



Université Mohamed khider –Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et d'Hydraulique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Filière : GENIE CIVIL
Spécialité : GEOTECHNIQUE

Réf. :

Présenté et soutenu par :
Safa KHALFOUN

Le : mercredi 12 juin 2024

Étude comparative des courbes de rétention d'eau pour différents matériaux granulaires

Dr. Nabil HOUHOU	Président	Université de Biskra
Dr. Linda BOUACIDA	Encadrante	Université de Biskra
Dr. Inssaf SAIFI	Examinatrice	Université de Biskra

Année universitaire : 2023/2024

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de cette thèse de master.

Tout d'abord, je remercie chaleureusement mon encadrante de recherche, Docteur BOUACIDA Linda, pour sa supervision, ses conseils avisés et son soutien indéfectible tout au long de ce travail. Son expertise et sa disponibilité ont été essentielles à l'aboutissement de cette thèse.

Je tiens également à remercier les membres de mon jury, pour avoir accepté d'évaluer mon travail et pour leurs remarques constructives qui ont permis d'améliorer ce manuscrit.

Un grand merci à mes collègues et amis de l'université, pour leur soutien moral, leurs discussions enrichissantes et les moments de convivialité partagés. Leur amitié et leurs encouragements ont été une source de motivation constante.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance à ma famille, en particulier mes parents ma sœur et mon frère, pour leur soutien indéfectible, leur patience et leur compréhension tout au long de ces années d'études. Leur amour et leurs encouragements m'ont permis de surmonter les moments difficiles et de persévérer.

Enfin, je remercie Les responsables des laboratoires pour leur aide précieuse, qu'il s'agisse de soutien matériel, informatique ou moral.

À tous, je vous adresse un grand merci.

RESUME

Cette étude explore le comportement hydrique des matériaux granulaires, en se concentrant sur cinq types de sable distincts. En caractérisant leurs courbes de rétention d'eau et en examinant l'influence de la taille des grains et de la densité, nous fournissons une compréhension approfondie de la façon dont ces facteurs affectent la succion et les niveaux de saturation des sols. Les résultats clés indiquent que la succion augmente à mesure que la taille des grains diminue, tandis que le degré de saturation diminue avec une succion du sol plus élevée. L'étude souligne l'importance de l'indice de densité, qui montre une corrélation positive avec la succion du sol, en faisant un paramètre critique dans la prédiction du comportement de rétention d'eau. De plus, la distribution de la taille des pores joue un rôle significatif dans l'absorption d'eau, avec des pores plus petits conduisant à une succion plus élevée. Cette recherche offre des perspectives précieuses pour les applications en ingénierie géotechnique et la gestion efficace des sols, en soulignant la nécessité de prendre en compte les propriétés hydrauliques des matériaux granulaires dans diverses conditions environnementales.

Mots-clés : Comportement hydrique, matériaux granulaires, courbe de rétention d'eau, succion du sol, taille des grains, indice de densité, distribution de la taille des pores.

ABSTRACT

This study delves into the hydraulic behavior of granular materials, focusing on five distinct types of sand. By characterizing their water retention curves and examining the influence of grain size and density, we provide a comprehensive understanding of how these factors affect soil suction and saturation levels. Key findings indicate that suction increases as grain size decreases, while the degree of saturation diminishes with higher soil suction. The study highlights the importance of the density index, which shows a positive correlation with soil suction, making it a critical parameter in predicting water retention behavior. Additionally, pore size distribution plays a significant role in water absorption, with smaller pores leading to higher suction. This research offers valuable insights for geotechnical engineering applications and effective soil management, emphasizing the need for considering the hydraulic properties of granular materials in various environmental conditions.

Keywords: Hydraulic behavior, granular materials, water retention curve, soil suction, grain size, density index, pore size distribution.

ملخص

تتعمق هذه الدراسة في السلوك الهيدروليكي للمواد الحبيبية، مع التركيز على خمسة أنواع مختلفة من الرمال. من خلال توصيف منحنيات احتفاظها بالماء وفحص تأثير حجم الحبيبات والكثافة، نقدم فهماً شاملاً لكيفية تأثير هذه العوامل على الشفط ومستويات التشبع في التربة. تشير النتائج الرئيسية إلى أن الشفط يزداد مع انخفاض حجم الحبيبات، بينما ينخفض مستوى التشبع مع زيادة شفط التربة. تسلط الدراسة الضوء على أهمية مؤشر الكثافة، الذي يظهر ارتباطاً إيجابياً مع شفط التربة، مما يجعله معلمة حاسمة في التنبؤ بسلوك احتفاظ الماء. بالإضافة إلى ذلك، يلعب توزيع حجم المسام دوراً مهماً في امتصاص الماء، حيث تؤدي المسام الأصغر إلى شفط أعلى. تقدم هذه الدراسة رؤى قيمة لتطبيقات الهندسة الجيوتكنيكية والإدارة الفعالة للتربة، مشددة على ضرورة أخذ الخصائص الهيدروليكية للمواد الحبيبية في الاعتبار في مختلف الظروف البيئية.

الكلمات المفتاحية: السلوك الهيدروليكي، المواد الحبيبية، منحنى احتفاظ الماء، شفط التربة، حجم الحبيبات، مؤشر الكثافة، توزيع حجم المسام.

Sommaire

RESUME

ABSTRACT

ملخص

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	3
1.1 Introduction	3
1.2 Comportement hydrique des matériaux granulaires	4
1.3 Succion dans les sols	5
1.3.1. Définition de la succion	5
1.3.2 Variabilité de la Succion	5
1.3.3 Les différents types de la succion	5
1.4 Techniques de contrôle et de mesure de la succion	6
1.5 Effets de la succion sur les particules solides	9
1.6 Courbe de succion ou de rétention d'eau	10
1.7 Définitions et allure générale	12
1.8 Points caractéristiques de la courbe de rétention	13
1.9 Différentes phases de la courbe de succion	14
1.10 Hystérésis de la courbe de succion	15
1.11 Influence des propriétés des matériaux sur la rétention d'eau	16
1.12 Revue de la littérature	17
1.13 Conclusion	18
CHAPITRE 2 MATERIAUX ETUDIES ET TECHNIQUE EXPERIMENTALES	20
2.1 Introduction	20
2.2 Description des matériaux étudiés	20
2.3 Caractérisation des matériaux granulaires :	20
2.2.1 L'analyse granulométrique	21
2.2.2 L'indice des vides	22
2.2.3 La masse volumique	24
2.2.4 L'équivalent de sable	25
2.4 Protocole d'essai tensiométrique	26
2.4.1 Méthode Tensiométrique	26
2.4.2 Programme Expérimental	27
2.4.3 Procédure de l'essai tensiometrique	29
2.5 Conclusion	32
CHAPITRE 3 : PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS	32
3.1 Introduction	32

3.2. Courbes de rétention d'eau	32
3.3. Effet de l'indice de densité	35
3.4. Evaluation des courbes de la distribution de la taille d'accès aux pores	36
3.5. Effet de la taille des grains.....	38
3.6. Conclusion.....	39
CONCLUSION GENERALE.....	41
Synthèse des principales conclusions	41
Contributions de l'étude	42
Perspectives futures	43
LISTE DE RÉFÉRENCES	

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Face à la diversité des matériaux granulaires et à leur impact sur les applications pratiques, il devient impératif de caractériser leurs courbes de rétention d'eau de manière approfondie. Une des principales problématiques réside dans la compréhension de la relation entre la succion et la rétention d'eau pour ces sols non saturés. Comment cette relation varie-t-elle en fonction des propriétés intrinsèques des matériaux granulaires tels que leur granulométrie, leur structure poreuse, ou leur composition minérale ? De quelle manière ces caractéristiques influent-elles sur la capacité des matériaux à retenir l'eau dans des conditions non saturées ? En répondant à ces questions, nous pourrions mieux appréhender le comportement hydrique de ces matériaux et ainsi améliorer leur gestion et leur utilisation dans divers domaines d'application.

Cette étude vise donc à explorer et à caractériser les courbes de rétention d'eau des matériaux granulaires, en mettant particulièrement l'accent sur le rôle de la succion dans les sols non saturés. En analysant les variations de cette caractéristique en fonction des propriétés des matériaux, nous pourrions établir des relations significatives et fournir des informations précieuses pour la gestion et l'optimisation de l'utilisation de ces matériaux dans différents contextes.

Dans le premier chapitre, nous présentons une revue sur les matériaux granulaires et leur comportement hydrique. Nous abordons les concepts fondamentaux de la succion, de la courbe de rétention d'eau, et des progrès récents dans la mécanique des sols non saturés. Nous citons également des différentes approches mathématique et physique développées par les chercheurs pour estimer la succion et les propriétés hydriques des sols.

Le deuxième chapitre détaille les caractéristiques des matériaux étudiés et les essais utilisés pour leur caractérisation. Nous décrivons les dispositifs expérimentaux et les procédures d'essais réalisés pour évaluer la succion des sables à différents indices de densité.

Dans le chapitre trois, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus. Nous discutons des courbes de rétention d'eau et de la distribution de la taille des pores en fonction des indices de densité. Les résultats sont analysés pour identifier les tendances clés et les relations entre les paramètres étudiés, permettant de mieux comprendre le comportement hydrique des matériaux granulaires et d'en tirer des conclusions pratiques pour leur utilisation dans différents domaines.

CHAPITRE 1 :

ETUDE

BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction

Les matériaux granulaires jouent un rôle crucial dans divers domaines tels que la construction, l'agriculture, et la géotechnique. Leur comportement hydrique, notamment leur capacité à retenir l'eau, est une caractéristique fondamentale qui influence leur performance dans différents contextes. La courbe de rétention d'eau est une représentation graphique de cette capacité en fonction du potentiel hydrique, ou succion, du matériau. Dans le cas des sols non saturés, où la présence d'eau n'est pas uniforme dans l'espace poreux, la succion devient un paramètre essentiel pour décrire leur comportement hydrique.

Depuis deux décennies, la mécanique des sols non saturés a connu beaucoup de progrès en développant des matériels de laboratoire. Beaucoup de chercheurs ont proposé des formules empiriques et même statistiques, qui tiennent compte de la succion, de la teneur en eau ou de degré de saturation.

Dans le domaine de la mécanique des sols, la succion est utilisée de plus en plus pour l'étude des sols non saturés. La connaissance de la succion dans un sol non saturé a de multiples intérêts. En effet, la succion conditionne les mouvements et l'équilibre de l'eau dans la zone non saturée. En outre, elle influence fortement le comportement mécanique des sols. L'évaluation de la courbe de rétention d'eau joue un rôle important dans la définition de comportement d'un sol non saturé. La courbe de rétention d'eau peut être utilisée pour estimer des fonctions des propriétés non saturées d'un sol telles que la conductivité, la rétention de l'eau, et les fonctions de résistance au cisaillement. En outre comprendre et caractériser les courbes de rétention d'eau de ces matériaux est donc essentiel pour optimiser leur utilisation et garantir leur durabilité. En outre, avec l'accent croissant mis sur la gestion durable des ressources naturelles, une meilleure compréhension de la rétention d'eau dans les matériaux granulaires peut contribuer à une utilisation plus efficace de l'eau et à la préservation de l'environnement.

1.2 Comportement hydrique des matériaux granulaires

Le comportement hydrique des matériaux granulaires est influencé par plusieurs facteurs, notamment la teneur en fines, la saturation, l'état de consolidation, et l'hystérésis hydrique. Ces facteurs interviennent dans la détermination de la résistance mécanique et des déformations permanentes de ces matériaux, qui sont essentiels pour leur utilisation dans divers domaines tels que l'extraction minière, le bâtiment, et l'industrie chimique.

Le comportement hydrique des sols ou des matériaux poreux décrit comment ces matériaux interagissent avec l'eau. Cela inclut l'absorption, la rétention, la transmission et le drainage de l'eau. Les principales caractéristiques du comportement hydrique sont :

❖ Capacité de Rétention d'Eau

La quantité d'eau que le sol peut retenir contre la force de gravité. Cela dépend de la texture et de la structure du sol. La capacité de rétention est influencée par la présence de sels solubles, la non-uniformité géométrique des pores, et la force de succion des capillaires.

❖ Perméabilité

La facilité avec laquelle l'eau peut traverser le sol. Les sols sablonneux ont généralement une perméabilité plus élevée que les sols argileux.

❖ Conductivité Hydraulique

La capacité du sol à transmettre l'eau lorsqu'il est saturé. Cela est influencé par la taille et la connectivité des pores. La conductivité hydraulique à saturation est principalement déterminée par la taille maximale des pores de l'horizon.

❖ Courbe de Rétention d'Eau

Relation entre la teneur en eau du sol et la tension capillaire. Cette courbe aide à comprendre comment le sol libère ou retient l'eau à différentes pressions. La courbe de rétention d'eau est caractéristique pour différents types de sols et montre que la teneur en eau du sol varie en fonction de la succion matricielle.

