

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



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية و الري
المرجع:

MÉMOIRE DE MASTER
2ème année
Sciences et Technologies
Filière : Génie civil
Spécialité : Géotechnique

Présenté et soutenu par :
MERIEM ZELACI

**Corrélation expérimentale entre la
perméabilité des matériaux granulaires et
la taille d'accès aux pores**

Soutenu le :11/06/2024

Encadrant :
Dr.BOUACIDA linda

Jury :
Boumekik nour islam
Brothen abde azize

Année universitaire : 2023/2024

Dédicace

Je remercie Dieu Tout-Puissant pour lui et son aide pour mener à bien cette recherche

À mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs encouragements constants. Merci de croire en moi et de m'inspirer à donner le meilleur de moi-même chaque jour.

À grand-mère mes et sœurs, pour leur patience, leur compréhension et leur soutien moral tout au long de cette aventure académique.

À mes amis, pour leur amitié sincère, leurs encouragements et les moments de joie partagés qui ont rendu ce voyage plus agréable.

Enfin, à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail, je vous exprime ma profonde gratitude et ma reconnaissance.

Remerciements

Louange à Dieu qui nous a éclairés sur le chemin de la connaissance et nous a aidés à remplir ce devoir et à nous accorder le succès dans la réalisation de ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements et ma gratitude à tous ceux qui nous ont aidés, de près ou de loin, à accomplir ce travail et à surmonter les difficultés rencontrées.

*Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à **Madame Linda Bouacida** , pour ses précieux conseils et son soutien indéfectible qui m'ont grandement aidé à mener à bien cette recherche.*

Mes remerciements vont également à tous les êtres chers à mon cœur qui ont été un soutien et une aide durant cette étape importante de ma vie.

Enfin, je n'oublie pas de remercier tous les professeurs qui m'ont enseigné et guidé tout au long de mon parcours académique.

Résumé

Ce travail se concentre sur la compréhension fondamentale de la perméabilité et de sa relation avec la taille d'accès aux pores, en raison de son importance dans différents contextes tels que le domaine du génie pétrolier, la conception des systèmes de drainage, ainsi que la construction de barrages en terre. Une étude approfondie a été menée sur cinq types de sables, aboutissant au développement d'une corrélation expérimentale novatrice entre la perméabilité d'un matériau granulaire, son diamètre des pores, et son indice de densité. Cette corrélation offre une méthode efficace pour évaluer la perméabilité d'un sable en se basant sur ses caractéristiques physiques, évitant ainsi la nécessité de procédures expérimentales longues.

Dans cette étude, nous avons utilisé la méthode tensiométrique sur les cinq types de sable afin d'évaluer leurs distributions de leurs tailles d'accès aux pores. Cette méthode consiste à augmenter par paliers la succion régnant au sein de l'éprouvette et à mesurer les variations correspondantes de la teneur en eau. Nous utilisons la méthode tensiométrique pour obtenir la courbe de rétention d'eau. À partir de cette courbe et la loi de Jurin qui permet d'exprimer la succion en fonction du rayon d'accès des pores nous pouvons évaluer la distribution de la taille d'accès aux pores. L'objectif à moyen terme de cette mesure est d'avoir une relation empirique reliant la perméabilité avec les tailles moyennes d'accès aux pores et grains ainsi que l'indice de densité.

Les résultats confirment que l'uniformité des courbes de taille des particules correspond à une uniformité satisfaisante de la distribution de la taille d'accès aux pores. De plus, l'observation d'une augmentation de la succion avec l'accroissement de l'indice de densité mettant en lumière les propriétés distinctives des sols non saturés.

Mots-clefs : *Perméabilité - Milieu poreux - Sable - Distribution de la taille des pores - Courbe de rétention d'eau - Taille moyenne des grains - Taille moyenne des pores .*

Abstract :

This work focuses on the fundamental understanding of permeability and its relationship with pore size, due to its importance in different contexts such as the field of petroleum engineering, drainage system design, and the construction of earth dams. A thorough study was conducted on five types of sand, resulting in the development of an innovative experimental correlation between the permeability of a granular material, its pore diameter, and its density index. This correlation provides an effective method to evaluate the permeability of a sand based on its physical characteristics, thus avoiding the need for long experimental procedures.

In this study, we used the tensiometric method on the five types of sand to evaluate their distributions of their pore access sizes. This method consists of increasing the suction within the test piece in stages and measuring the corresponding variations in water content. We use the tensiometric method to obtain the water retention curve. From this curve and the Jurin law which allows to express the suction according to the access radius of the pores we can evaluate the distribution of the access size to the pores. The medium-term objective of this measure is to have an empirical relationship linking permeability with mean pore and grain sizes and density index.

The results confirm that the uniformity of the particle size curves corresponds to a satisfactory uniformity of the pore access size distribution. In addition, the observation of an increase in suction with the increase in density index highlighting the distinctive properties of unsaturated soils.

Keywords: Permeability - Porous medium - Sand - Pore size distribution - Water retention curve - Average grain size - Average pore size.

ملخص

يركز هذا العمل على الفهم الأساسي للنفاذية وعلاقتها بحجم المسام، نظرًا لأهميتها في سياقات مختلفة مثل مجال هندسة البترول وتصميم نظام الصرف وبناء السدود الأرضية. أجريت دراسة شاملة على خمسة أنواع من الرمال، مما أدى إلى تطوير علاقة تجريبية مبتكرة بين نفاذية المادة الحبيبية وقطر مسامها ومؤشر كثافتها. يوفر هذا الارتباط طريقة فعالة لتقييم نفاذية الرمال بناءً على خصائصها الفيزيائية، وبالتالي تجنب الحاجة إلى إجراءات تجريبية طويلة.

في هذه الدراسة، استخدمنا اختبار قياس التوتر على الأنواع الخمسة من الرمال لتقييم توزيعاتها لأحجام الوصول إلى المسام. تتكون هذه الطريقة من زيادة الشفط داخل قطعة الاختبار على مراحل وقياس الاختلافات المقابلة في محتوى الماء. نستخدم اختبار قياس التوتر للحصول على منحنى الاحتفاظ بالماء. من هذا المنحنى وقانون Jurin الذي يسمح بالتعبير عن الشفط وفقًا لنصف قطر الوصول للمسام يمكننا تقييم توزيع حجم الوصول إلى المسام. والهدف المتوسط الأجل لهذا المقياس هو إقامة علاقة تجريبية تربط النفاذية بمتوسط أحجام المسام والحبوب ومؤشر الكثافة.

تؤكد النتائج أن اتساق منحنيات حجم الجسيمات يتوافق مع التماثل المرضي لتوزيع حجم الوصول إلى المسام. بالإضافة إلى ذلك، فإن ملاحظة زيادة في الشفط مع زيادة مؤشر الكثافة يبرز الخصائص المميزة للتربة غير المشبعة.

الكلمات الرئيسية: النفاذية - وسط مسامي - الرمل - توزيع المسام - منحنى الاحتفاظ بالمياه - متوسط حجم الحبوب - متوسط حجم المسام.

SOMMAIRE

Résumé.....	II
Abstract.....	VI
Liste des Figures.....	VI
Liste des tableaux.....	VI
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	2
1.1 Introduction.....	3
1.2 Relations théoriques et empiriques reliant la perméabilité des sols à des différentes propriétés.....	4
1.3. Effet de la microstructure sur la perméabilité des milieux poreux.....	8
1.4. Compilation de données - le rôle de la taille des pores.....	12
1.4.1. Pertinence des valeurs macroscopiques e et S_s	12
1.4.2. Variation de la perméabilité (k) en fonction de la taille des pores.....	13
1.4.3. Evolution de la perméabilité en fonction de l'indice de densité I_d	14
1.4.4. Evolution de la perméabilité en fonction de diamètre moyen des grains D_{g50}	15
1.5. Succion dans les sols.....	16
1.5.1. Définition de la succion.....	16
1.5.2. Capillarité.....	16
1.5.3. Ménisque capillaire.....	18
1.5.4. Différents types de la succion.....	19
1.5.4.1. Succion matricielle.....	19
1.5.4.2. Succion capillaire	19
1.5.4.3. Succion osmotique	20
1.5.4.4. Succion d'adsorption.....	20
1.6. Techniques de contrôle et de mesure de la succion.....	21
1.6.1. Contrôle par « translation d'axes ».....	21

1.6.2. Contrôle par plaque tensiométrique.....	21
1.7. Courbe de succion ou de rétention d'eau.....	22
1.8. Modèles de courbes à fondement mathématique	24
1.9. Conclusion.....	26
CHAPITRE 2 : MATERIAUX ETUDIES ET TECHNIQUE EXPERIMENTALES.....	
2.1. Introduction.....	27
2.2 Caractéristique des matériaux analysés.....	27
2.3. Méthodes de caractérisation des matériaux étudiés.....	27
2.3.1. Analyses granulométriques.....	27
2.4. La masse volumique.....	29
2.5. Equivalent de sable	30
2.6. Dispositif de mesure de perméabilité.....	31
2.7 . Détermination de l'indice des vides minimum et maximum (Selon la norme ASTM D4253-16 et ASTM D4254-16).....	32
2.8. Dispositif et procédure de mesure de la distribution de la taille d'accès aux pores. . . .	35
2.8.1 Méthode tensiométrique	35
2.8.2. Programme expérimental	36
2.8.3. Préparation des éprouvettes.....	37
2.9. Conclusion.....	39
CHAPITRE 3 : PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS.....	40
3.1. Introduction.....	41
3.2. Corrélation expérimentale entre la perméabilité d'un matériau granulaire et la taille des pores.....	41
3.2.1. Résultats expérimentaux et discussion.....	41
3.2.2.1. programme d'essais.....	41
3.2.2.2. Evolution de la perméabilité en fonction de l'indice de densité ID.....	41
3.2.2.3. Evolution de la perméabilité en fonction de diamètre moyen des grain Dg 50.....	42

3.2.2.4. Évolution de la perméabilité en fonction de diamètre des pores D_{p50}	43
3.2.3. courbes de rétention d'eau.....	43
3.2.4. Effet de l'indice de densité.....	45
3.2.5. Evaluation des courbes de la distribution de la taille d'accès aux pores.....	46
3.2.6. Effet de la taille des pores.....	47
3.2.7. Effet de la taille des grains.....	48
3.3. Corrélation entre la perméabilité, le diamètre des pores et l'indice de densité.....	49
3.4. Conclusion.....	50
CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES.....	51
Conclusions.....	52
Perspectives.....	53
Références bibliographiques.....	54

Liste des Figures

Chapitre 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure 1.1 Représentation graphique de la rondeur, R redessiné (Muszynski and Vitton, 2012).	8
Figure 1.2 Représentation graphique de la sphéricité, S redessiné de (Muszynski and Vitton, 2012).	8
Figure 1.3 Tableau comparatif (Santamarina <i>et al.</i> , 2004).	9
Figure 1. 4 Composantes de la dispersion. (Fried, 1975).	10
Figure 1. 5 Evolution de la perméabilité en fonction de la porosité des cinq types de matériaux. (David <i>et al.</i> , 1994).	11
Figure 1. 6 Conductivité hydraulique en fonction du l'indice de vide. Les données recueillies pour naturel et remodelé sédiments, des sables grossiers aux argiles à grains fins (Ren and Santamarina, 2018).	11
Figure 1. 7 Conductivité hydraulique mesurée k par rapport à la taille moyenne estimée des pores d_p (Ren and Santamarina, 2018) (Ren and Santamarina, 2018) .	13
Figure 1.8 Perméabilité des sables en fonction de l'indice de densité (Thèse doctorat, 2024).	15
Figure 1.9 Perméabilité des sables en fonction de diamètre moyen D_{g50} (Thèse doctorat, 2024).	15
Figure 1.10 Actions de forces sur une molécule d'eau(Techniques-ingenieur,2012).	17
Figure 1. 11 Modèle physique du phénomène d'effet capillaire (Szenknect,2003).	18
Figure 1.12 Ménisque capillaire, a: Sol granulaire ;b : Sol fin (Delage et Cui,2000).	18
Figure 1. 13 Cellule de Richards pour le contrôle de succion par translation d'axe (Delage and Cui, 2000).	21
Figure 1. 14 Plaque tensiométrique pour faibles succions (Delage and Cui,2000).	22
Figure 1. 15 Courbe typique de rétention d'eau dans le sol (Toll <i>et al.</i> , 2016).	23

Chapitre 2 : MATERIAUX ETUDIÉS ET TECHNIQUE EXPERIMENTALES

Figure2.1 Les cinq types de sable étudiés.	27
Figure 2.2 Série des tamis utilisé pendant les essais granulométriques.	28
Figure 2.3 Courbe granulométrique (source internet).	29
Figure 2. 4 Courbes granulométriques des sables étudiés.	29

Figure 2.5 (a) pycnomètre + sable , (b) pycnomètre + l'eau.....	30
Figure 2.6 (a) Solution + sable, (b) Agitateur + les tubes.....	30
Figure 2.7 la hauteur h1 : sable propre + éléments fins , la hauteur h2 : sable propre seulement.....	31
Figure 2.8 (a) Tube de mariotte + cellule oedometrique, (b) cellule oedometrique.....	32
Figure 2.9. : Préparation l'indice de densité minimal,a) l'échantillon est prélevé , b) versement d'une petite quantité pour former une couche, c) compactage et vibration.....	33
Figure 2.10 . : Préparation l'indice de densité maximum, a) Mettre l'entonnoir au fond du moule, b) Nous formons une pyramide avec du sable., c) Poids de l'échantillon + moule.....	34
Figure 2. 11 Schéma explicatif des processus de séchage et mouillage dans le réseau poreux constitué de cylindres de rayon r, (rm est le rayon du ménisque de l'interface air-eau) (d'après(Do, 1998) b). Processus de mouillage. a) Processus.....	35
Figure 2.12. : Schéma explicatif de principe de la méthode tensiométrique de mesure de la succion (Feia <i>et al.</i> , 2014).....	37
Figure 2.13 (a) installation la cellule dans l'eau (b) mettre dans le support (c) préparation d'un échantillon de sable (d) enveloppé de papier cellophane (e) procédure de l'essais tensiometrique...	38
Figure 2.14 Vue générale de dispositif	39
Chapitre 3 : PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS	
Figure 3. 1 Perméabilité des sables en fonction de l'indice de densité.....	42
Figure 3. 2 Perméabilité des sables en fonction de diamètre moyen D_{g50}	42
Figure 3. 3 Perméabilité des sables en fonction diamètre des pores D_{p50}	43
Figure 3.4 Courbes de rétention d'eau pour les cinq types de sable étudiés.....	44
Figure 3.5. Courbes de rétention d'eau pour les cinq types de sable étudiés.....	45
Figure 3. 6. Courbes de rétention d'eau pour le type de sable numéro 1 pour différentes valeurs de l'indice de densité.....	45
Figure 3.7 Distribution de la taille d'accès aux pores pour les cinq types de sable.....	47
Figure 3.8 L'effet de l'indice de densité sur la distribution de la taille d'accès aux pores.....	48
Figure 3.9 Distribution de la taille d'accès aux pores pour les cinq types de sable (différentes tailles des grains).....	49
Figure 3.10 Évolution du paramètre « a » en fonction de l'indice de densité I_D	50

Liste des tableaux

Chapitre 2 : MATERIAUX ETUDIES ET TECHNIQUE EXPERIMENTALES

Tableau 2. 1 Caractéristiques des matériaux étudiés	34
---	----

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La perméabilité, mesure de la capacité d'un matériau à laisser passer des fluides, est essentielle dans de nombreux domaines tels que le drainage, la construction de barrages et le génie pétrolier. La relation entre la conductivité hydraulique et la distribution de la taille d'accès aux pores des milieux poreux granulaires est bien établie et précieuse pour estimer la conductivité hydraulique lorsque les données directes sont limitées.

On connaît depuis longtemps l'interaction entre la conductivité hydraulique et la distribution granulométrique dans les milieux poreux granulaires (Freezeget Cherry, 1979). Cette relation revêt une grande importance pour évaluer la conductivité hydraulique lorsque les données de perméabilité directe sont restreintes et que les tests de laboratoire posent des difficultés.

