	5.186	3.455	0.158	5.177	0.158	3.807	24.75	17.96	47.00	0.98	99.00	49.49
	151.000	0.177	4.357	2.338	0.177	4.132	0.177	3.263	19.91	14.70	49.00	0.97	99.00	49.24
	241.700	0.144	5.925	3.298	0.144	5.873	0.144	4.749	18.31	14.59	45.00	0.94	93.00	48.45
	363.100	14.761	19.258	2.770	14.761	19.245	14.761	18.611	20.20	17.29	40.00	0.91	85.00	47.64
	518.300	0.149	5.472	2.821	0.148	5.453	0.148	4.640	16.50	13.92	35.00	0.80	68.00	44.44
	710.700	13.703	18.486	2.925	13.703	18.481	13.703	17.749	19.88	16.81	32.00	0.75	57.00	42.86
	943.500	0.141	4.884	2.972	0.141	5.201	0.141	4.289	17.49	15.30	27.00	0.71	41.00	41.52
	1220.000	14.497	18.883	2.575	14.497	18.930	14.497	17.634	18.18	13.01	24.00	0.66	60.00	39.76
	4230.000	13.200	18.078	3.108	13.200	18.165	13.198	17.759	20.23	18.92	22.00	0.51	27.00	33.77
	6300.000	0.130	6.103	3.838	0.130	6.394	0.130	5.810	18.95	18.03	18.00	0.50	11.00	33.33
	13700.000	0.128	4.491	2.862	0.128	4.812	0.128	4.399	18.45	18.06	12.00	0.46	12.00	31.51
	29290.000	14.273	17.505	2.132	14.273	17.851	14.273	17.464	17.21	16.99	10.00	0.44	11.00	30.56

ph	30.200	0.147	3.857	2.396	0.147	3.897	0.147	2.803	21.10	15.10	46.00	1.09	100.00	52.15
	48.500	0.163	4.729	2.576	0.163	4.608	0.163	3.572	18.82	14.05	44.00	1.07	99.00	51.69
	87.000	0.156	4.169	1.777	0.156	3.923	0.156	3.591	15.53	13.30	42.00	1.05	99.00	51.22
	151.000	0.173	1.803	0.900	0.177	1.697	0.173	1.348	20.22	14.58	42.00	1.00	98.00	50.00
	241.700	0.150	4.052	2.276	0.150	4.002	0.150	3.256	19.06	15.18	38.00	1.00	94.00	50.00
	363.100	14.761	19.341	2.753	14.761	19.329	14.761	18.530	19.43	15.99	44.00	0.95	90.00	50.74
	518.300	0.139	3.654	1.680	0.137	3.439	0.137	3.211	16.69	14.60	42.00	0.93	77.00	48.19
	710.700	13.703	19.510	3.375	13.703	19.422	13.703	18.579	19.07	16.02	41.00	0.90	75.00	47.37
	943.500	0.146	3.003	2.048	0.146	3.030	0.146	2.708	26.33	23.61	39.00	0.86	55.00	46.24
	1220.000	14.497	20.856	3.670	14.497	20.513	14.497	19.630	20.87	16.84	34.00	0.76	44.00	43.18
	4230.000	12.669	18.145	3.357	12.669	18.608	12.669	17.494	16.33	14.39	31.00	0.61	35.00	37.89
	6300.000	0.128	3.820	2.389	0.128	4.342	0.128	3.600	15.58	14.65	22.00	0.55	14.00	35.48
	13700.000	0.130	3.730	2.362	0.130	4.302	0.130	3.594	15.32	14.74	10.00	0.53	12.00	34.64
29290.000	14.772	21.138	4.133	14.772	21.999	14.772	20.953	15.84	15.38	6.00	0.49	12.00	32.89	
ps	30.200	0.155	3.936	2.057	0.155	3.863	0.155	2.967	17.63	13.11	55.00	1.03	97.00	50.00
	48.500	0.166	3.788	2.156	0.166	3.921	0.166	3.379	17.45	15.47	55.00	1.00	96.00	48.98
	87.000	0.148	3.329	1.977	0.148	3.112	0.148	2.465	24.81	18.07	54.00	0.96	96.00	47.37
	151.000	0.162	3.818	2.021	0.162	3.474	0.162	2.735	21.81	15.35	53.00	0.90	95.00	45.65
	241.700	0.150	3.961	2.003	0.150	3.923	0.150	3.108	16.58	12.87	51.00	0.84	90.00	48.72
	363.100	14.761	18.390	2.161	14.761	18.276	14.761	17.509	20.65	15.64	47.00	0.72	81.00	41.86
	518.300	0.139	3.246	1.632	0.138	2.953	0.138	2.845	20.23	17.62	41.00	0.64	60.00	39.02
	710.700	13.703	17.580	2.227	13.703	17.198	13.703	16.842	23.54	19.06	35.00	0.54	36.00	35.06
	943.500	0.140	3.218	1.830	0.140	3.040	0.140	2.987	22.17	20.50	27.00	0.53	39.00	34.64
	1220.000	14.497	18.212	2.122	14.497	17.748	14.500	17.382	25.34	19.66	22.00	0.47	41.00	31.97
	4230.000	14.079	17.579	2.172	14.079	17.718	14.079	17.108	18.37	15.90	20.00	0.45	14.00	31.03
	6300.000	0.130	3.939	2.408	0.130	4.207	0.130	3.601	17.57	16.01	14.00	0.43	11.00	30.07
	13700.000	0.138	3.509	2.170	0.138	3.947	0.238	3.263	15.84	14.21	8.00	0.42	10.00	29.58
29290.000	0.213	3.503	2.201	0.213	3.917	0.313	3.243	16.85	15.01	4.00	0.40	10.00	28.57	