❖ Hystérésis Hydrique

La différence entre les courbes de rétention d'eau lors de l'absorption et du dessèchement. Cela signifie que le chemin suivi par le sol pour absorber l'eau n'est pas le même que celui suivi pour la libérer. L'hystérésis hydrique est attribuée à plusieurs facteurs, notamment la présence d'air piégé, l'angle de contact solide-eau-air, et la non-uniformité géométrique des pores.

1. 3 Succion dans les sols

1.3.1 Définition de la succion

La succion est une pression plus faible que celle de l'air qui s'exerce sur l'eau à l'intérieur des grains, conduisant à des mouvements de l'eau et constituant une pression négative de l'eau des pores. Selon Bakkari A. (2007), la succion mesure l'attraction entre le sol et l'eau, permettant à l'eau de s'élever à une hauteur supérieure à celle de l'état naturel.

1.3.2 Variabilité de la Succion

La succion du sol peut varier dans un très large éventail, allant de 0 pour un sol saturé à 10^6 kPa pour un sol séché à l'étuve. Cette variabilité est influencée par la texture et la taille des pores, ainsi que par la quantité d'eau contenue par rapport à sa capacité de champ.

1.3.3 Les différents types de la succion

La succion dans les sols non saturés est un paramètre crucial pour comprendre leur comportement hydraulique et mécanique. Voici une explication détaillée des différents types de succion et de leur impact sur les sols :

- **Succion Matricielle**

La succion matricielle exprime la capacité de rétention d'eau des composants du sol, dépendant des propriétés capillaires et d'adsorption. Elle est considérée comme la composante dominante de la succion totale dans les sols non-plastiques.

- **Succion capillaire**

Caractérisée par la loi de Jurin, explique le phénomène d'ascension capillaire et est déterminante pour les mouvements de fluides dans les milieux poreux.

- **Succion d'Adsorption**

Dans les sols fins non saturés, l'attraction de l'eau par le sol est due à la capillarité et à l'adsorption physico-chimique. Les argiles, chargées négativement, ont tendance à adsorber de l'eau à leur surface. Les forces en jeu incluent la liaison hydrogène, les hydroxydes, l'hydratation des cations, l'attraction osmotique, l'attraction électrique, et les forces de Van der Waals.

- **Succion Osmotique**

La succion osmotique, ou pression osmotique, est la capacité de rétention d'eau par les sels dissous dans l'eau interstitielle. Elle dépend de la concentration des sels et est créée par la répulsion osmotique. En géotechnique, elle est souvent négligée en raison de son influence généralement faible sur le comportement des sols.

- **Succion Totale**

La succion totale du sol est la somme de la succion matricielle et de la succion osmotique. Elle est essentielle pour comprendre comment l'eau est retenue et se déplace dans les sols non saturés. La succion totale influence les propriétés mécaniques du sol en modifiant le champ de déformations et en impactant le comportement global du sol.

1.4 Techniques de contrôle et de mesure de la succion

1.4.1 Contrôle par « translation d'axes »

Les géotechniciens ont adapté le principe de translation d'axes aux appareils de mécanique des sols tels que les œdomètres, les essais triaxiaux et les boîtes de cisaillement. Cette technique, développée par Richards, implique l'utilisation d'une cellule hermétique dont la base, sur laquelle repose l'échantillon, est constituée d'une pierre poreuse céramique à porosité fine, immergée dans un récipient d'eau à la pression atmosphérique. Selon la loi de Jurin, une céramique capable de supporter une pression maximale de 500 kPa devra avoir des rayons de pores inférieurs à 0,29 μm . Des membranes semi-perméables en cellulose peuvent également être utilisées, placées sur une pierre poreuse classique. En fixant la pression de l'air à une valeur positive

supérieure à la pression de l'eau, on crée artificiellement une succion positive déterminée.

$$\Psi = Ua - Uw \quad (1.1)$$

L'expérimentation consiste à placer l'échantillon sous pression jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint, ce qui se produit en quelques jours pour des échantillons centimétriques tels que celui de la Figure 1.1 Une fois l'équilibre atteint, on relâche la pression et on extrait rapidement l'échantillon de la cellule, afin de déterminer par pesée sa teneur en eau sous la succion imposée. L'ordre de grandeur des succions maximales imposées avec cette technique est de 1,5 MPa, ce qui impose la réalisation de cellules métalliques de confinement extrêmement fiables, vu l'énergie élastique emmagasinée par les volumes de gaz comprimé.

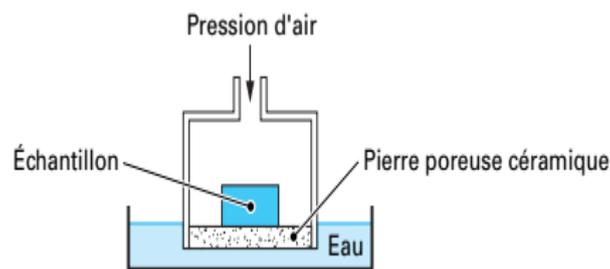


Figure 1.1 Cellule de Richards pour le contrôle de succion par translation d'axe
(Delage and Cui, 2000)

1.4.2 Le contrôle par plaque tensiométrique

Une méthode couramment utilisée pour imposer une succion. Cette méthode consiste à placer de l'eau d'un échantillon sous tension et à le mettre en contact avec une pierre poreuse céramique saturée d'eau, qui est reliée à un récipient d'altitude variable par un tube en forme de U. Un récipient positionné à une altitude inférieure à celle de l'échantillon permet de créer une dépression équivalente à la hauteur de la colonne d'eau. Ce système offre une excellente précision pour les faibles succions, dans la plage de 0 à 10 kPa (correspondant à 1 mètre d'eau). Dans des conditions normales, la tension

de l'eau ne peut être maintenue que jusqu'à la limite imposée par la cavitation, qui est de 80 kPa pour l'eau naturelle, définissant ainsi la plage de mesure tensiométrique (0 - 80 kPa). Cette technique est essentiellement utilisée en laboratoire.

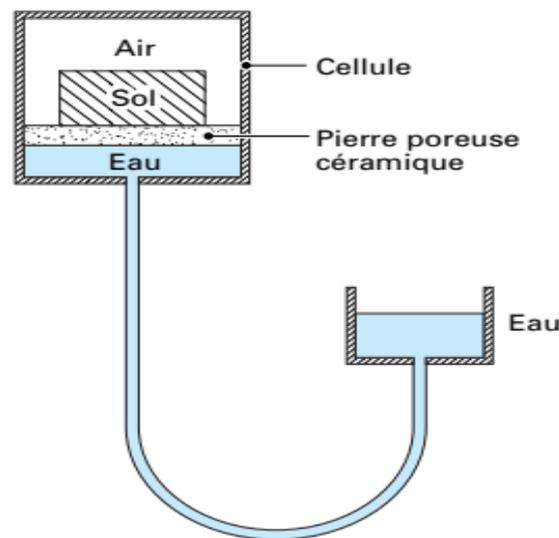


Figure 1.2 Plaque tensiométrique pour faibles succions (Delage and Cui, 2000)

1.4.3 La méthode tensiométrique

La méthode tensiométrique est conçue pour mesurer la pression négative de l'eau dans le sol in situ. Le dispositif se compose d'un réservoir d'eau désaérée de petite taille, avec une extrémité recouverte d'une couche de céramique poreuse qui est imperméable à l'air mais perméable à l'eau, permettant ainsi d'empêcher le passage de l'air. Il est relié à un manomètre par l'intermédiaire d'un tube rempli d'eau désaérée. Pour évaluer la pression négative du sol, le tensiomètre est inséré dans un trou préalablement foré dans le sol ou l'échantillon. Lorsque l'eau du réservoir atteint un équilibre avec l'eau du sol, la pression négative mesurée par le manomètre correspond directement à la pression négative de l'eau dans le sol. Cependant, cette méthode présente une limite de succion maximale d'environ 90 kPa en raison du phénomène de cavitation. En pratique, le tensiomètre doit être placé dans une éprouvette dans le sol préalablement foré, et il est nécessaire

d'assurer un bon contact entre le sol et le réservoir d'eau au travers de la céramique poreuse, afin d'assurer la continuité de la phase d'eau entre le réservoir et le sol, malgré le retrait éventuel du sol.

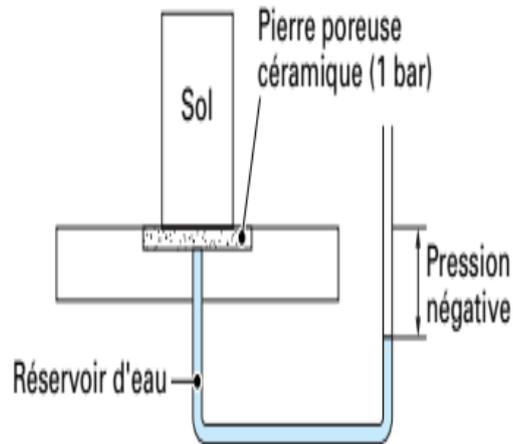


Figure 1. 3 Principe de la mesure de la succion par tensiométrie (Techniques-ingenieur, 2012)

(Feia et al. 2014) et (Della and Feia, 2017) ont étudié en profondeur les caractéristiques de rétention d'eau d'un sable. Ils ont employé une pierre céramique d'une capacité de 50 kPa, ce qui s'est avéré amplement adéquat pour examiner en détail les caractéristiques de rétention d'eau d'un sable. La détermination des courbes de rétention d'eau, notamment la courbe de séchage, repose sur la mesure de la succion par la méthode tensiométrique, telle que décrite par (Delage and Cui, 2000).

1.5 Effets de la succion sur les particules solides

La succion dans les sols non saturés est un phénomène complexe qui influence grandement les interactions entre les particules solides et l'eau interstitielle. Elle affecte les propriétés hydrauliques et mécaniques des sols non saturés, notamment la courbe de rétention d'eau, la perméabilité, l'infiltration, la résistance au cisaillement et la déformabilité.

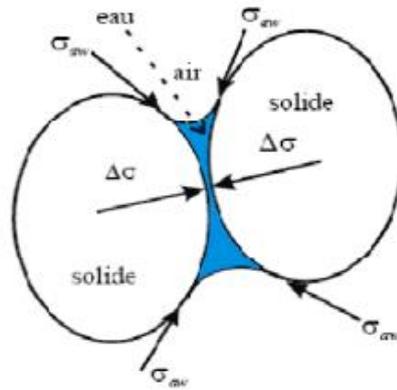


Figure 1.4 Effets de la succion sur les grains du sol

1.6 Courbe de succion ou de rétention d'eau

La courbe de succion, également appelée courbe de rétention d'eau, illustre la relation entre la succion et la teneur en eau du sol, généralement établie à l'aide de la cellule de Richards (Delage & Cui, 2000). Les méthodes de laboratoire pour déterminer cette courbe impliquent souvent l'utilisation d'une dépression d'eau à l'aide d'une plaque poreuse ou d'une surpression d'air sur l'échantillon (Klute, 1986 ; Carter & Gregorich, 2007). Les sols non saturés subissent des cycles de séchage et de remouillage en fonction des conditions climatiques, ce qui affecte leur succion et leur rétention d'eau.

Une courbe de succion est spécifique à un matériau, et sa pente indique l'effort de drainage nécessaire pour modifier la teneur en eau (%). Les études récentes ont approfondi la compréhension de la courbe de rétention d'eau et de ses applications. Par exemple, Barbour (1998) et Bachmann et Ploeg (2002) fournissent une vue d'ensemble complète de l'état actuel des connaissances dans ce domaine.

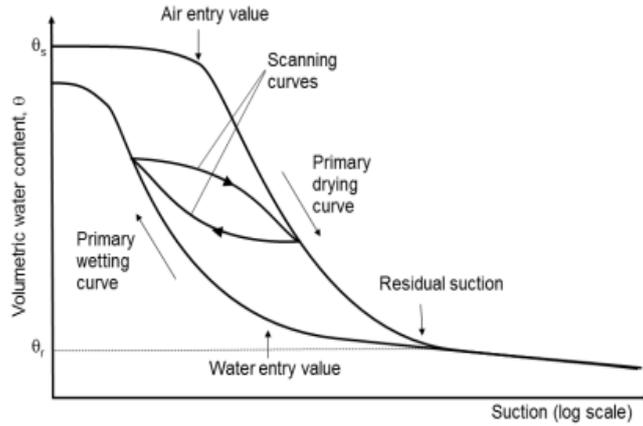


Figure 1.5 Courbe typique de rétention d'eau dans le sol (Toll *et al.*, 2016)

Différentes fonctions mathématiques ont été proposées pour ajuster les points expérimentaux de la courbe de rétention d'eau, telles que celles de Gardner (1958), van Genuchten (1980) et Fredlund et Xing (1994). Des études telles que celles menées par Giménez *et al.* (1997), Fredlund, Wilson et Fredlund (2002) et Chertkov (2003) ont exploré la relation entre la forme de la courbe de rétention d'eau et les caractéristiques physiques du sol, comme sa courbe granulométrique.