Des chercheurs ont développé des équations empiriques reliant la perméabilité des sols à des propriétés comme la taille des grains et la porosité. Cependant, pour une évaluation plus précise, la taille des pores est un paramètre clé, souvent évaluée à partir des courbes de rétention d'eau. En géomécanique, contrôler la succion est crucial pour évaluer le comportement hydromécanique des sols, particulièrement pour les sols cohérents.

Les études ont montré que l'évolution de la courbe granulométrique et de la surface spécifique lors du chargement affecte la perméabilité. Ce travail de recherche explore la relation entre la perméabilité des matériaux granulaires, et la taille d'accès aux pores.

Les résultats d'une étude expérimentale de perméabilité sont exposés dans cette étude, comprenant la variation du diamètre d'accès aux pores et l'indice de densité. La méthode de tensiométrie est employée afin d'évaluer la répartition de la taille des pores en se basant sur la courbe de rétention d'eau. Tout d'abord, nous exposons une description des matériaux étudiés (les sables), puis les tests utilisés pour évaluer ces matériaux (emin, emax, cu...).

CHAPITRE 1
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Introduction

La littérature abonde en travaux sur la perméabilité et ses liens avec les propriétés physiques des sols. Ces études couvrent divers domaines tels que la compréhension de l'écoulement multiphasique à l'échelle des pores, le renforcement des sols par injection de ciment et l'ingénierie pétrolière. Dans ce dernier domaine, la connaissance de la perméabilité du sable est cruciale pour comprendre le phénomène de colmatage lors de l'injection d'eau de production.

De nombreux chercheurs ont proposé des équations empiriques reliant la perméabilité des sols à des propriétés comme la taille des grains, la surface spécifique, l'indice des vides et la porosité (Kozeny, 1927; Carman, 1938). La perméabilité est mieux exprimée par la taille d'accès aux pores, car l'écoulement de l'eau dans un milieu poreux est régulé par la distribution de la taille des pores plutôt que par la porosité ou l'indice des vides seul.

En mécanique des sols non saturés, la taille des pores est évaluée à partir des courbes de rétention d'eau, spécifiquement la courbe de séchage utilisant la loi de Jurin. Cependant, il y a quelques années, la taille des pores était difficile à évaluer en laboratoire pour les matériaux granulaires. Depuis deux décennies, les progrès en mécanique des sols non saturés ont permis le développement de nouveaux matériels de laboratoire. Plusieurs chercheurs ont proposé des formules empiriques et statistiques tenant compte de la succion, de la teneur en eau ou du degré de saturation.

La succion dans les sols non saturés est de plus en plus utilisée pour étudier ces sols, car elle conditionne les mouvements et l'équilibre de l'eau dans la zone non saturée et influence fortement le comportement mécanique des sols. L'évaluation de la courbe de rétention d'eau est cruciale pour définir le comportement des sols non saturés. Cette courbe peut être utilisée pour estimer des propriétés telles que la conductivité, la rétention d'eau et la résistance au cisaillement.

L'écoulement des fluides dans un milieu poreux est influencé par plusieurs paramètres tels que les propriétés du milieu poreux (porosité, perméabilité, taille et forme des grains, taille et forme des pores) et la succion.

Ce chapitre présente une synthèse des principaux travaux publiés sur les équations théoriques et

empiriques de perméabilité, les courbes de rétention d'eau et les différents modèles existants, en se concentrant sur l'évolution des propriétés de la courbe de succion.

1.2. Relations théoriques et empiriques reliant la perméabilité des sols à des différentes propriétés

Les équations théoriques et empiriques relient le coefficient de perméabilité des sols à des propriétés telles que la taille des grains, la surface spécifique, teneur en argile, porosité et géométrie des pores (Taylor W, 1948; Malusis, Shackelford and Olsen, 2003; Zhang *et al.*, 2005; Roque and Didier, 2006; Dolinar, 2009; Mejías, Renard and Glenz, 2009; Chapuis, 2012; Wang *et al.*, 2013; Ilek, Kucza and Szostek, 2015; Ren *et al.*, 2016). L'équation de Kozeny-Carman (KC) dérivée analytiquement considère le réseau poreux dans les sols comme un faisceau de tubes et elle assume l'écoulement de fluide laminaire dans les tubes. Le coefficient de perméabilité k [m/s] peut alors être exprimé en termes de surface spécifique S_s [m²/g] et l'indice des vides (Taylor W, 1948):

$$k = \frac{C_f g}{V_f \rho_m^2} S_s^{-2} \frac{e^3}{1+e} \quad (1-1)$$

Où ρ_m [kg / m³] est la densité de masse minérale, V_f [m²/s] est la viscosité cinématique du fluide et $C_f \approx 0,2$ est une constante liée à la topologie des pores. En général, on pense que l'équation de Kozeny-Carman plus précisément prédit les tendances de coefficient de perméabilité des sols sableux à grains grossiers ainsi que les sols argileux à grain fin.

Des relations empiriques ont été suggérées pour les sols sableux à grains grossiers et pour les sols argileux à grains fins. L'équation de Hazen (Hazen, 1892) est l'équation empirique la plus fréquemment citée pour les sols à grains grossiers et souligne le rôle de la fraction la plus fine sur le coefficient de perméabilité d'un sol :

$$k(\text{cm/s}) \approx (D_{10})^2(\text{mm}) \quad (1-2)$$

Les valeurs prédites et mesurées peuvent différer dans plus d'un ordre de magnitude en raison de la variabilité de la taille des grains et de la forme des particules (Shepherd, 1989)(Cabalar and Akbulut, 2016) (Ishaku, Gadzama and Kaigama, 2011). Autre taille les fractions D_5 , D_{20} et D_{50} ont été considérées pour améliorer la prévisibilité cependant la fonction d'origine de D_{10} reste la plus connue (Kenney, Lau and Ofoegbu, 1984; Indraratna, Nguyen and Rujikiatkamjorn, 2012). L'estimation de premier ordre de Hazen du coefficient de perméabilité de sol était basée sur un sable mal gradué à densité moyenne, et il est remarqué que le coefficient K est indépendant de l'indice des vides (e) à cause de la faible compressibilité des gros grains du sol (Note : Taylor W

(Taylor W, 1948) a corrigé les valeurs calculées pour l'indice des vides rapport, suivant l'équation de Kozeny-Carman

Il existe de nombreuses équations théoriques et empiriques reliant le coefficient de perméabilité des sols à différentes propriétés. Le coefficient de perméabilité (k) peut être estimé grâce à l'analyse granulométrique du sol d'intérêt. Des équations empiriques, telles que celles proposées par (Vuković and Soro, 1992a), permettent de lier k à une propriété spécifique de la taille des grains du sol. Plusieurs méthodes empiriques issues d'études antérieures ont été résumées, présentant une formule générale :

$$K = \frac{g}{\nu} \cdot C \cdot f(n) \cdot d_e^2 \quad (1-3)$$

Où k = coefficient de perméabilité ; g = accélération due à la gravité ; ν = viscosité cinématique ; C = coefficient de tri; f (n) = fonction de porosité et d_e = diamètre effectif du grain. La viscosité cinématique (ν) est liée à la viscosité dynamique (μ) et à la densité du fluide (eau) comme suit :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-4)$$

Les valeurs de C, f (n) et d_e dépendent des différentes méthodes utilisées dans l'analyse granulométrique. Selon (Vuković and Soro, 1992a), la porosité (n) peut être déduite de la relation empirique avec le coefficient d'uniformité du grain (U) comme suit :

$$n = 0.255(1 + 0.83^U) \quad (1-5)$$

Où U est le coefficient d'uniformité du grain donné par:

$$U = \left(\frac{d_{60}}{d_{10}} \right) \quad (1-6)$$

Ici, d_{60} et d_{10} dans la formule représentent le diamètre de grain en (mm) correspond respectivement à 60% et 10% de passant sur la courbe granulométrique

Des études antérieures ont présenté les formules suivantes qui prennent la forme générale présentée dans l'équation (1-3) ci-dessus, mais avec des valeurs variables de C, f (n) et de d_e et leurs domaines d'applicabilité.

Hazen:

$$K = \frac{g}{\nu} \times 6 \times 10^{-4} [1 + 10(n - 0.26)] d_{10}^2 \quad (1-7)$$

La formule de Hazen a été développée à l'origine pour la détermination du coefficient de perméabilité du sable uniformément classé, mais elle est également utile pour les plages de sable fin

à gravier, à condition que le sol a un coefficient d'uniformité inférieur à 5 et une taille de grain effective comprise entre 0,1 et 3 mm.

Kozeny-Carman:

$$K = \frac{g}{v} \times 8.3 \times 10^{-3} \left[\frac{n^3}{(1-n)^2} \right] d_{10}^2 \quad (1-8)$$

L'équation de Kozeny-Carman est l'une des dérivations les plus largement acceptées et utilisées de la perméabilité en fonction des caractéristiques du milieu du sol. Cette équation a été proposée à l'origine par Kozeny ([Josef Kozeny, 1927](#)), puis modifiée par Carman ([Carman, 1938](#); [Carman and C., 1956](#)) pour devenir l'équation de Kozeny-Carman.

Breyer:

$$K = \frac{g}{v} \times 6 \times 10^{-4} \log \frac{500}{U} d_{10}^2 \quad (1-9)$$

Cette méthode ne tient pas compte de la porosité, ce qui signifie que la fonction de porosité est fixée à 1. La formule de Breyer est souvent considérée comme la plus appropriée pour les matériaux présentant une répartition inhomogène des grains et des grains mal triés, avec un coefficient d'uniformité compris entre 1 et 20 et une taille de grain effective comprise entre 0,06 mm et 0,6 mm.

Slitcher:

$$K = \frac{g}{v} \times 1 \times 10^{-2} n^{3.287} d_{10}^2 \quad (1-10)$$

Cette formule est plus applicable pour les grains de taille comprise entre 0,01 mm et 5 mm.

Terzaghi:

$$K = \frac{g}{v} \cdot C_t \cdot \left(\frac{n-0.13}{\sqrt[3]{1-n}} \right)^2 d_{10}^2 \quad (1-11)$$

où C_t = coefficient de tri. La formule de Terzaghi est la plus applicable pour le sable à gros grains ([Cheng and Chen, 2007](#)).

USBR:

$$K = \frac{g}{v} \times 4.8 \times 10^{-4} d_{20}^{0.3} \times d_{20}^2 \quad (1-12)$$

Le Bureau de récupération des États-Unis (USBR) calcule la perméabilité à partir de la taille de grain effective (d_{20}) et ne dépend pas de la porosité ; la fonction de porosité est donc une unité. La

formule convient le mieux au sable à grain moyen avec un coefficient d'uniformité inférieur à 5 (Cheng and Chen, 2007)

Alyamani & Sen :

$$K = 1300[I_o + 0.025(d_{50} - d_{10})]^2 \quad (1-13)$$

Où K est le coefficient de perméabilité (m / jour), I_o est l'interception (en mm) de la ligne formée par d_{50} et d_{10} avec l'axe granulométrique, d_{10} est le diamètre effectif du grain (mm) et d_{50} est le diamètre moyen du grain (mm). Il convient de noter que les termes de la formule ci-dessus portent les unités indiquées pour des raisons de cohérence. Cette formule est donc exceptionnellement différente de celles qui prennent la forme générale de l'équation (1-3) ci-dessus.

Le coefficient de perméabilité, qui représente la capacité d'un milieu poreux de transmettre l'eau à travers ses vides, est l'un des paramètres clés les plus importants des géo matériaux de nombreux phénomènes naturels, dont la gestion des ressources en eau, la consommation d'eau, l'eau potable, etc. l'approvisionnement en eau, la sécurité des dépôts de déchets, la circulation hydrogéologique à l'échelle du bassin, la stabilité et de nombreux autres problèmes liés à l'hydrologie souterraine et au génie géotechnique (Terzaghi and R. peck, 1948; Terzaghi, Peck and Mesri, 1996; F K Boadu, 2000; Fred Kofi Boadu, 2000; Chapuis, 2012) Il y a eu des tentatives d'estimation de la perméabilité selon la distribution granulométrique (Mualem, 1976; Uma, Egboka and Onuoha, 1989; Salarashayeri and Siosemarde, 2012). Empirique (Krumbein and Monk, 1942; Alyamani and Şen, 1993) (et les méthodes prédictives (j Kozeny, 1927; Carman, 1938; Krumbein and Monk, 1942; Alyamani and Şen, 1993; F K Boadu, 2000; Göktepe and Sezer, 2010) d'estimer la perméabilité à l'aide de relations quantitatives ont été développées dans la littérature.

On sait depuis longtemps que les caractéristiques de la forme des grains ont un effet significatif sur certaines propriétés techniques des sols (Terzaghi, 1925; Gilboy, 1928; Olson and Mesri, 1970; Clayton, Abbireddy and Schiebel, 2009). Terzaghi est l'un des premiers ingénieurs qui a effectué une recherche pour comprendre l'influence des caractéristiques de la forme en utilisant des constituants à grain plat (Terzaghi, 1925). Les observations, effectuées par (Gilboy, 1928), que tout système d'analyse négligeant l'effet de la forme du grain serait incomplet. De nombreuses recherches ont été menées en raison de l'importance de la forme de grains et son rôle dans le comportement des sols, tant pour les ingénieurs que pour les chercheurs.

(Holubec and D'appolonia, 1973) ont indiqué que les résultats de la pénétration dynamique dans le sable dépendent des caractéristiques de forme des grains.

(Holtz and Kovacs, 1981) ont souligné comment la forme du grain affecte l'angle de frottement interne (ϕ). (Cedergren, 1989) a déclaré que la forme du grain affecte la perméabilité. La forme du grain joue aussi un rôle important dans le potentiel de liquéfaction. (Wadell, 1932; Krumbein, 1941b; Powers, 1953b; Holubec and D'appolonia, 1973) ont introduit des explications détaillées sur la forme du grain. Deux propriétés indépendantes sont fondamentalement utilisées pour décrire la forme d'un grain de sol : (1) L'arrondi, une mesure dans laquelle les bords et les coins d'un grain ont été arrondis (2) Sphéricité (forme), une mesure dans laquelle un grain s'approche d'une sphère en forme.

Une mesure dans laquelle un grain s'approche d'une sphère en forme. (Wadell, 1932) a proposé un paramètre de sphéricité (S) simplifié ($D_{\max\text{-insc}}/D_{\min\text{-circ}}$), où $D_{\max\text{-insc}}$ est le diamètre d'un cercle maximum inscrit et $D_{\min\text{-circ}}$ est le diamètre d'une sphère minimale délimitant une particule de gravier. (Wadell, 1932) a défini la rondeur (R) comme étant $D_{i\text{-ave}}/D_{\max\text{-insc}}$,

Bien que de nombreuses déterminations sur le terrain et en laboratoire de coefficient de perméabilité ont été effectuées à l'aide d'appareils de mesure du coefficient de perméabilité par des ingénieurs, des géologues et des hydrogéologues, les relations entre la gradation et les propriétés de forme des grains et l'écoulement restent mal comprises et insuffisamment quantifiées.

Les Figures (1.1), (1.2) et (1.3) décrivent R, S et un tableau comparatif entre eux pour identifier la forme de grain (Krumbein, 1941a; Powers, 1953a).