Tableau 2 : Détermination des caractéristiques des sols par pesées immergées dans de l'huile (Système de pesées au Kerdane) T_{75%} + SD_{25%} + Chaux [3%]

	Mesurées
	calculées

Type de matériau	Tuf + sable + chaux [3%]
Type de manipulation	retrait-gonflement
Gamma S (g/ cm3)	2.7
Densité de l'huile (g/ cm3)	0.785

	Succion	Tare (g)	Ph+tare (g)	Ph+tare+huile _imm (Ph+k imm)	Tare (g)	Ph+tare+huile (Ph+k)	Tare	Ps+tare (g)	Gamma h (KN/m3)	Gamma D (KN/m3)	w (%)	e	Sr (%)	n (%)
C	30.200	0.156	4.898	2.829	0.156	4.824	0.156	3.995	19.85	16.07	55.00	0.73	100.00	42.20
	48.500	0.184	4.886	2.900	0.184	4.931	0.184	4.354	19.59	17.38	53.00	0.73	99.50	42.20
	87.000	0.151	4.814	2.786	0.151	4.801	0.151	3.922	19.27	15.58	50.00	0.71	98.00	41.52
	151.000	0.172	4.937	2.609	0.172	4.389	0.172	3.437	22.82	15.64	49.00	0.70	96.00	41.18
	241.700	0.149	4.955	2.960	0.149	4.955	0.149	4.253	20.04	17.12	42.00	0.61	90.00	37.89
	363.100	14.135	17.881	2.179	14.135	17.850	14.135	17.186	18.78	15.30	38.00	0.54	61.00	35.06
	518.300	0.148	5.472	3.267	0.148	5.453	0.148	4.670	20.12	17.09	33.00	0.50	44.00	33.33
	710.700	13.868	18.717	2.850	13.869	18.619	13.869	17.845	19.65	16.11	24.00	0.46	55.00	31.51
	943.500	0.140	4.553	2.752	0.140	4.665	0.140	4.068	19.17	17.07	22.00	0.41	45.00	29.08
	1220.000	12.311	17.247	2.836	12.311	17.199	12.311	16.266	18.53	14.84	18.00	0.37	33.00	27.01
	4230.000	14.760	18.622	2.468	14.760	18.646	14.760	18.031	20.97	17.76	14.00	0.34	16.00	25.37
	6300.000	0.133	5.492	3.370	0.133	5.727	0.133	5.098	18.56	17.19	10.00	0.33	10.00	24.81
	13700.000	0.134	4.711	2.989	0.134	5.133	0.134	4.615	17.53	17.16	6.00	0.33	11.00	24.81
	29290.000	0.102	3.507	2.251	0.102	3.886	0.102	3.464	17.12	16.90	4.00	0.32	11.00	24.24

