

université Mohamed khider-Biskra

Faculté des science et de la technologie

Département de Génie Civil et d'Hydraulique

جامعة محمد خيضر-بسكرة

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم الهندسة المدنية والري



Mémoire de Master

Spécialité : Géotechnique

Thème :

Proposition d'un nouveau modèle décrivant les courbes de rétention d'eau d'un matériau granulaire

Etudiant :

Melle. Amri Meriem

Encadrant :

Mme. Bouacida Linda

Promotion: septembre 2020

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

*Mes parents qui ont toujours été derrière moi et qui m'ont
toujours encouragé dans mon travail.*

*Mes très chères sœurs pour leur soutien dans la réalisation
de ce mémoire.*

*Mes amis pour leur encouragement et pour tous les bons
moments qu'on a vécus ensemble.*

A tous ceux qui m'aiment ...

Remerciements

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mme. Bouacida Linda, on la remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire, pour ces idées brillantes et pour son aide à la réalisation de certaines expériences.

Un grand remerciement à Dr. Feia Sadok qui m'a apporté un soutien considérable. Je le remercie pour ses idées précieuses et les échanges fructueux qu'on a eus.

Je tiens à remercier mes chers amis et collègues notamment Raïal Nour El Houda , Bekhlili Sabrina et Hamza Ghelassa.

Et, enfin, j'adresse toute ma gratitude à ma chère famille, et très particulièrement ma mère, pour leurs encouragements et soutien permanents.

Amri Meriem

Résumé

Les propriétés hydrauliques des sols non saturés sont indispensables pour traiter les problèmes d'écoulement et transfert de masse à travers les sols. L'une des propriétés hydrauliques essentielle est la courbe de rétention d'eau du sol. Les mesures directes de cette propriété sont coûteuses et longues ; en conséquence des modèles sont développés pour la prédire sur la base des indices texturaux du sol.

La présente recherche a pour objectif de proposer un nouveau modèle décrivant les courbes de rétention d'eau d'un matériau granulaire pour onze sols. La méthode tensiométrique a été appliquée dans ce mémoire. Cette méthode consiste à augmenter par palier la succion régnant au sein de l'éprouvette et à mesurer les variations correspondantes de la teneur en eau.

Les résultats expérimentaux obtenus ont permis de caler les paramètres hydrodynamiques sur le modèle de van Genuchten (1980).

Mots-clés : Milieu poreux, succion du sol, sols non saturés, courbe de rétention d'eau.

Abstract

The hydraulic properties of unsaturated soils are essential to address flow and mass transfer problems through soils. One of the essential hydraulic properties is the soil water retention curve. Direct measurements of this property are expensive and time consuming; consequently models are developed to predict it on the basis of the textural indices of the soil.

The present research aims to propose a new model describing the water retention curves of a granular material for eleven soils. The tensiometric method was applied in this thesis. This method consists in gradually increasing the suction prevailing in the test tube and in measuring the corresponding variations in the water content.

The experimental results obtained made it possible to fix the hydrodynamic parameters on the model of van Genuchten (1980).

Keywords: Porous medium, soil suction, unsaturated soils, water retention curve

Liste des Figures

Figure.1.1. Aspect de l'espace poreux	4
Figure.1.2. Différents états de l'eau dans le sol	5
Figure.1.3.Principe de la plaque tensiométrique (faibles succions) (Technique de l'ingénieur 2012)	7
Figure.1.4.Cellule de Richards pour le contrôle de succion par translation d'axe (Technique de l'ingénieur 2012)	8
Figure.1.5. Mise en œuvre de la technique Osmotique (Technique de l'ingénieur 2012)	8
Figure.1.6.Contrôle de succion par phase vapeur (Technique de l'ingénieur 2012).....	9
Figure.1.7.Principe de la mesure de la succion par tensiométrie (Technique de l'ingénieur 2012)	9
Figure.1.8.Méthode du papier-filtre (Technique de l'ingénieur 2012)	10
Figure.2.1. Vue des onze types de sable étudiés	14
Figure.2.2. Analyse granulométrique.....	14
Figure.2.3. Courbes granulométriques des matériaux étudiés.....	15
Figure 2.4. Courbe granulométrique (source internet).....	15
Figure .2.5.Préparation l'indice des vides maximum.....	16
Figure .2.6.Préparation l'indice des vides minimum.....	17
Figure .2.7.Schéma explicatif des processus de séchage et mouillage dans le réseau poreux constitué de cylindres de rayon r , (r_m est le rayon du ménisque de l'interface air-eau) (d'après Do, 1998).....	20
Figure 2.8. Schéma de principe de la méthode tensiométrique de mesure de la succion (Feia et al. 2012).....	21
Figure.2.9. Saturation de la pierre céramique.....	21
Figure .2.10. Procédure de montage pour la réalisation d'un essai tensiométrique.....	22
Figure.2.11.Vue général de dispositif.....	22
Fig.3.1. Courbe de rétention d'eau de sables relativement uniformes.....	27
Figure.3.2.Les courbes de rétention d'eau de tous les tests effectués (Feia et. 2014).....	30
Figure 3.3. Calage de la loi de Van Genuchten sur les courbes de rétention d'eau.....	31
Figure.3.4.Évolution du paramètre « α * » en fonction de l'indice de densité ID.....	32
Figure.3.5.Évolution du paramètre « n » en fonction de l'indice de densité ID.....	33

Liste des Tableaux

Tableau 2.1. Caractéristiques des sables utilisés	17
Le Tableau 3-1 présente l'indice de densité et la masse de l'éprouvette	28
Tableau.3.2 Valeurs des paramètres du nouveau modèle pour les sept types de sable	32

Sommaire

Liste des Tableaux.....	II
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	2
1.1 Introduction.....	3
1.2 Milieux poreux	3
1.2.1 Définition du milieu poreux	3
1.2.2 Etat de l'eau dans les milieux poreux.....	3
1.2.2.1 Eau libre	3
1.2.2.2 Eau liée (eau de rétention).....	4
1.2.2.3 Eau capillaire	4
1.3 La succion des sols non saturés.....	5
1.3.1 Définition	5
1.3.2 Les différents types de la succion.....	5
1.3.2.1 Succion matricielle.....	5
1.3.2.1.1 Succion capillaire	5
1.3.2.1.2 Succion d'adsorption	5
1.3.2.2 Succion osmotique.....	6
1.3.2.3 Succion totale	6
1.3.3. Techniques de contrôle et de mesure de la succion	6
1.3.3.1 Techniques de contrôle de la succion.....	6
1.3.3.1.1 Contrôle par plaque tensiométrique	6
1.3.3.1.2 Contrôle par « translation d'axes ».....	7
1.3.3.1.3 Technique de contrôle osmotique.....	7
1.3.3.1.4 Technique de contrôle par phase vapeur	8
1.3.3.2 techniques de mesure de la succion.....	8
1.3.3.2.1 Mesure tensiométrique de la succion :.....	8
1.3.3.2.3 Méthode du papier-filtre	9
1.4 Courbe de succion ou de rétention d'eau	9
CHAPITRE 2. DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET MATERIAUX ETUDIES	11
2.1 Introduction.....	12

2.2 Description des matériaux étudiés	12
2.3 Caractérisation générale du matériau	12
2.3.1 L'analyse granulométrique	13
2.3.1.1 L'analyse granulométrique par tamisage.....	13
2.3.1.2 L'analyse granulométrique par sédimentation	14
2.3.2 Indice des vides maximum et minimum	15
2.3.2.1 L'indice des vides maximum :.....	15
2.3.2.2 L'indice des vides minimum	15
2.4 Dispositif et procédure de mesure de la distribution de la taille d'accès aux pores	17
2.5 Principe de la méthode	17
2.6 Matériels et procédure d'essai	18
2.6.2 Procédure de l'essai : description d'essai tensiométrique	20
2.7 Conclusion	21
CHAPITRE 3. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION	22
3.1 Introduction	23
3.2 Analyse théorique de la relation entre WRC et PSD	23
3.2.1 Courbe de rétention d'eau dans le modèle de van Genuchten	23
3.2.2 Analyse dimensionnelle de la relation.....	24
3.2.3 Deux conditions extrêmes	25
3.3 Estimation du WRC à partir C_u et d_{60}	25
3.3.1 Les tests supplémentaires de rétention d'eau.....	25
3.4 Résultats et discussions	26
3.4.1. Courbe de rétention	27
3.4.2 Calage du modèle sur les résultats expérimentaux	28
3.4.3 Évolution du paramètre α * et n en fonction de l'indice de densité ID	31
3.5 Conclusion	32
Conclusion générale	33
Références bibliographique	35
ANNEXES	37

INTRODUCTION GENERALE

Le comportement d'un sol partiellement saturé est généralement très différent de celui d'un sol saturé. Pour caractériser le comportement hydromécanique des sols partiellement saturés à l'échelle macroscopique, il est alors indispensable de comprendre les phénomènes physiques se produisant à l'échelle des grains

Les modèles qui simulent l'écoulement de l'eau à travers les sols non saturés ont été largement développés et adoptés avec un certain succès dans le domaine des sciences du sol. L'application de ces modèles est néanmoins subordonnée à la disponibilité des propriétés hydrauliques. Plus particulièrement, deux caractéristiques doivent être déterminées: la relation entre la teneur en eau et la succion, nommée communément la courbe de rétention d'eau du sol.

Les courbes de rétention contiennent des variables très importantes, résumées par les succions d'entrée d'air et résiduelle, ainsi que leurs valeurs respectives de teneur en eau et/ou de degré de saturation. Elles peuvent être estimées selon différentes procédures [VAN 98] et [ZHA12].

Bien que ces relations possèdent une grande importance à nos jours dans divers domaines de géoenvironnement, elles ne sont pas systématiquement disponibles aux laboratoires. La raison principale est que leurs mesures directes sont difficiles, longues et très coûteuses pour obtenir enfin un ensemble complet de données. Vu la complexité des procédures expérimentales et étant donné l'importance de l'incertitude associée habituellement avec les résultats des propriétés hydrauliques, il devient très improbable que des percées majeures dans le développement des techniques expérimentales, changeront cette situation dans un avenir très proche

Au laboratoire, la distribution de la taille des pores est évaluée dans les sols par différentes méthodes en fonction du type de sol testé. On peut donner comme exemples, la porosimétrie au mercure, la porosimétrie par absorption de vapeur d'eau, la méthode tensiométrique et les méthodes basées sur la résonance magnétique nucléaire.

Par la suite, nous avons effectué une étude paramétrique des modèles empiriques décrivant les propriétés hydrauliques utilisés dans cette modélisation. Cette étude paramétrique commence par une estimation des valeurs des paramètres des modèles par ajustement des courbes de rétention, suivie par une étude de la nature des paramètres, et de la sensibilité de la courbe de rétention et du profil hydrique vis-à-vis aux variations de ces paramètres d'ajustement. L'objectif principal de ce travail est d'établir un nouveau modèle décrivant la courbe de rétention d'eau des matériaux granulaires dans un milieu poreux en utilisant le modèle de Van Genuchten.

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique relative aux propriétés de rétention en eau des sols et aux méthodes utilisées pour les estimer.

Le deuxième chapitre porte sur le matériel et la méthodologie expérimentale mise en œuvre adoptés pour la réalisation de ce travail

Nous présentons des descriptions détaillées des dispositifs utilisés dans cette étude tels que le dispositif tensiométrique permettant d'évaluer la distribution de la taille d'accès aux pores d'un matériau granulaire, enfin les résultats obtenus sont présentés et discutés dans le troisième chapitre.

Dans ce dernier chapitre, nous utilisons un modèle de Van Genuchten avec une loi empirique décrivant les courbes de rétention

CHAPITRE 1. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Sommaire

1.1 Introduction.....	3
1.2 Milieux poreux	3
1.2.1 Définition du milieu poreux	3
1.2.2 Etat de l'eau dans les milieux poreux	3
1.2.2.1 Eau libre	3
1.2.2.2 Eau liée (eau de rétention).....	4
1.2.2.3 Eau capillaire	4
1.3 La succion des sols non saturés.....	5
1.3.1 Définition	5
1.3.2 Les différents types de la succion.....	5
1.3.2.1 Succion matricielle.....	5
1.3.2.1.1 Succion capillaire	5
1.3.2.1.2 Succion d'adsorption	5
1.3.2.2 Succion osmotique.....	6
1.3.2.3 Succion totale	6
1.3.3. Techniques de contrôle et de mesure de la succion	6
1.3.3.1 Techniques de contrôle de la succion.....	6
1.3.3.1.1 Contrôle par plaque tensiométrique	6
1.3.3.1.2 Contrôle par « translation d'axes ».....	7
1.3.3.1.3 Technique de contrôle osmotique.....	7
1.3.3.1.4 Technique de contrôle par phase vapeur	8
1.3.3.2 techniques de mesure de la succion.....	8
1.3.3.2.1 Mesure tensiométrique de la succion :.....	8
1.3.3.2.3 Méthode du papier-filtre	9
1.4 Courbe de succion ou de rétention d'eau	9

1.1 Introduction

Le comportement de rétention d'eau des sols est un aspect essentiel de la compréhension du comportement insaturé des matériaux du sol (Fredlund, 2002). Il représente la relation entre la succion et la teneur en eau ou peut être représenté en termes de degré de saturation. Il s'agit d'une information essentielle pour la modélisation de l'écoulement insaturé dans les sols (e.g. Brooks & Corey, 1964 ; Van Genuchten, 1980).

Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique des principaux travaux publiés sur la courbe de rétention d'eau d'un matériau granulaire et, de façon plus générale, dans les milieux poreux.