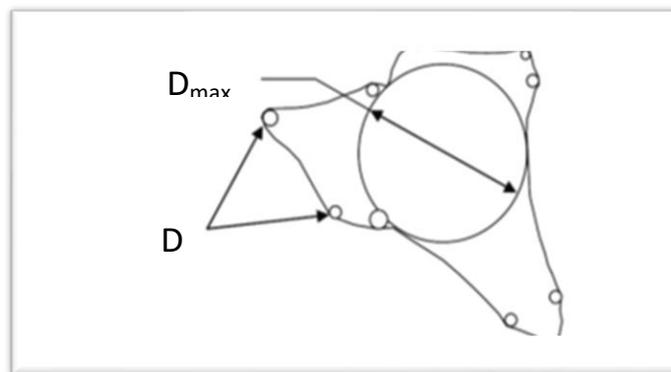


Figure 1.1. Représentation graphique de la rondeur, R redessiné (Muszynski and Vitton, 2012)

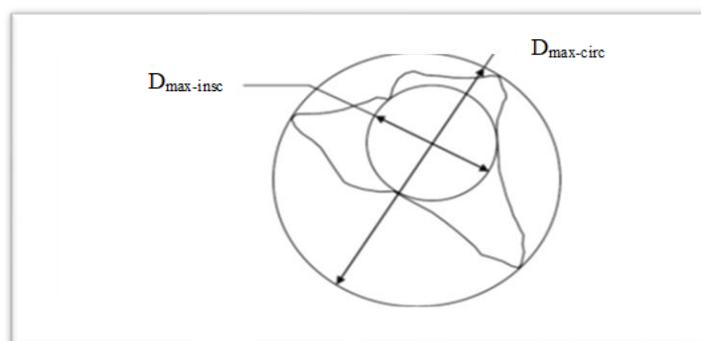


Figure 1. 2 Représentation graphique de la sphéricité, S redessiné de (Muzynski)

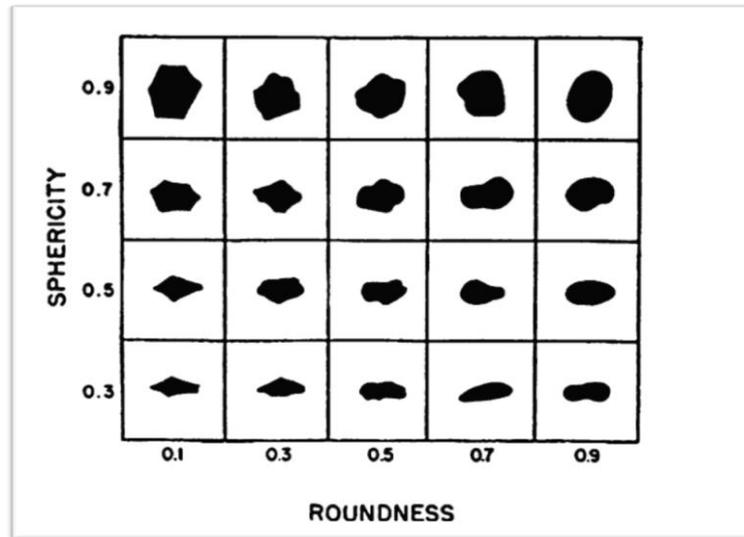


Figure 1.3 Tableau comparatif (Santamaria et al.,2004)

1.3. Effet de la microstructure sur la perméabilité des milieux poreux

La porosité influence considérablement la perméabilité d'un milieu, ce qui a entraîné l'élaboration de plusieurs lois dans la littérature qui établissent une corrélation entre la perméabilité et la porosité. Parmi ces lois, le modèle le plus couramment utilisé est le modèle de Kozeny-Carmank (J. Kozeny, 1927). Kozeny a développé une expression de la perméabilité en fonction de la porosité, en prenant en compte la tortuosité comme paramètre d'ajustement. La variation de vitesse de l'écoulement est due à la tortuosité, car les chemins d'écoulement réels sont plus longs que la distance directe à travers le milieu. Ce mélange est démontré dans la Figure (1.4) (Fried, 1975). De cette relation, on peut en déduire plusieurs facteurs :

- La répartition de la vitesse au sein d'un pore (a) : Les particules situées près des parois des pores ont une mobilité inférieure à celles situées au centre des pores. Bv.
- La répartition des dimensions des pores (b) : La disparité de vitesse entre les particules peut être expliquée par la variation de la taille des pores. x .
- La complexité du milieu entraîne la possibilité pour les particules solides voisines de suivre des trajectoires différentes, empruntant ainsi des voies différentes en raison de la tortuosité du milieu.

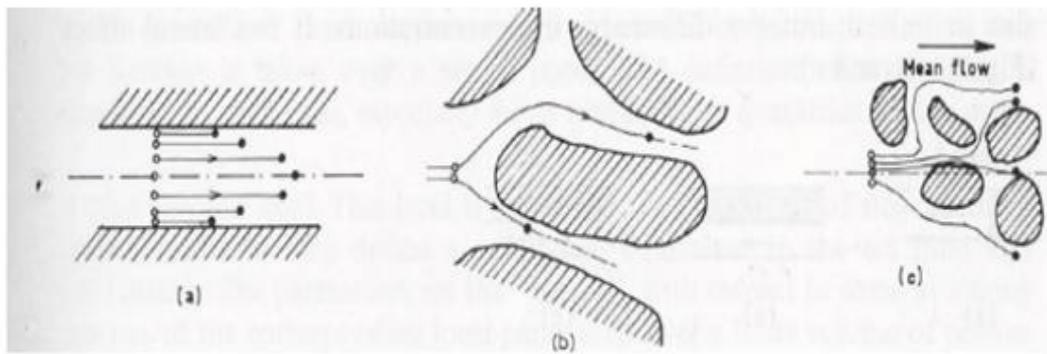


Figure 1.4 Composantes de la dispersion. (Fried, 1975)

Les grosses particules suivent des trajectoires moins tortueuses et seront donc moins dispersées que les plus petites.

(Carman, 1938) a proposé une modification de la théorie de Kozeny prenant en compte la surface spécifique du milieu poreux.

L'expression résultante est appelé l'équation de Kozeny-Carman reliant la perméabilité k à la surface spécifique du milieu poreux S et à la porosité ϕ , par l'intermédiaire d'une constante C_{kc} appelée constante de Kozeny-Carman dépendant de la géométrie des pores. La forme finale de l'expression s'écrit :

$$k = \frac{\phi^3}{C_{kc} \cdot S^2 \cdot (1-\phi)^2} \quad (1-14)$$

Une étude menée par David et al. (1994) a examiné l'évolution de la perméabilité en fonction de la porosité de cinq types de matériaux soumis à une charge hydrostatique. Ils ont constaté que cette évolution suit bien une loi puissance qui relie la perméabilité à la porosité (équation 1-14) (Voir Figure 1.5). Le paramètre n varie de 4,6 à 25,4 selon de type de matériau.

$$k = k_0 \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^n \quad (1-15)$$

La perméabilité est également influencée par la taille des grains du milieu. Des chercheurs tels que (Hazen, 1892), ont établi des corrélations entre la perméabilité et la taille des grains. Cependant, ces lois reposent sur différentes hypothèses qui ne sont pas nécessairement vérifiables pour tous les matériaux. A titre d'exemple, la loi de Hazen est applicable uniquement aux sables et produirait des résultats non significatifs et donc inutilisables en présence de limon ou d'argile, même en petites quantités.

(Chapuis, 2004) a présenté une corrélation reliant la perméabilité avec la taille des grains et l'indice des vides équation (1-16).

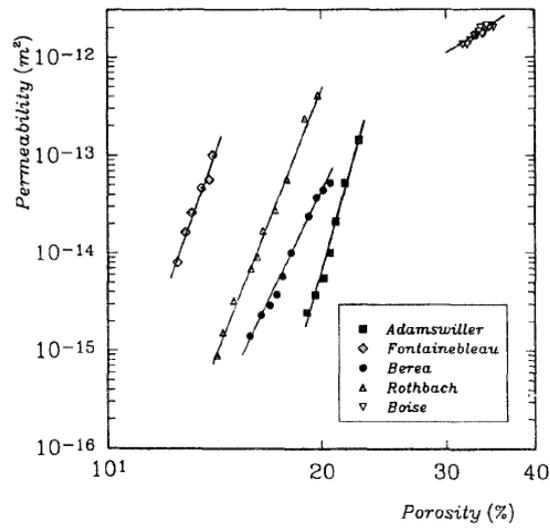


Figure 1. 5 Evolution de la perméabilité en fonction de la porosité des cinq types de matériaux (David et al., 1994)

$$k = 1,5D_{10}^2 \frac{e^3(1+e)}{e_{max}^3} \quad (1-16)$$

Où e est l'indice des vides, e_{max} est l'indice des vides maximum du matériau et D_{10} est le diamètre qui correspond à 10% de passant sur la courbe granulométrique.

D'après Bernabé (2003), il n'y a pas de relation entre la perméabilité et la porosité qui puisse s'appliquer pour tous les milieux poreux car ce qui compte ce sont les étranglements ou seuils de pores ; ils contribuent peu au volume poreux mais contrôlent la connectivité entre les pores.

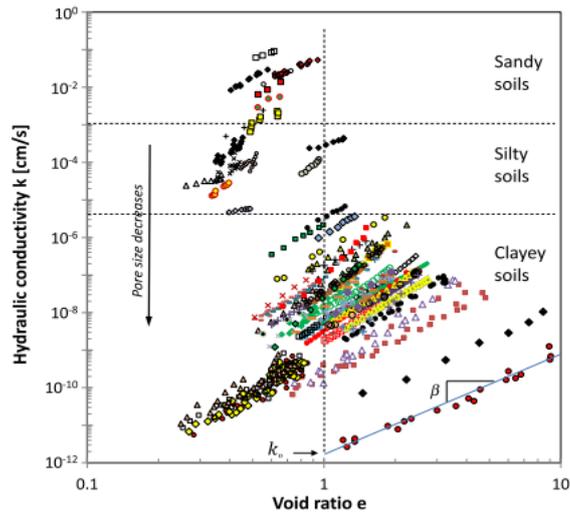


Figure 1. 6 Conductivité hydraulique en fonction du l'indice de vide. Les données recueillies pour naturel et remodelé sédiments, des sables grossiers aux argiles à grains fins(Ren and Santamarina, 2018)

1.4. Compilation de données - le rôle de la taille des pores

La base de données sur le coefficient de perméabilité des sols comprend à la fois des sols naturels et des mélanges de sol (allant des graviers grossiers aux argiles) avec différentes densités I_D (sol lâche et sol dense). Une observation importante est que les courbes correspondant aux différents types de sols présentent une relation linéaire. Les ensembles de données individuels montrent une tendance linéaire dans l'espace logarithmique ($\log(k) - \log(e)$), comme illustré dans les figures (1.6). On peut remarquer que :

- Le coefficient de perméabilité (k) augmente avec l'augmentation de l'indice des vides pour le même type de sol.

- Pour les sols fins on a les mêmes valeurs de k pour des valeurs élevés de l'indice des vides.

- Alors l'équation de Kozeny-Carman met en évidence l'importance de la "taille des pores" plutôt que de la "porosité" sur le transport des fluides.

1.4.1. Pertinence des valeurs macroscopiques e et S_s

Les derniers travaux de Kozeny-Carman sur la perméabilité ont souligné l'importance de la "taille des pores" plutôt que de la "porosité" dans le transport des fluides. La taille moyenne des pores d_p peut être calculée pour des différentes formes des grains en fonction de l'indice des vides e et de la surface spécifique S_s [m^2/g] (Phadnis and Santamarina, 2011). Considérons le volume des vides uniformément répartie autour des grains comme une "couche de vide" d'épaisseur t_{void} ; La distance inter-particules $d_p = 2t_{void}$ est alors considérée comme une estimation de la taille moyenne des pores :

$$d_p = \frac{2e}{S_s \rho_m} \quad (1-17)$$

Où ρ_m [kg / m^3] est la masse volumique minérale.

Cette estimation est basée sur deux paramètres macroscopiques : l'indice des vides et la surface spécifique S_s

La surface spécifique n'est pas rapportée dans la plupart des études tracées dans Figure (1-6) ; alors nous estimons la surface spécifique en utilisant d'autres publications:

- Pour les sols fins, les estimations étaient basées sur les limites de liquidité w_L (Farrar and Coleman, 1967), voir aussi (Muhunthan, 1991; Santamarina *et al.*, 2002)

$$S_s = 1.8w_L - 34 \quad (1-18)$$

- Pour les sols sablonneux constitués de grains arrondis, la surface spécifique était estimée à partir de l'analyse granulométrique cumulée (Santamarina *et al.*, 2002) suppose une distribution linéaire en échelle logarithmique).

$$S_s = \frac{3(C_u + 7)}{4(P_w G_s D_{50})} \quad (1-19)$$

Où $C_u = D_{60} / D_{10}$ est le coefficient d'uniformité.

La surface spécifique dans les mélanges est estimée en additionnant les surfaces spécifiques des différentes fractions granulométriques, pondérées par leurs fractions massiques respectives.

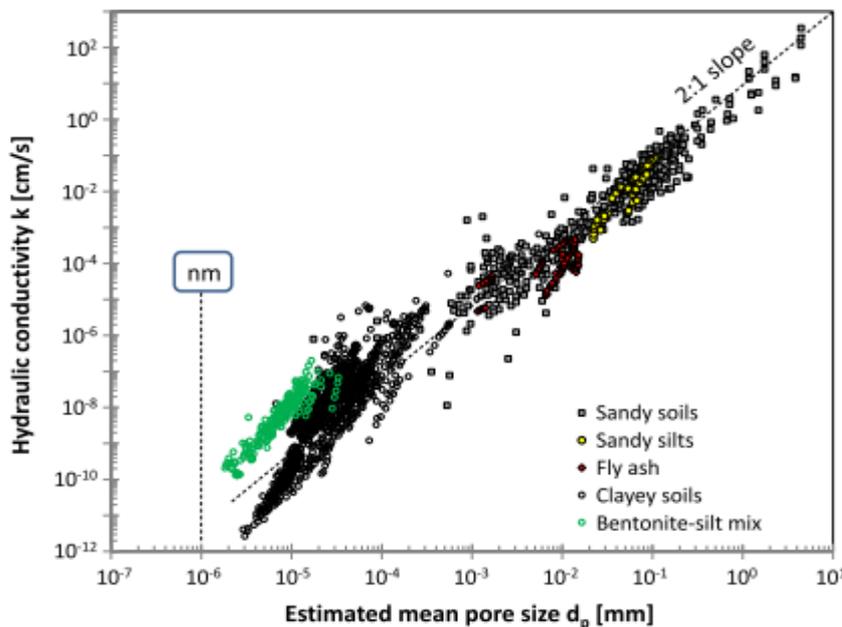


Figure 1.7 Conductivité hydraulique mesurée k par rapport à la taille moyenne estimée des pores d_p (Ren and Santamarina, 2018)

1.4.2. Variation de la perméabilité (k) en fonction de la taille des pores

Nous appliquons l'équation (1-17) $d_p = 2e / S_s \rho_m$ pour estimer la taille moyenne des pores à partir de l'ensemble de données présenté dans la Figure (1.6). Ensuite, les valeurs de coefficient de perméabilité sont remplacées par rapport à la taille moyenne des pores calculée d_p dans la Figure (1.7). Données supplémentaires pour les sables avec des distributions granulométriques connues sont inclus dans cette figure.

Nous observons:

1. Tous les types de sols, qu'ils soient composés de gros grains ou de fins grains, convergent vers une tendance unique relativement étroite dans l'espace k - d_p .
2. L'équation de Hagen-Poiseuille, qui décrit l'écoulement de fluide dans des tubes cylindriques, prédit une relation quadratique entre le coefficient de perméabilité (K) et la taille des pores $k \propto d_p^2$. La ligne avec la pente 2 superposée sur les données de la Figure (1.7) correspond étroitement à la tendance générale.

Ces observations confirment le rôle principal de la taille des pores sur le coefficient de perméabilité (k). De plus, l'analyse présentée ci-dessus démontre la pertinence des deux paramètres macroscopiques mesurables, l'indice des vides (e) et la surface spécifique s_s .

1.4.3. Évolution de la perméabilité en fonction de l'indice de densité I_D

Afin d'étudier l'évolution de la perméabilité pour les dix types des sables, des mesures de perméabilité ont été réalisées pour différents indices de densité ($I_D=0.9$; 0.8; 0.65; 0.45). Les résultats de ces mesures sont présentés sur la Figure (1.8). On observe une diminution considérable de la perméabilité pour tous les types de sable quand la valeur de l'indice de densité augmente.