ph	30.200	0.155	3.370	2.707	0.155	3.867	0.155	3.294	24.62	24.04	51.00	1.24	100.00	55.36
	48.500	0.161	5.533	3.019	0.161	5.524	0.161	4.212	17.65	13.31	51.00	1.22	98.88	54.95
	87.000	0.155	3.317	1.781	0.158	3.034	0.155	2.978	22.24	19.86	48.00	1.20	98.50	54.55
	151.000	0.149	5.899	3.158	0.149	5.526	0.149	4.212	19.95	14.10	41.00	1.14	95.00	53.27
	241.700	0.152	3.451	1.894	0.152	3.211	0.152	2.526	21.82	15.70	36.00	1.08	88.00	51.92
	363.100	14.135	19.709	3.207	14.135	19.250	14.135	18.484	22.50	17.56	35.00	1.04	71.00	50.98
	518.300	0.137	3.654	2.035	0.137	3.439	0.137	3.011	21.37	17.46	33.00	0.91	70.00	47.64
	710.700	13.868	19.368	3.095	13.868	19.026	13.868	18.227	20.54	16.28	27.00	0.87	49.00	46.52
	943.500	0.148	2.970	2.036	0.148	3.072	0.148	2.538	24.46	20.71	24.00	0.81	55.00	44.75
	1220.000	12.311	18.406	3.421	12.311	18.013	12.311	17.543	20.58	17.66	21.00	0.76	38.00	43.18
	4230.000	14.593	21.806	4.461	14.593	22.446	14.593	20.824	16.37	14.14	16.00	0.61	12.00	37.89
	6300.000	0.130	3.160	1.871	0.130	3.474	0.130	2.681	15.84	13.34	12.00	0.55	14.00	35.48
	13700.000	0.130	2.913	1.776	0.130	3.303	0.130	2.376	15.33	12.38	10.00	0.50	12.00	33.33
	29290.000	0.123	6.305	3.800	0.123	6.868	0.123	5.408	16.16	13.82	6.00	0.48	12.00	32.43
ps	30.200	0.156	3.864	2.072	0.156	3.855	0.156	2.908	17.55	13.02	50.00	1.06	94.00	51.46
	48.500	0.172	3.647	2.078	0.172	3.811	0.172	3.208	17.14	14.98	49.00	1.00	94.00	50.00
	87.000	0.153	3.880	2.205	0.153	4.009	0.153	2.524	17.38	11.06	42.00	0.96	91.00	48.98
	151.000	0.151	3.514	1.935	0.151	3.471	0.151	2.806	18.69	14.76	36.00	0.90	85.00	47.37
	241.700	0.146	3.987	2.230	0.146	4.011	0.146	3.219	18.09	14.48	31.00	0.84	72.00	45.65
	363.100	14.135	17.537	2.045	14.135	17.173	14.135	17.145	26.38	23.34	27.00	0.81	78.00	44.75
	518.300	0.138	3.246	1.812	0.138	3.253	0.138	2.645	18.36	14.81	23.00	0.70	50.00	41.18
	710.700	13.868	17.839	2.301	13.868	17.789	13.868	17.086	18.88	15.30	20.00	0.65	44.00	39.39
	943.500	0.144	3.122	2.094	0.144	3.365	0.144	2.812	20.36	18.24	16.00	0.59	38.00	37.11
	1220.000	12.311	16.052	2.160	12.311	15.906	12.311	15.527	20.08	17.26	14.00	0.52	24.00	34.21
	4230.000	12.312	15.321	1.907	12.312	15.662	12.312	15.047	16.06	14.60	14.00	0.45	13.00	31.03
	6300.000	0.128	3.483	2.098	0.128	3.910	0.128	3.325	15.35	14.63	8.00	0.41	11.00	29.08
	13700.000	0.135	3.156	1.784	0.135	3.296	0.135	2.799	16.90	14.91	10.00	0.39	10.00	28.06
	29290.000	0.172	2.837	1.727	0.172	3.261	0.172	2.802	15.07	14.87	4.00	0.33	10.00	24.81