1.2 Milieux poreux

1.2.1 Définition du milieu poreux

Un milieu poreux est défini comme étant un milieu solide contenant des pores ; ces pores peuvent être interconnectés ou séparés (Figure I.1.a). Pour qu'une phase fluide puisse percoler dans un milieu poreux donné, au moins une partie de sa porosité doit être constituée de pores interconnectés, formés par des cellules poreuses reliées entre elles par des gorges de pores appelées aussi des canalicules comme présentées sur la figure (I.1.b).

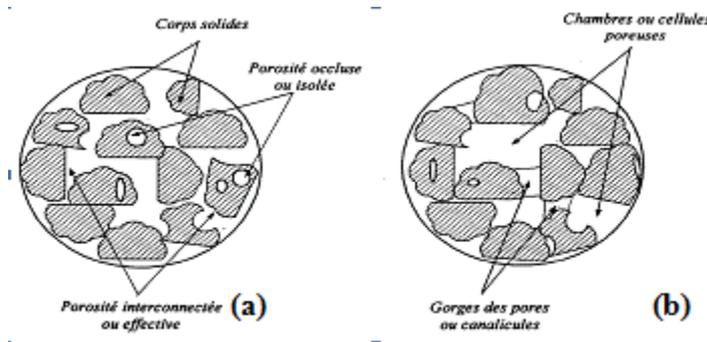


Figure.1.1. Aspect de l'espace poreux

1.2.2 Etat de l'eau dans les milieux poreux

Si l'on exclut l'eau qui entre dans la composition des minéraux (eau de constitution), on peut trouver l'eau dans les milieux poreux sous trois états:

1.2.2.1 Eau libre

Cette eau peut se déplacer entre les particules sous l'effet du potentiel gravitaire (z) ou des gradients de pression ; c'est l'eau de la macroporosité. Son principal effet sur le comportement du sol se manifeste par la pression hydraulique exercée sur le sol. En outre, lorsque l'eau s'écoule, un effet hydrodynamique se traduit en un effort physique sur les particules dont certaines, extrêmement fines, peuvent être emportées (lessivées) par le courant d'eau. Cette eau peut aussi dissoudre certains sels et modifier la composition chimique des minéraux. Ces effets physiques et chimiques peuvent être la cause de certaines instabilités du terrain.

1.2.2.2 Eau liée (eau de rétention)

Cette eau est attachée à la surface des particules solides par des forces d'interaction moléculaire de nature essentiellement électrique. L'eau de rétention se trouve dans la structure du minéral à une position fixe, soit sous forme d'ions OH^- et H^+ , soit sous forme de molécules H_2O . Elle fait partie de la composition chimique du minéral. En général, ce type d'eau influence peu le comportement du sol, sauf lorsqu'il est soumis à une température très élevée. Si la température est supérieure à 400°C , cette eau peut quitter la structure du minéral et en modifier ainsi la composition chimique. On distingue l'eau hygroscopique qui représente toutes les premières couches de molécules d'eau, adsorbée par attraction moléculaire ; l'eau pelliculaire faiblement adsorbée formant un "film" d'eau autour des grains.

1.2.2.3 Eau capillaire

Elle est retenue dans les pores du sol par les forces capillaires présentes à l'interface eau-air, c'est l'eau de la microporosité. Elle est souvent sous forme de films continus autour des particules du sol. L'eau dans ces films est déplacée par l'action capillaire.

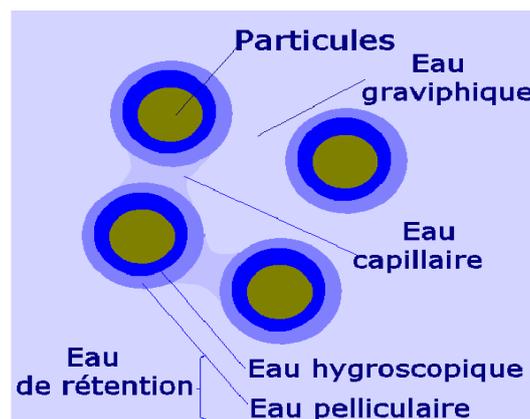


Figure.1.2. Différents états de l'eau dans le sol

1.3 La succion des sols non saturés

1.3.1 Définition

La succion est une pression plus faible que celle de l'air qui s'exerce sur l'eau à l'intérieur des grains, conduit à des mouvements de l'eau donc c'est une pression négative de l'eau des pores. D'après Bakkari A. (2007) la succion est une mesure de l'attraction entre le sol et l'eau. Ce phénomène permet à l'eau de s'élever à une hauteur supérieure à celle de l'état naturel. La succion est le paramètre le plus important du comportement hydraulique et mécanique des sols non saturés. La succion du sol peut varier dans un très large éventail, de 0 pour un sol saturé à 106 kPa pour un sol sèche a l'étuvé.

1.3.2 Les différents types de la succion

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

1.3.2.1 Succion matricielle

La succion matricielle exprime la capacité de rétention d'eau de composants du sol, elle est dépendante des propriétés capillaires du milieu et des propriétés d'adsorption développées par les particules d'un sol. Elle est généralement considérée comme la composante dominante de la succion totale dans le cas des sols non-plastique.

1.3.2.1.1 Succion capillaire

Plus généralement, Lorsqu'un liquide et un gaz sont en contact, l'interface entre les deux phases est le siège d'une tension de surface T_s . Cette propriété permet d'expliquer le phénomène d'ascension capillaire. C'est la différence entre les pressions de l'air et de l'eau ou la pression capillaire, qui est le paramètre déterminant des mouvements de fluides dans les milieux poreux. Cette différence de pression se traduit par l'existence d'un ménisque entre l'air et l'eau. Elle est caractérisée par la loi de Jurin. Elle est notée S_m . Donc on a :

$$\Psi_m = u_a - u_w = 2T_s \cos\alpha / r$$

1.3.2.1.2 Succion d'adsorption

Dans les sols fins non saturés, contrairement aux sols grenus, l'action d'attraction de l'eau par le sol n'est pas seulement due à la capillarité, mais aussi aux actions d'adsorption physico-chimique car les argiles sont des particules chargées négativement, et de ce fait, ont tendance à adsorber de l'eau à leur surface.

1.3.2.2 Succion osmotique

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

1.3.2.3 Succion totale

La succion totale Ψ du sol peut être vue comme la somme de deux composantes principales : la succion matricielle et la succion osmotique (Aitchison, 1965, cité par MEKKIL., 2009)

1.3.3. Techniques de contrôle et de mesure de la succion

1.3.3.1 Techniques de contrôle de la succion

1.3.3.1.1 Contrôle par plaque tensiométrique

Une des premières techniques utilisées, la plaque tensiométrique (Figure 1-3), consiste à mettre l'eau d'un échantillon sous tension en le mettant au contact d'une pierre poreuse céramique saturée d'eau, connectée à un récipient d'altitude variable par le biais d'un tube en U.

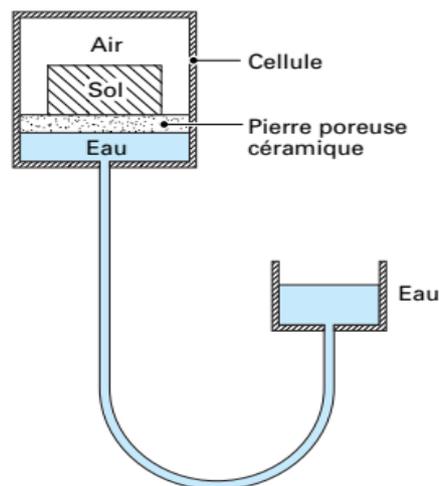


Figure.1.3.Principe de la plaque tensiométrique (faibles succions) (Technique de l'ingénieur 2012)

1.3.3.1.2 Contrôle par « translation d'axes »

La technique de translation d'axes a été mise en œuvre à l'aide du dispositif de la Figure (1-4), il s'agit d'une cellule étanche à l'air dont la base, sur laquelle repose l'échantillon, est constituée d'une pierre poreuse céramique de fine porosité immergée dans un récipient d'eau à la pression atmosphérique ; comme on l'a vu, les pores de la pierre poreuse sont suffisamment petits pour qu'elle ne soit pas désaturée par la pression maximale d'air appliquée dans la cellule.

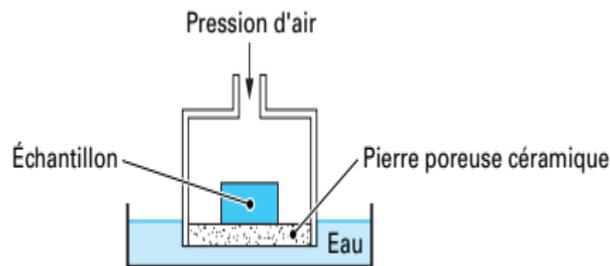


Figure.1.4. Cellule de Richards pour le contrôle de succion par translation d'axe (Technique de l'ingénieur 2012)

1.3.3.1.3 Technique de contrôle osmotique

La technique osmotique provient de la biologie, où elle est utilisée en particulier pour les dialyses. Elle est basée sur l'utilisation de membranes (de dialyse) semi-perméables et d'une solution aqueuse de molécules organiques de polyéthylène glycol (PEG) de grande taille, constituées de longues chaînes de radicaux éthyle (C_2H_4), ce qui leur confère une masse molaire considérable. La mise en œuvre de la technique osmotique pour la détermination de la rétention d'eau se fait suivant le principe de la Figure (1-5).

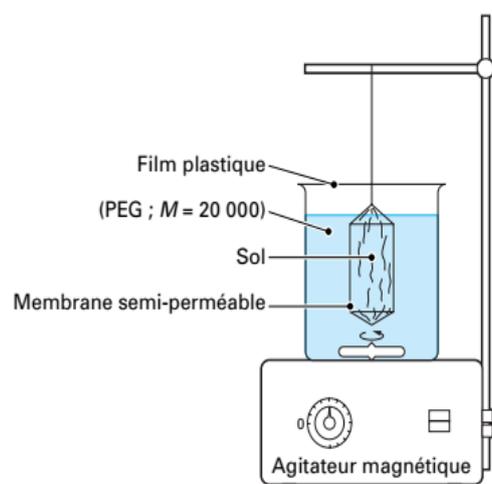


Figure.1.5. Mise en œuvre de la technique Osmotique (Technique de l'ingénieur 2012)

1.3.3.1.4 Technique de contrôle par phase vapeur

La technique de contrôle de succion par phase vapeur est basée sur la loi de Kelvin. Elle consiste à placer un échantillon dans une atmosphère confinée à humidité contrôlée dans un dessiccateur, et à laisser les transferts d'eau s'effectuer sous phase vapeur jusqu'à l'équilibre, ce qui est assez long et peut durer jusqu'à une dizaine de jours, voire plus selon la taille de l'échantillon et la valeur de la succion, (Figure 1-6).

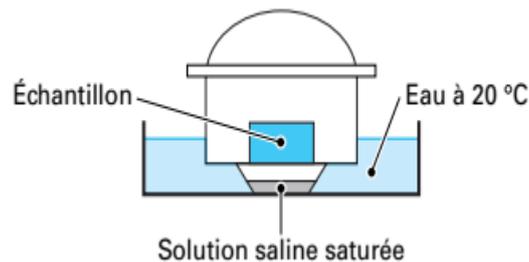


Figure.1.6. Contrôle de succion par phase vapeur (Technique de l'ingénieur 2012)

1.3.3.2 techniques de mesure de la succion

1.3.3.2.1 Mesure tensiométrique de la succion :

La technique la plus répandue et la plus simple est la tensiométrie, illustrée par le schéma de la Figure (1-7). C'est une mesure de la pression négative de l'eau sous tension, analogue, dans son principe, à celle des pressions positives ; il est cependant nécessaire d'utiliser une pierre poreuse céramique fine, qui doit rester saturée à tout niveau de succion, et qui assure la continuité de l'eau entre le sol non saturé et la chambre du capteur, qui doit rester pleine d'eau.

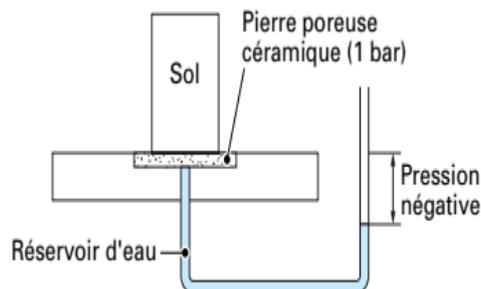


Figure.1.7. Principe de la mesure de la succion par tensiométrie (Technique de l'ingénieur 2012)

1.3.3.2 Mesure psychrométrique de la succion

Dans les techniques psychrométriques, on mesure l'humidité relative à proximité de l'eau interstitielle du sol non saturé, et on en déduit la succion par la loi de Kelvin. L'humidité relative est déterminée par la mesure de la température du point de rosée de l'atmosphère considérée, qui est d'autant plus faible que l'air est sec.

1.3.3.3 Méthode du papier-filtre

La méthode du papier-filtre est une méthode de mesure de succion simple et pratique, utilisable dans n'importe quel laboratoire disposant d'un système de pesée précis au 1/10 000 de gramme. Son principe est représenté sur la Figure (1-8). La méthode est basée sur l'emploi d'un papier-filtre dont la courbe de rétention d'eau a été préalablement déterminée au laboratoire ; elle consiste à insérer une triple épaisseur de papier-filtre dans l'éprouvette dont on veut déterminer la succion et à attendre (au moins 24 h) l'équilibre des succions entre le sol et le papier-filtre, en évitant toute évaporation : on peut paraffiner l'éprouvette ou l'envelopper soigneusement d'un sac plastique. On extrait ensuite les papiers filtres de l'éprouvette et l'on détermine la teneur en eau de la feuille centrale, non polluée, par une pesée au 1/10 000.