Alors il est clair que la perméabilité dans le sable diminue à mesure que l'indice de densité augmente, entraînant une réduction de la taille des pores. ([Thèse doctorat, 2024](#))

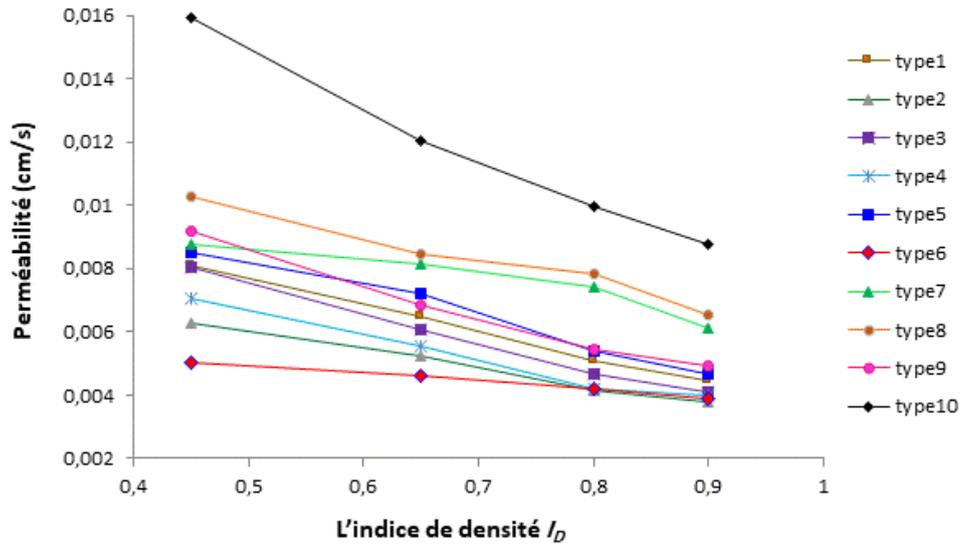


Figure 1.8 Perméabilité des sables en fonction de l'indice de densité
(Thèse doctorat, 2024)

1.4.4.Évolution de la perméabilité en fonction de diamètre moyen des grains D_{g50}

La Figure (1.9) présente l'évolution de la perméabilité des sables étudiés en fonction du diamètre moyen D_{g50} pour les quatre indices de densité testés (0.9; 0.8; 0.65; 0.45). On observe une augmentation de la perméabilité en fonction du diamètre moyen des grains, ce constat étant valable pour toutes les valeurs de l'indice de densité. Pour un même état de densité, un sable présentant un diamètre de grains plus grand entraîne une taille des pores également plus grande, expliquant ainsi l'augmentation de la perméabilité associée au diamètre des grains. (Thèse doctorat, 2024)

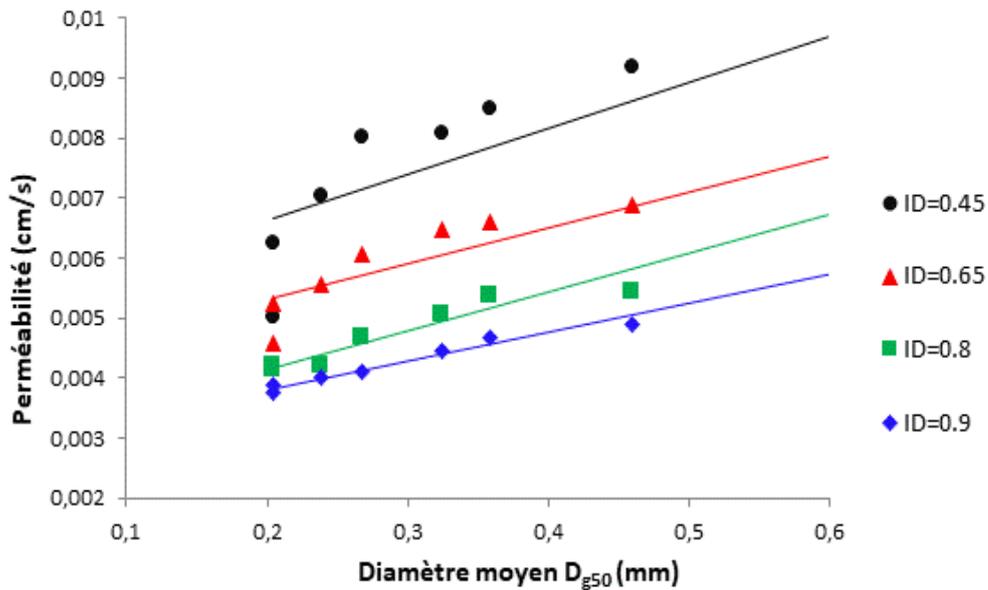


Figure 1.9 Perméabilité des sables en fonction de diamètre moyen D_{g50} .

(Thèse doctorat, 2024)

1.5. Succion dans les sols

1.5.1. Définition de la succion

La succion correspond à une pression inférieure à celle de l'air, qui s'exerce sur l'eau à l'intérieur des grains, entraînant ainsi les mouvements de l'eau. Il s'agit essentiellement d'une pression négative exercée par l'eau dans les pores du sol (Silva and Bremner, 1966) Selon (Bakkari, 2007) la succion peut également être considérée comme une mesure de l'attraction entre le sol et l'eau. De plus, la succion du sol peut varier considérablement, allant de 0 pour un sol saturé à 10^6 kPa pour un sol séché à l'étuve (ARSENIE, 2009).

1.5.2. Capillarité

Les phénomènes de capillarité se manifestent à l'interface entre deux fluides en raison d'un ensemble de forces d'interactions non équilibrées qui agissent sur les molécules à cet endroit, contrairement à une molécule située à l'intérieur d'un fluide. Lorsqu'une molécule d'eau se trouve au sein d'une masse d'eau, elle est soumise à des forces de même nature (Figure 1-10 b). En revanche, une molécule d'eau à l'interface entre deux fluides, tels que l'eau et l'air, subit des forces différentes : actions dues à l'eau et actions dues à l'air (Figure 1-10 a). Les molécules d'eau à l'interface entre l'eau et l'air sont donc attirées vers la masse d'eau, et la surface de l'eau est soumise à une force perpendiculaire à sa surface libre. C'est cette attraction qui génère

une tension de surface σ_s à l'interface, illustrée sur la Figure (1.10) pour le cas d'une interface plane.

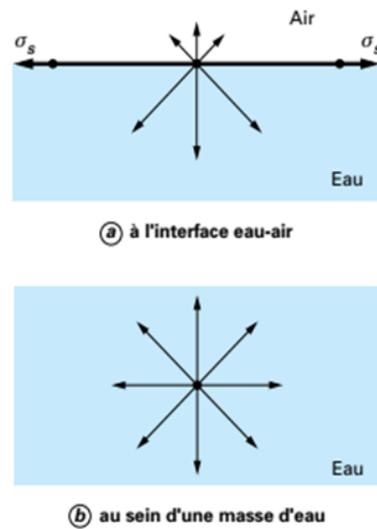


Figure 1.10 Actions de forces sur une molécule d'eau (Techniques-ingenieur,2012)

Dans la zone non saturée, contrairement aux aquifères, les forces de pression capillaire deviennent significatives voire prédominantes. À l'équilibre, et dans la zone non saturée, un profil de saturation de 100% décroissant est établi dans la frange capillaire juste au-dessus de la nappe phréatique, atteignant une valeur minimale appelée saturation résiduelle (S_r).

Le phénomène de capillarité est associé à la composante succion matricielle de la succion totale. La hauteur de l'élévation de l'eau et le rayon de courbure ont un impact direct sur la teneur en eau par rapport à la relation de succion matricielle dans les sols.

Lorsqu'on réalise une expérience consistant à immerger un tube capillaire de rayon r dans un réservoir d'eau, on observe que le niveau de l'eau à l'intérieur du tube s'élève à une hauteur h au-dessus du niveau de l'eau dans le réservoir (Figure 1.11). Plus le diamètre du tube est petit, plus la hauteur h est importante. (Szenknect, 2003).

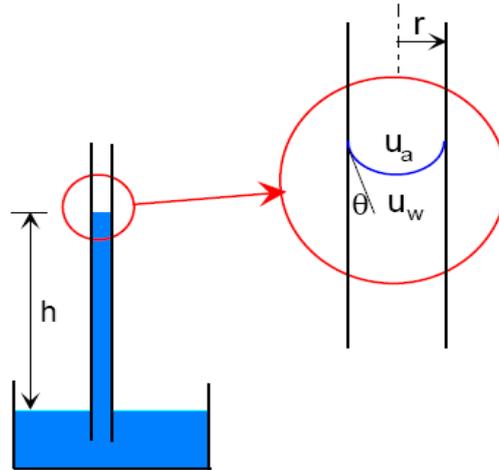


Figure 1.11 Modèle physique du phénomène d'effet capillaire (Szenknect,2003)

Lorsque l'eau est mise en contact avec l'air et un solide, une tension superficielle T_s se forme le long de la ligne de contact avec le solide en raison de la différence de pression entre l'eau u_w et l'air u_a agissant sur l'interface. Cette tension superficielle se manifeste physiquement par le phénomène de capillarité, illustré par la Figure 1.11.

Un tube de rayon r est plongé dans un bassin d'eau. Sous l'effet de la tension superficielle, l'eau monte dans le tube et a tendance à mouiller la paroi du tube. Ainsi, l'interface air – eau dans le tube prend une courbure et forme un ménisque (Figure 1.11).

1.5.3.Ménisque capillaire

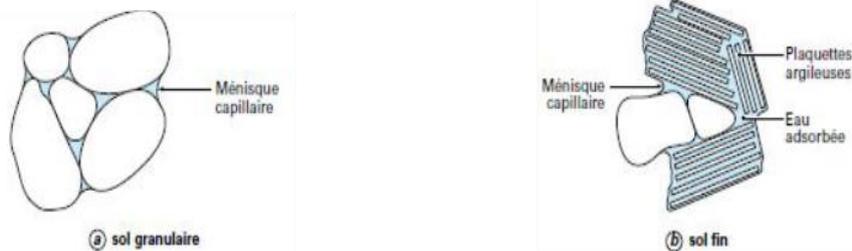


Figure 1.12 Ménisque capillaire, a: Sol granulaire ;b : Sol fin

(Delage et Cui,2000)

La différence de pression entre l'air et l'eau est généralement appelée pression capillaire. La relation entre la tension superficielle et la pression capillaire peut être décrite par la loi de Jurin, qui est une simplification de la loi de Laplace basée sur l'hypothèse que l'interface a une forme sphérique. Cette relation est illustrée par la Figure 1.12.

$$U_a - U_w = \frac{2T_s \cos\theta}{r} \quad (1-20)$$

L'angle de contact θ est égal à zéro lorsque l'eau est pure. Dans ce cas, le ménisque forme une demi sphère parfaite, le rayon de courbure du ménisque est égal à celui du tube r , on a alors:

$$U_a - U_w = \frac{2T_s}{r} \quad (1-21)$$

1.5.4. Différents types de la succion

Dans les sols non saturés, nous identifions trois composantes de succion selon (Blatz, Cui and Oldecop, 2009) : la succion matricielle, la succion d'adsorption pour les minéraux argileux, et la succion osmotique. Nous pouvons également observer la présence de la succion capillaire.

1.5.4.1. Succion matricielle

La succion matricielle représente la capacité du sol à retenir l'eau, et elle dépend des propriétés capillaires du milieu ainsi que des propriétés d'adsorption développées par les particules constituant le sol. Elle est souvent considérée comme la composante prédominante de la succion totale dans le cas des sols non-plastiques.

1.5.4.2. Succion capillaire

En général, lorsque deux phases, un liquide et un gaz, entrent en contact, une tension de surface T_s se forme à l'interface entre les deux. Cette propriété permet d'expliquer le phénomène d'ascension capillaire. La différence de pression entre l'air et l'eau, connue sous le nom de pression capillaire, joue un rôle déterminant dans les mouvements de fluides à travers les milieux poreux. Cette différence de pression se manifeste par la présence d'un ménisque entre l'air et l'eau, et elle est caractérisée par la loi de Jurin. On la note généralement comme S_m .

Donc on a :

$$S_m = U_a - U_w = \frac{2T_s \cos\alpha}{r} \quad (1-22)$$

La généralisation de cette définition s'applique à tous les états de contrainte mécanique. Dans le domaine de la Mécanique des Sols, les concepts de pression capillaire et de succion sont considérés comme équivalents.

1.5.4.3. Succion d'adsorption

Dans les sols fins non saturés, à la différence des sols granulaires, l'attraction de l'eau par le sol ne résulte pas uniquement de la capillarité, mais également des processus d'adsorption physico-chimique. Les particules d'argile, qui sont chargées négativement, ont tendance à adsorber de l'eau à leur surface, ce qui contribue à cette attraction. Selon (Masekanya, 2008), les forces mises en jeu sont :

- La liaison hydrogène entre les molécules d'eau et les atomes d'oxygène ;
- Les hydroxydes situés à la surface des feuillets argileux ;
- L'eau nécessaire à l'hydratation des cations attirés par les défauts de charge du feuillet ;
- L'eau attirée par l'attraction osmotique créée par la concentration de cations au voisinage du feuillet ;
- L'attraction électrique du pôle positif du dipôle que forme la molécule d'eau ;
- Les forces d'attraction de Van der Waals.

1.5.4.4. Succion osmotique

La succion osmotique, également appelée pression osmotique, correspond à la capacité du sol à retenir l'eau en présence de sels dissous dans l'eau interstitielle. Elle se manifeste lorsque l'eau est une solution saline. Si la concentration en sel est faible, ou dans le cas des sols sableux qui contiennent généralement peu de sels, cette composante peut être négligée, et la succion totale se réduit alors à la succion matricielle.

La succion osmotique π est identique à la pression osmotique. Elle est créée par la force résultant de la répulsion osmotique qui se produit en présence de sels solubles dans l'eau. Elle dépend de leur concentration.

On a :

$$\pi = \frac{\rho_w R T}{\omega_w} \ln x_w \quad (1-23)$$

Avec :

R : la constante des gaz parfaits ($R = 8.31432 \text{ J/(mol K)}$)

T : la température absolue ($^{\circ}\text{K}$)

ρ_w : la masse volumique de l'eau (kg/m^3)

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

x_w : la fraction molaire d'eau dans la solution

(Houston, Houston and Wagner, 1994) cité par (Alshihabi, 2002) confirment que la succion osmotique diminue quand le degré de saturation augmente.

En géotechnique elle n'est en général pas prise en compte, car son influence serait négligeable (Fredlund and Rahardjo, 1993; Delage and Cui, 2000).

1.6. Techniques de contrôle et de mesure de la succion

1.6.1. Contrôle par « translation d'axes »

Les géotechniciens ont adapté le principe de translation d'axes aux appareils de mécanique des sols tels que les oedomètres, 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 semiperméables 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.

$$\Psi = U_a - U_w \quad (1-24)$$

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 1.11. 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 (Delage and Cui, 2000).

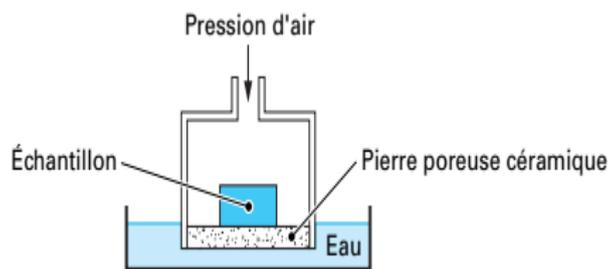


Figure 1.13 Cellule de Richards pour le contrôle de succion par translation d'axe (Delage and Cui, 2000)

1.6.2. Contrôle par plaque tensiométrique

Une méthode couramment utilisée pour imposer une succion est la technique de la plaque tensiométrique (Figure 1.14). Cette méthode consiste à mettre l'eau d'un échantillon sous tension en

le plaçant 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). (Masekanya, 2008) 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.

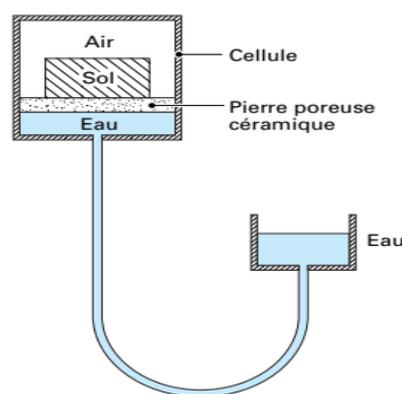


Figure 1. 14 Plaque tensiométrique pour faibles succions
(Delage and Cui,2000)

1.7. Courbe de succion ou de rétention d'eau

La relation entre la succion et la teneur en eau est représentée graphiquement sous forme d'une courbe appelée courbe de rétention d'eau (Figure 1.15). Cette courbe exprime la capacité du sol à attirer et à retenir l'eau en fonction de la succion appliquée par paliers croissants, suivis de paliers décroissants, généralement en utilisant la cellule de Richards (Delage and Cui, 2000). Les techniques de laboratoire les plus couramment utilisées pour établir la courbe de rétention d'eau reposent soit sur la création d'une dépression d'eau à l'aide d'une plaque poreuse, soit sur l'application d'une surpression d'air sur l'échantillon (Klute, 1986) (Carter and Gregorich, 2007). Ces méthodes présentent l'inconvénient de nécessiter un temps prolongé (un mois ou plus) pour obtenir des résultats. Il existe également des méthodes en régime transitoire, qui sont plus rapides car elles ne requièrent pas l'atteinte de l'équilibre, mais les résultats obtenus sont moins précis que ceux obtenus en régime permanent (Klute, 1986). Il est également possible de déterminer la courbe de rétention à partir de la texture du sol, du taux de matière organique et de la densité (Rawls and Brakensiek, 1982). Cependant, ces

méthodes sont généralement utilisées pour des plages de succion allant d'environ -300 cm à -15 000 cm. 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%.