Tableau 3 : Détermination des caractéristiques des sols par pesées immergées dans de l'huile (Système de pesées au Kerdane) T_{75%} + SD_{25%} + Chaux [6%]

	Mesurées
	calculées

Type de matériau	Tuf + sable + chaux [6%]
Type de manipulation	retrait-gonflement
Gamma S (g/ cm3)	2.7
Densité de l'huile (g/ cm3)	0.785

	Succion (KPa)	Tare (g)	Ph+tare (g)	Ph+tare+huile e_imm (Ph+k imm)	Tare (g)	Ph+tare+huile (Ph+k)	Tare	Ps+tare (g)	Gamma h (KN/m3)	Gamma D (KN/m3)	w (%)	E	Sr (%)	n (%)
C	30.200	0.151	5.353	3.153	0.151	5.352	0.151	4.475	19.56	16.26	41.00	1.33	100.00	57.08
	48.500	0.164	4.448	2.548	0.164	4.408	0.164	3.696	19.44	16.03	41.00	1.31	99.00	56.71
	87.000	0.129	5.370	3.123	0.129	5.353	0.129	4.430	19.20	15.76	40.00	1.27	98.00	55.95
	151.000	0.128	3.324	1.737	0.128	3.085	0.128	2.460	20.17	14.72	39.00	1.20	95.00	54.55
	241.700	0.150	5.986	3.585	0.150	6.017	0.150	5.220	19.70	17.11	39.00	1.09	93.00	52.15
	363.100	13.713	18.001	2.539	13.713	17.994	13.713	17.278	18.96	15.76	39.00	0.93	81.00	48.19
	518.300	0.133	4.806	2.917	0.133	5.206	0.133	4.376	16.69	15.16	36.00	0.79	41.00	44.13
	710.700	14.592	19.657	3.023	14.592	20.103	14.592	18.642	15.68	12.54	33.00	0.65	65.00	39.39
	943.500	0.144	4.759	3.307	0.144	5.971	0.144	4.076	14.10	12.01	27.00	0.56	44.00	35.90
	1220.000	12.668	16.949	2.401	12.668	17.418	12.668	16.066	14.03	11.14	22.00	0.51	23.00	33.77
	4230.000	14.697	19.239	2.948	14.697	19.526	14.697	19.017	18.60	17.69	14.00	0.47	14.00	31.96
	6300.000	0.124	4.816	2.972	0.124	5.052	0.124	4.527	18.47	17.33	12.00	0.43	11.00	30.07
	13700.000	0.141	5.080	3.324	0.141	5.548	0.141	5.018	18.26	18.03	10.00	0.42	10.00	29.58
	29290.000	0.177	4.148	2.649	0.177	4.539	0.177	4.104	17.85	17.65	10.00	0.41	10.00	29.08