Le modèle de Bouacida *et al.* a également été utilisé comme base pour poursuivre notre travail.

$$S_e = \left(1 + \left(\frac{s^*}{(3.75I_D + 1) * cu} \right)^{(6.25I_D + 2.89)} \right)^{\frac{1}{(6.25I_D + 2.89)} - 1} - (0.12I_D + 0.26) \quad (1.2)$$

Soit : $s^* = s \cdot cu$, s : succion normalisé Cu : coefficient de uniformité I_D : l'indice de densité

La modélisation de l'hystérésis entre les chemins de drainage et d'imbibition a également été étudiée, avec des propositions de modèles par Saix (1987) et Pham et Fredlund (2011). Les couplages hydromécaniques (Salager, 2007 ; Salager *et al.* 2013) ainsi que l'influence de la température (Tang, 2005 ; Salager *et al.* 2006) ont également été pris en compte dans ces recherches.

1.7 Définitions et allure générale

La Figure 1.6a présente les formes typiques des courbes de rétention d'eau pour divers types de sols. La teneur en eau à saturation (w_{sat}) diminue à mesure que la compacité du sol augmente. Ainsi, les argiles, généralement moins compactes, montrent une teneur en eau à saturation plus élevée comparativement aux sols plus granulaires tels que les limons et les sables.

La succion d'entrée d'air (s_a) représente la succion à partir de laquelle le sol commence à se désaturer. Selon la loi de Jurin, cette succion est liée au rayon moyen des pores, spécifiquement aux plus grands pores présents dans le milieu. Par conséquent, les sols à granulométrie fine, comme les argiles, qui possèdent une porosité plus fine, ont des succions d'entrée d'air plus élevées que les sols à granulométrie plus grossière, tels que les limons et les sables.

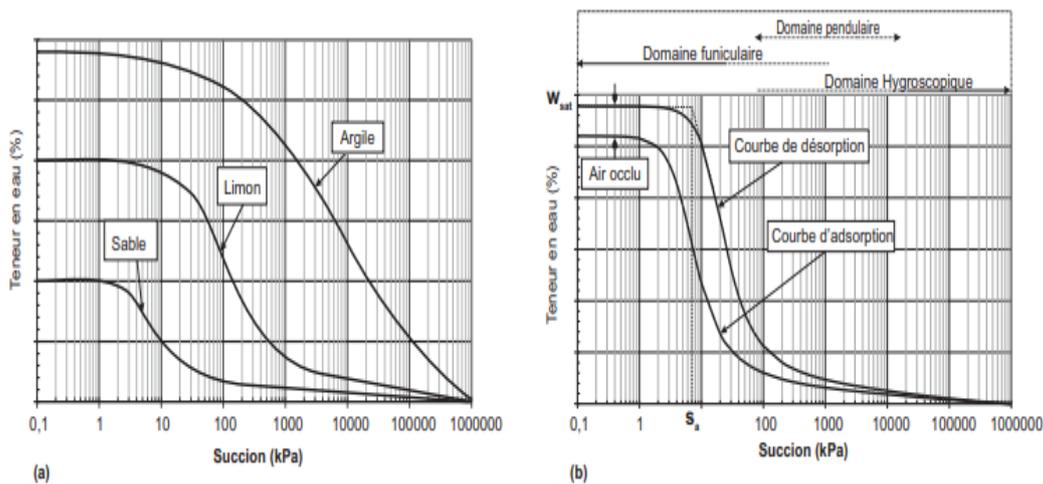


Figure 1.6 a) Courbes de rétention d'eau pour différents types de sols

b) Description générale de cette courbe (Salager, 2011)

1.8 Points caractéristiques de la courbe de rétention

Les caractéristiques initiales de la courbe de rétention d'eau d'un sol peuvent être identifiées à travers des paramètres tels que le point d'entrée d'air, la teneur en eau à saturation (θ_s) et la teneur en eau résiduelle (θ_r). Le point d'entrée d'air correspond à la succion ψ_b à partir de laquelle le sol cesse d'être saturé et les pores les plus larges commencent à se vider (Fredlund & Xing, 1994; Fredlund, Fredlund & Wilson, 1994; Weynants, 2005).

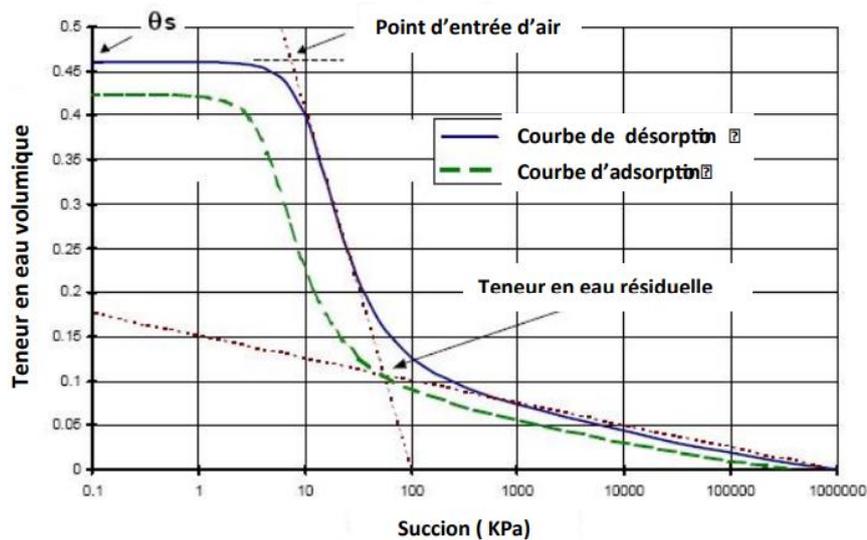


Figure 1.7 Les paramètres caractérisant la courbe de succion (Fredlund, 1997)

La teneur en eau résiduelle représente le point où la phase liquide cesse d'être connectée et l'eau cesse de circuler, restant piégée dans les pores non connectés. Quelle que soit la valeur du gradient hydrique, il est impossible de faire circuler l'eau, ce qui entraîne une conductivité hydraulique nulle. La teneur en eau à saturation et la succion au point d'entrée d'air augmentent avec la plasticité du sol (Fredlund & Rahardjo, 1993).

1.9 Différentes phases de la courbe de succion

La Figure 1.8 illustre les divers stades de la courbe de rétention d'eau.

- **Première phase**

Il s'agit de la phase de l'effet limite, située près de la teneur en eau à saturation où la courbe est pratiquement horizontale. Cette partie de la courbe est connue sous le nom de "frange capillaire" et reflète la nécessité d'appliquer une dépression non nulle pour drainer un milieu poreux. Cela s'explique par le fait que les pores ne dépassent pas une certaine taille maximale et que les rayons de courbure des interfaces eau-air sont nécessairement inférieurs à une valeur seuil R_0 (Fredlund & Rahardjo, 1993).

- **Deuxième phase**

Il s'agit de la phase de transition où la courbe de succion présente une pente relativement forte.

- **Troisième phase**

Il s'agit de la phase de l'effet résiduel où la courbe se réduit à une ligne droite avec une pente faible, voire infinie, à mesure que l'on s'approche de la teneur en eau résiduelle. Lorsque le sol se dessèche progressivement, les interfaces eau-air acquièrent un rayon de courbure de plus en plus petit, entraînant une augmentation de la succion (Lu & Likos, 2004).

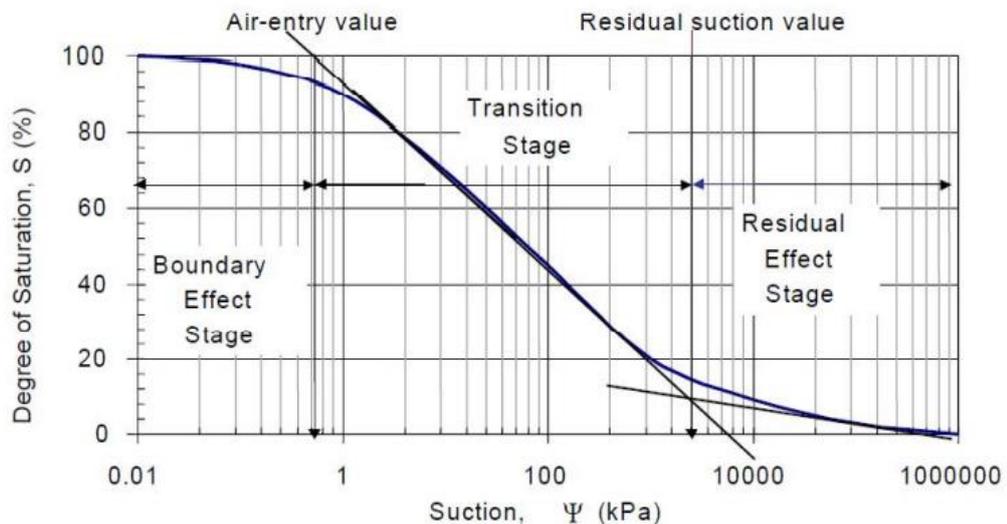


Figure 1.8 Différentes phases de la courbe de succion (Vanapalli, Wright and Fredlund, 2000)

1.10 Hystérésis de la courbe de succion

Lorsqu'on détermine expérimentalement les courbes de rétention d'un matériau donné en désorption et en adsorption, on constate que les chemins de drainage et d'imbibition ne se superposent pas (Figure 1.6). Le chemin suivi lors du drainage se trouve au-dessus du chemin d'imbibition, révélant ainsi un phénomène d'hystérésis. Cela signifie qu'en général, il n'existe pas de correspondance biunivoque entre la succion et sa variable associée, telle que la teneur en eau. La Figure 1.9 présente les trois mécanismes classiques attribués à ce phénomène d'hystérésis (Delage & Cui, 2000).

- ❖ **Pores connectés en parallèle** : Lors du drainage, pour une même charge hydrique, le pore de plus petit diamètre reste saturé tandis qu'il est vide lors de l'imbibition.
- ❖ **Pores connectés en série** : En raison de la variation de rayon, il est nécessaire d'avoir une hauteur h plus importante lors du drainage pour atteindre le même niveau de succion.
- ❖ **Variation de l'angle de contact** : Lors de l'imbibition, l'angle de contact est plus important que lors du drainage. Comme démontré par l'effet de goutte mentionné par Masekanya (2008), l'angle de contact 2, qui se produit lors du mouvement relatif causé par l'air poussant l'eau, est inférieur à l'angle 1 qui se produit lors du mouvement relatif causé par l'eau poussant l'air.

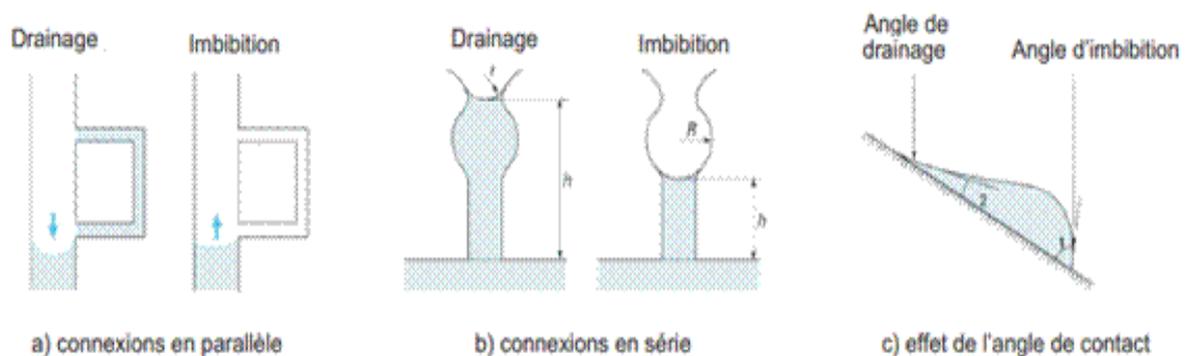


Figure 1.9 Mécanismes invoqués pour l'hystérésis des courbes de rétention d'eau (Masekanya, 2008)

1.11 Influence des propriétés des matériaux sur la rétention d'eau

La rétention d'eau dans les sols et autres matériaux poreux est significativement influencée par leurs caractéristiques physiques. Voici un aperçu des principaux facteurs et de leur impact, appuyés par des références scientifiques.

❖ Texture du sol

La texture du sol, définie par la proportion de sable, de limon et d'argile, est un déterminant clé de la rétention d'eau. Les sols argileux, avec des particules fines et une grande surface spécifique, retiennent plus d'eau que les sols sableux, qui ont des particules plus grosses et des pores plus larges. Les sols limoneux, ayant des particules de taille intermédiaire, présentent une capacité de rétention d'eau modérée (Hillel, 1998).