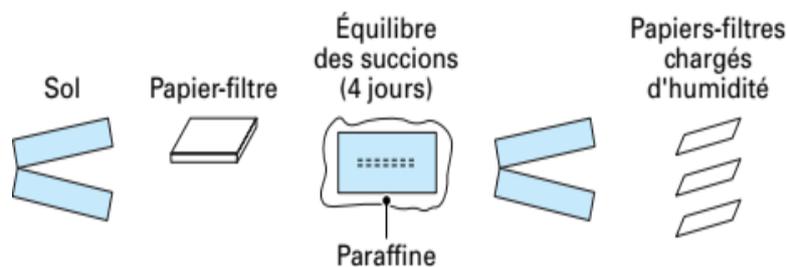


Figure.1.8.Méthode du papier-filtre (Technique de l'ingénieur 2012)

1.4 Courbe de succion ou de rétention d'eau

C'est une grandeur macroscopique fondamentale en physique du sol car elle exprime l'influence de la structure, de la porosité et de l'adsorption sur l'état de l'eau du sol. Les variations de la succion en fonction de la teneur en eau sont représentées à l'aide d'une courbe appelée courbe de rétention d'eau qui est obtenues par Croney sur un sable argileux (11 % < 2 mm, 31 % < 0,08 mm). Cette courbe exprime la capacité du sol à attirer et/ou retenir l'eau en fonction de la succion exercée par application de paliers de succion croissante, puis décroissante, le plus souvent à l'aide de la cellule de Richards. Dans la nature

les sols non saturés sont soumis au séchage et au remouillage, phénomènes qui se succèdent en fonction des conditions climatiques. Le séchage a pour effet de diminuer la teneur en eau et par conséquent d'augmenter la succion. Le remouillage, en revanche, entraîne une augmentation de la rétention d'eau. Une courbe de succion est propre à un matériau. La pente de cette courbe indique l'effort de drainage pour faire varier la teneur en eau $W\%$.

CHAPITRE 2. DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET MATERIAUX ETUDIES

Sommaire

2.1 Introduction.....	12
2.2 Description des matériaux étudiés.....	12
2.3 Caractérisation générale du matériau.....	12
2.3.1 L'analyse granulométrique	13
2.3.1.1 L'analyse granulométrique par tamisage.....	13
2.3.1.2 L'analyse granulométrique par sédimentation	14
2.3.2 Indice des vides maximum et minimum	15
2.3.2.1 L'indice des vides maximum :.....	15
2.3.2.2 L'indice des vides minimum	15
2.4 Dispositif et procédure de mesure de la distribution de la taille d'accès aux pores	17
2.5 Principe de la méthode.....	17
2.6 Matériels et procédure d'essai	18
2.6.2 Procédure de l'essai : description d'essai tensiométrique	20
2.7 Conclusion	21

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord une description des matériaux étudiés, puis les essais utilisés pour la caractérisation de ces matériaux. Ensuite, nous décrivons les dispositifs expérimentaux utilisés tels que le dispositif d'essai tensiométrique, les procédures d'essais réalisés dans le cadre de ce travail.

2.2 Description des matériaux étudiés

Dans cette étude onze types des sables ont été testés .Le sable (type 1) qui est ramené de la région (El Khanga -Biskra),et le sable (type 2) qui est ramené de la région (Liwa),et les deux type (3et4) ont été ramenés de la région (Zriba),les sables (5et7) sont ramenés de la région(Meniaa),le sable (6) est ramené de la région (Hassi Mesaoud),et les deux type (8 et 10) ont été ramenés de la région (Constantine)et le type (9) nous l'avons eu du mélange entre les deux types (4 et 8) et le type 11est ramené de Djamaa. La Figure (2-1) présente une vue des différents sables testés.



Figure.2.1. Vue des onze types de sable étudiés

2.3 Caractérisation générale du matériau

Afin de mieux interpréter nos résultats expérimentaux, une caractérisation des matériaux est nécessaire. Pour cela nous avons été amenés à réaliser les essais suivants :

2.3.1 L'analyse granulométrique

Pour bien décrire un sol, il faut donc connaître sa granulométrie, c'est-à-dire la répartition de ses particules suivant leurs diamètres équivalents. Deux essais de laboratoire permettent d'établir la granulométrie des sols.

- l'analyse granulométrique par tamisage : pour les gains $> 0,08$ mm.
- l'analyse granulométrique par sédimentation : pour les particules inférieures à $0,08$ mm et passants sont plus de 20%.

2.3.1.1 L'analyse granulométrique par tamisage

L'essai consiste à faire passer un échantillon représentatif de sol à travers des tamis superposés dont les ouvertures vont en décroissant du haut vers le bas. Les particules les plus grosses restent donc emprisonnées sur les tamis les plus hauts (refus ou retenu), tandis que les particules plus fines se dirigent vers les tamis inférieurs (tamisat ou passant).

Lorsque les masses retenues sur chaque tamis deviennent constantes, le tamisage est terminé et tous les refus sont pesés. La masse de chaque refus est ensuite comparée à la masse totale de l'échantillon, ce qui permet de calculer les pourcentages de refus cumulatif et de passant. Les résultats sont portés sur un graphique semi-logarithmique ou ils construisent une courbe granulométrique.



a. Tamiseuse



b. Série des tamis

Figure.2.2. analyse granulométrique.

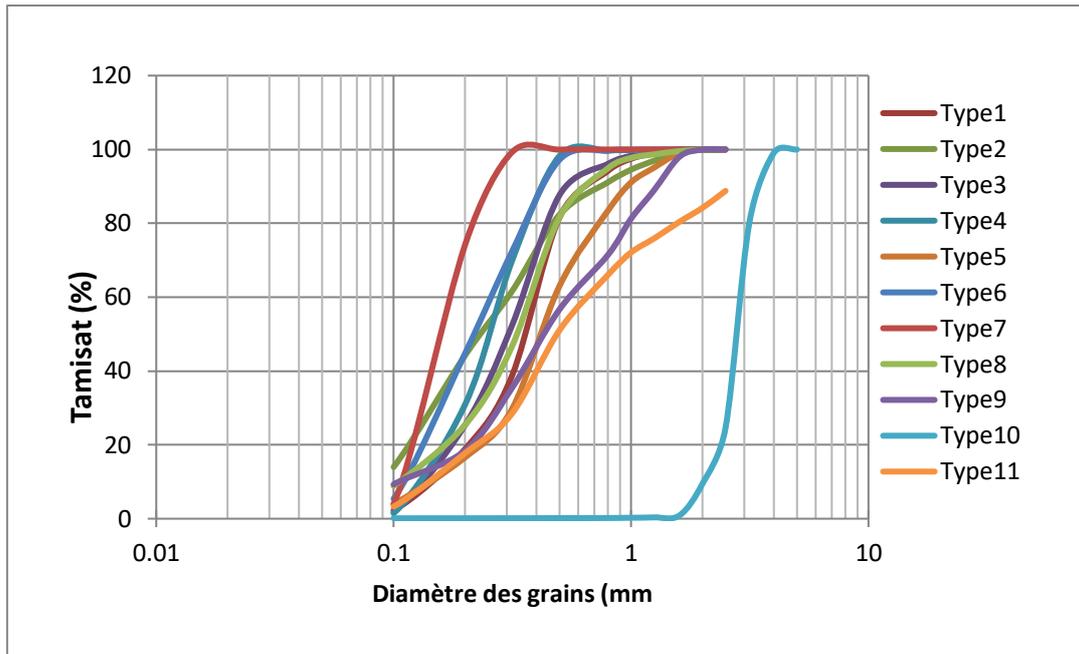


Figure.2.3. Courbes granulométriques des matériaux étudiés.

2.3.1.2 L'analyse granulométrique par sédimentation

-La granulométrie se fait par tamisage jusqu'aux grains de 80µm de diamètre.

-La sédimentométrie se fait sur la fraction inférieure à 80µm.

Afin d'estimer la distribution granulométrique des particules de silt et d'argile, on procède à une analyse granulométrique par sédimentation. La méthode consiste à mesurer le temps de sédimentation dans une colonne d'eau, c'est-à-dire la vitesse de chute des particules.

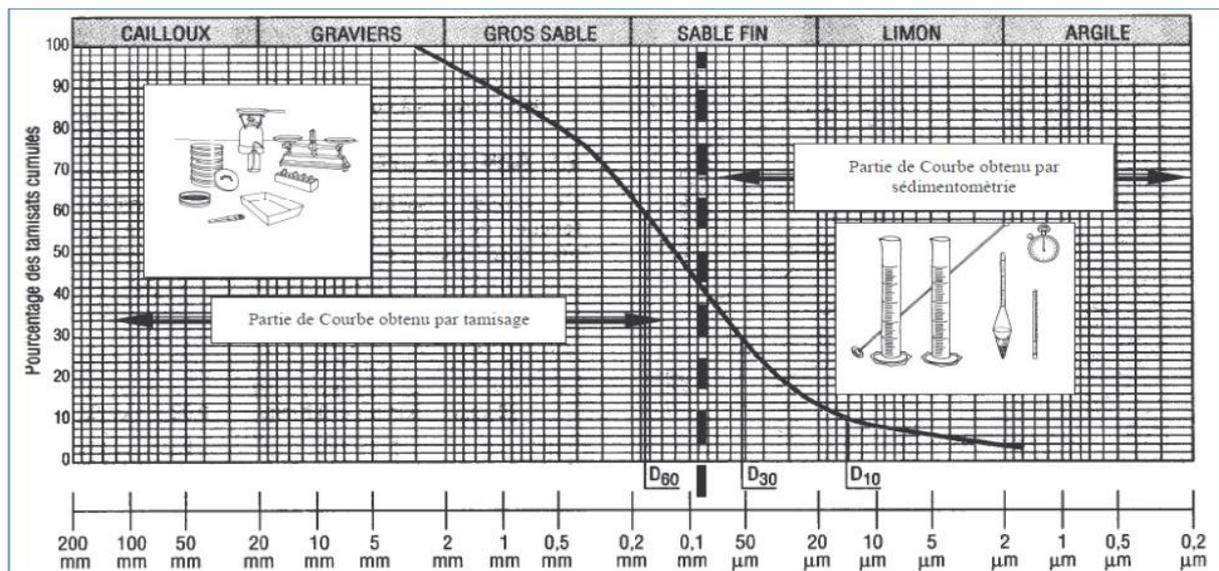


Figure 2.4. Courbe granulométrique (source internet)

2.3.2 Indice des vides maximum et minimum

Cet essai ne s'applique qu'aux sols sans cohésion.

2.3.2.1 L'indice des vides maximum :

e_{\max} : est le taux de vide pour l'état le plus dense possible. Nous prenons l'entonnoir en ver, Et le mettre au fond du moule. Nous remplissons l'entonnoir par le sable, puis on soulève lentement l'entonnoir en veillant à ce que l'entonnoir reste plein d'échantillon jusqu'à la fin de l'expérience, Nous pesons l'échantillon dans la balance et extrayons la valeur (e_{\max}) à travers la loi :

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (2-1)$$



(a) Versement de sable par l'entonnoir.



(b) enlever la quantité excédentaire sur le moule.

Figure .2.5.Préparation l'indice des vides maximum

2.3.2.2 L'indice des vides minimum

e_{\min} : est le taux de vide pour l'état le plus lâche possible. Nous mettons soigneusement une couche de sable dans le moule avec une cuillère et secouons le moule avec un petit marteau. Nous répétons le processus jusqu'à ce que le moule soit rempli et avec une règle nous enlevons la quantité excédentaire sur le moule. Nous pesons l'échantillon dans la balance et extrayons la valeur (e_{\min}) à travers la loi précédant

(a) mise en place des couches
de sable(b) compactage du sol par
vibration

Figure 2.6. Préparation l'indice des vides minimum

Des essais de détermination de l'indice des vides minimum et maximum (e_{\min} , e_{\max}) ont été réalisés. Les résultats de ces essais sont présentés dans le Tableau 2.1.

sable	$d_{50}(\text{mm})$	C_u	e_{\min}	e_{\max}	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$
type1	0.38	2.47	0.47	0.76	2.65
type2	0.25	2.888	0.46	0.75	2.65
type3	0.33	2.47	0.49	0.77	2.65
type4	0.3	1.82	0.47	0.75	2.65
type5	0.45	3.13	0.43	0.73	2.65
type6	0.25	2.33	0.49	0.78	2.65
type7	0.14	1.64	0.51	0.79	2.65
type8	0.28	3	0.51	0.84	2.65
type9	0.47	3.35	0.44	0.72	2.65
type10	2.9	1.38	0.56	0.77	2.65
type11	0.54	4.8	0.36	0.65	2.65