ph	30.200	0.161	3.643	2.019	0.161	3.849	0.161	2.669	16.06	11.56	48.00	1.25	100.00	55.56
	48.500	0.180	7.151	3.974	0.180	7.320	0.180	5.435	16.96	12.79	47.00	1.25	99.00	55.56
	87.000	0.138	3.595	1.918	0.138	3.571	0.138	2.594	17.57	12.48	47.00	1.20	98.00	54.55
	151.000	0.135	6.202	3.367	0.135	5.968	0.135	4.586	18.95	13.90	47.00	1.10	96.00	52.38
	241.700	0.140	3.432	1.908	0.140	3.418	0.140	2.722	18.51	14.52	46.00	0.98	93.00	49.49
	363.100	13.713	18.589	2.796	13.713	18.556	13.713	17.490	18.34	14.20	43.00	0.88	90.00	46.81
	518.300	0.137	3.513	2.355	0.137	3.926	0.137	3.054	18.13	15.67	33.00	0.78	77.00	43.82
	710.700	14.592	20.202	3.154	14.592	20.072	14.592	18.837	18.57	14.05	24.00	0.65	70.00	39.39
	943.500	0.147	3.170	2.145	0.147	3.655	0.147	2.809	17.08	15.04	18.00	0.55	45.00	35.48
	1220.000	12.668	18.254	3.233	12.668	18.039	12.668	17.586	20.12	17.72	14.00	0.47	23.00	31.85
	4230.000	14.136	20.374	3.984	14.136	20.659	14.136	18.822	18.92	14.21	10.00	0.32	14.00	24.24
	6300.000	0.127	2.916	1.675	0.127	3.377	0.127	2.051	13.64	9.41	9.00	0.27	12.00	21.26
	13700.000	0.139	2.773	1.641	0.139	3.425	0.139	2.247	12.33	9.87	8.00	0.25	12.00	20.00
	29290.000	0.212	6.628	4.183	0.212	7.558	0.212	5.879	15.62	13.80	6.00	0.24	12.00	19.35
ps	30.200	0.170	3.801	2.018	0.170	3.765	0.170	2.810	17.72	12.88	51.00	1.02	96.00	50.44
	48.500	0.163	3.537	1.963	0.163	3.618	0.163	3.018	17.41	14.73	51.00	1.00	95.00	50.00
	87.000	0.139	3.491	2.224	0.139	3.489	0.139	2.766	22.93	17.97	51.00	0.99	95.00	49.75
	151.000	0.127	3.268	1.884	0.127	3.454	0.127	2.919	16.76	14.90	49.00	0.92	94.00	47.92
	241.700	0.130	3.789	2.367	0.130	3.792	0.130	2.985	21.76	16.98	41.00	0.81	77.00	44.75
	363.100	13.713	17.031	1.982	13.713	17.539	13.713	16.531	13.85	11.76	36.00	0.73	79.00	42.20
	518.300	0.138	3.346	1.895	0.138	3.392	0.138	3.010	18.18	16.28	33.00	0.60	45.00	37.39
	710.700	14.592	18.114	2.109	14.592	18.253	14.592	17.841	17.48	16.13	30.00	0.50	38.00	33.33
	943.500	0.159	3.046	1.731	0.159	3.067	0.159	2.971	18.89	18.39	26.00	0.41	26.00	29.24
	1220.000	12.668	15.914	1.939	12.668	16.008	12.668	15.757	17.84	16.98	21.00	0.32	14.00	24.24
	4230.000	14.500	17.572	1.975	14.500	18.047	14.500	17.117	15.05	12.82	19.00	0.22	8.00	18.03
	6300.000	0.131	2.918	1.681	0.131	3.271	0.131	2.545	14.71	12.74	14.00	0.21	9.50	17.36
	13700.000	0.139	3.160	1.883	0.139	3.575	0.139	2.940	14.97	13.88	12.00	0.20	10.00	16.67
	29290.000	0.164	3.676	2.281	0.164	4.051	0.164	3.438	16.84	15.70	8.00	0.20	10.00	16.67

Tableau 4 : Détermination des caractéristiques des sols par pesées immergées dans de l'huile (Système de pesées au Kerdane) T_{75%} + SD_{25%} + Chaux [9%]

	Mesurées
	calculées

Type de matériau	Tuf + Sable + Chaux [9%]
Type de manipulation	retrait-gonflement
Gamma S (g/ cm3)	2.7
Densité de l'huile (g/ cm3)	0.785