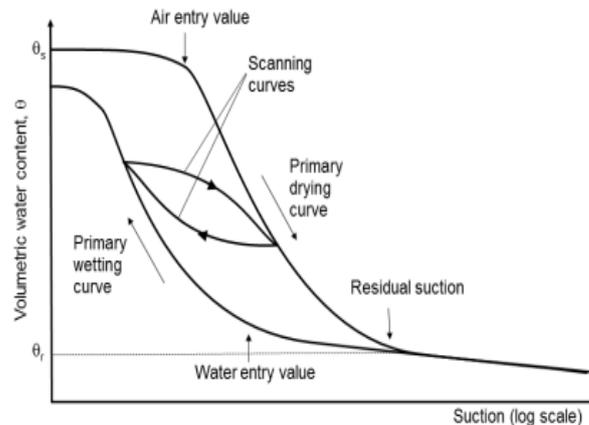


Figure 1. 15 Courbe typique de rétention d'eau dans le sol (Toll *et al.*, 2016)

Au cours des dernières décennies, la courbe de rétention d'eau a fait l'objet de nombreuses études approfondies. Les articles de (Barbour, 1998) et de (Bachmann and Ploeg, 2002) offrent un aperçu complet de l'état actuel des connaissances dans ce domaine. Ces recherches ont permis d'obtenir plusieurs résultats clés, qui couvrent différents aspects :

- ✓ Différentes fonctions mathématiques ont été utilisées pour ajuster les points expérimentaux de la courbe de rétention d'eau. Parmi ces fonctions figurent celles proposées par (Gardner, 1958; van Genuchten, 1980; Fredlund and Xing, 1994) .
- ✓ Il est possible de prédire la forme de la courbe de rétention d'eau en se basant sur les caractéristiques physiques du sol, en particulier sa courbe granulométrique. Plusieurs études, telles que celles menées par (Giménez *et al.*, 1997; Fredlund, Wilson and Fredlund, 2002; Chertkov, 2003) ont exploré cette relation. L'application de cette courbe à la détermination du coefficient relatif de perméabilité. Des études telles que celles menées par (Fredlund and Xing, 1994; Fleureau and Taibi, 1995; Jamin, 2003) ont exploré cette application. L'application à l'analyse de la résistance au cisaillement (Fredlund, Vanapalli and Pufahl, 1995).
- ✓ La modélisation de l'hystérésis a été observée entre les chemins de drainage et d'imbibition. Des études telles que celles réalisées par (Saix, 1987; Pham and Fredlund, 2011) se sont intéressées à ce phénomène et ont proposé des modèles pour le représenter. La prise en compte

des couplages hydromécaniques (Salager, 2007; Salager *et al.*, 2013) L'influence de la température (Tang, 2005; Salager *et al.*, 2006) .

1.8. Modèles de courbes à fondement mathématique

a) Modèle de Brooks et Corey (1964)

Ce modèle est fondé sur les travaux de (Burdine, 1953). (Brooks and Corey, 1964) ont développé une équation qui présente différentes formes en fonction des valeurs du potentiel de pression (h) :

$$S_e = (\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r) \quad (1-25)$$

$$\text{Pour } h < 1 \quad S_e = \left(\frac{h_a}{h}\right)^\lambda \quad (1-26)$$

$$\text{Pour } h \geq 1 \quad S_e = 1 \quad (1-27)$$

Où, S_e est la saturation effective, $0 \leq S_e \leq 1$;

λ est l'indice de distribution de la taille des pores, est adimensionnel et varie de 0,70 à 0,15 selon la texture des sols (sable à limono-argileux) ;

h_a est le potentiel de pression au point d'entrée d'air en cm. Il prend des valeurs entre -10 et -1000 cm en fonction du type de sol ;

h potentiel de pression ;

θ , θ_s et θ_r sont la teneur en eau, la teneur en eau saturée et la teneur en eau résiduelle respectivement.

Un inconvénient de ce modèle est qu'il présente une discontinuité lorsque h atteint la valeur de h_a , entraînant une rupture de pente abrupte au niveau du point d'entrée d'air. Cette caractéristique peut parfois entraver une convergence rapide des schémas de résolution numérique.

b) Modèle de Campbell (1974) :

En s'appuyant sur les travaux de (Gardner, Hillel and Benyamini, 1970), (Campbell, 1974) a proposé une fonction puissance similaire à celle proposée par (Brooks and Corey, 1964)

$$\theta = \theta_s \left(\frac{h}{h_a}\right)^{\frac{1}{b}} \quad (1-28)$$

Où, h et h_a exprimés initialement en bar

b est une constante empirique, caractéristique du sol considéré,

Le modèle de (Campbell, 1974) présente également une discontinuité de pente lorsque $h=h_a$, ce qui entraîne les mêmes limitations que le modèle de (Brooks and Corey, 1964). De plus, ce modèle ne prend pas en compte le terme θ_r , ce qui limite sa flexibilité, comme souligné par

(G. Bastet *et al.*, 1998).

c) Modèle Van Genuchten (1980) :

Ce modèle se base sur la relation de (van Genuchten, 1980), ou la définition du degré de saturation effectif est généralement adopté pour caractériser le comportement de rétention d'eau comme :

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{S_r - S_r^r}{1 - S_r^r} \quad (1-29)$$

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.

Ce modèle ne parvient pas à fournir des résultats satisfaisants pour les sols ayant une faible teneur en eau, comme l'a constaté (Assouline, Tessier and Bruand, 1998). Pour remédier à cela, (Vogel and Cislérova, 1988) ont proposé des modifications du modèle afin d'améliorer sa performance dans des conditions proches de la saturation. Grâce à ces modifications, le modèle ajusté permet d'obtenir des courbes plus précises pour les matériaux fins tels que les argiles.

Le degré de saturation effectif est aussi exprimé par :

$$S_e = \left(1 + \left(\frac{s}{\alpha}\right)^n\right)^{\frac{1}{n}-1} \quad (1-30)$$

Où s est la succion du sol, α un paramètre lié à la valeur d'entrée d'air et n est un paramètre lié à la pente de la courbe de rétention d'eau

d) Modèle Bouacide et al (2024) :

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

$$S_e = \left(1 + \left(\frac{s^*}{(3.75I_D + 1) * cu}\right)^{(6.25I_D + 2.89)}\right)^{\frac{1}{(6.25I_D + 2.89)} - 1} - (0.12I_D + 0.26) \quad (1-31)$$

Soit : $s^* = s.cu$, s : succion normalisé Cu : coefficient de uniformité ID : l'indice de densité

1.9. Conclusion

Les mesures de la perméabilité des sols non saturés sont parfois délicates et assez peu répandues actuellement notamment dans la maîtrise des caractéristiques imposées au laboratoire (ex : indice de densité des éprouvettes). Dans ce chapitre on a tout d'abord présenté une synthèse sur les équations empiriques et théoriques existantes dans la littérature pour la détermination de la perméabilité et l'accent a été mis sur leurs limites d'application. Ensuite nous avons abordé l'effet de la microstructure sur la perméabilité des milieux poreux et nous avons mis en évidence l'importance de la "taille des pores" par rapport à la "porosité" sur le transport des fluides dans un milieu poreux. Dans ce chapitre, les études montrant la dépendance de la perméabilité avec les caractéristiques du milieu poreux (taille, forme des grains et des pores, l'indice des vides et la surface spécifique) ont été présentées.

Etant donné que la perméabilité est plus influencée par la taille d'accès aux pores et que cette dernière dépend directement aux courbes de rétention d'eau (suction en fonction de la teneur en eau ou du degré de saturation), dans ce chapitre nous nous sommes intéressés également à ces courbes de rétention et leurs techniques d'évaluation au laboratoire et les modèles développés dans la littérature qui permettent de prédire ces courbes.

Sachant que la suction du sol est une variable clé dans les sols non saturés, une meilleure connaissance de l'état de l'eau et des propriétés de rétention et de transfert de l'eau dans les sols non saturés permet de mieux comprendre le comportement d'ouvrages bâtis en sol non saturé tels que les ouvrages en sol compacté (remblais routiers, barrages en terre, barrières géologiques d'étanchéité de centres de stockage de déchets).

La détermination expérimentale de la courbe de rétention d'eau du sol nécessite beaucoup de temps, d'effort et de technicité élevée. De plus, chacune des techniques n'étant valable que dans un intervalle limité de suction.

CHAPITRE 2

MATERIAUX ETUDIÉS ET
TECHNIQUE
EXPERIMENTALES

CHAPITRE 2 MATERIAUX ETUDIÉS ET TECHNIQUE EXPERIMENTALES

2.1. Introduction

Dans cette partie, nous exposons les propriétés des divers sables étudiés ainsi que les instruments expérimentaux employés. Les procédures d'essais réalisées dans le cadre de cette étude sont également brièvement décrites, ainsi que les raisons d'utilisation de chaque méthode et essai, ainsi que les protocoles expérimentaux développés dans le cadre de ceux-ci.

2.2. Caractéristiques des matériaux analysés

Les essais sont réalisés sur cinq types de sables, représentés par la Figure 2.1 :



Figure 2.1 Les cinq types de sable étudiés.

2.3. Méthodes de caractérisation des matériaux testés

La caractérisation des éprouvettes avant et après l'essai est indispensable pour mieux expliquer nos résultats expérimentaux. Ainsi, nous avons été contraints de mener les essais suivants :

2.3.1 Analyses granulométriques

Il est donc essentiel de connaître la granulométrie d'un sol, c'est-à-dire la répartition de ses particules en fonction de leurs diamètres équivalents. Deux tests en laboratoire sont utilisés pour déterminer la granulométrie des sols :

- l'analyse granulométrique par tamisage

- l'analyse granulométrique par sédimentation

a. Étude granulométrique à l'aide de tamisage

Dans un ordre croissant de bas en haut, les tamis sont emboîtés les uns sur les autres. On commence par un récipient à fond plein (pour collecter les éléments fins) et on y ajoute un couvercle pour éviter la dispersion des poussières (voir Figure 2.2). Le tamisage est effectué en versant le matériau sec. Un refus (une partie qui reste sur le premier tamis) et un tamisât (une partie qui passe à travers le tamis) seront collectés. Une partie du tamisât sera retenue, puis une autre partie passera, et ainsi de suite jusqu'au dernier tamis qui permettra de laisser passer les éléments inférieurs à 0,08 mm. En cas de tamisage manuel, les différents tamis sont secoués afin de les faire passer.



Figure 2.2: Série des tamis utilisés pendant les essais granulométriques

b. Étude granulométrique à l'aide de sédimentométrie

L'analyse granulométrique par sédimentation est utilisée pour évaluer la répartition granulométrique des particules de silt et d'argile. Il s'agit de l'évaluation du temps de sédimentation dans une colonne d'eau, c'est-à-dire de la vitesse de chute des cristaux.

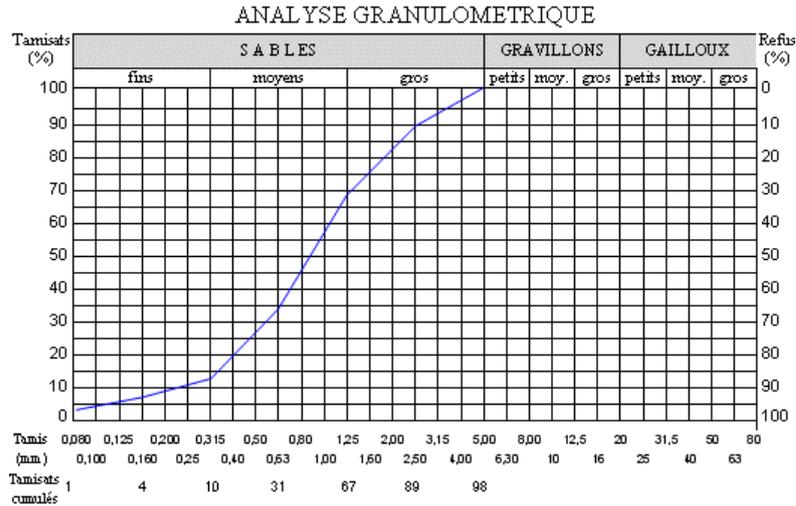


Figure 2.3: Courbe granulométrique (source internet)

Dans ce travail, nous avons seulement effectué l'analyse granulométrique par tamisage, car la quantité de particules fines inférieures à 80µm était très faible et les résultats de l'analyse sont présentés dans la figure 2.4

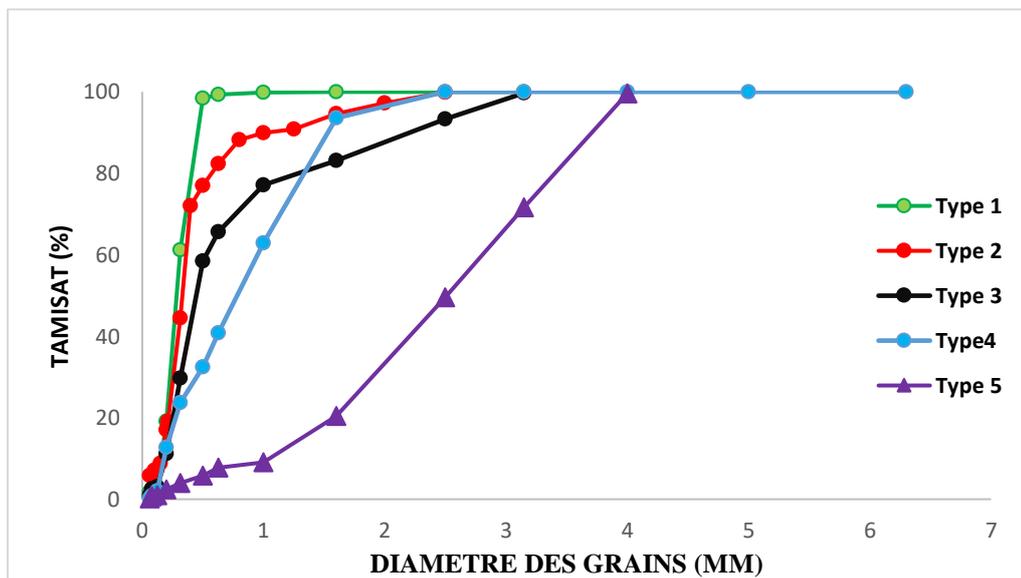


Figure 2. 4 Courbes granulométriques des sables étudiés.

2.4. La masse volumique

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 mentionné ci-dessous.