Tableau 2.1. Caractéristiques des sables utilisés

2.4 Dispositif et procédure de mesure de la distribution de la taille d'accès aux pores

La compréhension du phénomène de transport et de dépôt des particules dans un milieu poreux doit se baser sur la distribution de la taille des pores de ce dernier, car tout mouvement des particules dépend forcément de l'espace poreux. Afin d'étudier ce paramètre, plusieurs auteurs ont étudié différentes granulométries de matériaux mais pour se faire, il faudrait avoir une bonne maîtrise de la densité de l'éprouvette car pour un matériau donné, si on change l'indice de densité on peut avoir différentes distributions de tailles des pores. Il est donc nécessaire de connaître les caractéristiques de l'espace poreux du matériau granulaire telles que la taille, la forme, etc avant de le tester. Dans la littérature, ce paramètre est rarement étudié malgré son importance étant donné que son évaluation dans les matériaux granulaires en laboratoire est mal connue. Il existe plusieurs techniques d'évaluation de la distribution de la taille des pores selon la nature du sol testé. On peut citer la porosimétrie au mercure, la porosimétrie par sorption de vapeur d'eau et les méthodes basées sur la résonance magnétique nucléaire (relaxometry (Jaeger et al. 2009) et cryoporometry (Mitchell et al. 2008)). Le choix de la méthode appropriée pour un matériau donné dépend de la nature du sol. La plupart des méthodes citées sont appropriées pour les sols cohérents et avec des petites tailles d'éprouvette et sont difficiles à appliquer pour un sol pulvérulent comme le sable. Pour utiliser la porosimétrie au mercure pour un sable, des techniques spécifiques de préparation de l'éprouvette doivent être mises en oeuvre comme celle proposée par Juang et Holtz (1986b) dans laquelle le sable est mélangé avec une résine pour donner à l'éprouvette une cohésion après chauffage de l'ensemble. La distribution de la taille des pores peut également être évaluée de manière approximative à partir des lois empiriques qui relient la taille des pores à la taille des grains (e.g. Fredlund et al. 2002). Dans ce travail, nous avons utilisé une méthode similaire à la méthode dite « Hanging column » (ASTM D6836, 2008) afin d'évaluer la distribution de la taille des pores d'un matériau granulaire et d'étudier l'effet de paramètres tels que ; la taille et la forme des grains ainsi que l'état de densité de l'éprouvette et l'étalement de la courbe granulométrique sur la distribution de la taille des pores. Cette technique appelée « technique tensiométrique » est décrite dans un travail de Feia et al. (2014)

2.5 Principe de la méthode

La taille des pores est évaluée à partir des courbes de rétention d'eau. Le modèle d'écoulement sous-jacent fait l'hypothèse d'un réseau de pores constitué de tubes cylindriques parallèles dans lequel l'écoulement de l'eau se fait dans la direction de l'axe des cylindres. Cette hypothèse correspond au chemin de séchage, lorsque les pores sont initialement remplis d'eau liquide. Pour le chemin d'humidification, la condensation de la vapeur d'eau contenue dans les pores se fait par la formation de ménisques cylindriques le long de la paroi des pores. Ces courbes (humidification – séchage) sont déterminées par la mesure tensiométrique de la succion (Fredlund and Rahardjo, 1993 ; Delage et Cui, 1998). C'est une technique de mesure de la pression négative de l'eau sous tension, analogue, dans son principe, à celle des pressions positives. Il est cependant nécessaire d'utiliser une pierre poreuse en céramique

fine, qui doit rester saturée à tous les niveaux de succion appliqués, et qui doit assurer la continuité de l'eau entre le sol non saturé et le tube qui doit rester rempli d'eau. La parfaite saturation de la pierre céramique par l'eau désaérée est une condition essentielle au bon fonctionnement d'un tensiomètre. Dans cette technique, la succion maximale que l'on peut mesurer dépend de la pression négative maximale que peut supporter la pierre céramique, car au-delà de cette gamme, la pierre risque de se désaturer. Dans nos essais, nous utilisons une pierre céramique d'une capacité de -50 kPa. Cette pression est largement suffisante pour étudier les caractéristiques de rétention d'eau d'un sable.

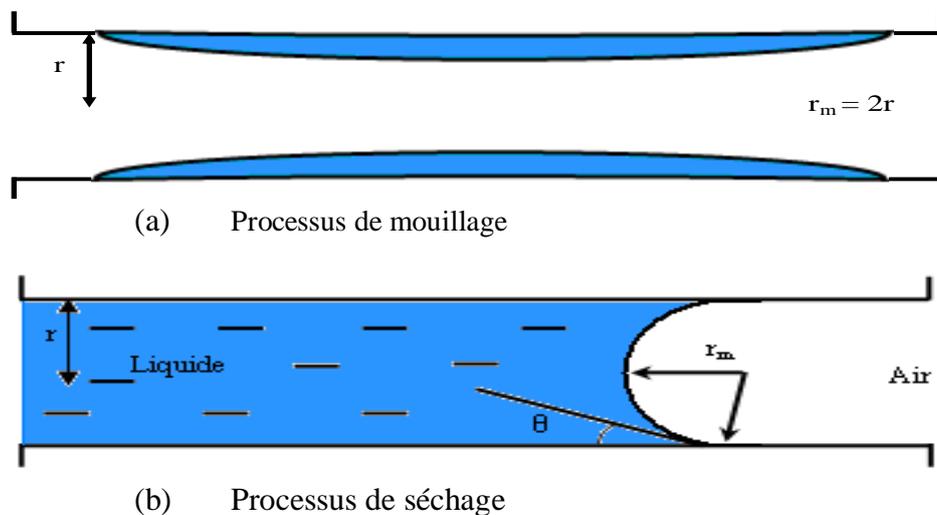


Figure 2.7. Schéma explicatif des processus de séchage et mouillage dans le réseau poreux constitué de cylindres de rayon r , (r_m est le rayon du ménisque de l'interface air-eau) (d'après Do, 1998).

2.6 Matériels et procédure d'essai

2.6.1 Matériels utilisés

La Figure 2-5 présente le dispositif d'essai. Celui-ci est composé d'une cellule oedométrique (70 mm de diamètre et 37 mm de hauteur), d'une pierre céramique d'une capacité de -50 kPa au séchage, et d'un tube d'eau gradué (diamètre 7 mm) relié à un réservoir d'eau désaérée. Le dispositif est placé dans une salle climatisée à 20°C, et durant tout l'essai, l'éprouvette est couverte par un film de cellophane qui empêche l'évaporation d'eau. La technique de mesure tensiométrique de la succion consiste à augmenter par palier la succion régnant au sein de l'éprouvette et à mesurer les variations de la teneur en eau correspondantes. Le niveau de l'eau dans le tube gradué est plus bas que l'éprouvette afin d'appliquer une succion dans le sol. Il en résulte, après l'équilibre hydrique (environ 30 minutes pour les sables étudiés), une variation du niveau d'eau dans le tube gradué. Comme la section du tube gradué est relativement petite, on peut négliger la quantité d'eau évaporée pendant l'équilibre hydrique.

La lecture de la variation du niveau d'eau dans le tube permet de calculer le volume d'eau échangé entre le sol et le tube. En appliquant plusieurs niveaux de succions successifs, on peut obtenir les courbes de rétention d'eau pour les chemins d'humidification et de séchage. Le tube est gradué avec une résolution de 1 mm, la précision de la mesure de volume d'eau dans le tube (diamètre 7 mm) est donc d'environ 40 mm³, ce qui est négligeable en comparaison du volume poreux de l'éprouvette de sol (environ 57000 mm³).

A partir de la courbe de rétention d'eau (courbe de séchage) et en appliquant la loi de Young-Laplace (équation 2-1), qui permet d'exprimer la succion en fonction du rayon d'accès aux pores, on peut évaluer la distribution de la taille des pores.

$$s = u_a - u_w - \frac{4\sigma \cos\theta}{dp} \quad (2-2)$$

Où s est la succion, dp est le diamètre d'accès des pores, u_a et u_w sont respectivement les pressions d'air et d'eau, σ est la tension de surface eau-air, θ est l'angle de raccordement entre le ménisque et le solide qui dépend de la propriété de la surface, le mouvement du ménisque, la viscosité (Decker et al. 1999; Espinoza and Santamarina, 2010; Lourenço et al. 2012). $\cos\theta \approx 1$ est couramment utilisé dans la littérature pour évaluer la distribution de la taille des pores (Mitchell and Soga, 2005; Hao et al. 2007; Innocentini and Pandolfelli, 2001).

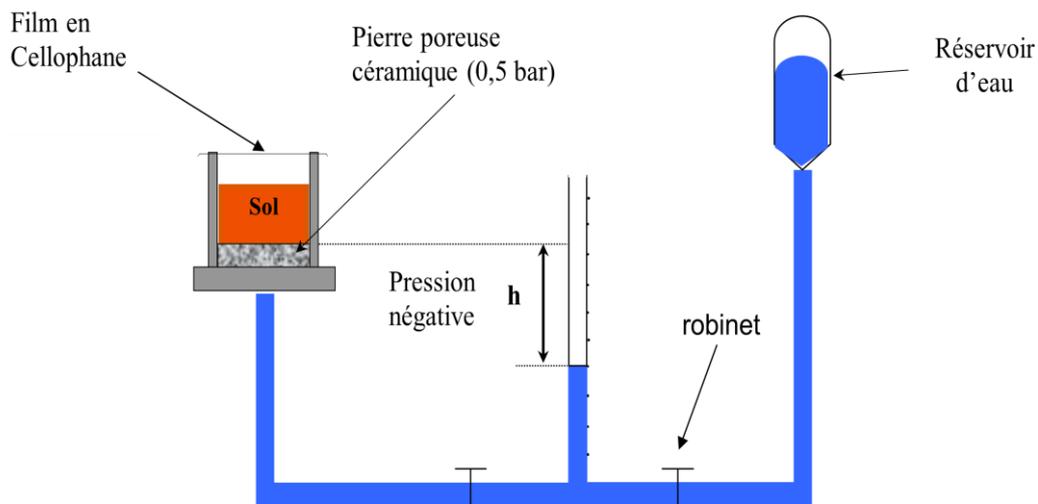


Figure 2.8. Schéma de principe de la méthode tensiométrique de mesure de la succion (Feia et al. 2012)

2.6.2 Procédure de l'essai : description d'essai tensiométrique

Une pierre poreuse en céramique, à 50 kPa de pression d'entrée d'air a été collée dans un moule cylindrique. Pour saturer la pierre céramique, on la trempe dans l'eau pendant 24 h dans un dessiccateur remplie d'eau mis sous vide. La partie en-dessous de la pierre céramique se connecte avec un tube de mesure.



Figure.2.9. Saturation de la pierre céramique.

Après la saturation de la pierre céramique, on place le sol sur la pierre céramique par couche. Pour que ce dispositif fonctionne, l'eau doit constituer une phase continue (sans bulle d'air) entre l'échantillon, la pierre céramique et le tube de mesure. Afin d'éviter l'évaporation de l'eau contenu dans l'échantillon, la cellule est recouverte d'un film de cellophane. Après la préparation de l'échantillon, on fixe la cellule et on positionne l'extrémité du tube de mesure en bas d'une règle fixée à une hauteur h . Après la fixation du tube de mesure, on ouvre le robinet pour démarrer l'essai.



(a)



(b)

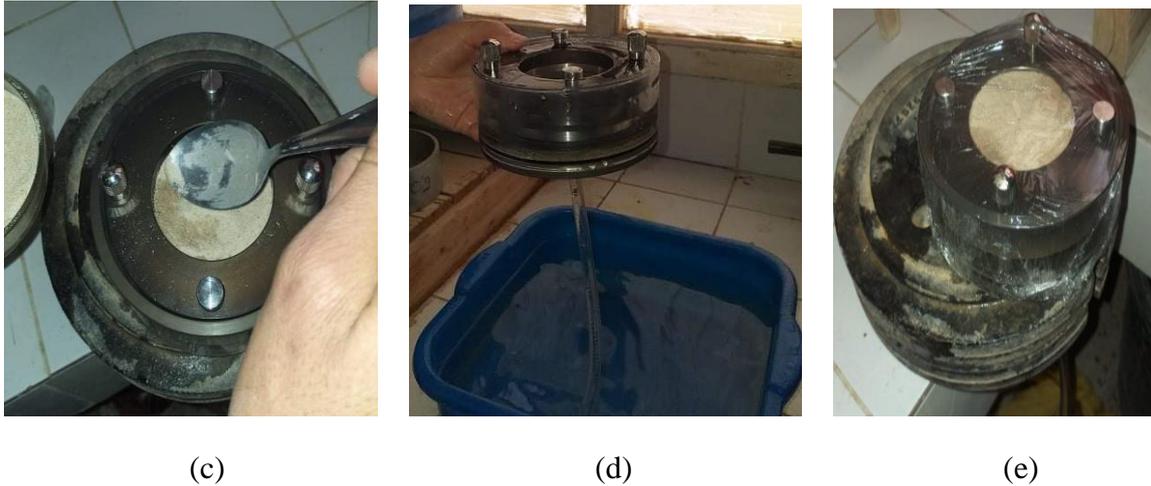


Figure .2.10. Procédure de montage pour la réalisation d'un essai tensiométrique. (a) versement d'un sable (b) compactage par vibration (c) mise en place des couches de Sable, (d) mise en place de la pierre céramique dans le moule, (e) mise en place d'un film cellophane.



Figure.2.11. Vue général de dispositif.

2.7 Conclusion

Le présent chapitre présente les caractéristiques des matériaux étudiés, ainsi que les techniques et les procédures expérimentales adoptées dans cette étude. Dans ce chapitre, nous avons mis en œuvre une technique expérimentale pour l'évaluation de la distribution de la taille d'accès aux pores d'un matériau granulaire (sable). Cette technique est basée sur l'évaluation des courbes de rétention d'eau par une méthode appelée « tensiométrie ».