	Succion (KPa)	Tare (g)	Ph+tare (g)	Ph+tare+huile immerg (Ph+k imm)	Tare (g)	Ph+tare+huile (Ph+k)	Tare	Ps+tare (g)	Gamma h (KN/m3)	Gamma D (KN/m3)	w (%)	e	36.00	n (%)
C	30.200	0.159	4.976	2.865	0.159	4.966	0.159	4.361	19.11	16.67	49.00	0.69	100.00	40.83
	48.500	0.168	4.329	2.538	0.168	4.366	0.168	3.914	19.30	17.37	49.00	0.65	100.00	39.39
	87.000	0.150	4.831	2.908	0.150	4.846	0.150	4.258	20.17	17.70	49.00	0.64	100.00	39.02
	151.000	0.152	2.940	1.555	0.132	2.693	0.132	2.327	21.34	16.80	44.00	0.61	96.00	37.89
	241.700	0.141	4.888	2.894	0.141	4.892	0.141	4.156	19.68	16.65	41.00	0.56	90.00	35.90
	363.100	13.198	15.113	1.144	13.198	15.134	13.198	14.869	18.63	16.26	39.00	0.50	65.00	33.33
	518.300	0.140	5.592	3.391	0.140	5.709	0.140	5.109	19.28	17.57	39.00	0.45	51.00	31.03
	710.700	14.080	16.900	1.737	14.080	16.962	14.080	16.617	18.97	17.07	34.00	0.41	53.00	29.08
	943.500	0.149	4.961	3.009	0.149	5.085	0.149	4.454	19.23	17.20	28.00	0.40	66.00	28.57
	1220.000	14.697	20.145	3.378	14.497	20.254	14.697	19.456	17.64	15.41	21.00	0.37	52.00	27.01
	4230.000	14.804	17.257	1.571	14.804	17.417	14.804	17.217	18.12	17.83	15.00	0.33	13.00	24.81
	6300.000	0.127	4.874	3.083	0.127	5.210	0.127	4.661	18.28	17.45	14.00	0.32	9.50	24.24
	13700.000	0.138	4.844	3.091	0.138	5.304	0.138	4.789	17.46	17.25	10.00	0.33	10.00	24.81
	29290.000	0.141	2.152	1.330	0.141	2.372	0.141	2.027	17.18	16.11	6.00	0.33	10.00	24.81

ph	30.200	0.152	3.175	1.737	0.152	4.179	0.152	2.467	10.17	7.78	46.00	1.14	100.00	53.27
	48.500	0.167	4.075	2.247	0.167	4.176	0.167	3.070	17.09	12.69	45.00	1.10	100.00	52.38
	87.000	0.143	3.458	1.909	0.143	3.465	0.143	2.052	18.07	10.41	45.00	1.10	100.00	52.38
	151.000	0.122	7.227	3.918	0.122	7.011	0.122	5.475	18.41	13.87	45.00	1.07	98.00	51.69
	241.700	0.145	3.298	1.811	0.145	3.295	0.145	2.460	18.13	13.31	44.00	1.00	95.00	50.00
	363.100	13.198	17.473	2.454	13.198	17.481	13.198	16.511	18.00	13.95	40.00	0.98	90.00	49.49
	518.300	0.148	3.516	1.946	0.148	3.746	0.148	3.046	15.70	13.51	39.00	0.94	61.00	48.45
	710.700	14.080	18.453	2.548	14.080	18.769	14.080	17.827	15.73	13.47	33.00	0.91	48.00	47.64
	943.500	0.158	3.262	1.816	0.158	3.524	0.158	2.836	15.43	13.31	31.00	0.84	46.00	45.65
	1220.000	14.693	18.708	2.388	14.697	18.886	14.697	18.246	17.17	15.18	27.00	0.78	36.00	43.82
	4230.000	13.715	21.120	4.743	13.715	21.062	13.715	20.814	21.89	20.99	23.00	0.72	16.00	41.86
	6300.000	0.123	3.428	1.992	0.123	3.945	0.123	3.079	13.91	12.44	18.00	0.70	13.00	41.18
	13700.000	0.142	3.131	1.859	0.142	3.723	0.142	2.917	13.37	12.41	12.00	0.66	12.00	39.76
29290.000	0.169	8.578	5.472	0.169	10.385	0.169	8.022	13.65	12.75	8.00	0.63	12.00	38.65	
ps	30.200	0.155	3.474	1.860	0.155	3.445	0.155	2.630	17.88	13.33	50.00	1.00	97.00	50.00
	48.500	0.175	4.186	2.311	0.175	4.261	0.175	3.401	17.39	13.99	51.00	1.00	96.00	50.00
	87.000	0.154	3.616	1.990	0.154	3.605	0.154	2.819	18.24	14.04	49.00	0.98	96.00	49.49
	151.000	0.118	4.213	2.359	0.118	4.145	0.118	3.257	18.91	14.50	46.00	0.93	92.00	48.19
	241.700	0.149	3.492	1.890	0.149	3.490	0.149	2.916	17.74	14.68	45.00	0.86	91.00	46.24
	363.100	13.198	17.121	2.187	13.198	17.165	13.198	16.549	16.96	14.49	43.00	0.82	61.00	45.05
	518.300	0.146	3.288	1.746	0.146	3.546	0.146	2.600	14.63	11.43	42.00	0.77	44.00	43.50
	710.700	14.080	18.028	2.253	14.080	18.134	14.080	17.511	16.88	14.67	34.00	0.75	36.00	42.86
	943.500	0.146	2.774	1.553	0.146	2.958	0.146	2.674	16.07	15.46	28.00	0.71	35.00	41.52
	1220.000	14.697	18.170	2.071	14.697	18.336	14.697	17.976	17.06	16.10	24.00	0.70	33.00	41.18
	4230.000	13.818	17.477	2.343	13.818	17.995	13.818	17.046	15.36	13.55	19.00	0.62	13.00	38.27
	6300.000	0.125	3.189	1.908	0.125	3.717	0.125	3.022	14.01	13.25	14.00	0.61	11.00	37.89
	13700.000	0.132	3.303	2.000	0.132	3.945	0.132	3.208	13.47	13.07	12.00	0.60	10.00	37.50
29290.000	0.098	3.334	2.012	0.098	3.829	0.098	3.114	14.49	13.51	8.00	0.58	9.50	36.71	