❖ Structure du sol

La structure du sol, qui est l'arrangement des particules en agrégats, affecte également la rétention d'eau. Un sol bien structuré, avec des agrégats stables, retient mieux l'eau qu'un sol mal structuré. La présence d'agrégats améliore la porosité et crée des espaces supplémentaires pour stocker l'eau (Bronick & Lal, 2005).

❖ Porosité

La porosité totale, c'est-à-dire le volume des pores par rapport au volume total du sol, détermine la capacité du sol à retenir l'eau. Une porosité élevée signifie plus d'espace pour stocker l'eau. Cependant, la taille et la distribution des pores sont cruciales : les micropores retiennent l'eau par capillarité, tandis que les macropores facilitent le drainage (Jury & Horton, 2004).

❖ Densité apparente

La densité apparente, qui mesure la masse sèche du sol par unité de volume, influence la rétention d'eau. Une densité apparente plus faible (sol moins compacté) est associée à une porosité plus élevée et, par conséquent, à une meilleure capacité de rétention

d'eau. Un sol compacté avec une densité apparente élevée a une capacité de rétention d'eau réduite (Blake & Hartge, 1986).

❖ **Teneur en matière organique**

La matière organique améliore la structure du sol, augmente la porosité et donc la capacité de rétention d'eau. Les sols riches en matière organique retiennent mieux l'eau car les substances organiques peuvent absorber et retenir de grandes quantités d'eau (Rawls et al. 2003).

❖ **Plasticité**

La plasticité, souvent mesurée par l'indice de plasticité, est un indicateur de la capacité des particules de sol à se déformer sans se rompre. Les sols avec une haute plasticité, comme les argiles, retiennent plus d'eau en raison de leur surface spécifique élevée et de leur capacité d'adsorption d'eau (Mitchell & Soga, 2005).

❖ **Succion matricielle**

La succion matricielle est la force qui retient l'eau dans les pores du sol contre la gravité. Elle dépend de la texture, de la structure et de la teneur en eau du sol. Une succion matricielle élevée signifie une meilleure rétention d'eau, particulièrement dans les sols non saturés (Fredlund & Rahardjo, 1993).

1.12 Revue de la littérature

Quelques recherches existantes dans la littérature

- **Étude de Berthelin et al. (2005)** : Cette étude a examiné l'effet de la granulométrie sur la rétention d'eau des sols argileux en utilisant des méthodes expérimentales telles que la courbe de rétention d'eau et la distribution de la taille des pores.
- **Recherche de Silva et al. (2012)** : Cette étude a analysé comment la granulométrie des sols affecte leur capacité à retenir l'eau dans les régions semi-arides, en mettant en évidence l'importance des sols fins dans la conservation de l'eau.
- **Étude de Ferrand et al. (2017)** : Cette recherche a examiné l'impact de la granulométrie sur la rétention d'eau des sols agricoles en utilisant des modèles

numériques pour simuler le comportement hydrique des sols à différentes granulométries.

- **Recherche de Leal et al. (2020)** : Cette étude a analysé la relation entre la granulométrie et la rétention d'eau dans les sols sableux des régions côtières, en mettant en évidence comment les différentes fractions granulométriques contribuent à la rétention d'eau.

Ces études, parmi d'autres, démontrent l'importance de la granulométrie dans la rétention d'eau des matériaux granulaires et fournissent des informations précieuses sur la manière dont les variations de la granulométrie peuvent influencer le comportement hydrique des sols dans divers environnements et conditions.

1.13 Conclusion

Ce chapitre dédié à l'étude bibliographique, nous avons plongé dans la complexité du comportement hydrique des matériaux granulaires, en mettant en lumière plusieurs concepts et techniques essentiels.

La courbe de rétention d'eau et la succion ont été identifiées comme des paramètres clés dans la compréhension de la réponse hydrique des matériaux granulaires. Nous avons examiné en détail les techniques de contrôle et de mesure de la succion.

En explorant les définitions et l'allure générale des courbes de rétention d'eau, ainsi que les points caractéristiques de ces courbes, nous avons pu mieux appréhender les différentes phases de la courbe de succion, notamment l'hystérésis de la courbe.

Enfin, en effectuant une revue de la littérature, nous avons examiné l'influence des propriétés des matériaux sur la rétention d'eau, éclairant ainsi les nombreuses variables qui interviennent dans ce processus complexe.

Cette exploration approfondie des études bibliographiques a jeté les bases nécessaires pour aborder de manière éclairée les expérimentations à venir sur le comportement hydrique des matériaux granulaires.

CHAPITRE 2

MATERIAUX ETUDIES
ET TECHNIQUE
EXPERIMENTALES

CHAPITRE 2 : MATERIAUX ETUDIÉS ET TECHNIQUE EXPERIMENTALES

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 ainsi que les procédures d'essais réalisés.

2.2 Description des matériaux étudiés

Les essais ont été appliqués sur cinq types de sable possédant les caractéristiques représentées par la Figure 2.1 :



Figure 2.1 Les types des sables utilisés

2.3 Caractérisation des matériaux granulaires :

Pour caractériser ces matériaux, les tests d'identification suivants ont été réalisés :

- (1) Analyse de la granulométrie ;
- (2) Détermination de l'indice des vides minimum et maximum ;

- (3) Détermination de la masse volumique : méthode de pycnomètre ;
- (4) Détermination de l'équivalent de sable.

2.2.1 L'analyse granulométrique

Elle permet de déterminer la composition granulométrique du sol grâce à un processus de faire passer un échantillon à travers des tamis identifiés d'une façon décroissante du haut vers le bas. Les gros grains restent retenus dans les tamis (refus), tandis que les grains fins traversent les tamis (tamisât). Le temps où les masses emprisonnées dans les tamis deviennent constantes marque la fin du tamisage. Après le pesage des refus, la masse de chaque refus est comparée à la masse initiale de l'échantillon ce qui autorise de calculer les pourcentages de refus cumulatif et de passants. Les résultats sont présentés sur un graph logarithmique, ils construisent une courbe granulométrique qui donne une distribution de la taille des particules.



Figure 2.2 Analyse granulométrique.

a) Tamiseuse et la série des tamis utilisés. b) le pesage de l'échantillon granulaire.

Les résultats de l'analyse granulométrique sont les suivantes Figure 2.3.

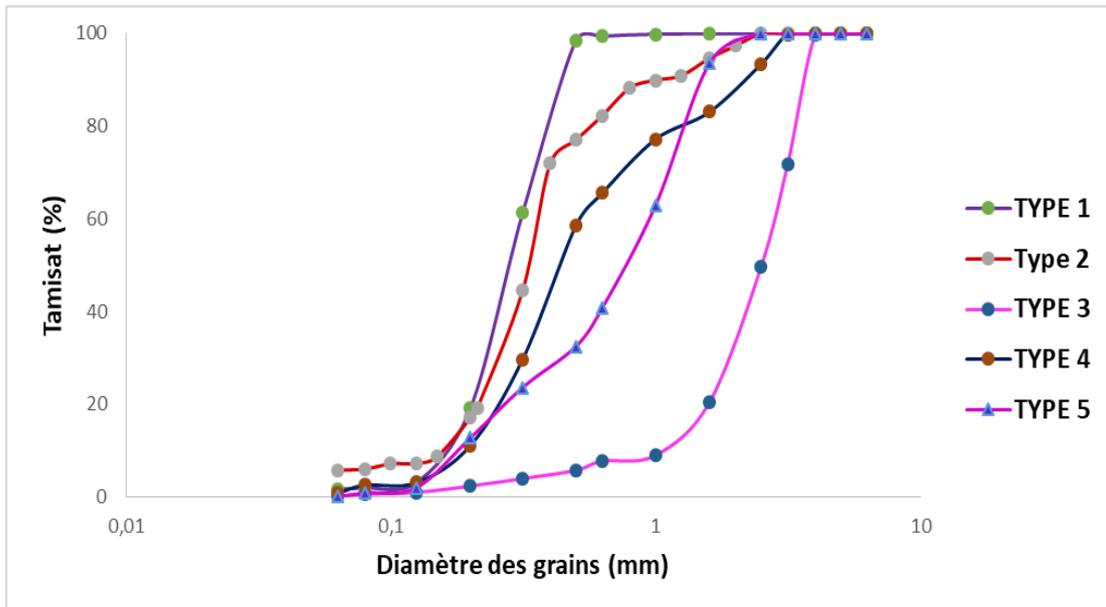


Figure 2.3 Courbes granulométriques des matériaux étudiés

2.2.2 L'indice des vides

L'évaluation des indices des vides maximum (e_{max}) et minimum (e_{min}) constitue une étape cruciale, spécifiquement pour les sols sans cohésion.

Pour déterminer e_{max} , représentant le taux de vide pour l'état le plus lâche possible, nous utilisons un entonnoir en verre placé au fond du moule (masse connue). En remplissant l'entonnoir avec du sable, nous veillons à le soulever lentement, garantissant ainsi que l'entonnoir reste plein d'échantillon jusqu'à la fin. Nous utilisons une règle pour enlever l'excès de sable du moule. Ensuite, en pesant l'échantillon dans la balance et en appliquant la formule ci-dessous nous obtenons la valeur de e_{max} .

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (2.1)$$

Où ρ_s : la masse volumique absolue, ρ_d : la masse volumique apparente



Figure 2.4 Détermination de l'indice de vides (e_{max})

- a) remplissage utilisant l'entonnoir en verre ; b) moule plain avant l'enlèvement de l'excès ;
c) le pesage du moule après Le nettoyage de l'excès

Pour e_{min} , représentant le taux de vide pour l'état le plus dense possible, nous déposons soigneusement une couche de sable dans le moule à l'aide d'une cuillère, puis secouons légèrement le moule avec un petit marteau. Ce processus est répété jusqu'à ce que le moule soit rempli, et avec une règle, nous retirons l'excès de sable du moule. Ensuite, en pesant à nouveau l'échantillon dans la balance, nous obtenons la valeur de e_{min} à travers la même méthode de calcul précédente.

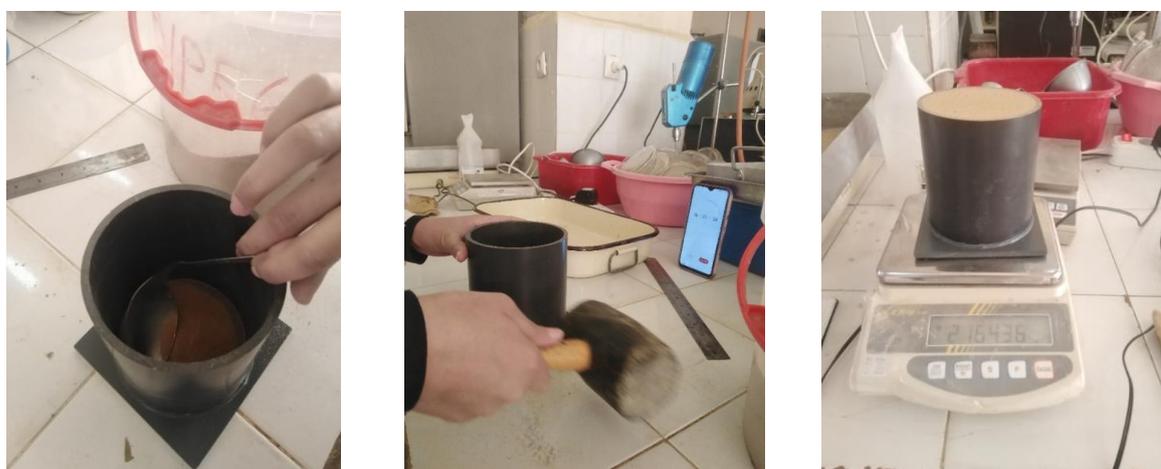


Figure 2.5 Détermination de l'indice de vides (e_{min})

- a) remplissage utilisant une cuillère ; b) la secousse du moule ;
c) le pesage du moule après Le nettoyage de l'excès.

2.2.3 La masse volumique

Cette méthode permet d'évaluer la compacité et la densité des granulats, ce qui est essentiel dans de nombreux domaines de constructions.

Tout d'abord, on pèse le pycnomètre vide et sec avec une précision appropriée, puis on ajoute l'échantillon granulaire au pycnomètre et on le pèse à nouveau. Ensuite, on le remplit d'eau distillée jusqu'à ce qu'il déborde, en éliminant toutes les bulles d'air. Après avoir essuyé l'excès d'eau sur le bord du pycnomètre, on le pèse à nouveau avec précision. En utilisant les masses mesurées du pycnomètre vide, plein d'eau et plein d'échantillon de matériau granulaire, on calcule la masse volumique apparente et absolue du matériau par les formules mentionnées ci-dessous. Ce processus méticuleux garantit des résultats fiables et précis, essentiels pour garantir la qualité et la performance des matériaux utilisés dans diverses applications.

$$\rho_d = \frac{(m_2 - m_1)}{v} \quad (2.2)$$

$$\rho_s = \rho_w \frac{(m_2 - m_1)}{(m_4 + m_2 - m_1 - m_3)} \quad (2.3)$$

Soit m_1 : la masse de pycnomètre vide, m_2 : la masse de pycnomètre avec l'échantillon, m_3 : la masse de pycnomètre avec l'eau distillée, m_4 : la masse de pycnomètre avec l'échantillon et l'eau distillée, v : volume de pycnomètre.