(a)



(b)

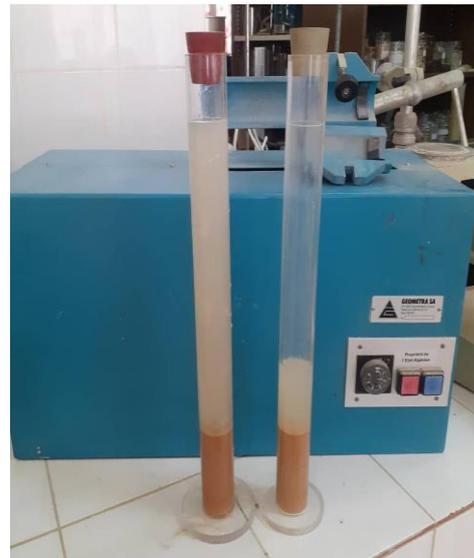
Figure2.5 : (a) pycnomètre + sable , (b) pycnomètre + l'eau

2.5. Equivalent 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 .



(a)



(b)

Figure2.6 : (a) Solution + sable, (b) Agitateur + les tubes

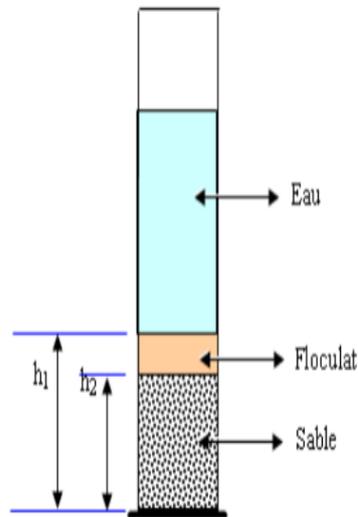


Figure 2.7. : la hauteur h_1 : sable propre + éléments fins

la hauteur h_2 : sable propre seulement

2.6. Dispositif de mesure de perméabilité

Un tube de Mariotte est utilisé pour mesurer la perméabilité à charge constante. Le tube de Mariotte est une boîte fermée, à l'exception d'une ouverture en haut pour un tube d'entrée et d'une ouverture, soit en haut, soit ailleurs, pour un tube de sortie. Dans le système illustré dans la Figure (2.8), la plaque métallique établit un joint étanché au sommet du cylindre en plastique grâce à un joint en caoutchouc graissé, tandis que le tube d'entrée traverse la plaque grâce à un raccord de compression qui scelle avec un joint. La pression au fond du tube d'entrée reste constante, Cependant, la pression à l'intérieur du trou de sortie est supérieure à celle de l'atmosphère. La pression à l'intérieur du récipient diminue dès que l'eau commence à sortir du trou de sortie, ce qui entraîne une baisse de la pression au fond du tube d'entrée au-dessous de la pression atmosphérique. Il entraîne l'infiltration d'air dans le tube, ce qui maintient la pression au fond du tube à la pression atmosphérique. De cette manière, tant que le niveau d'eau à l'intérieur du cylindre est supérieur au fond La pression au niveau du trou de sortie du tube d'entrée restera inchangée, l'air qui pénètre dans le système forme des bulles depuis le bas du tube jusqu'à l'espace situé en haut du cylindre. Le tube de Mariotte, utilisé dans ce dispositif, garantit une charge constante en étant connecté au système de drainage de la cellule oedométrique. Les parties inférieure et supérieure de l'éprouvette sont couvertes d'une pierre poreuse pour permettre l'écoulement de l'eau. Chaque intervalle de temps permet de mesurer le volume d'eau entrant dans l'éprouvette en utilisant un tube gradué .



(a)



(b)

Figure 2.8 : (a) Tube de mariotte + cellule oedométrique, (b) cellule oedométrique

2.7. Détermination de l'indice des vides minimum et maximum (Selon la norme ASTM D4253-16 et ASTM D4254-16)

Afin de contrôler la densité des éprouvettes étudiées, il est nécessaire d'effectuer un calcul de leur masse. Ce calcul se base sur l'indice des vides de l'éprouvette. L'indice des vides est lui-même calculé à partir de la relation suivante de l'indice de densité, permettant ainsi d'assurer une évaluation précise de la densité des échantillons :

$$I_D = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (2-1)$$

Tel que : e_{min} : est le taux de vide pour l'état le plus dense possible ; e_{max} : est le taux de vide pour l'état le plus lâche possible ; e : L'indice des vides de l'éprouvette dans son état naturel ;
 I_D : L'indice de densité

Dans le cadre de cette étude l'évaluation des indices des vides minimum et maximum a été effectuée selon les normes suivantes : ASTM D4253-16 et ASTM D4254-16.

a. Indice des vides minimum

Une couche de sable est déposée avec précaution dans le moule à l'aide d'une cuillère, puis le moule est secoué avec un petit marteau. On répète ce processus jusqu'à ce que le moule soit entièrement

rempli, et selon une règle, on retire l'excédent de matériau sur le dessus du moule (voir Figure 2.9). Par la suite, on évalue l'échantillon sur la balance et on calcule la valeur de l'indice des vides minimum (e_{min}) en utilisant la loi suivante :

$$(2-2) \quad \rho_d = \frac{m_s}{v}$$

$$\text{Et} \quad e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (2-3)$$



(a)

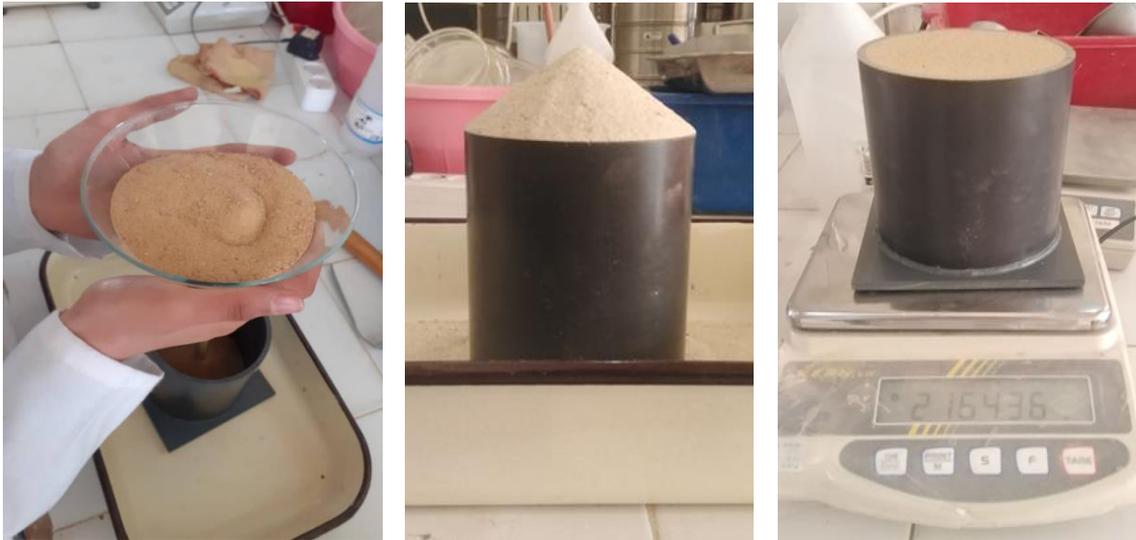
(b)

(c)

Figure 2.9. : Préparation l'indice de densité minimal, **a)** l'échantillon est prélevé , **b)** versement d'une petite quantité pour former une couche, **c)** compactage et vibration

b. Indice des vides maximum

La procédure suivante est utilisée pour effectuer l'essai de détermination de l'indice des vides maximum. L'entonnoir en verre est d'abord placé au fond du moule. Puis, on verse l'échantillon de sable dans l'entonnoir, puis on le soulève progressivement, en veillant à ce qu'il reste toujours rempli d'échantillon jusqu'à la fin de l'expérience . Après avoir délicatement retiré l'entonnoir, l'échantillon est pesé sur une balance, puis on extrait la valeur de l'indice des vides maximum (e_{max}) en se basant sur la relation donnée dans la loi (2-3)..



(a)

(b)

(c)

Figure 2.10 . : Préparation l'indice de densité maximum, **a)** Mettre l'entonnoir au fond du moule, **b)** Nous formons une pyramide avec du sable., **c)** Poids de l'échantillon + moule

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 étudiés

Sable	$D_{g50}(mm)$	C_u	e_{min}	e_{max}	$s(g/cm^3)\rho$
Type1	0.28	2.06	0.48	0.7	2.71
Type2	0.355	2.4	0.49	0.71	2.63
Type3	0.44	2.83	0.42	0.69	2.59
Type4	0.77	5.3	0.46	0.7	2.57
Type5	2.51	2.6	0.44	0.71	2.65

2.8. Dispositif et procédure de mesure de la distribution de la taille d'accès aux pores :

2.8.1. Méthode tensiométrique

On évalue la taille des pores en utilisant les courbes de rétention d'eau. L'hypothèse du modèle d'écoulement sous-jacent est celle d'un réseau de pores composé de tubes cylindriques parallèles, où l'eau circule dans la direction de l'axe des cylindres. Cette supposition concerne le processus de séchage, lorsque les pores sont initialement remplis d'eau liquide (Figure 2.11 a). En ce qui concerne le chemin de mouillage, la vapeur d'eau présente dans les pores se condense en formant des ménisques cylindriques le long de la paroi des pores. (Figure 2.11. b).

La mesure tensiométrique de la succion permet de déterminer ces courbes (Delage et Cui 1998). Il s'agit d'une méthode de mesure de la pression négative de l'eau sous tension, similaire dans son principe à celle des pressions positives. Cependant, il est essentiel d'utiliser une pierre fine en céramique poreuse qui doit rester saturée à tout niveau de succion, garantissant ainsi la continuité de l'eau entre le sol non saturé et le tube qui doit rester rempli d'eau. Il est crucial que la pierre céramique soit parfaitement saturée par l'eau désaérée afin de garantir le bon fonctionnement d'un tensiomètre.

Dans cette méthode, on peut mesurer la succion maximale en fonction de la pression négative maximale que la pierre céramique peut supporter, car si elle dépasse sa capacité, elle risque de se déformer. Nous faisons usage d'une pierre céramique avec une capacité de 50 kPa dans nos tests. La pression actuelle est largement adéquate pour étudier les propriétés de rétention d'eau d'un sable.

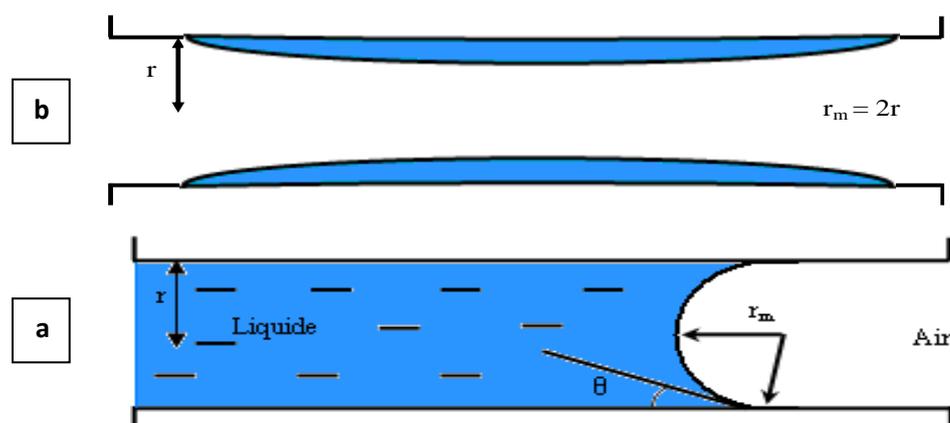


Figure 2. 11 Schéma explicatif des processus de séchage et mouillage dans le réseau poreux constitué de cylindres de rayon r , (r_m est le rayon du ménisque de l'interface air-eau) (d'après(Do, 1998) b). Processus de mouillage. a) Processus

2.8 .2 . Programme expérimental

Le dispositif d'essai est illustré dans la Figure (2.12) et comprend une cellule œdométrique (70 mm de diamètre et 37 mm de hauteur), une pierre céramique avec une capacité de séchage de -50 kPa et un tube d'eau gradué (diamètre 7mm) relié à un réservoir d'eau désaérée. Le matériel est placé dans une salle chauffée à 20°C et pendant toute la durée de l'essai, l'échantillon est recouvert d'un film de cellophane qui empêche l'évaporation de l'eau.

La méthode de mesure de la succion tensiométrique implique d'augmenter progressivement la succion présente dans l'éprouvette et de mesurer les fluctuations correspondantes de la teneur en eau. Le tube gradué a un niveau d'eau inférieur à celui de l'éprouvette pour appliquer une succion dans le sol. Après l'équilibre hydrique, il y a une fluctuation du niveau d'eau dans le tube gradué. Étant donné la petite surface du tube gradué, il est possible de sous-estimer la quantité d'eau évaporée lors de l'équilibre hydrique. Il est possible de calculer le volume d'eau échangé entre le sol et le tube en observant la variation du niveau d'eau dans le tube.

Il est possible d'obtenir les courbes de rétention d'eau pour les chemins d'humidification et de séchage en appliquant plusieurs niveaux de succion successifs. La mesure du volume d'eau dans le tube (diamètre 7mm) est réalisée avec une résolution de 1mm, ce qui entraîne une précision d'environ 40 mm³, ce qui est insignifiant par rapport au volume poreux de l'éprouvette de sol (environ 57000 mm³). On peut évaluer la répartition de la taille des pores en utilisant la courbe de rétention d'eau (courbe de séchage) et en utilisant la loi de Jurin (équation 2.4) pour exprimer la succion en fonction du rayon d'accès des pores.

$$S = u_a - u_w = \frac{4\sigma_s \cos \theta}{d_p} \quad (2.4)$$

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, 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, EL, Frank, B., Suo, Y. et Garoff, 1999)(Espinoza and Santamarina, 2010) (Lourenco *et al.*, 2012) $\cos \theta \approx 1$ est couramment utilisé dans la littérature pour évaluer la distribution de la taille des pores (Mitchell, J. K., & Soga, 2005) (Carter, MR, & Gregorich, 2007) (Innocentini and Pandolfelli, 2001) On a pour l'eau $\sigma_s 72,75 \times 10^{-3}$ N/m

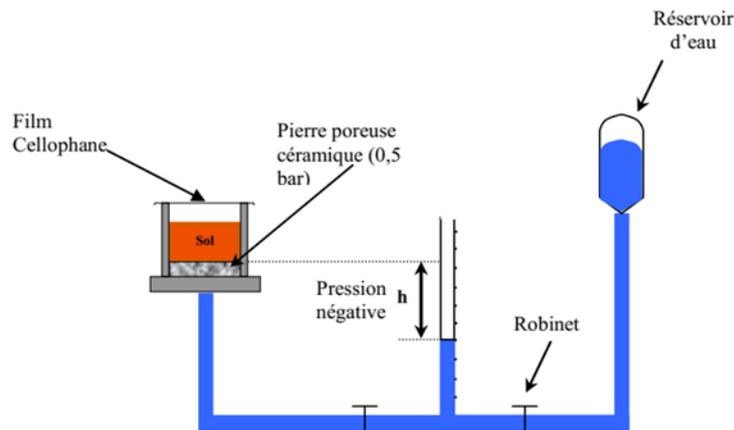


Figure 2.12. : Schéma explicatif de principe de la méthode tensiométrique de mesure de la succion
(Feia *et al.*, 2014)

2.8.3 . Préparation des éprouvettes

Différentes méthodes de production d'échantillons de sable en laboratoire peuvent être réparties en deux catégories (Butterfield et Andrawes, 1970) :

- les techniques qui permettent d'ajuster la densité après la déposition, pour des échantillons denses.
- les techniques où la densité est régulée lors de la déposition, pour toutes les densités.

La méthode employée dans cette étude se trouve dans la première phase où le sable est placé par couche, puis vérifié à la fin de cette opération pour obtenir une densité adéquate. Les échantillons obtenus grâce à cette méthode présentent une forte anisotropie et une densité inégale dans la direction verticale. Cependant, afin d'éviter tout dommage au sable, nous avons évité le compactage dynamique et nous avons seulement essayé de vibrer notre échantillon avec une légère vibration. Ensuite, l'éprouvette est couverte d'un film de cellophane qui empêche l'évaporation d'eau. Les principales étapes de préparation de l'éprouvette pour l'essai tensiométrique sont.