CHAPITRE 3. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

Sommaire

3.1 Introduction.....	23
3.2 Analyse théorique de la relation entre WRC et PSD.....	23
3.2.1 Courbe de rétention d'eau dans le modèle de van Genuchten	23
3.2.2 Analyse dimensionnelle de la relation.....	24
3.2.3 Deux conditions extrêmes	25
3.3 Estimation du WRC à partir C_u et d_{60}	25
3.3.1 Les tests supplémentaires de rétention d'eau.....	25
3.4 Résultats et discussions	26
3.4.1. Courbe de rétention	27
3.4.2 Calage du modèle sur les résultats expérimentaux	28
3.4.3 Évolution du paramètre α^* et n en fonction de l'indice de densité ID	31
3.5 Conclusion	32

3.1 Introduction

La courbe de rétention d'eau (CRE) ou la courbe caractéristique sol-eau est la relation entre le degré de saturation et la succion. C'est une propriété hydraulique importante des sols non saturés qui peut également affecter les comportements mécaniques du sol. Il a été reconnu qu'il existe un lien entre la CRE et les propriétés de base du sol telles que la distribution granulométrique (PSD), la texture du sol et la densité relative. Cette relation est généralement appelée fonctions de pédotransfert (PTF). La microstructure ou le tissu est compliqué pour un sol argileux ou un sol avec une grande fraction de matières organiques. Pour un sol sableux, sa variation de taux de vide est relativement faible, et sa distribution de la taille des pores a généralement un seul pic, qui est associé à son distribution granulométrique. Ainsi, la courbe de rétention peut être prédite à partir de la PSD .ce qui permettra d'économiser du temps et des coûts d'essai .la première approche pour prédire la courbe de rétention à partir de la distribution granulométrique consiste à développer un modèle physico-empirique, qui nécessite une forme de grain simplifiée et un espace poreux, comme le modèle classique Arya-Paris. La distribution de la taille des pores est estimée à partir des fractions, puis la courbe de rétention peut être déduite avec un facteur d'échelle. Une autre méthode pour estimer la courbe de rétention d'eau à partir de la PSD est une méthode statistique basée sur les paramètres de fonctions CRE de forme fermées. La relation entre les paramètres d'ajustement dans les équations de forme fermée et la PSD est étudiée sur la base d'une analyse de régression .des formulations sont proposées en utilisant des fractions de texture du sol (fractions de sable, de limon et d'argile). Plus tard, une mesure de la taille moyenne des grains et une mesure de l'uniformité de la taille des grains sont les facteurs clés affectant les paramètres CRE.

Le modèle classique de van Genuchten est adopté pour décrire la courbe de rétention d'eau. L'analyse dimensionnelle est appliquée pour clarifier les paramètres clés qui peuvent déterminer la courbe de rétention d'eau.

Dans ce chapitre nous présenterons les résultats des méthodes de laboratoire utilisées. Nous allons utiliser des courbes de rétention d'eau obtenues par la méthode tensiométrique afin de caler le modèle de van Genuchten sur ces courbes et évaluer les paramètres de ce modèle.

3.2 Analyse théorique de la relation entre WRC et PSD

3.2.1 Courbe de rétention d'eau dans le modèle de van Genuchten

Avec l'augmentation de la succion du sol, le degré de saturation commence à diminuer lorsqu'il atteint la valeur d'entrée d'air et que les bulles d'air entrent dans la phase aqueuse. Ensuite, le degré de saturation diminue considérablement avec l'augmentation de la succion et les phases d'eau et d'air deviennent continues (où les grands pores commencent à se drainer tandis que les pores plus petits sont toujours remplis d'eau).Lorsque la valeur de la succion devient très élevée, la phase aqueuse existe sous forme de ponts d'eau isolés et de couches d'adsorption. Le changement de succion a peu d'influence supplémentaire sur le degré de

saturation. Ceci est nommé comme l'état résiduel. La définition du degré effectif de saturation est généralement adoptée pour caractériser le comportement de rétention d'eau comme:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{S_r - S_r^r}{1 - S_r^r} \quad (3-1)$$

Où, θ , θ_s et θ_r sont la teneur en eau, la teneur en eau saturée et la teneur en eau résiduelle respectivement et S_r et S_r^r sont le degré de saturation et le degré de saturation résiduel. Dans le modèle classique de van Genuchten, le degré de saturation effectif est exprimé par:

$$S_e = \left(1 + \left(\frac{s}{\alpha} \right)^n \right)^{\frac{1}{n} - 1} \quad (3-2)$$

Où s est la succion du sol, α est un paramètre lié à la valeur d'entrée d'air et n est un paramètre lié à la Pente CRE.

3.2.2 Analyse dimensionnelle de la relation

En génie géotechnique, d_{10} , d_{30} et d_{60} (tailles de particules à 10%, 30% et 60% passant à côté poids) sont trois tailles de particules importantes dans la description de la gradation du sol. Avec le coefficient d'uniformité ($C_u = d_{60} / d_{10}$), le coefficient de courbure ($C_c = d_{30}^2 / (d_{60} d_{10})$) et une mesure de la taille moyenne des particules, la forme de la distribution granulaire peut être déterminée. Dans cette étude, pour simplifier les modèles d_{60} est utilisée pour quantifier la taille moyenne des grains.

L'analyse dimensionnelle, à savoir le Pi-théorème de Buckingham, est largement utilisée dans l'analyse scientifique et des problèmes d'ingénierie qui peuvent clarifier les facteurs clés et simplifier la relation physique. Il réécrit une relation physique en tant que groupes de variables indépendants et sans dimension et réduit un certain degré de liberté dans le système. En CRE, le degré de saturation effectif (S_e) repose sur le PSD, succion et valeur de la tension superficielle de l'eau (notée γ). On suppose que la variation du taux de vide pour les sols sableux est faible. S_e [-] peut alors être exprimé en fonction de variables de C_e [-], c_c [-], d_{60} [L], S [$ML^{-1}T^{-2}$] et γ [MT^{-2}], où - signifie sans dimension et L, M et T représentent unités de longueur, de masse et de temps, respectivement. En appliquant le théorème Pi de Buckingham S_e peut être simplifié en tant que fonction f' :

$$S_e = f(c_u, c_c, d_{60}, s, \gamma) = f'(c_u, c_c, \frac{S d_{60}}{\gamma}) \quad (3-3)$$

En analysant les données de taille de particule dans la base de données UNSODA, on constate que C_u est un paramètre dépendant de C_u , alors la relation peut être simplifiée comme suit:

$$S_e \approx f''(C_u, \frac{Sd_{60}}{\gamma}) \quad (3-4)$$

L'équation de van Genuchten peut également être réécrite par succion normalisée ($S^* = Sd_{60}/\gamma$) et normalisée ($\alpha^* = \alpha d_{60}/\gamma$) comme :

$$S_e = \left(1 + \left(\frac{S^*}{\alpha^*}\right)^n\right)^{\frac{1}{n}-1} \quad (3-5)$$

En combinant les deux équations ci-dessus, on peut en déduire que le paramètre n peut être une fonction du coefficient d'uniformité (C_u) et le paramètre normalisé $\alpha^* = \alpha d_{60}/\gamma$ est soit lié à C_u soit à une constante.

3.2.3 Deux conditions extrêmes

Pour rendre l'analyse plus applicable sur les données au-delà de la base de données, deux conditions extrêmes sont considérées. L'un est un matériau granulaire monosé, donc le coefficient d'uniformité = 1. Si les particules sont supposées être des sphères, Si les particules sont supposées être des sphères, la taille des pores dans le milieu granulaire sera uniforme. Cela signifie que lorsque l'aspiration atteint la valeur d'entrée d'air, tous les pores commencent à se drainer. La pente de la CRE est presque infinie ($n \rightarrow \infty$). Un autre scénario est que C_u est très élevé. Cela signifie que les grands pores sont remplis de particules plus fines et que le sol est très difficile à désaturer. Par conséquent, la pente de la CRE sera une forme plutôt plate. La valeur minimale du paramètre n sera réduite à l'approche 1.

3.3 Estimation du WRC à partir C_u et d_{60}

3.3.1 Les tests supplémentaires de rétention d'eau

La plupart des sols de la base de données UNSODA ont des valeurs C_u relativement élevées ($C_u > 2$). Les deux conditions extrêmes ne sont pas considérées. Avant l'analyse des comportements de rétention d'eau des différents sols sableux de la base de données, un ensemble d'essais supplémentaires de rétention d'eau est réalisé sur des matériaux granulaires. quatre types de sables aux formes irrégulières sont testés. quatre sables sont un «sable mol» de silice, un sable moyen d'un chantier de construction et deux autres types de sable (sables A et B) tamisés à partir du sable moyen. La taille des particules de sable Mol est comprise entre 0,1 mm et 0,5 mm avec $C_u = 1,43$ et $d_{60} = 0,28$ mm. La taille moyenne du sable varie de 0,1 mm à 1,68 mm avec $C_u = 2,26$ et $d_{60} = 0,52$ mm. Les tailles de particules de sable A et B sont tamisées respectivement de 0,208 mm à 0,417 mm et de 0,417 mm à 0,833 mm. Les valeurs correspondantes sont approximatives de 1,43 et 1,47 et les valeurs sont d'environ 0,32 mm et 0,66 mm.

Fig. 1 montre les courbes de rétention d'eau mesurées du sable ajustées par le modèle de van Genuchten.

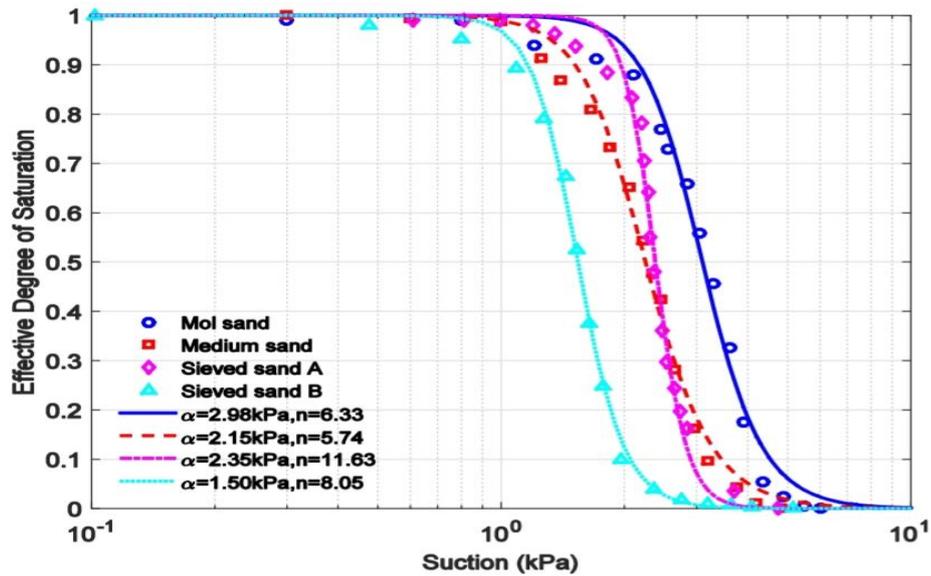


Fig.3.1. Courbe de rétention d'eau de sables relativement uniformes

3.4 Résultats et discussions

Les essais ont été réalisés dans ce travail avec différents indices de densité **ID**. L'indice de densité est défini par l'équation (3-1) :

$$I_D = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (3-6)$$

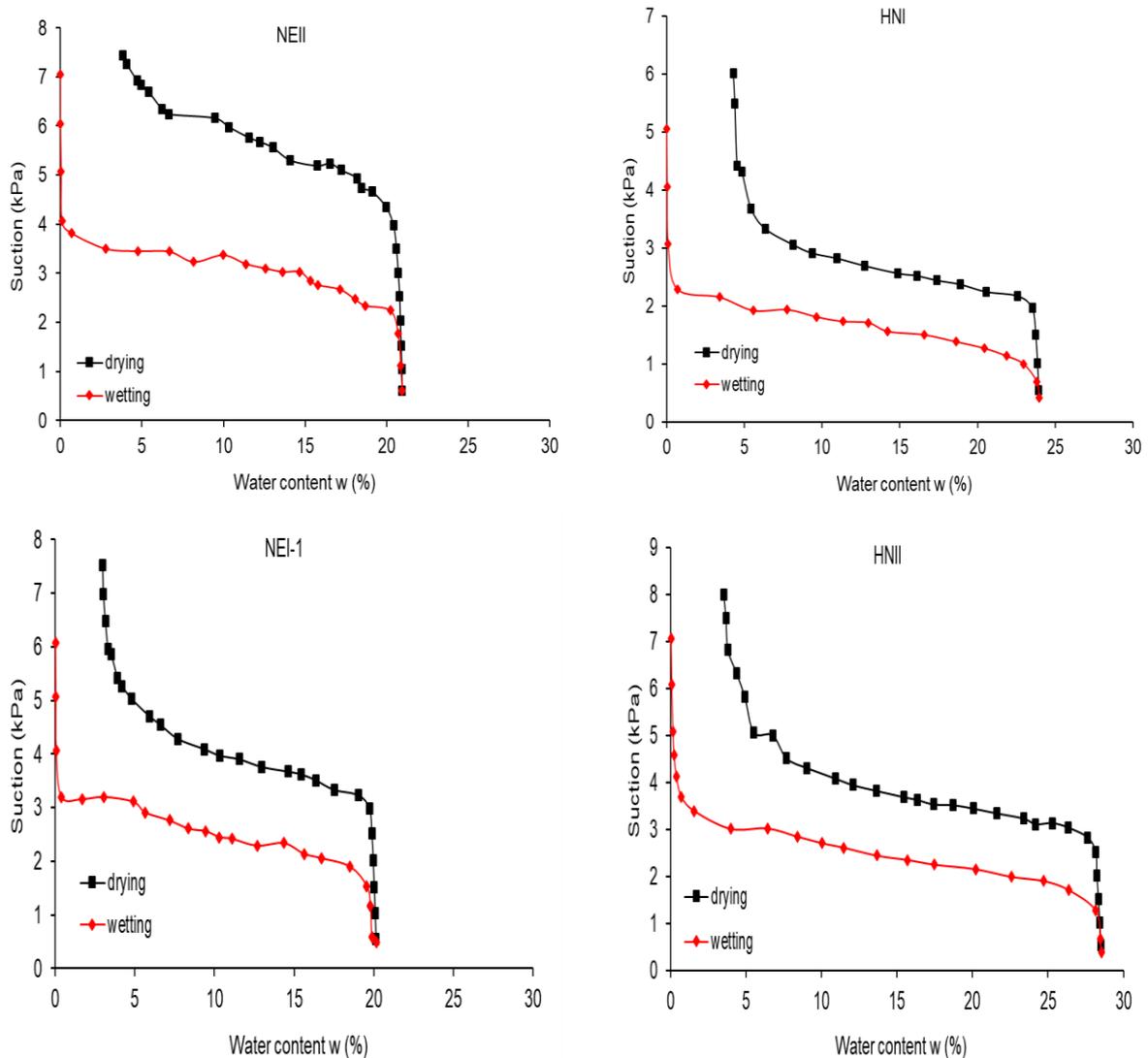
Tableau 3-1 présente l'indice de densité et la masse de l'éprouvette

Sable	ID=0,9	ID=0,7	ID=0,5
type1	190,49	183,40	176,81
type3	188,11	181,41	175,18
type4	190,62	183,75	177,36
type5	195,58	187,86	180,73
type6	187,98	181,07	174,65
type7	185,66	179,14	173,06
type8	185,06	177,47	170,48
type9	194,51	187,37	180,73
type10	180,61	175,94	171,50
type11	205,58	197,34	189,73

Le Tableau 3-1 présente les caractéristiques des essais réalisés tels que : type de sable, indice de densité, masse de l'éprouvette.