Tableau 5 : Détermination des caractéristiques des sols par pesées immergées dans de l'huile (Système de pesées au Kerdane) T_{75%} + SD_{25%} + Chaux [12%]

	Mesurées
	calculées

Type de matériau	Tuf + Sable + Chaux [12%]
Type de manipulation	retrait-gonflement
Gamma S (g/ cm3)	2.7
Densité de l'huile (g/ cm3)	0.785

	Succion (KPa)	Tare (g)	Ph+tare (g)	Ph+tare+huile_ immerg (Ph+k imm)	Tare (g)	Ph+tare+huile (Ph+k)	Tare	Ps+tare (g)	Gamma h (KN/m3)	Gamma D (KN/m3)	w (%)	e	Sr (%)	n (%)
C	30.200	0.152	4.802	2.796	0.152	4.982	0.152	3.954	17.60	14.39	47.00	0.81	100.00	44.64
	48.500	0.179	4.130	2.392	0.179	4.129	0.179	3.624	19.53	17.03	47.00	0.80	100.00	44.44
	87.000	0.150	6.198	3.755	0.150	6.020	0.150	4.904	22.02	17.31	47.00	0.80	97.00	44.44
	151.000	0.121	5.221	2.965	0.121	5.074	0.121	4.542	19.75	17.12	46.00	0.77	96.00	43.50
	241.700	0.138	5.544	3.358	0.138	5.550	0.138	4.719	20.27	17.17	44.00	0.75	90.00	42.86
	363.100	14.805	20.051	3.241	14.805	20.120	14.805	19.511	19.48	17.47	42.00	0.70	71.00	41.18
	518.300	0.139	4.618	2.821	0.139	4.743	0.139	4.261	19.35	17.80	43.00	0.65	66.00	39.39
	710.700	14.017	18.367	2.569	14.017	18.352	14.017	17.625	18.97	15.73	37.00	0.60	44.00	37.50
	943.500	0.141	4.884	2.952	0.141	5.001	0.141	4.489	19.14	17.55	34.00	0.52	35.00	34.21
	1220.000	13.819	18.157	2.584	13.819	18.325	13.819	17.518	17.37	14.81	24.00	0.46	36.00	31.51
	4230.000	14.016	18.454	2.891	14.016	18.748	14.016	18.244	18.55	17.68	18.00	0.41	14.00	29.08
	6300.000	0.131	5.162	3.459	0.131	5.544	0.131	4.774	19.83	18.30	15.00	0.41	11.50	29.08
	13700.000	0.126	5.042	3.247	0.126	5.553	0.126	5.006	17.37	17.24	10.00	0.40	11.00	28.57
	29290.000	0.106	3.970	2.666	0.106	4.421	0.106	3.940	18.04	17.90	6.00	0.38	11.00	27.54