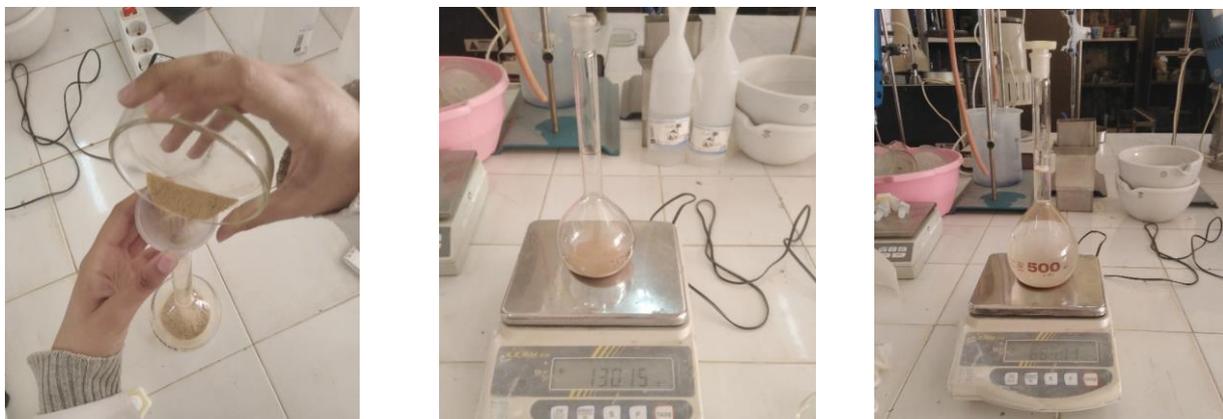


Figure 2.6 Détermination de la masse volumique

a) remplissage du pycnomètre ; b) pesage de l'échantillon dans le pycnomètre ;

c) pesage du pycnomètre avec l'échantillon et l'eau.

2.2.4 L'équivalent de sable

L'essai consiste à laver et à tamiser l'échantillon afin de séparer les particules fines. Ensuite, l'échantillon est séché et pesé avant d'être traité chimiquement pour éliminer les particules organiques. La quantité de particules fines est évaluée en mesurant la différence de hauteurs entre les couches, soit visuellement, soit à l'aide d'un piston. Un résultat d'équivalent de sable élevé indique un sable propre et de haute qualité, tandis qu'un résultat plus bas peut signaler une contamination par des particules fines indésirables. Ce test revêt une importance cruciale pour garantir la qualité des matériaux utilisés dans la construction et assurer la durabilité des structures ; En classifiant selon les formules suivantes.

$$Ev = \frac{h1}{h2} \quad (2.4)$$

$$Ep = \frac{h1}{h2p} \quad (2.5)$$



Figure 2.7 L'équivalent de sable

a) remplissage du tube de solution avec l'échantillon ; b) deux échantillons une après lavage et la deuxième avant le lavage ; c) mesure d'hauteur visuelle.

Le Tableau 2.1 récapitule toutes les caractéristiques physiques obtenues à partir des essais d'identification réalisés sur les cinq types de sables étudiés.

Tableau 2. 1 Caractéristiques des matériaux à analyser

Sable	D_{g10} (mm)	D_{g30} (mm)	D_{g50} (mm)	D_{g60} (mm)	C_u	C_c	$E_{piston}(\%)$	classification selon (E_p)
Type1	0,15	0,21	0,28	0,31	2,06	0,94	82,71	très propre
Type2	0,15	0,24	0,33	0,36	2,4	1,06	40,13	argileux
Type3	1,08	1,85	2,51	2,8	2,59	1,13	79,31	propre
Type4	0,18	0,32	0,44	0,53	2,94	1,07	22,24	argileux
Type5	0,18	0,45	0,75	0,96	5,33	1,17	99	très propre

2.4 Protocole d'essai tensiométrique

2.4.1 Méthode tensiométrique

L'estimation de la taille des pores est réalisée en analysant les courbes de rétention d'eau, en particulier la courbe de séchage. Le modèle d'écoulement sous-jacent suppose l'existence d'un réseau de pores composé de tubes cylindriques parallèles, où l'écoulement de l'eau se produit dans la direction de l'axe des cylindres. Cette hypothèse correspond au chemin de séchage, lorsque les pores sont initialement remplis d'eau liquide (Figure 2.8 b). Lors du mouillage des pores, la condensation de la vapeur d'eau présente à l'intérieur se produit par la formation de ménisques cylindriques le long des parois des pores (Figure 2.8 a). Ces courbes sont déterminées par la mesure tensiométrique de la succion (Delage et Cui, 2000).

La méthode tensiométrique est une technique utilisée pour mesurer la pression négative de l'eau sous tension. Elle fonctionne de manière similaire aux mesures de pression positive, mais nécessite l'utilisation d'une fine pierre poreuse en céramique. Cette pierre doit rester saturée en tout point de succion et garantir la continuité de l'eau entre le sol non saturé et le tube, qui doit rester rempli d'eau. Il est essentiel que la pierre céramique soit parfaitement saturée d'eau désaérée pour assurer le bon fonctionnement du tensiomètre. La mesure maximale de succion réalisable dépend de la capacité maximale de pression négative que la pierre céramique peut supporter, car au-delà de cette capacité, la pierre risque de se désaturer. Lors des essais effectués par (Feia et al.), une pierre céramique d'une capacité de 10 kPa a été employée, ce qui s'est avéré amplement adéquat pour examiner en détail les caractéristiques de rétention d'eau d'un sable.

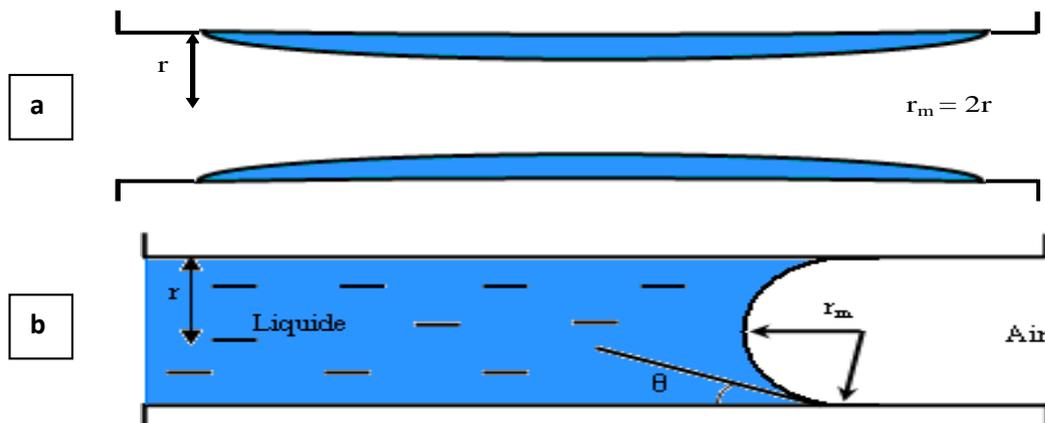


Figure 2.8 Schéma explicatif des processus de séchage et mouillage dans le réseau poreux constitué de cylindres de rayon r , (r_m est le rayon du ménisque de l'interface air-eau) (d'après(Do, 1998) a). Processus de mouillage. b) Processus de séchage

2.4.2 Programme Expérimental

La Figure 2.9 présente le dispositif expérimental utilisé, comprenant une cellule œdométrique de 70 mm de diamètre et 37 mm de hauteur, une pierre céramique avec une capacité de -50 kPa lors du séchage, ainsi qu'un tube d'eau gradué de 7 mm de diamètre relié à un réservoir d'eau désaérée. L'ensemble du dispositif est placé dans une salle climatisée à une température de 20°C. Pendant toute la durée de l'expérience, l'échantillon est recouvert d'un film de cellophane afin de prévenir l'évaporation de l'eau.

La méthode de mesure de la succion par tensiomètre consiste à augmenter progressivement la succion à l'intérieur de l'échantillon tout en enregistrant les variations correspondantes de la teneur en eau. Le niveau d'eau dans le tube gradué est maintenu plus bas que celui de l'échantillon afin de créer une succion dans le sol. Après l'établissement de l'équilibre hydrique, cela entraîne une variation du niveau d'eau dans le tube gradué. Étant donné la surface relativement petite du tube gradué, on peut négliger la quantité d'eau évaporée pendant l'équilibre hydrique. En observant les changements de niveau d'eau dans le tube, il est possible de déterminer le volume d'eau échangé entre le sol et le tube. En appliquant différents niveaux successifs de succion, il devient possible de générer des courbes de rétention d'eau pour les processus d'humidification et de séchage. Le tube est gradué avec une résolution de 1 mm, ce qui permet une précision de mesure de volume d'eau d'environ 40 mm³, négligeable en comparaison du volume poreux de l'éprouvette de sol (environ 57 000 mm³).

À partir de la courbe de rétention d'eau (courbe de séchage) et en appliquant la loi de Jurin qui permet d'exprimer la succion en fonction du rayon d'accès des pores, on peut évaluer la distribution de la taille des pores :

$$s = u_a - u_w = \frac{4\sigma_s \cos\theta}{D_p} \quad (2.6)$$

Où s est la succion, D_p est le diamètre d'accès des pores, u_a et u_w sont respectivement les pressions d'air et d'eau, σ_s est la tension de surface eau-air, et θ est l'angle de contact entre le ménisque et le solide, dépendant de la propriété de la surface, du mouvement du ménisque, et de la viscosité (Decker, EL, Frank, B., Suo, Y. et Garoff, 1999; Espinoza et Santamarina, 2010; Lourenco et al., 2012). L'approximation $(\cos \theta \approx 1)$ est couramment utilisée dans la littérature pour évaluer la distribution de la taille des pores (Mitchell et Soga, 2005 ; Carter et Gregorich, 2007 ; Innocentini et Pandolfelli, 2001).

Pour l'eau, $\sigma_s = 72,75 \times 10^{-3}$ N/m.

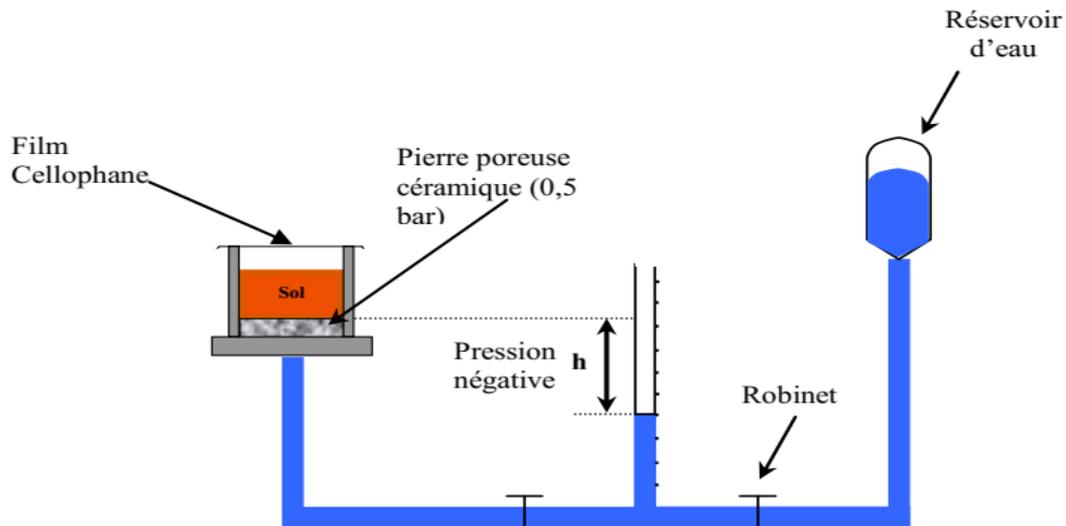


Figure 2. 9 Schéma explicatif de principe de la méthode tensiométrique de mesure de la succion (Feia et al., 2014)

2.4.3 Procédure de l'essai tensiométrique

Pour réaliser un essai tensiométrique, nous suivons une série d'étapes précises. Tout d'abord, nous calculons la masse de l'échantillon en fonction du volume de la cellule et la masse volumique apparente.