3.4.1. Courbe de rétention

Après avoir appliqué la méthode de tensiométrie sur d'un sable. La Figure.3.2 présente les courbes de rétention d'eau (mouillage – séchage) du sept type de sable. Différentes propriétés typiques de rétention des sols non saturés peuvent être observées sur ces courbes. On remarque que la courbe correspondante au chemin de séchage se situe au-dessus de celle correspondante au chemin de humidification, ce qui met en évidence un phénomène d'hystérésis. Cette hystérésis est typique des milieux poreux constitués de pores de taille variable interconnectés en parallèle ou en série. Dans le cas d'une connexion en parallèle, lors du séchage, lorsque la succion correspond à la vidange d'un grand pore, le petit pore qui est en parallèle reste saturé, ce qui conduit à une teneur en eau plus élevée ; lors de l'humidification, la teneur en eau à la même succion est plus faible du fait que le petit pore est vide.



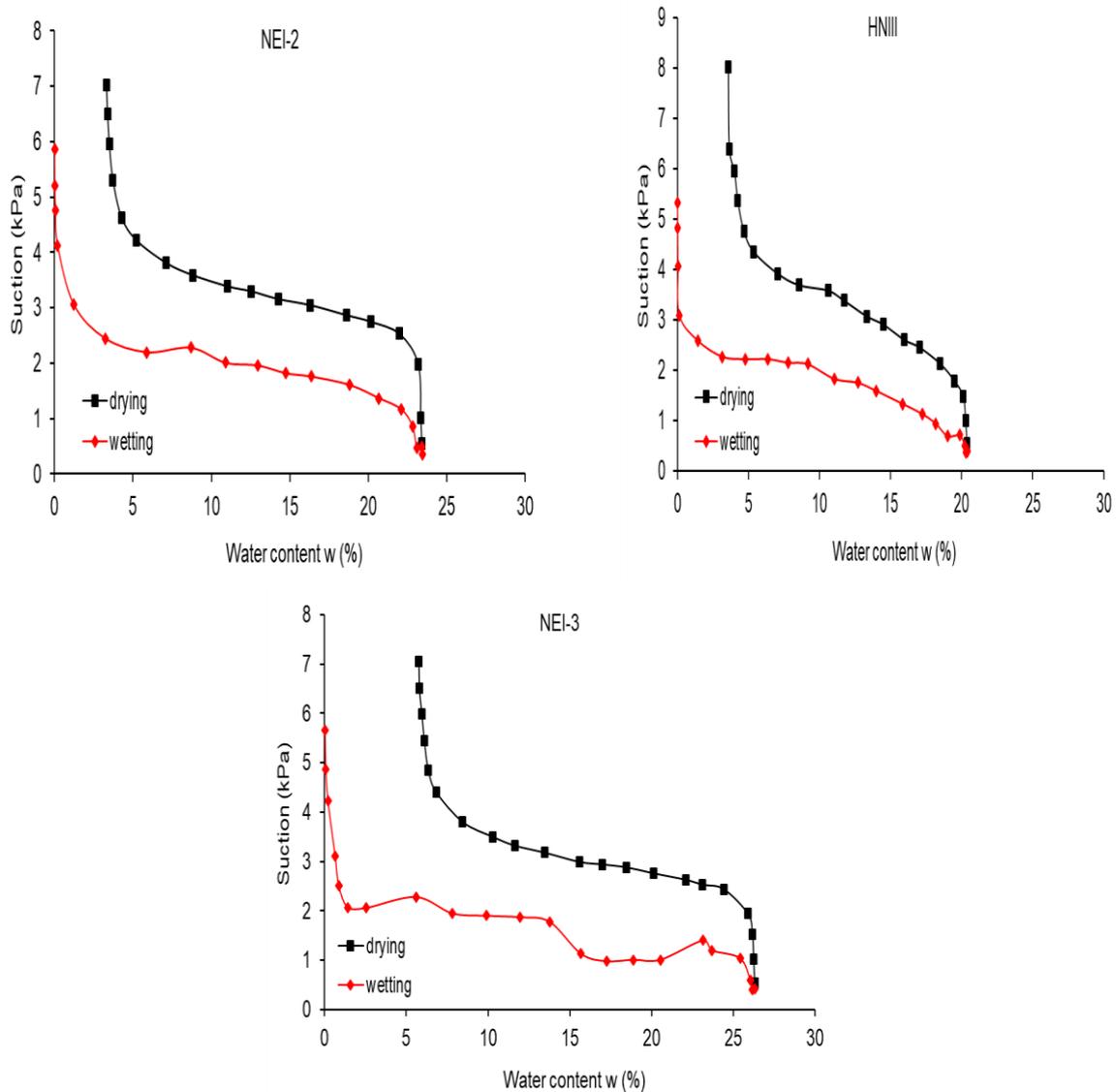
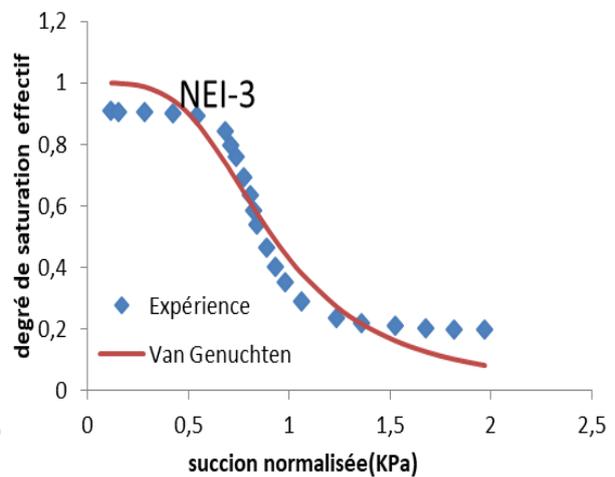
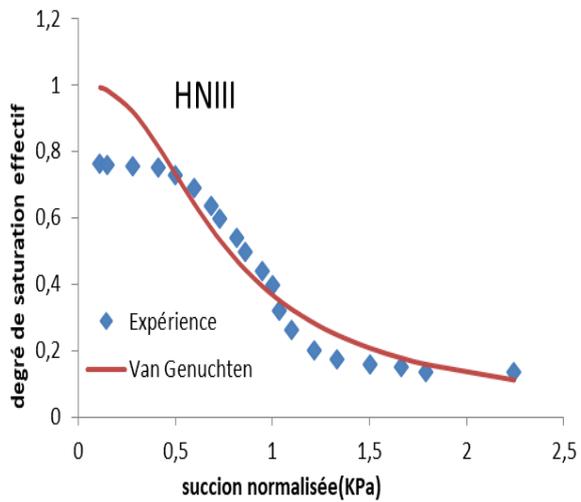
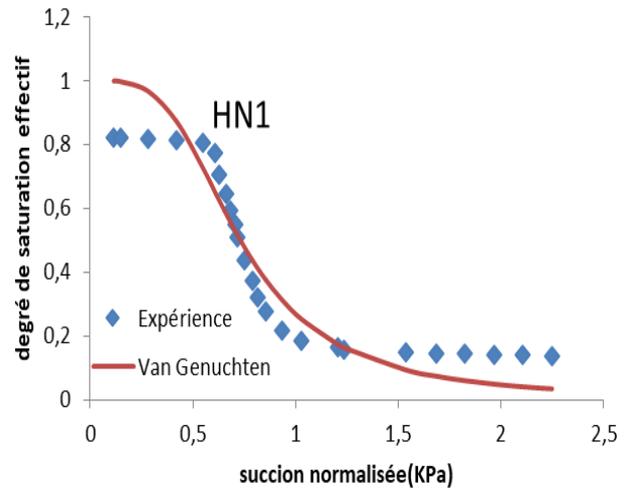
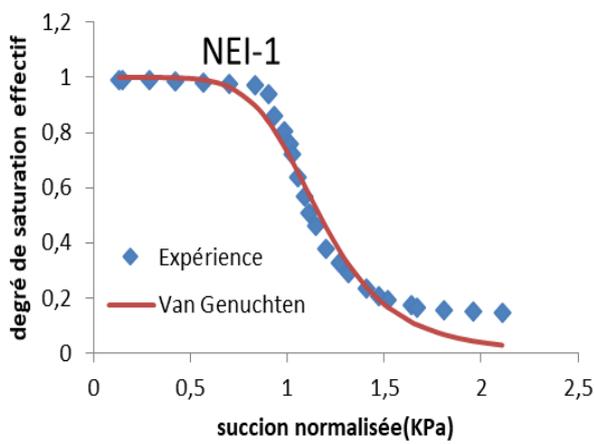
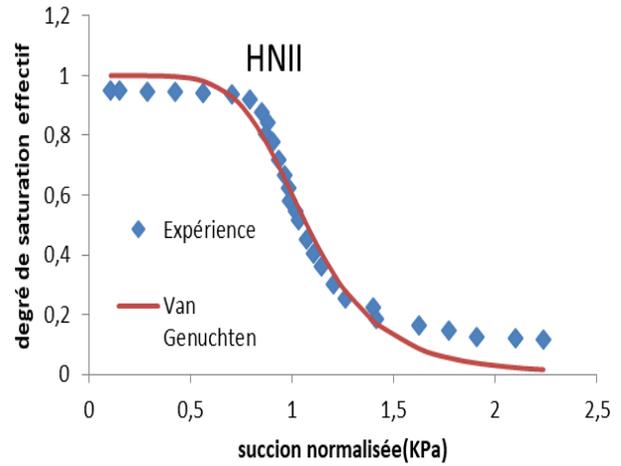
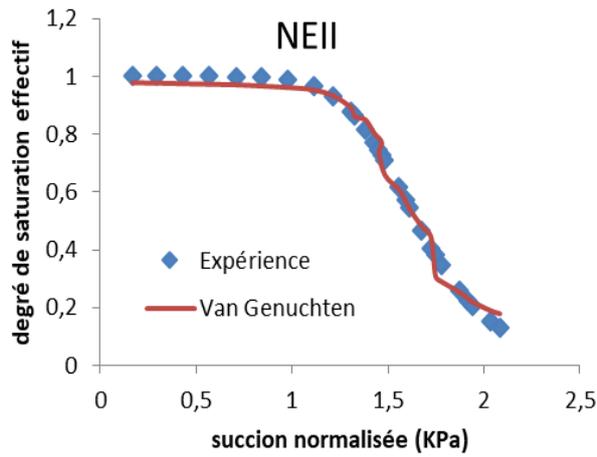


Figure.3.2. Les courbes de rétention d'eau de tous les tests effectués (Feia et. 2014)

3.4.2 Calage du modèle sur les résultats expérimentaux

Grâce à l'expérience de l'essai tensiométrique que nous avons faite dans le chapitre précédent et les différentes relations de Van Genuchten présentées dans ce chapitre ont été calibrées à partir des données expérimentales, Les résultats a été effectué sont dans la figure ci-dessous (Figure 3.3).

Nous avons calé la loi de Van Genuchten sur les courbes de rétention d'eau. Les résultats de ce calage sont présentés sur la Figure 3.3 et les valeurs du paramètre sont données sur le Tableau 3.2.



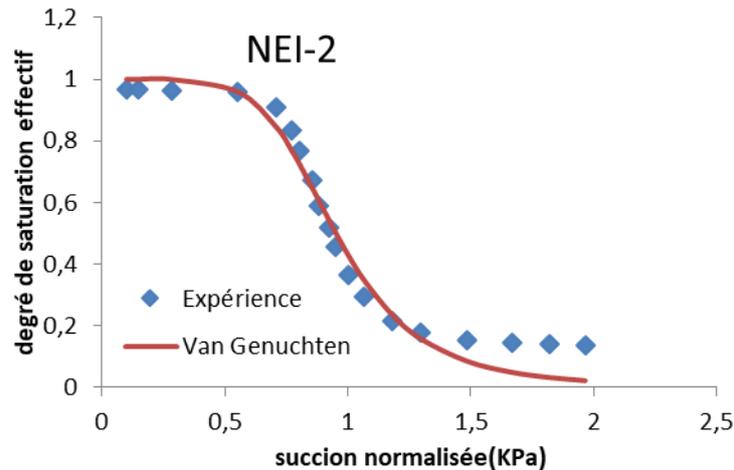


Figure 3.3. Calage de la loi de Van Genuchten sur les courbes de rétention d'eau.