Annexes

ph	30.200	0.150	4.131	2.396	0.150	4.283	0.150	3.061	17.65	12.91	49.00	1.20	100.00	54.55
	48.500	0.147	3.109	1.701	0.147	3.108	0.147	2.301	18.11	13.16	48.00	1.18	99.00	54.13
	87.000	0.147	3.410	1.777	0.147	3.320	0.147	2.504	18.00	13.00	49.00	1.14	98.00	53.27
	151.000	0.103	6.032	3.414	0.103	6.023	0.103	4.763	18.22	14.32	46.00	1.12	95.00	52.83
	241.700	0.144	3.917	2.276	0.144	4.200	0.144	3.247	16.32	13.42	44.00	1.05	88.00	51.22
	363.100	14.805	20.824	3.433	14.805	20.858	14.805	19.696	17.69	14.37	41.00	1.00	71.00	50.00
	518.300	0.139	3.110	1.780	0.139	3.198	0.139	2.659	17.89	15.18	39.00	0.94	38.00	48.45
	710.700	14.016	19.156	2.982	14.017	19.240	14.017	18.154	17.65	14.21	39.00	0.90	41.00	47.37
	943.500	0.146	3.003	2.148	0.146	3.330	0.146	2.308	21.25	16.08	36.00	0.84	42.00	45.65
	1220.000	13.819	17.568	2.356	13.819	17.555	13.819	16.963	20.91	17.54	31.00	0.82	23.00	45.05
	4230.000	13.704	20.937	4.466	13.704	22.032	13.704	20.317	14.42	13.19	25.00	0.62	15.00	38.27
	6300.000	0.132	3.454	2.132	0.132	3.978	0.132	3.062	14.93	13.17	17.00	0.59	13.50	37.11
	13700.000	0.132	3.399	2.033	0.132	4.024	0.132	3.383	13.53	13.46	12.00	0.57	12.00	36.31
	29290.000	0.114	5.230	3.329	0.114	6.352	0.114	5.187	13.54	13.43	10.00	0.58	12.00	36.71
ps	30.200	0.145	3.774	2.157	0.145	3.765	0.145	2.909	19.10	14.54	47.00	1.17	97.00	53.92
	48.500	0.175	3.683	2.010	0.175	3.697	0.175	3.051	17.86	14.65	47.00	1.12	95.00	52.83
	87.000	0.148	3.582	1.977	0.149	3.591	0.149	2.818	18.05	14.03	47.00	1.11	93.00	52.61
	151.000	0.107	4.307	2.450	0.107	4.303	0.107	3.471	18.53	14.84	44.00	1.05	90.00	51.22
	241.700	0.140	3.598	2.003	0.140	3.611	0.140	2.880	18.14	14.37	43.00	0.96	80.00	48.98
	363.100	14.805	18.274	2.043	14.805	18.398	14.805	17.806	17.23	14.91	40.00	0.83	51.00	45.36
	518.300	0.139	2.913	1.732	0.139	3.011	0.139	2.539	18.74	16.21	36.00	0.66	44.00	39.76
	710.700	14.017	17.334	2.191	14.017	17.552	14.017	16.893	19.00	16.48	32.00	0.58	28.00	36.62
	943.500	0.140	3.218	1.990	0.140	3.440	0.140	2.887	18.10	16.16	31.00	0.55	13.00	35.48
	1220.000	13.819	17.185	2.141	13.819	17.133	13.819	16.554	22.10	17.96	27.00	0.50	12.00	33.33
	4230.000	13.868	17.229	2.151	13.868	17.689	13.868	17.129	15.50	15.03	22.00	0.50	24.00	33.33
	6300.000	0.131	3.363	2.035	0.131	3.953	0.131	3.289	13.93	13.61	16.00	0.49	11.00	32.89
	13700.000	0.119	2.607	1.754	0.119	3.092	0.119	2.488	15.71	14.97	12.00	0.50	9.00	33.33
	29290.000	0.136	3.144	1.959	0.136	3.646	0.136	3.120	14.94	14.82	8.00	0.52	9.50	34.21