Ensuite, nous préparons la cellule dans des conditions spécifiques où la pierre poreuse doit être saturée. Les différentes pièces de la cellule sont assemblées sous l'eau afin d'éviter la formation de bulles d'air. Une fois la cellule assemblée, nous éliminons l'excès d'eau à l'intérieur.

Nous installons ensuite un tube sur la cellule, qui est connecté à un autre tube gradué pour la mesure. Ce tube est également relié à un réservoir rempli d'eau désaérée. Il est crucial de vérifier qu'il n'y a pas de bulles d'air dans le tube reliant la cellule, car cela pourrait fausser les résultats.

L'échantillon est ensuite placé dans la cellule et emballé soigneusement avec du papier cellophane pour éviter toute contamination ou perte de matériau.

MATERIAUX ETUDIES ET TECHNIQUE EXPERIMENTALE

Nous déterminons ensuite un niveau d'eau de référence et procédons à l'ouverture du robinet, permettant à l'eau de traverser la cellule. Nous mesurons enfin la différence entre les niveaux d'eau dans le tube gradué, ce qui nous permet de calculer la succion dans le sol.



Figure 2.10 Procédure de l'essai tensiometrique

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous détaillons les caractéristiques des matériaux étudiés, ainsi que les techniques et procédures expérimentales adoptées dans le cadre de cette étude :

Les analyses granulométriques ont permis de déterminer la distribution des tailles des grains des différents types de sable. L'indice des vides et la masse volumique, mesurés avec un pycnomètre, ont fourni des informations essentielles sur la compacité et la densité des sables.

L'équivalent de sable a été utilisé pour évaluer la propreté relative des échantillons, indiquant la proportion de fines présentes. Les essais tensiométriques ont permis de mesurer la succion des sables à différents indices de densité.

Les essais de caractérisation ont fourni une base solide pour comprendre les propriétés hydriques des sables étudiés, mettant en évidence l'influence de la taille des grains et de la densité sur leur comportement hydraulique. Ces données sont essentielles pour les applications pratiques en ingénierie géotechnique et pour une gestion efficace des sols dans divers contextes.

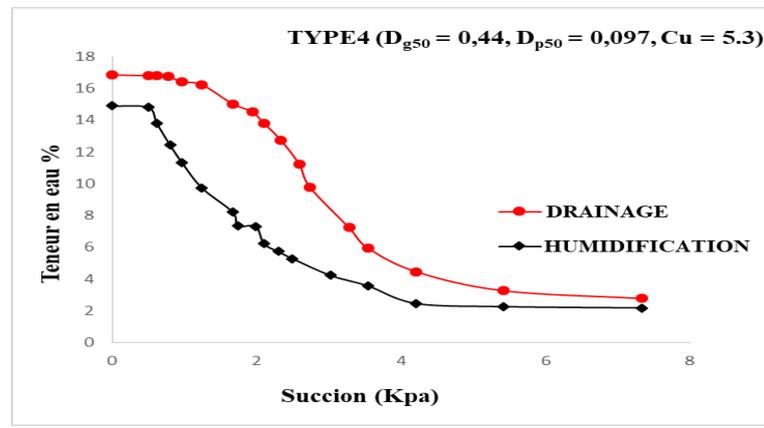
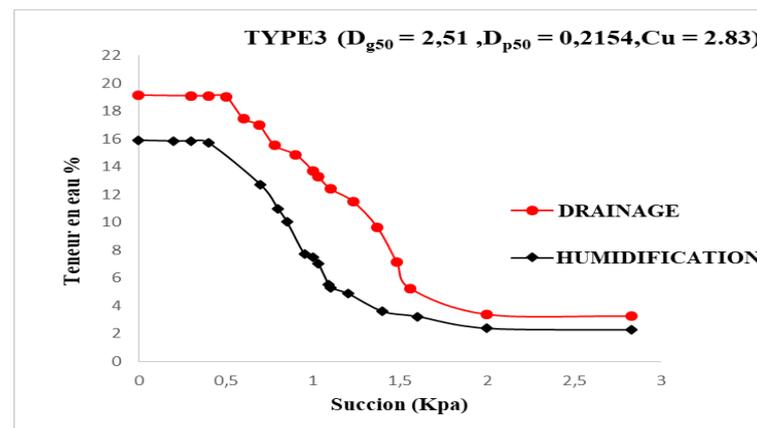
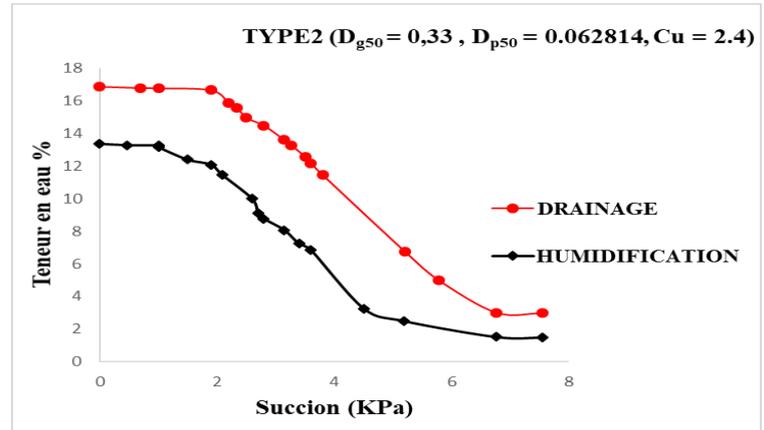
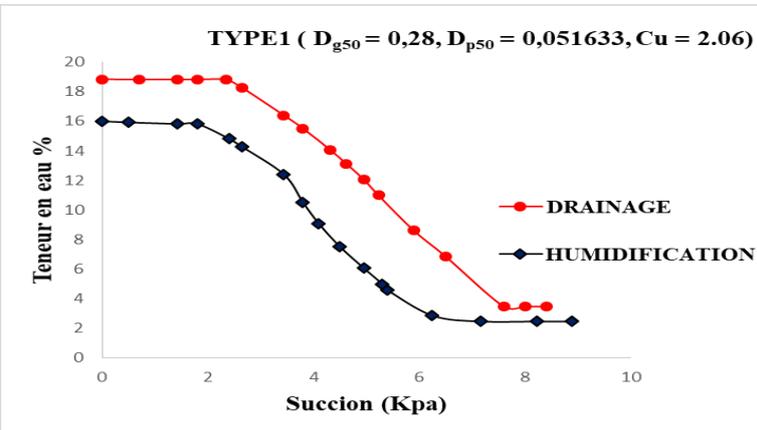
CHAPITRE 3 :
PRESENTATION
ET ANALYSE
DES
RESULTATS

CHAPITRE 3 : PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus par la méthode tensiométrique sur les sables étudiés. Nous avons réalisé des essais tensiométriques avec différents indices de densité (ID) afin d'évaluer les courbes de rétention d'eau des cinq types de sable étudiés.

3.2 Courbes de rétention d'eau



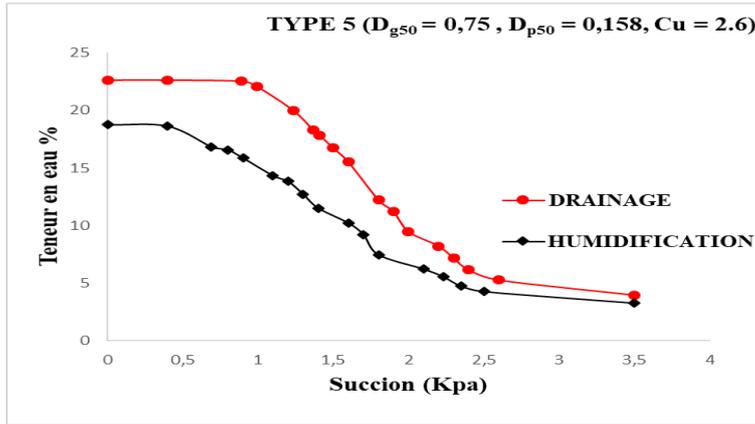


Figure 3.1 Courbes de succion des phases humidification et drainage des cinq Types

La Figure 3.1 illustre les courbes de rétention d'eau pour les cinq types de sable, obtenues en utilisant le modèle proposé avec un indice de densité de 0,9. On a observé que la succion augmente avec la diminution de la taille des grains et le degré de saturation diminue à mesure que la succion du sol augmente. Ces courbes mettent clairement en évidence les différentes propriétés de rétention d'eau des sols non saturés et leur allure est cohérente avec celles présentées dans la littérature pour des matériaux similaires.

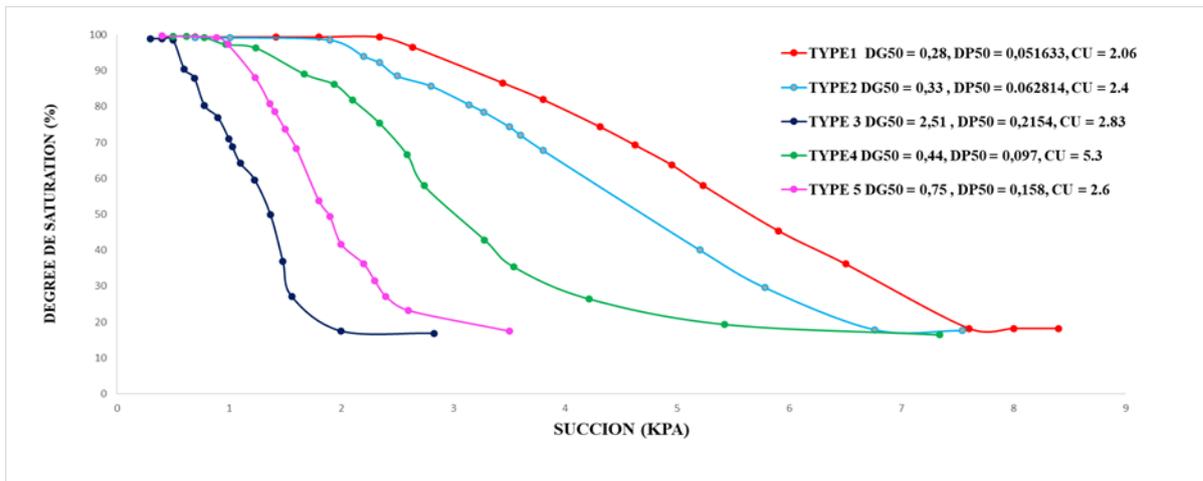


Figure 3.2 Courbes de rétention d'eau pour les cinq types de sable étudiés

Les courbes de succion en fonction de degré de saturation illustrent les différences marquées entre les diverses distributions granulaires et poreuses des matériaux examinés. Les points d'entrée d'air varient selon la taille des pores, les matériaux à pores plus petits exigeant une succion plus élevée pour amorcer l'entrée d'air, tandis que ceux à pores plus grands nécessitent une succion moindre. De même, la teneur en eau résiduelle diffère en fonction de la taille des pores, les matériaux à pores plus petits conservant une quantité d'eau plus élevée, même à des sucions élevées, du fait de leur capillarité plus forte, tandis que ceux à pores plus grands affichent une teneur en eau résiduelle plus faible, en raison de la moindre rétention d'eau à des sucions élevées.

Par ailleurs, le comportement des courbes de rétention d'eau varie également selon la granulométrie des matériaux. Les matériaux à grains plus fins montrent une descente lente des courbes après le point d'entrée d'air, mettant en évidence la capacité des petits pores à retenir l'eau face à des forces de succion élevées. En revanche, les matériaux à grains plus gros présentent une descente rapide des courbes après le point d'entrée d'air, révélant une faible rétention d'eau due aux gros pores. Ces observations soulignent l'importance critique de la distribution granulométrique et de la taille des pores dans la compréhension du comportement hydrique des matériaux granulaires.