Les paramètres de gradation du sol de base et sont utilisés pour estimer les CRE des sols granulaires non saturés. Des tests de rétention d'eau sont réalisés sur 7 matériaux quasi monodispersés. De nouveaux PTF sont proposés pour estimer le CRE en appliquant une analyse dimensionnelle et une analyse de régression sur les 7 matériaux granulaires testés. Le paramètre α^* , lié à la valeur d'entrée d'air inversée, est inversement proportionnel à d_{60} . Le paramètre n , proportionnel à la pente CRE, est inversement proportionnel au logarithmique c_u . Les nouvelles PTF améliorent l'estimation en particulier dans la prédiction de paramètre n . Dans les sept types de sable pour lequel des courbes de rétention de Van Genuchten ont déjà été calibrées (Figure 3.3), nous obtenons les paramètres des courbes de rétention n et α de nos modèles (Tableau 3.2)

Sable	NEI 1	NEI 2	NEI 3	NEII	HNI	HNII	HNIII
I_D	0.90	0.70	0.50	0.90	0.50	0.70	0.50
α^*	4.027	3.255	2.923	5.770	2.305	3.684	2.098
n	6.645	5.963	3.808	8.71	3.689	6.264	2.620

Tableau.3.2 Valeurs des paramètres du nouveau modèle pour les sept types de sable.

Les valeurs des paramètres du nouveau modèle sont présentées dans le Tableau 3-2. L'ensemble des résultats du modèle montre un bon accord avec les données expérimentales correspondant à l'essai avec quelques décalages qui sont visibles dans la courbe

3.4.3 Évolution du paramètre α^* et n en fonction de l'indice de densité ID

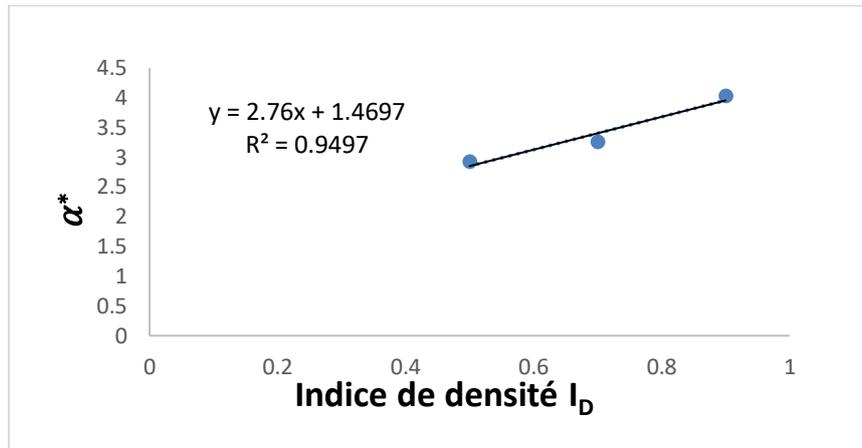


Figure.3.4.Évolution du paramètre « α^* » en fonction de l'indice de densité ID

La Figure 3.4 présente l'évolution du paramètre α^* en fonction de l'indice de densité. Nous observons que cette évolution suit une courbe linéaire de forme $y = ax+b$. La courbe de tendance sur ces données montre que cette évolution suit l'équation suivante :

$$\alpha^* = 2,76 I_d + 1,4697 \quad (3-7)$$

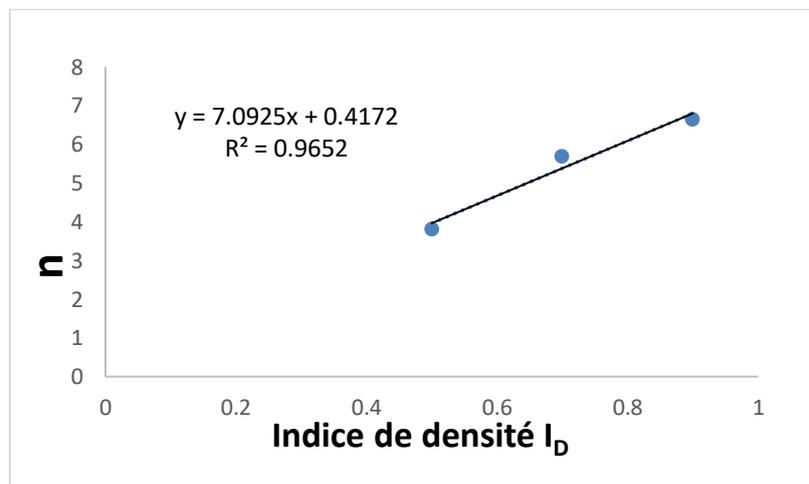


Figure.3.5.Évolution du paramètre « n » en fonction de l'indice de densité ID

La Figure.3.5 présente l'évolution du paramètre n en fonction de l'indice de densité. Nous observons que cette évolution suit une courbe linéaire de forme $y = ax+b$. La courbe de tendance sur ces données montre que cette évolution suit l'équation suivante :

$$n = 7,0925 I_d + 0,4172 \quad (3-8)$$

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les résultats expérimentaux des méthodes utilisées de chaque type de sable. Et en étudiant les résultats de méthode tensiométrie appliquée à un type de sable, nous avons pu tracer une courbe de rétention d'eau (mouillage – séchage). À partir de ce résultat nous avons pu extraire un modèle qui combine entre la succion et le degré de saturation à travers la courbe de rétention d'eau. Et spécifiquement la courbe de séchage et le calage entre le modèle de van Genuchten et les résultats expérimentaux. Nous avons évalué notre modèle et ses paramètres.

Conclusion générale

Ces études hydromécaniques nécessitent le développement d'un modèle théorique capable de simuler les chemins de séchage et d'humidification du sol dans la relation degré de saturation, indice des vides, succion. L'objectif de la recherche est de développer un modèle théorique représentant correctement la réalité et dont les paramètres soient accessibles à partir des essais courants de géotechnique. Il existe plusieurs façons de modéliser les courbes de rétention et l'effet du cycle :

- par des corrélations expérimentales. Cette approche a eu beaucoup de succès avec le modèle de Van Genuchten (1980) par la modélisation physique de l'écoulement de l'eau dans les capillaires des sols non saturés
- en considérant la courbe granulométrique comme une donnée entrante globale de la modélisation

Dans le but d'analyser les données d'une manière plus efficace et plus fiable, deux critères sont considérés dans la sélection des sols. La première est qu'il a une courbe de distribution de particules claire qui couvre la plage de d_{10} à d_{60} (cela donne les valeurs d_{60} et C_u). Un autre aspect est que le sol doit avoir une courbe de rétention d'eau du premier séchage avec l'état résiduel atteint à forte succion dans les données. Les courbes de rétention d'eau de ces sols sont également ajustées par l'équation de van Genuchten avec la méthode des moindres carrés et les paramètres de α et n sont obtenus.

Une nouvelle modèle est présentée pour la courbe de rétention du sol le long des chemins de séchage et de mouillage. Elle explique la différence entre ces deux chemins par la saturation des particules de sol avec des ménisques d'eau au mouillage et par l'apparition de bulles d'air qui percolent au séchage. Ce nouveau modèle utilise seulement des paramètres physiques constants qui peuvent être facilement définis et ne nécessitent pas de paramètres mathématiques. Ce modèle détermine la courbe de rétention pour les matériaux granulaire non saturé. Il est économique car il n'utilise que des tests géotechniques de routine.

Les résultats de cette étude constituent une première étape vers une meilleure compréhension des phénomènes de transfert hydrique dans les matériaux granulaire non saturé, et en particulier vers une meilleure modèle et détermination des paramètres qui régissent ces mécanismes. D'un point de vue expérimental, cette étude permet de vérifier qu'une expérience de séchage simple donne une évaluation correcte des paramètres hydrodynamiques d'un matériau granulaire. On constate que la prédiction du modèle est très cohérente avec les mesures pour les sables.

Dans ce mémoire, les corrélations physiques potentielles entre la courbe de rétention d'eau et le PSD sont d'abord abordées, à partir desquelles les variables clés dérivées du PSD sont identifiées pour estimer la courbe de rétention d'eau. Ensuite, un bref examen de la sélection de classe de modèle de van genuchten est présenté.

Une CRE mesuré pendant le processus de séchage. Il est à noter que la courbe de mouillage est différente de la courbe de séchage en raison de l'hystérésis hydraulique. Ce mémoire ne considère que la courbe de séchage. Les principales caractéristiques du CRE sont la succion du sol et la teneur en eau pour laquelle un changement substantiel de la succion est nécessaire

pour éliminer l'eau supplémentaire dans le sol. Les deux peuvent être estimés par la méthode tensiométrique

Références bibliographique

- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B., and Chapuis, R.P. (2003). A model to predict the water retention curve from basic. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(6), 1104–1122. doi:10.1139/t03-054
- Bastet, G., Bruand, A., Quetin, P. & Cousin, I. (1998). Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à l'aide de fonctions de pédotransfert (FPT): Une analyse bibliographique. *Etude et Gestion des sols*, 5(1), 7-28.
- Bouchemella, S. (2015). Contribution à la Simulation Numérique des Ecoulements Des Eaux Dans les Milieux Poreux Non Saturés. *Thèse de Doctorat, université 8 mai 1945, Guelma*.
- Chiu CF, Yan WM, Yuen K-V. (2012). Estimation of water retention curve of granular soils from particle-size distribution. *Canadian Geotechnical Journal*, 1024–35.
- Feia, S. (2015). Effet de l'injection d'eau de production sur la perméabilité des réservoirs. *Thèse de Doctorat, Université Paris-Est, Paris, France*.
- Feia, S., Ghabezloo, S., Bruchon, J.F., Sulem, J., Canou, J., Dupla, J.F. (2014). Experimental Evaluation of the Pore-Access Size Distribution of Sands. *Geotechnical testing journal*, 1-8.
- Feia, S., Sulem, J., Ghabezloo, S., Canou, J., Dupla, J-C. (2012). Evaluation de la distribution de la taille des pores d'un sable par la méthode tensiométrique. *2eme Colloque international des Sols Non Saturés et Environnement (Unsat Alger 2012), Alger 5-6 Novembre 2012*, 1-8.
- Fredlund D.G., Xing A. (1994). Equation for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 521-532.
- Fredlund, M.D., Wilson, G.W., and Fredlund, D.G. (2002). Use of the grain-size distribution for estimation of the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(5):, 1103–1117.
- Ghanbarian-Alavijeh, B., Liaghat, A., Huang Guan-Hua & Van Genuchten, M. TH. (2010). Estimation of the Van Genuchten soil water retention properties from soil Textural Data. *Pedosphere*, 20(4), 456-465.
- Haverkamp R., Parlange J.Y. (1986). Predicting the water retention curve from particle-size distribution: Sandy soils without organic matter. *Soil Science*, 142, 325-339.
- Van Genuchten, M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic. *In Proceedings of the soils science society of unsaturated soils*, 30, 156-162.

ANNEXES
PUBLICATIONS

Annexe 1 :

Résultat de l'essai Analyse granulométrique

Tamis (mm)	type1	type2	type3	type4	type5	type6	type7	type8	type9	type10	type11
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99,99	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99,13	-
3,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	80,17	-
2,5	100	100	100	99,97	99,98	100	100	100	99,99	24,59	88,77
2	99,83	99,99	99,99	99,96	99,97	100	100	99,98	99,95	9,49	84,19
1,6	99,83	99,23	99,92	99,94	99,08	99,99	99,995	99,55	98,02	0,88	80,42
1,25	98,92	96,95	99,39	99,9	95,07	99,97	99,994	98,67	88,96	0,36	75,89
1	97,48	94,52	98,29	99,82	91,08	99,91	99,991	97,72	81,25	0,26	72,11
0,8	94,22	91,13	96,11	99,66	83,47	99,71	99,98	94,92	71,47	0,18	66,05
0,5	81,67	82,36	87,69	98,27	63,09	97,25	99,97	81,63	56,72	0,15	51,09
0,315	38,67	61,59	52,29	69,82	29,703	72,32	99,242	46,65	35,38	0,13	28,46
0,2	18,89	44,25	25,39	30,95	16,61	44,8	74,23	25,43	18,42	0,12	17,77
0,1	2,32	13,99	1,74	1,45	4,07	5,39	3,91	8,88	9,29	0,11	3,29
0,063	1,78	2,25	0,65	0,52	0,68	0,14	0,54	2,57	0,42	0,1	0,78
0	0,1	0,01	0,07	0,07	0,06	0,03	0,02	0,16	0,02	0,07	0,11

Figure A1.1-Résultats de l'analyse granulométrique

d60	d10	d30	Cu	Cc
0,42	0,17	0,29	2,47	1,18
0,3		0,15		
0,37	0,15	0,25	2,47	1,13
0,31	0,17	0,24	1,82	1,1
0,5	0,16	0,32	3,13	1,28
0,28	0,12	0,17	2,33	0,86
0,18	0,11	0,1	1,64	0,51
0,33	0,11	0,12	3	0,4
0,57	0,17	0,3	3,35	0,93
2,9	2,1	2,56	1,38	1,08
0,72	0,15	0,34	4,8	1,07

Figure A1.2-Résultats de l'analyse granulométrique

Annexe 2 :