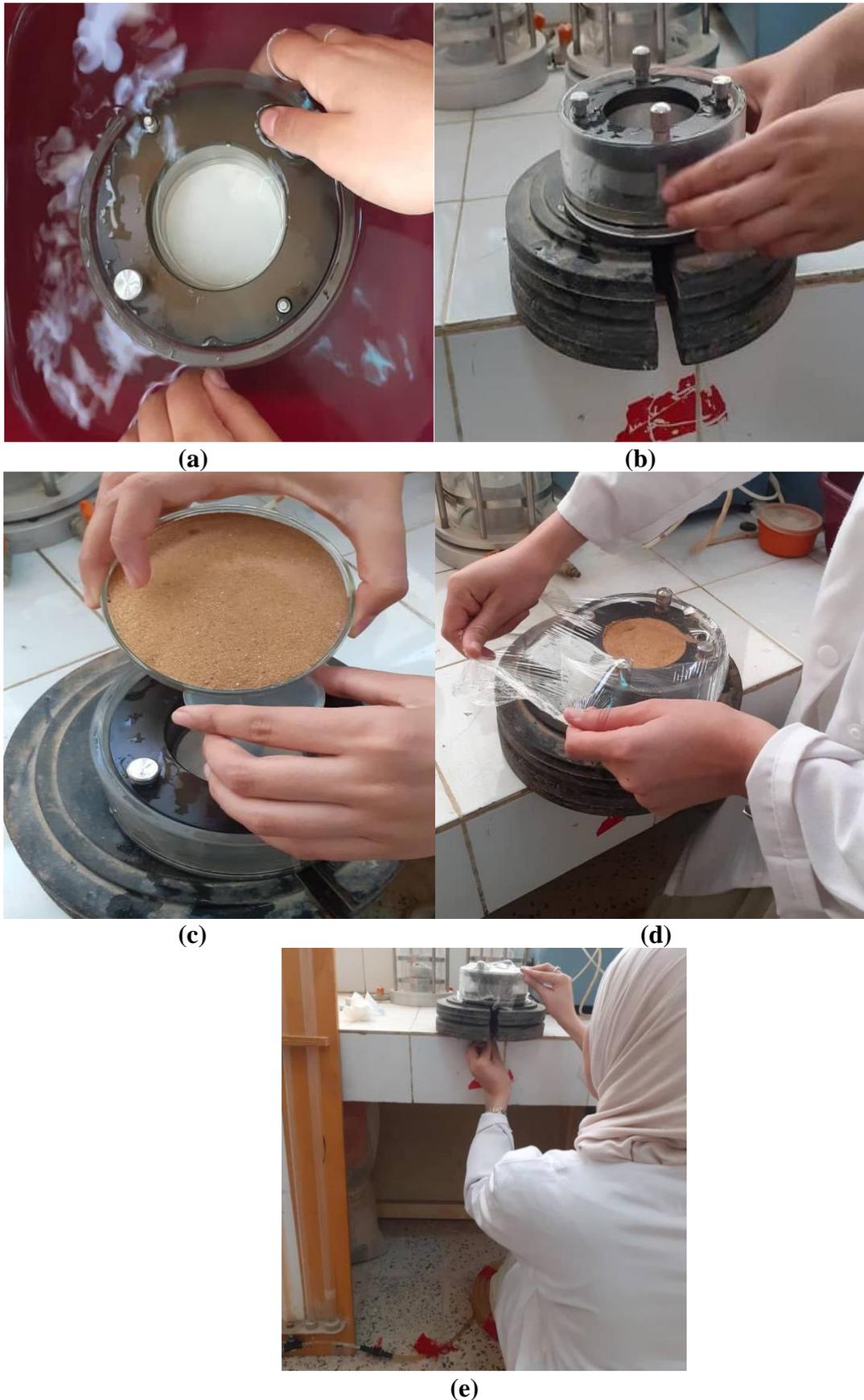


Figure 2.13 (a) installation la cellule dans l'eau (b) mettre dans le support (c) préparation d'un échantillon de sable (d) enveloppé de papier cellophane (e) procédure de l'essai tensiométrique



Figure 2.14. Vue générale de dispositif

2.9. Conclusion

Les caractéristiques des matériaux étudiés sont exposées dans le chapitre, ainsi que les techniques et les procédures expérimentales utilisées dans cette étude. Dans ce chapitre, une méthode expérimentale a été employée afin d'évaluer la perméabilité de chaque type de sable. Cette méthode est utilisée en utilisant un tube de Mariotte. Par la suite, une autre méthode expérimentale qui est l'essai tentiométrique a été employée afin d'évaluer la répartition de la taille d'accès aux pores d'un matériau granulaire (sable). L'objectif de cette méthode est de tracer les courbes de rétention d'eau et ensuite en appliquant la loi Young-Laplace, qui permet d'exprimer la succion en fonction du rayon d'accès aux pores. Au chapitre suivant, nous exposons tous les résultats expérimentaux obtenus ainsi que les interprétations de ces résultats

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 de la perméabilité des sables étudiés. Nous exposons également les résultats expérimentaux obtenus par la méthode tensiométrique, illustrés sur les courbes de rétention d'eau. Nous commenterons ensuite ces résultats, en mettant en parallèle les données de perméabilité et celles issues de la tensiométrie.

3.2 Corrélation expérimentale entre la perméabilité d'un matériau granulaire et la taille des pores

3.2.1. Résultats expérimentaux et discussion

3.2.2.1. Programme d'essais

Dans le cadre de ce travail les essais de mesure de perméabilité ont été réalisés avec différents indices de densité I_D (0.9; 0.7; 0.6; 0.5) sur différents types de sable. L'indice de densité est défini par l'équation): (3-1)

$$(3-1) I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$

3.2.2.2. Evolution de la perméabilité en fonction de l'indice de densité I_D

Afin d'étudier l'évolution de la perméabilité en fonction de l'indice de densité pour les cinq types des sables, des mesures de perméabilité ont été réalisées pour différents indices de densité ($I_D=0.9$; 0.7; 0.6; 0.5). Les résultats de ces mesures sont présentés sur la Figure (3.1). On

observe une diminution considérable de la perméabilité pour tous les types de sable quand la valeur de l'indice de densité augmente.

Alors il est clair que la perméabilité dans le sable diminue à mesure que l'indice de densité augmente, entraînant une réduction de la taille des pores.

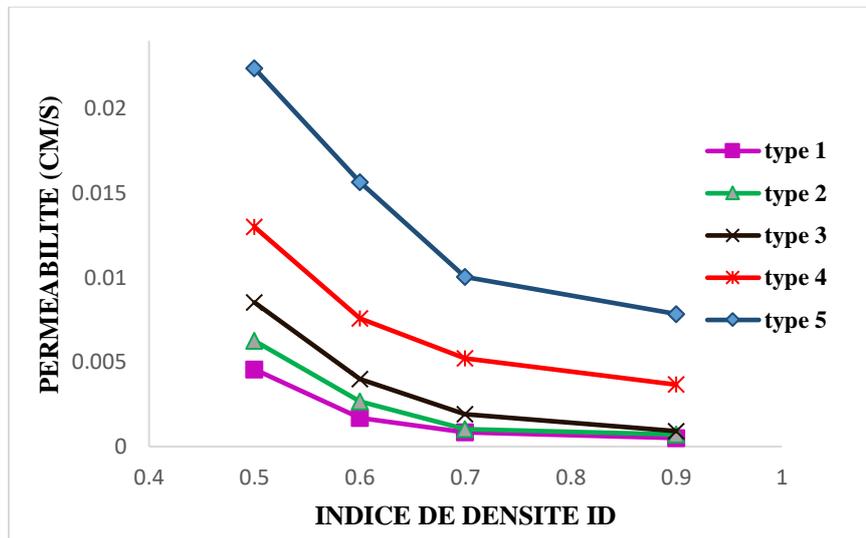


Figure 3. 1 Perméabilité des sables en fonction de l'indice de densité.

3.2.2.3. Évolution de la perméabilité en fonction de diamètre moyen des grains D_{g50}

La Figure (3.2) présente l'évolution de la perméabilité des sables étudiés en fonction du diamètre moyen D_{g50} pour les quatre indices de densité testés (0.9; 0.7; 0.6; 0.5). On observe une augmentation de la perméabilité en fonction du diamètre moyen des grains, ce constat étant valable pour toutes les valeurs de l'indice de densité. Pour un même état de densité, un sable présentant un diamètre de grains plus grand entraîne une taille des pores également plus grande, expliquant ainsi l'augmentation de la perméabilité associée au diamètre des grains.

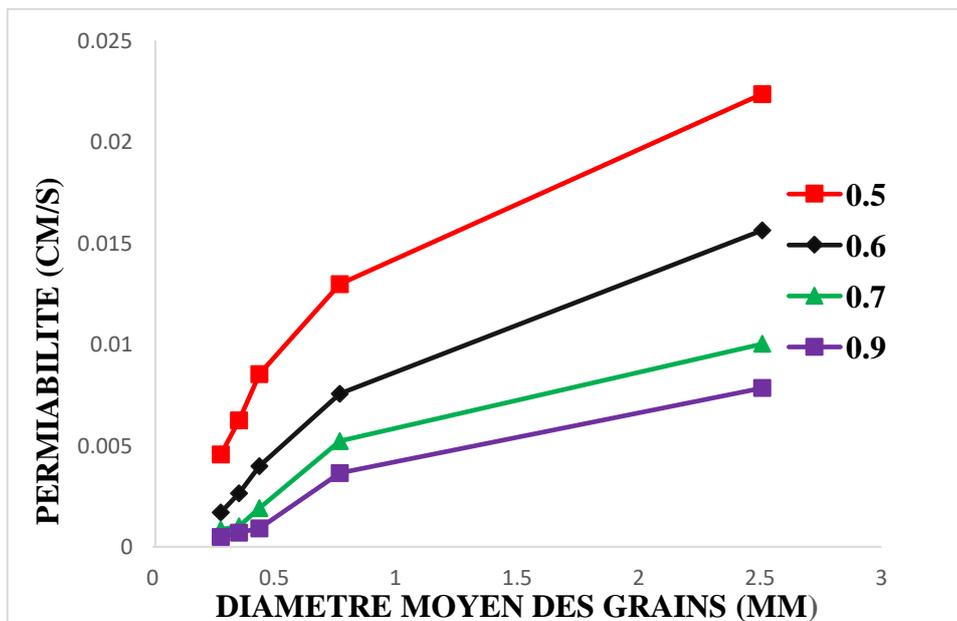


Figure 3. 2 Perméabilité des sables en fonction de diamètre moyen D_{g50} .

3.2.2.4. Évolution de la perméabilité en fonction de diamètre des pores D_{p50}

La Figure (3.3) présente l'évolution de la perméabilité des sables étudiés en fonction du diamètre des pores D_{p50} pour les quatre indices de densité testés (0.9; 0.7; 0.6; 0.5). On observe une augmentation de la perméabilité en fonction du diamètre des pores, ce constat étant valable pour toutes les valeurs de l'indice de densité.

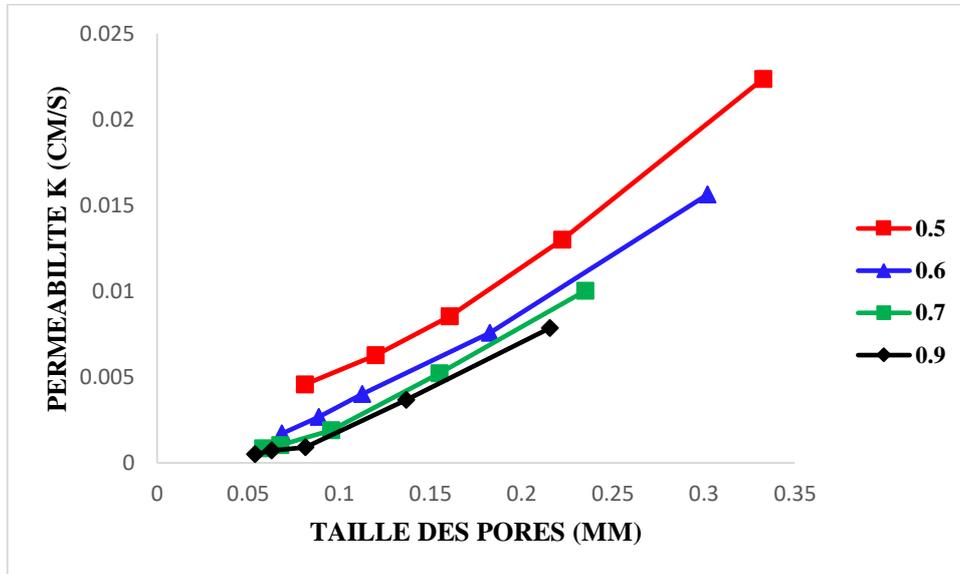
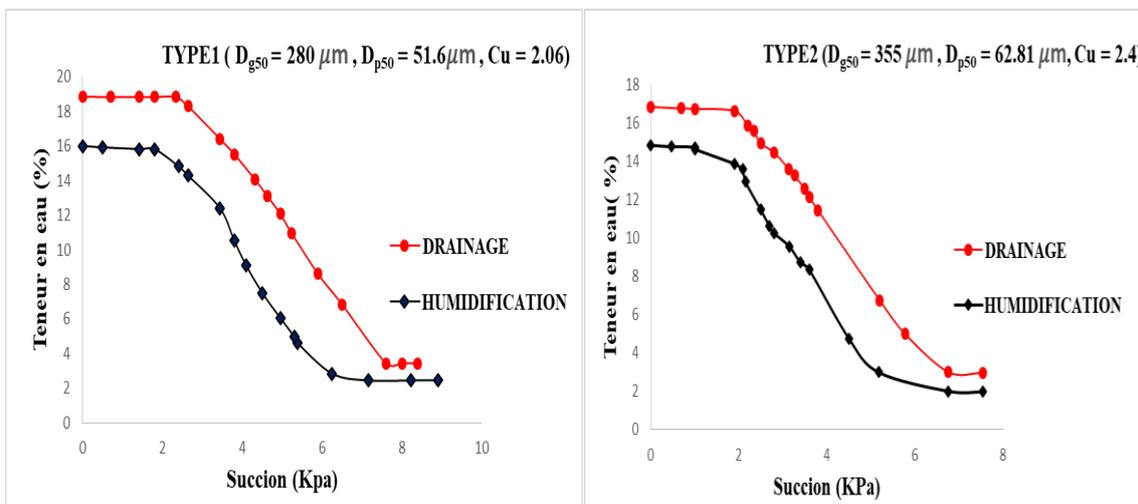


Figure 3. 3. Perméabilité des sables en fonction diamètre des pores D_{p50} .

3.2.3. Courbes de rétention d'eau

La Figure (3.4) illustre les courbes l'évolution de la teneur en eau (%) en fonction de la succion (KPa) pour trois types de sols, sous deux processus : drainage et humidification, Drainage :La teneur en eau diminue de manière plus régulière avec la succion, Humidification :La teneur en eau commence à un niveau inférieur comparé au drainage et augmente progressivement.



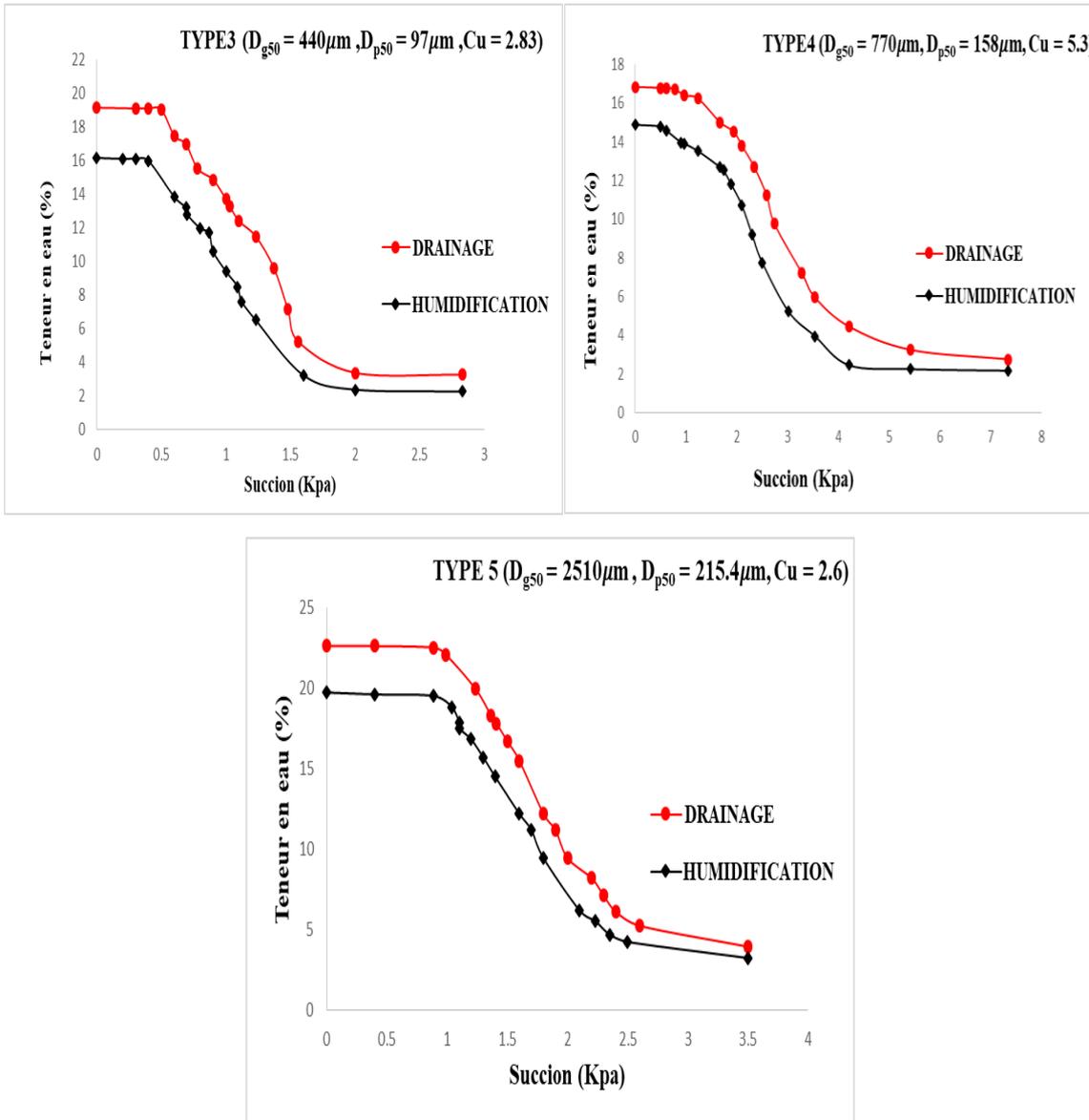


Figure 3.4. Courbes de rétention d'eau pour les cinq types de sable étudiés.