3.2.1 Le point d'entrée d'air et la teneur en eau résiduelle

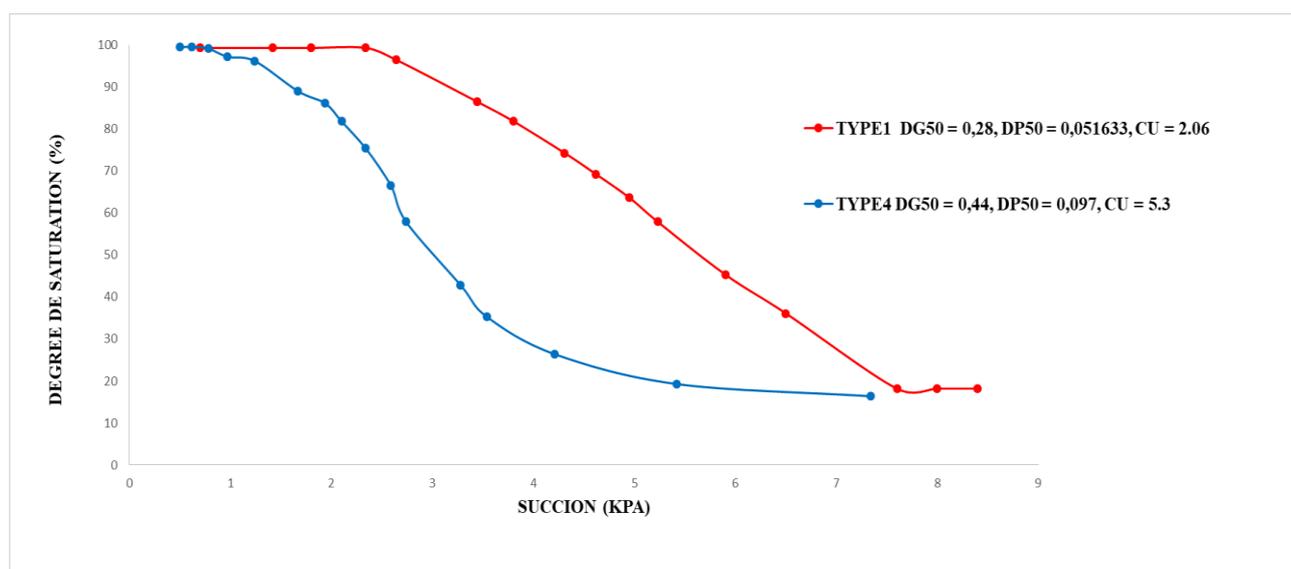


Figure 3.3 courbes de rétention d'eau de deux types de sables

La figure 3.3 compare les courbes de succion en fonction de teneur en eau pour deux types de sable présentant des distributions granulaires et poreuses distinctes. On observe que le sable à pores plus petits nécessite une succion plus élevée pour amorcer l'entrée d'air, tandis que le sable à pores plus grands atteint ce point à une succion moindre.

Cette différence s'explique par la taille des pores : les petits pores, en raison de leur capillarité plus forte, retiennent l'eau plus efficacement et nécessitent une succion plus élevée pour permettre l'entrée d'air. En outre, la teneur en eau résiduelle est plus élevée dans le sable à pores plus petits, car ces derniers conservent une quantité d'eau plus importante même à des sucions élevées. En revanche, le sable à pores plus grands montre une teneur en eau résiduelle plus faible, reflétant une rétention d'eau moindre à des sucions élevées. Ces observations mettent en évidence l'impact de la distribution granulométrique et de la taille des pores sur le comportement hydrique des sables étudiés.

3.3 Effet de l'indice de densité

La Figure 3.4 montre les courbes de rétention d'eau pour le type de sable numéro 1, obtenues en appliquant le modèle proposé pour différentes valeurs d'indice de densité. Cette même Figure montre une comparaison entre les courbes de rétention d'eau de même type de sable pour quatre indices de densité différents (0,5, 0,6, 0,7 et 0,9). Les résultats obtenus ont révélé une corrélation positive entre la succion et l'indice de densité, ce qui est en parfait accord avec les résultats expérimentaux rapportés dans la littérature. En outre, il est clairement noté que les différentes propriétés de rétention d'eau des sols non saturés peuvent être observées sur ces courbes.

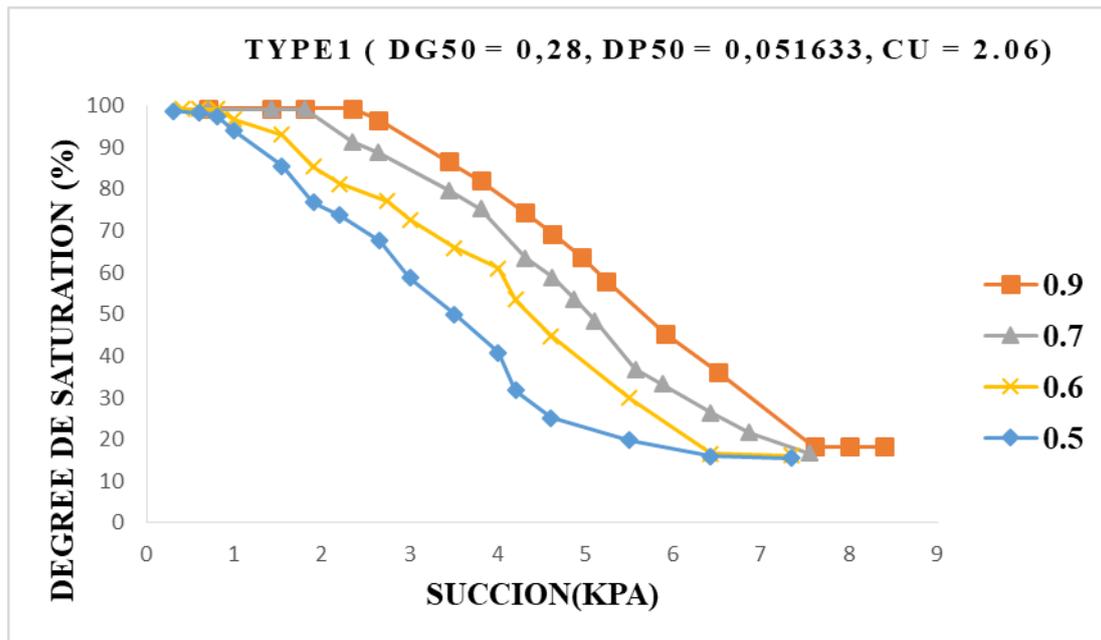


Figure 3.4 Courbes de rétention d'eau pour le type 1 pour différentes valeurs de l'indice de densité

3.4 Evaluation des courbes de la distribution de la taille d'accès aux pores

La taille des pores des matériaux granulaires, comme les sables, est cruciale pour la succion et la courbe de rétention d'eau. Elle détermine la capacité du sol à absorber et retenir l'eau, influençant directement la succion. Les grands pores facilitent l'écoulement de l'eau, réduisant ainsi la succion, tandis que les petits pores retiennent l'eau et augmentent la succion.

Une étude paramétrique a analysé l'effet de la taille des grains, de l'indice de densité et de l'étalement de la courbe granulométrique sur la distribution de la taille des pores et les courbes de rétention d'eau. Les résultats indiquent que la taille des pores est un facteur clé influençant l'absorption d'eau par le sable et la force d'attraction exercée sur l'eau.

Les courbes de rétention d'eau sont obtenues en soumettant un échantillon à un cycle de séchage et de remouillage à l'aide de la cellule de Richards, montrant des phénomènes d'hystérésis. Cela signifie que la teneur en eau à une succion donnée dépend du chemin suivi par l'eau, sans relation biunivoque entre la succion et la teneur en eau.

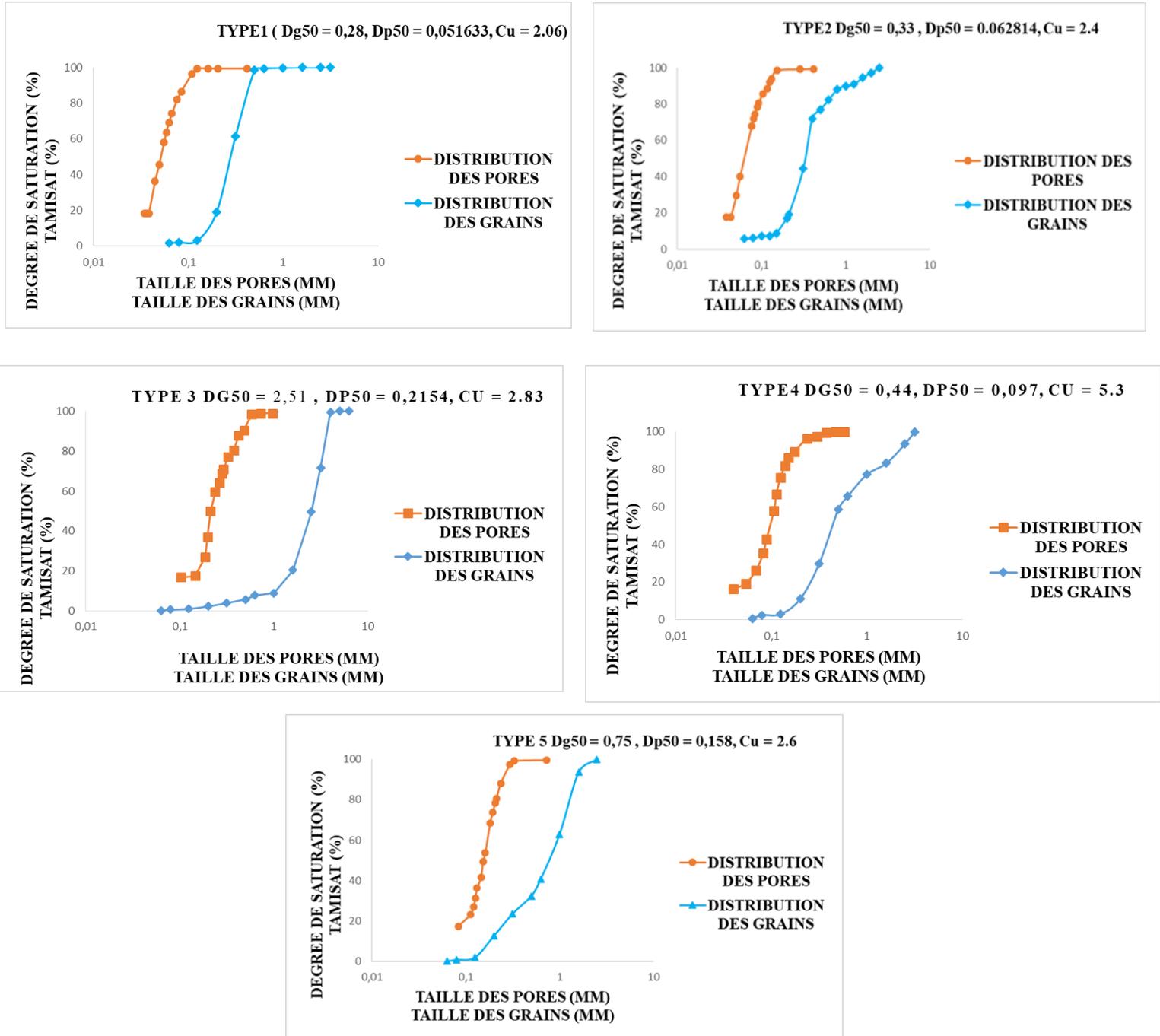


Figure 3.5 Distribution de la taille d'accès aux pores pour les cinq types de sable

La Figure 3.5 présente des courbes de distribution de la taille des pores pour cinq types de sable avec un indice de densité $ID = 0,9$. Une simple comparaison des courbes de distribution de la taille des pores et de la taille des particules montre que l'uniformité des courbes de taille des particules entraîne une bonne uniformité des courbes de distribution de la taille des pores.

D_{p50} représente le diamètre des pores à 50 % de saturation, déterminé à partir de l'estimation de la taille des pores. Les courbes de distribution de la taille des pores ont été obtenues en appliquant la loi de Young-Laplace, permettant d'estimer le diamètre des pores pour chaque valeur de succion.

$$D_p = \frac{4\sigma_s \cos\theta}{s} \quad (3.1)$$

3.5 Effet de la taille des grains

La Figure 3.6 illustre une comparaison des tailles d'accès aux pores des sables présentant différentes distributions de particules. Il a été remarqué que lorsque les particules deviennent plus fines (avec une taille moyenne des grains D_{g50} plus petite), les pores diminuent en taille, établissant ainsi une corrélation directe entre D_{g50} (taille moyenne des grains) et D_{p50} (taille moyenne des pores). De plus, la diversité des tailles de pores s'accroît avec la taille des particules.

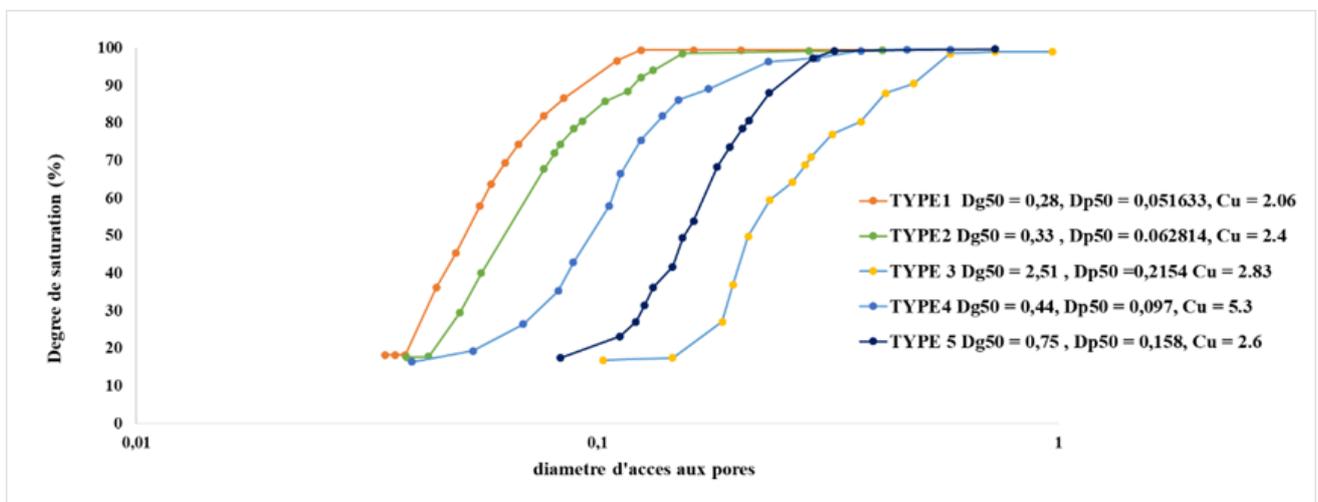


Figure 3.6 Distribution de la taille d'accès aux pores pour les quatre types de sable (différentes tailles des grains)

Ceci s'explique par les résultats obtenus, indiquant une augmentation de la taille médiane des pores en parallèle avec celle des grains.