Résultats expérimentaux pour l'essai tensiométrique

NEII

sr	s(kPa)	s*	α^*	(1/n)-1	Se
0,97831965	0,6	0,168	1,61569513	-0,88517011	1
0,9772963	1,04	0,2912	1,61569513	-0,88517011	0,99999971
0,97524961	1,53	0,4284	1,61569513	-0,88517011	0,99999156
0,97320292	2,03	0,5684	1,61569513	-0,88517011	0,99990095
0,97115622	2,53	0,7084	1,61569513	-0,88517011	0,99932647
0,96706284	3,01	0,8428	1,61569513	-0,88517011	0,99695015
0,9619461	3,5	0,98	1,61569513	-0,88517011	0,98875695
0,95375933	3,97	1,1116	1,61569513	-0,88517011	0,96710047
0,93278071	4,345	1,2166	1,61569513	-0,88517011	0,93069085
0,89287018	4,66	1,3048	1,61569513	-0,88517011	0,87991344
0,86114643	4,74	1,3272	1,61569513	-0,88517011	0,86349864
0,84988961	4,94	1,3832	1,61569513	-0,88517011	0,81587673
0,803839	5,1	1,428	1,61569513	-0,88517011	0,77118689
0,77211525	5,24	1,4672	1,61569513	-0,88517011	0,72776895
0,73527476	5,19	1,4532	1,61569513	-0,88517011	0,74369663
0,65852374	5,3	1,484	1,61569513	-0,88517011	0,70809884
0,60837974	5,56	1,5568	1,61569513	-0,88517011	0,61757582
0,57051591	5,68	1,5904	1,61569513	-0,88517011	0,57417465
0,54083885	5,76	1,6128	1,61569513	-0,88517011	0,54516456
0,48250807	5,98	1,6744	1,61569513	-0,88517011	0,46684591
0,44259754	6,16	1,7248	1,61569513	-0,88517011	0,40625616
0,31058579	6,24	1,7472	1,61569513	-0,88517011	0,38076939
0,29011885	6,35	1,778	1,61569513	-0,88517011	0,34740652
0,25327836	6,69	1,8732	1,61569513	-0,88517011	0,25779011
0,23178808	6,84	1,9152	1,61569513	-0,88517011	0,22486065
0,21950791	6,93	1,9404	1,61569513	-0,88517011	0,2069629
0,18983085	7,26	2,0328	1,61569513	-0,88517011	0,15219099
0,17857404	7,44	2,0832	1,61569513	-0,88517011	0,12861842

HNI

sr(kpa)	s(kPa)	s*	α^*	(1/n)-1	Se
0,95056406	0,38	0,1064	1,03138297	-0,84036833	0,99999944
0,94972803	0,54	0,1512	1,03138297	-0,84036833	0,99999498
0,94721995	1,02	0,2856	1,03138297	-0,84036833	0,99973028
0,94429385	1,515	0,4242	1,03138297	-0,84036833	0,99679505
0,94094973	2,01	0,5628	1,03138297	-0,84036833	0,98148079
0,93844165	2,52	0,7056	1,03138297	-0,84036833	0,92818315
0,92004903	2,83	0,7924	1,03138297	-0,84036833	0,86289352
0,87741159	3,04	0,8512	1,03138297	-0,84036833	0,80195277
0,84271642	3,135	0,8778	1,03138297	-0,84036833	0,7702882
0,80593118	3,11	0,8708	1,03138297	-0,84036833	0,77884499
0,77917828	3,23	0,9044	1,03138297	-0,84036833	0,73645683
0,71982028	3,34	0,9352	1,03138297	-0,84036833	0,69508592
0,66882256	3,44	0,9632	1,03138297	-0,84036833	0,6559916
0,62409505	3,515	0,9842	1,03138297	-0,84036833	0,6260982
0,58062158	3,53	0,9884	1,03138297	-0,84036833	0,62008554
0,54509038	3,625	1,015	1,03138297	-0,84036833	0,58192804
0,51499337	3,685	1,0318	1,03138297	-0,84036833	0,55790661
0,45396331	3,82	1,0696	1,03138297	-0,84036833	0,50473837
0,40296559	3,94	1,1032	1,03138297	-0,84036833	0,45921941
0,36367227	4,08	1,1424	1,03138297	-0,84036833	0,40903365
0,30138816	4,305	1,2054	1,03138297	-0,84036833	0,33643555
0,25624264	4,51	1,2628	1,03138297	-0,84036833	0,27970251
0,22572761	5	1,4	1,03138297	-0,84036833	0,17830713
0,18434422	5,055	1,4154	1,03138297	-0,84036833	0,16954167
0,16427954	5,81	1,6268	1,03138297	-0,84036833	0,08663
0,14588692	6,33	1,7724	1,03138297	-0,84036833	0,05623879
0,12665827	6,82	1,9096	1,03138297	-0,84036833	0,03837348
0,12247813	7,5	2,1	1,03138297	-0,84036833	0,02344933
0,11746196	7,99	2,2372	1,03138297	-0,84036833	0,01685819

NEI-1

sr	s(kPa)	s*	α^*	(1/n)-1	Se
0,99197032	0,48	0,1344	1,12768755	-0,8495193	0,99999938
0,99144602	0,545	0,1526	1,12768755	-0,8495193	0,99999857
0,98882453	1,025	0,287	1,12768755	-0,8495193	0,99990456
0,98567875	1,52	0,4256	1,12768755	-0,8495193	0,99869287
0,98253297	2,02	0,5656	1,12768755	-0,8495193	0,99141743
0,97833859	2,51	0,7028	1,12768755	-0,8495193	0,96472142
0,97099843	2,98	0,8344	1,12768755	-0,8495193	0,89793319
0,93744341	3,23	0,9044	1,12768755	-0,8495193	0,83828547
0,86194461	3,33	0,9324	1,12768755	-0,8495193	0,80941747
0,80532051	3,51	0,9828	1,12768755	-0,8495193	0,75094009
0,76023095	3,62	1,0136	1,12768755	-0,8495193	0,71174116
0,72038436	3,67	1,0276	1,12768755	-0,8495193	0,69324337
0,63754541	3,76	1,0528	1,12768755	-0,8495193	0,6591317
0,56938677	3,9	1,092	1,12768755	-0,8495193	0,60476839
0,50856829	3,97	1,1116	1,12768755	-0,8495193	0,57738187
0,46033295	4,09	1,1452	1,12768755	-0,8495193	0,53075587
0,37959118	4,28	1,1984	1,12768755	-0,8495193	0,45944254
0,32611286	4,54	1,2712	1,12768755	-0,8495193	0,37062416
0,29046065	4,71	1,3188	1,12768755	-0,8495193	0,31955121
0,23593374	5,03	1,4084	1,12768755	-0,8495193	0,23941463
0,2065731	5,27	1,4756	1,12768755	-0,8495193	0,19213466
0,19294137	5,42	1,5176	1,12768755	-0,8495193	0,1674607
0,17301808	5,86	1,6408	1,12768755	-0,8495193	0,1125198
0,16358073	5,96	1,6688	1,12768755	-0,8495193	0,10298019
0,15519197	6,47	1,8116	1,12768755	-0,8495193	0,06641861
0,14890041	6,99	1,9572	1,12768755	-0,8495193	0,04354101
0,14680322	7,53	2,1084	1,12768755	-0,8495193	0,02884479

HN1

sr	s(kPa)	s*	α^*	(1/n)-1	Se
0,82055782	0,41	0,1148	0,64534376	-0,72899389	0,99875499
0,81970981	0,54	0,1512	0,64534376	-0,72899389	0,99656917
0,81674176	1,015	0,2842	0,64534376	-0,72899389	0,96606226
0,8129257	1,505	0,4214	0,64534376	-0,72899389	0,87157903
0,80529357	1,96	0,5488	0,64534376	-0,72899389	0,72654488
0,77306904	2,17	0,6076	0,64534376	-0,72899389	0,65132906
0,70437992	2,24	0,6272	0,64534376	-0,72899389	0,62628295
0,64671497	2,37	0,6636	0,64534376	-0,72899389	0,5805466
0,59498612	2,44	0,6832	0,64534376	-0,72899389	0,5565523
0,5508894	2,52	0,7056	0,64534376	-0,72899389	0,52982845
0,50933672	2,56	0,7168	0,64534376	-0,72899389	0,51677955
0,43640752	2,69	0,7532	0,64534376	-0,72899389	0,47596797
0,3745025	2,82	0,7896	0,64534376	-0,72899389	0,43779106
0,32022961	2,91	0,8148	0,64534376	-0,72899389	0,41297789
0,27825293	3,055	0,8554	0,64534376	-0,72899389	0,37581009
0,21719592	3,33	0,9324	0,64534376	-0,72899389	0,31451783
0,18581941	3,68	1,0304	0,64534376	-0,72899389	0,2520736
0,16546708	4,31	1,2068	0,64534376	-0,72899389	0,17329299
0,15529091	4,42	1,2376	0,64534376	-0,72899389	0,16288798
0,15020282	5,49	1,5372	0,64534376	-0,72899389	0,09406637
0,14681077	6,01	1,6828	0,64534376	-0,72899389	0,07434374
0,14469073	6,515	1,8242	0,64534376	-0,72899389	0,06015936
0,14214669	7,02	1,9656	0,64534376	-0,72899389	0,04939748
0,14002666	7,515	2,1042	0,64534376	-0,72899389	0,04123277
0,13833063	8,03	2,2484	0,64534376	-0,72899389	0,03456805

HNIII

sr(kpa)	s(kpa)	s*	α^*	(1/n)-1	Se
0,76122802	0,4	0,112	0,58738122	-0,61837584	0,99204175
0,76033666	0,54	0,1512	0,58738122	-0,61837584	0,98274233
0,75677119	1,01	0,2828	0,58738122	-0,61837584	0,91854109
0,75053161	1,48	0,4144	0,58738122	-0,61837584	0,81183855
0,72735605	1,79	0,5012	0,58738122	-0,61837584	0,73100091
0,68991861	2,13	0,5964	0,58738122	-0,61837584	0,64333224
0,63643654	2,45	0,686	0,58738122	-0,61837584	0,5671863
0,596325	2,6	0,728	0,58738122	-0,61837584	0,53438038
0,54016883	2,91	0,8148	0,58738122	-0,61837584	0,47285804
0,49738318	3,07	0,8596	0,58738122	-0,61837584	0,44436671
0,43766155	3,38	0,9464	0,58738122	-0,61837584	0,39506395
0,39576726	3,58	1,0024	0,58738122	-0,61837584	0,36703691
0,31910964	3,69	1,0332	0,58738122	-0,61837584	0,35277016
0,26295347	3,92	1,0976	0,58738122	-0,61837584	0,3253418
0,20055773	4,35	1,218	0,58738122	-0,61837584	0,28166422
0,17470807	4,76	1,3328	0,58738122	-0,61837584	0,24758392
0,15866345	5,37	1,5036	0,58738122	-0,61837584	0,20729476
0,14974978	5,95	1,666	0,58738122	-0,61837584	0,17759333
0,13637926	6,4	1,792	0,58738122	-0,61837584	0,15885123
0,13370516	8,02	2,2456	0,58738122	-0,61837584	0,11178705

NEI-3

sr(kpa)	s(kPa)	s*	α^*	(1/n)-1	Se
0,90792394	0,42	0,1176	0,81834547	-0,73737658	0,99954362
0,90707063	0,54	0,1512	0,81834547	-0,73737658	0,99881274
0,90493735	1,015	0,2842	0,81834547	-0,73737658	0,98705564
0,90237741	1,52	0,4256	0,81834547	-0,73737658	0,94292819
0,89299098	1,94	0,5432	0,81834547	-0,73737658	0,86884885
0,84179226	2,44	0,6832	0,81834547	-0,73737658	0,74050392
0,79742004	2,53	0,7084	0,81834547	-0,73737658	0,71459361
0,76158094	2,63	0,7364	0,81834547	-0,73737658	0,68539128
0,69416929	2,76	0,7728	0,81834547	-0,73737658	0,64720468
0,63699739	2,88	0,8064	0,81834547	-0,73737658	0,61216342
0,58579867	2,94	0,8232	0,81834547	-0,73737658	0,59484134
0,5380132	2,99	0,8372	0,81834547	-0,73737658	0,58054874
0,46377506	3,18	0,8904	0,81834547	-0,73737658	0,52779185
0,40148328	3,32	0,9296	0,81834547	-0,73737658	0,49087507
0,35455113	3,5	0,98	0,81834547	-0,73737658	0,44629103
0,29140604	3,8	1,064	0,81834547	-0,73737658	0,3797935
0,23594076	4,4	1,232	0,81834547	-0,73737658	0,27538173
0,21887452	4,85	1,358	0,81834547	-0,73737658	0,21824301
0,2103414	5,45	1,526	0,81834547	-0,73737658	0,16279159
0,20522153	5,99	1,6772	0,81834547	-0,73737658	0,12728857
0,20010166	6,5	1,82	0,81834547	-0,73737658	0,10242986
0,19924835	7,04	1,9712	0,81834547	-0,73737658	0,08259494

NEI-2

sr(kpa)	s(kPa)	s*	α^*	(1/n)-1	Se
0,96835805	0,36	0,1008	0,91131186	-0,83229806	0,99999835
0,96741054	0,54	0,1512	0,91131186	-0,83229806	0,99998144
0,964568	1,02	0,2856	0,91131186	-0,83229806	0,99917757
0,95793541	1,98	0,5544	0,91131186	-0,83229806	0,95896393
0,90866475	2,53	0,7084	0,91131186	-0,83229806	0,84590911
0,83286373	2,75	0,77	0,91131186	-0,83229806	0,77130542
0,76843286	2,87	0,8036	0,91131186	-0,83229806	0,72471216
0,67368158	3,05	0,854	0,91131186	-0,83229806	0,64970709
0,58935294	3,16	0,8848	0,91131186	-0,83229806	0,60238215
0,51828949	3,3	0,924	0,91131186	-0,83229806	0,54230686
0,45575364	3,39	0,9492	0,91131186	-0,83229806	0,50453925
0,36479242	3,59	1,0052	0,91131186	-0,83229806	0,425154
0,29467647	3,81	1,0668	0,91131186	-0,83229806	0,34769281
0,21603291	4,22	1,1816	0,91131186	-0,83229806	0,23469994
0,17671113	4,635	1,2978	0,91131186	-0,83229806	0,15723441
0,15397083	5,31	1,4868	0,91131186	-0,83229806	0,08432137
0,1444957	5,95	1,666	0,91131186	-0,83229806	0,04896617
0,13975813	6,5	1,82	0,91131186	-0,83229806	0,0318645
0,1369156	7,02	1,9656	0,91131186	-0,83229806	0,02185493