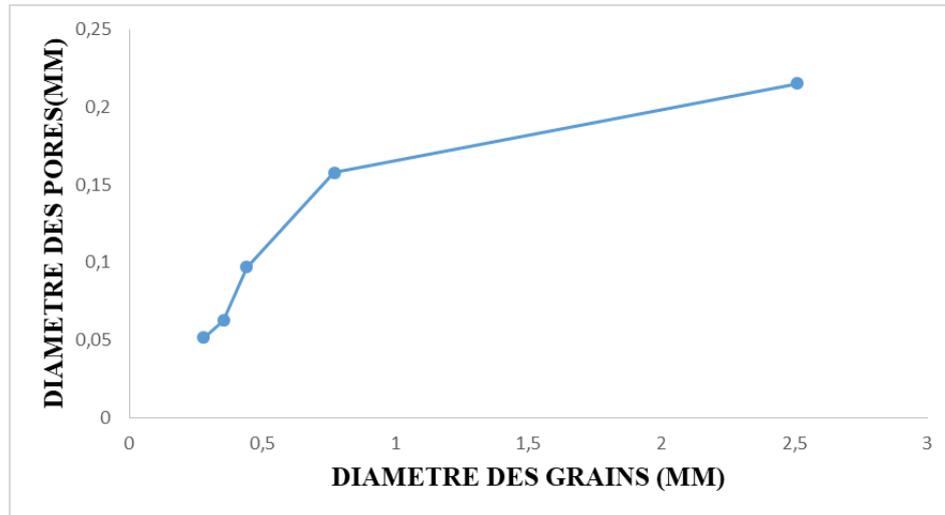


Figure 3.7 Distribution de la taille médiane des pores et celle des grains

3.6 Conclusion

Cette étude a permis de caractériser en détail les propriétés des matériaux granulaires, en particulier cinq types de sables avec des caractéristiques variées. Le modèle proposé a été appliqué avec succès sur ces différents sables pour prédire leur comportement hydrique.

Les courbes de rétention d'eau obtenues montrent que la succion augmente avec la diminution de la taille des grains et que le degré de saturation diminue à mesure que la succion du sol augmente. L'indice de densité a été identifié comme un paramètre clé influençant la rétention d'eau, avec une corrélation positive entre la succion et l'indice de densité. Ces courbes mettent en évidence les différentes propriétés de rétention d'eau des sols non saturés.

La taille des pores des matériaux granulaires est cruciale pour la succion et la courbe de rétention d'eau. Une étude paramétrique a montré que la taille des pores est un facteur clé influençant l'absorption d'eau par le sable. Ces résultats permettent de mieux comprendre le comportement hydrique des matériaux granulaires.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Cette étude a permis de caractériser en détail les propriétés des matériaux granulaires, en particulier cinq types de sables avec des caractéristiques variées. L'essai tensiométrique a été appliqué avec succès sur ces différents sables pour prédire leur comportement hydrique. La taille des pores des matériaux granulaires est cruciale pour la succion et la courbe de rétention d'eau. Une étude paramétrique a montré que la taille des pores est un facteur clé influençant l'absorption d'eau par le sable. Les sables à pores plus petits, nécessitant une succion plus élevée pour l'entrée d'air et présentant une teneur en eau résiduelle plus importante, montrent une capacité accrue à retenir l'eau même sous des forces de succion élevées, grâce à leur forte capillarité. À l'inverse, les sables à pores plus grands atteignent le point d'entrée d'air à des succions moindres et affichent une teneur en eau résiduelle plus faible, traduisant une rétention d'eau moins efficace. Ces résultats permettent de mieux comprendre le comportement hydrique des matériaux granulaires.

Synthèse des principales conclusions

Cette étude a apporté plusieurs contributions importantes à la compréhension du comportement hydrique des matériaux granulaires, en mettant particulièrement l'accent sur la caractérisation des courbes de rétention d'eau pour les sols non saturés. Les principales conclusions peuvent être résumées comme suit :

1. Nous avons réussi à caractériser de manière approfondie les courbes de rétention d'eau pour une gamme représentative de matériaux granulaires, en utilisant un protocole d'essai tensiométrique rigoureux.
2. L'analyse des données a révélé des variations significatives dans le comportement hydrique des différents matériaux, mettant en évidence l'impact de facteurs tels que la granulométrie, la structure poreuse.
3. Les courbes de rétention d'eau obtenues montrent que la succion augmente avec la diminution de la taille des grains et que le degré de saturation diminue à mesure que la succion du sol augmente .
4. Les résultats obtenus par l'application de l'essai tensiométrique ont révélé que la succion augmente avec l'augmentation de l'indice de densité, En outre, il est

clairement noté que les différentes propriétés de rétention d'eau des sols non saturés peuvent être observées sur ces courbes ;

5. Les courbes de la distribution de la taille d'accès aux pores sont déduites à partir des courbes de rétention d'eau obtenues par l'essai tensiométrique, en particulier de la courbe de séchage ;
6. Une simple comparaison entre les courbes de distribution de la taille d'accès aux pores et les courbes de distribution de la taille des particules indique que l'uniformité des courbes de taille des particules induit une bonne uniformité des courbes de distribution de la taille d'accès aux pores ;
7. L'indice de densité exerce une influence significative sur la taille d'accès aux pores. Dans le cas du sable lâche, cela se traduit par une augmentation de la taille des pores. En revanche, le sable dense tend à présenter des pores plus fins ;
8. Une relation positive est trouvée entre la taille moyenne des grains D_{g50} et la taille moyenne des pores D_{p50}
9. La taille des pores augmente avec l'augmentation de la taille des grains ;
10. La comparaison des courbes de rétention d'eau entre les différents matériaux a permis d'identifier des tendances générales ainsi que des différences spécifiques, offrant ainsi des perspectives précieuses pour la sélection et l'utilisation appropriées de ces matériaux dans diverses applications.

Contributions de l'étude

Les principales contributions de cette étude sont les suivantes :

Amélioration de la compréhension du comportement hydrique des matériaux granulaires : En caractérisant de manière détaillée les courbes de rétention d'eau pour une variété de matériaux, cette étude fournit une base solide pour une meilleure compréhension de leur comportement hydrique dans des conditions non saturées.

Identification des facteurs influençant la rétention d'eau : En examinant l'effet de divers facteurs sur la rétention d'eau des matériaux granulaires, cette étude contribue à l'identification des principaux paramètres contrôlant leur comportement hydrique, ce qui est essentiel pour une utilisation efficace de ces matériaux dans diverses applications.

Orientations pratiques pour l'utilisation des matériaux granulaires : Les recommandations fournies à la suite de cette étude offrent des orientations pratiques pour

la sélection et la gestion des matériaux granulaires, en tenant compte de leurs propriétés hydriques spécifiques, ce qui peut avoir un impact significatif sur la performance et la durabilité des structures et des systèmes construits.

En résumé, cette étude élargit notre connaissance du comportement hydrique des matériaux granulaires et offre des perspectives précieuses pour leur utilisation efficace dans diverses applications, contribuant ainsi à l'avancement des pratiques et des recherches dans ce domaine.

Perspectives futures

Bien que cette étude ait permis d'approfondir notre compréhension du comportement hydrique des matériaux granulaires, plusieurs pistes de recherche restent à explorer pour enrichir davantage ce domaine. Les perspectives futures suivantes sont suggérées :

- ❖ **Étude approfondie des mécanismes de rétention d'eau** : Il serait bénéfique de mener des recherches approfondies sur les mécanismes physiques et chimiques qui influent sur la rétention d'eau dans les matériaux granulaires, notamment en utilisant des techniques avancées telles que la microscopie électronique et la spectroscopie.
- ❖ **Étude de l'interaction eau-sol dans des conditions environnementales variées** : Explorer l'effet des conditions environnementales telles que la température, la pression et la composition chimique du sol sur la rétention d'eau des matériaux granulaires permettrait de mieux comprendre leur comportement dans des contextes réels.
- ❖ **Étude des interactions sol-eau-végétation** : En prenant en compte les interactions complexes entre les sols, l'eau et la végétation, il serait possible de développer des approches intégrées pour la gestion durable des terres et des ressources en eau.

En poursuivant ces pistes de recherche, il est possible de continuer à enrichir notre compréhension du comportement hydrique des matériaux granulaires et de développer des solutions innovantes pour répondre aux défis actuels et futurs dans ce domaine.

LISTE DE RÉFÉRENCES

LISTE DE RÉFÉRENCES

- Bachmann, J., & Ploeg, M. J. (2002). Understanding water retention curves. In *Geotechnical News*, 20(2), 2528.
- Barbour, S. L. (1998). Soil water retention models with applications to engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(10), 859869.
- Bouacida, et al. (2022). An analytical model to predict water retention curves for granular materials using the grain size distribution curve. *Studia Geotechnica et Mechanica*; 44(4); 354–369.
- Bouacida (2024), Investigation Expérimentale de l'endommagement des grains sous fortes contraintes : évolution de la microstructure
- Brady, N.C., Weil, R.R. (2016). *The Nature and Properties of Soils*. Pearson.
- Brooks, R.H., Corey, A.T. (1964). Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Papers*, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Campbell, G.S., Norman, J.M. (1998). *An Introduction to Environmental Biophysics*. Springer.
- Carter, M. R., & Gregorich, E. G. (Eds.). (2007). *Soil sampling and methods of analysis*. CRC Press.
- Chertkov, V. Y. (2003). Prediction of soil water retention in the tillage layer of the southern foreststeppe of Russia. *Eurasian Soil Science*, 36(2), 159168.
- Cui Y.J., Tang A., Mantho A. and De Laure E. (2008). Monitoring field soil suction using a miniature tensiometer. *Geotechnical Testing Journal* 31 (1). 95100. (2.1), (2.3).
- Dane, J.H., Topp, G.C. (2002). *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods*. Soil Science Society of America.
- Delage, P., & Cui, Y. J. (2000). Laboratory testing of unsaturated soils. *Unsaturated soils* (pp. 107144). Wiley.
- Fredlund, D. G., & Xing, A. (1994). Equations for the soilwater characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), 521532.
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. Wiley.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & Fredlund, M. D. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons.

- Giménez, D., AlvarezBenedi, J., & Gallipoli, D. (1997). Soil water retention behaviour of compacted soils. *Geotechnique*, 47(5), 917-929.
- Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations*. Academic Press.
- Klute, A. (Ed.). (1986). *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods (Vol. 9)*. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.
- Landau, L. D., & Lifshitz, E. M. (1987). *Fluid Mechanics (2nd ed.)*. Pergamon Press.
- Pham, Q. L., & Fredlund, D. G. (2011). An improved model for the hydraulic properties of unsaturated soils based on the concept of effective stress. *Computers and Geotechnics*, 38(3), 332-340.
- Pr. Silvan Andrei. Les propriétés hydrauliques et mécaniques des sols non saturés. Comité Français de Mécanique des Sols. 1977.
- Saix, C. (1987). Experimental determination of the water retention curve and relative permeability functions of a compacted silt. *Water Resources Research*, 23(3), 413-422.
- Salager, S. (2007). *Modélisation couplée hydromécanique des phénomènes de retrait-gonflement des sols argileux*. Thèse de doctorat, Université ParisEst.
- Salager, S., Delage, P., & Cui, Y. J. (2013). Temperature influence on the volume change behaviour of compacted soils. *Géotechnique*, 63(3), 223-236.
- Šimůnek, J., Sejna, M., Van Genuchten, M.T. (2016). *The HYDRUS1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media*. Version 4.16, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA.
- Tang, A. M. (2005). Influence of temperature on the hydromechanical behaviour of a compacted soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(5), 1302-1313.
- Tisdall, J.M., Oades, J.M. (1982). Organic matter and water stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33(2), 141-163.
- van Genuchten, M. T. (1980). A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898.