La Figure (3.5) illustre les courbes de rétention d'eau pour les cinq types de sable, obtenues en utilisant l'essai tentiométrique 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.

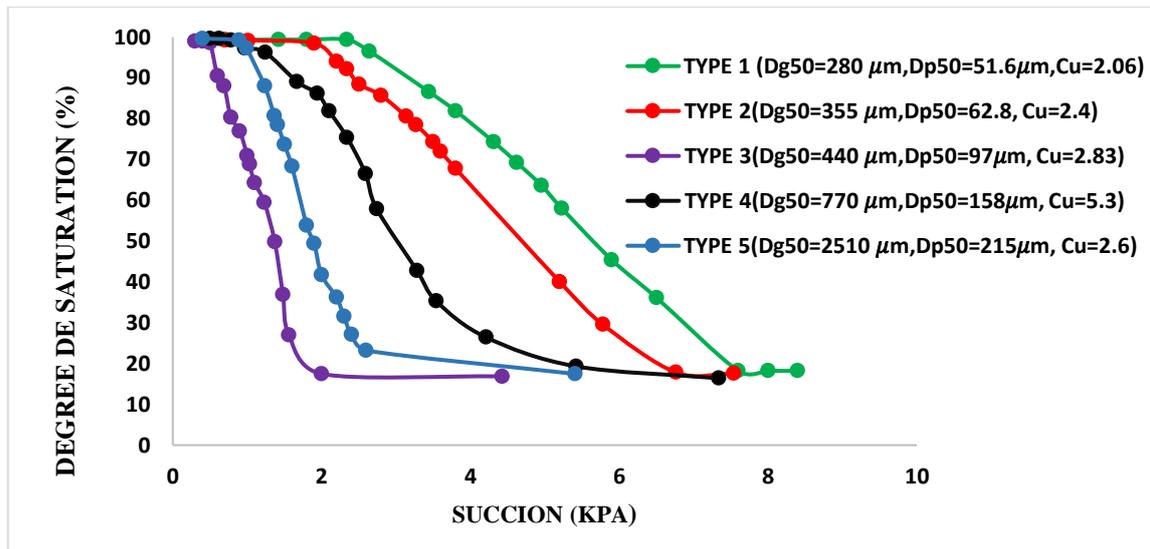


Figure 3.5. Courbes de rétention d'eau pour les cinq types de sable étudiés.

3.2.4. Effet de l'indice de densité

La Figure 3.6 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

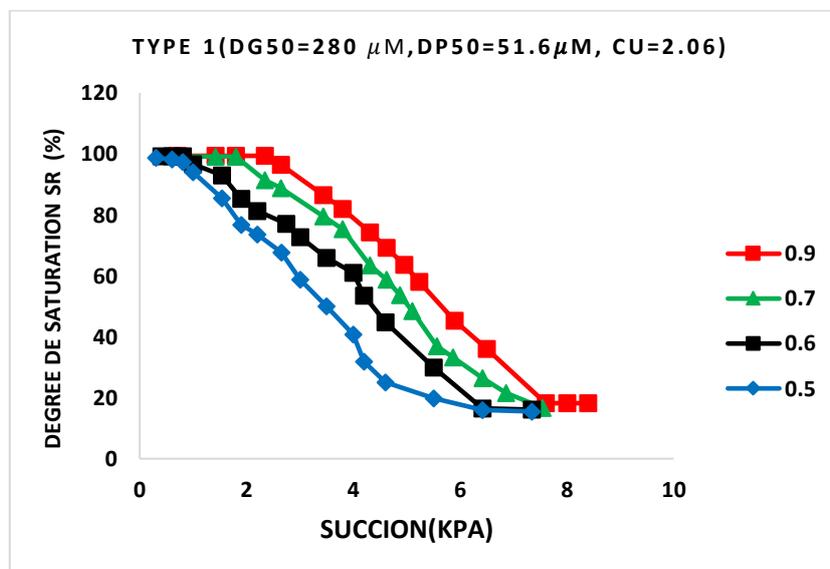
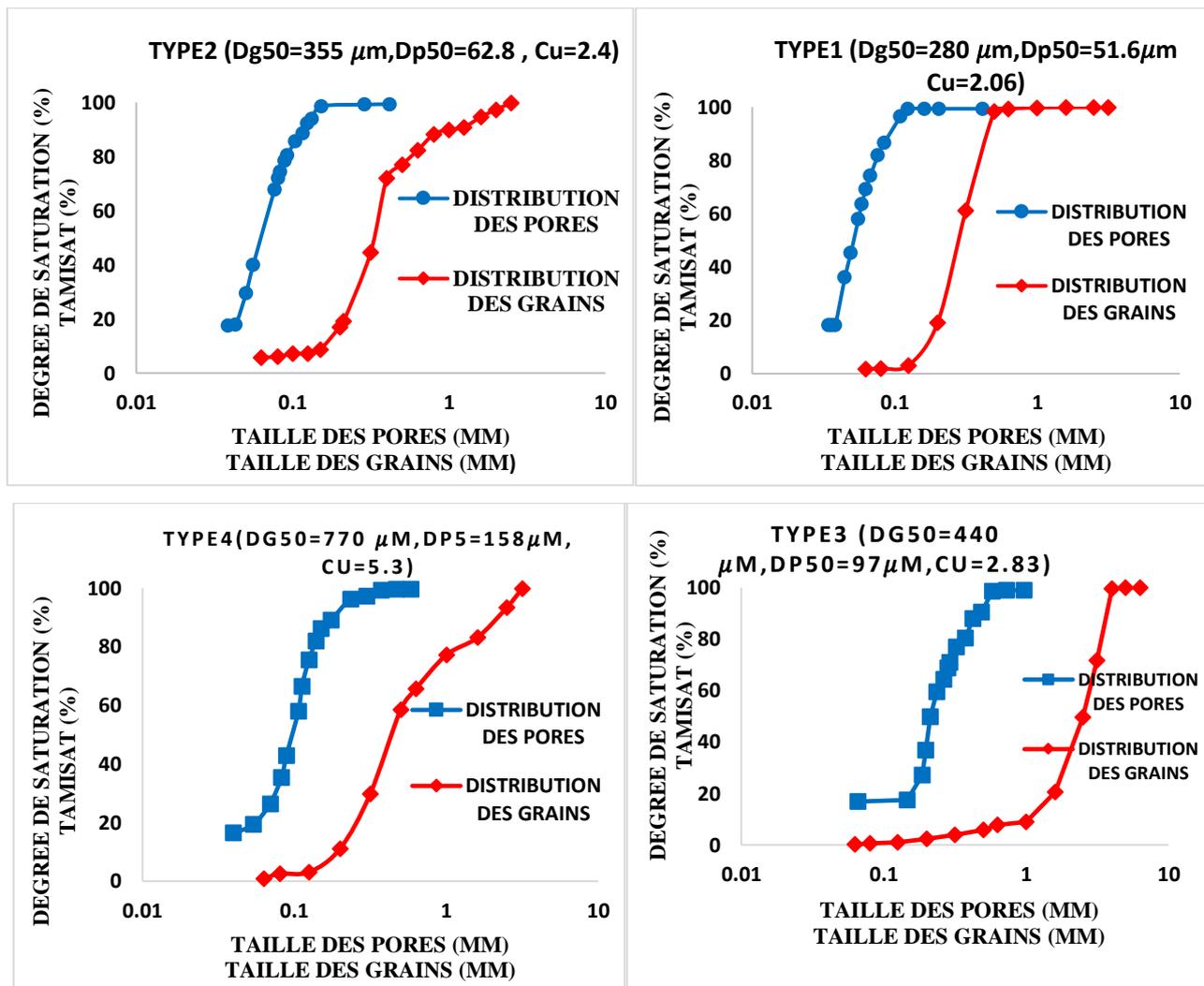


Figure 3. 6. Courbes de rétention d'eau pour le type de sable numéro 1 pour différentes valeurs de l'indice de densité

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

La taille d'accès aux pores des matériaux granulaires (les sables) joue un rôle crucial dans la succion et la courbe de rétention d'eau. En effet, elle détermine la capacité du sol à absorber et à retenir l'eau, ce qui a un impact direct sur la succion. Les pores plus grands facilitent l'écoulement de l'eau à travers le matériau, ce qui réduit la succion. En revanche, les pores plus petits ont tendance à retenir l'eau, favorisant ainsi une succion plus élevée. Par conséquent, la taille d'accès aux pores est un paramètre clé qui influe sur la capacité du sable à absorber l'eau et sur la force d'attraction exercée sur celle-ci. Une étude paramétrique a été réalisée afin d'étudier l'effet des paramètres tels que ; la taille des grains, l'indice de densité et l'étalement de la courbe granulométrique sur la distribution de la taille d'accès aux pores et les courbe de la distribution de la taille d'accès aux pores sont déduites à partir des courbes de rétention d'eau, en particulier de la courbe de séchage.



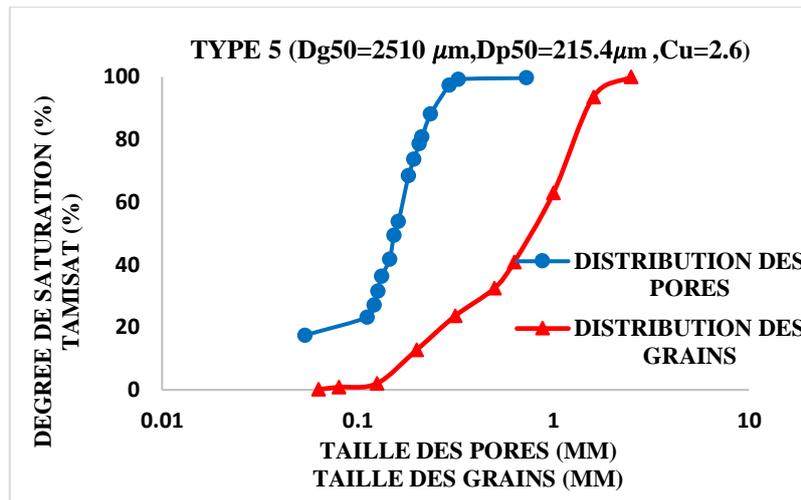


Figure 3. 7. Distribution de la taille d'accès aux pores pour les cinq types de sable

La Figure 3.7 montre un résultat typique des courbes de distribution de la taille d'accès aux pores pour les cinq types de sable avec un indice de densité $I_D = 0,5$. Une simple comparaison entre les courbes de la distribution de la taille d'accès aux pores et les courbes de la 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

Où :

D_{p50} est le diamètre des pores à 50 degrés de saturation obtenu à partir de l'estimation de la taille des pores en utilisant le modèle proposé.

Les courbes de distribution de la taille d'accès aux pores ont été obtenues par l'application de la loi de Young-Laplace (équation (2-4)) où le diamètre de la taille d'accès aux pores peut être estimé pour chaque valeur de la succion.

$$D_p = \frac{4\sigma_s \cos\theta}{s} \quad (3-2)$$

3.2.6. Effet de la taille des pores

La Figure 3.7 compare la distribution de la taille d'accès aux pores pour le type 1 de sable avec quatre indices de densité différents (0,5, 0,6, 0,7 et 0,9). La distribution partielle est également plus étalée pour des densités plus faibles. On peut dire alors que l'indice de densité exerce une influence significative sur la taille d'accès aux pores. Dans le cas du sable lâche, cela se manifeste par une augmentation de la taille des pores, tandis que le sable dense a tendance à présenter des pores plus petits.

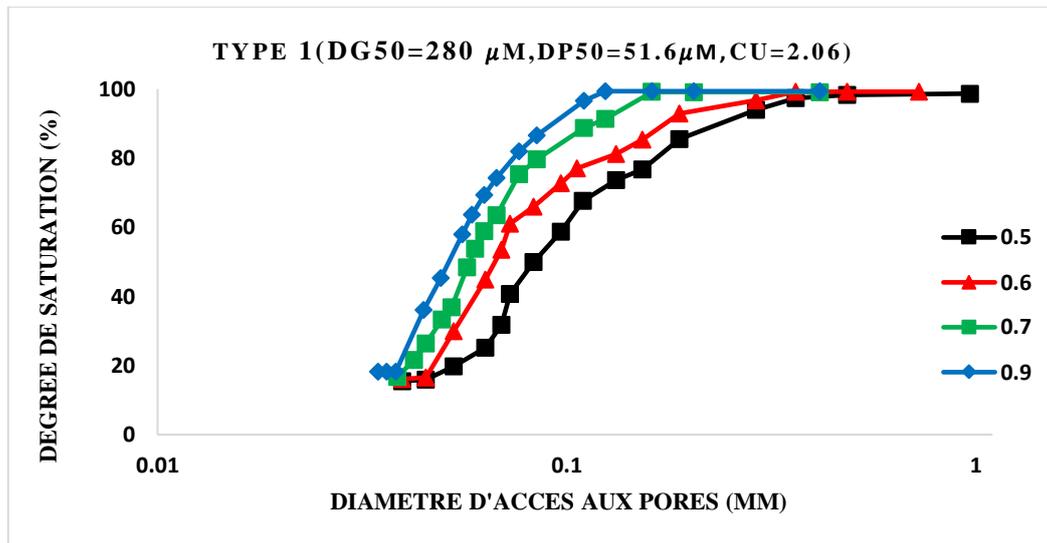


Figure 3.8. L'effet de l'indice de densité sur la distribution de la taille d'accès aux pores.

Il a été démontré que pour le sable lâche, la taille des pores devient plus grande, et par conséquent, des succions plus importantes sont nécessaires pour dessécher les pores. Cependant, les sables ayant des valeurs d'indice de densité plus élevées (sable dense) ont généralement des pores plus fins .

3.2.7. Effet de la taille des grains

La Figure 3.9 montre une comparaison entre la taille d'accès aux pores des sables avec différentes distributions de particules. Il a été observé que lorsque la taille des particules devient plus fine (la taille moyenne des particules D_{g50} est plus petite), la taille des pores devient plus petite, et donc une relation directe est trouvée entre D_{g50} (taille moyenne des grains D_{g50}) et D_{p50} (taille moyenne des pores D_{p50}). En outre, la diversité de la taille des pores augmente avec la taille des particules.

On explique cela par les valeurs obtenues, suggérant que la taille médiane des pores augmente en corrélation avec la taille médiane des grains. En observant une augmentation de la taille médiane des grains (D_{g50}) de 280 à 2510 μm , on constate que la taille médiane des pores (D_{p50}) augmente également, passant de 51.6 à 215.4 μm .

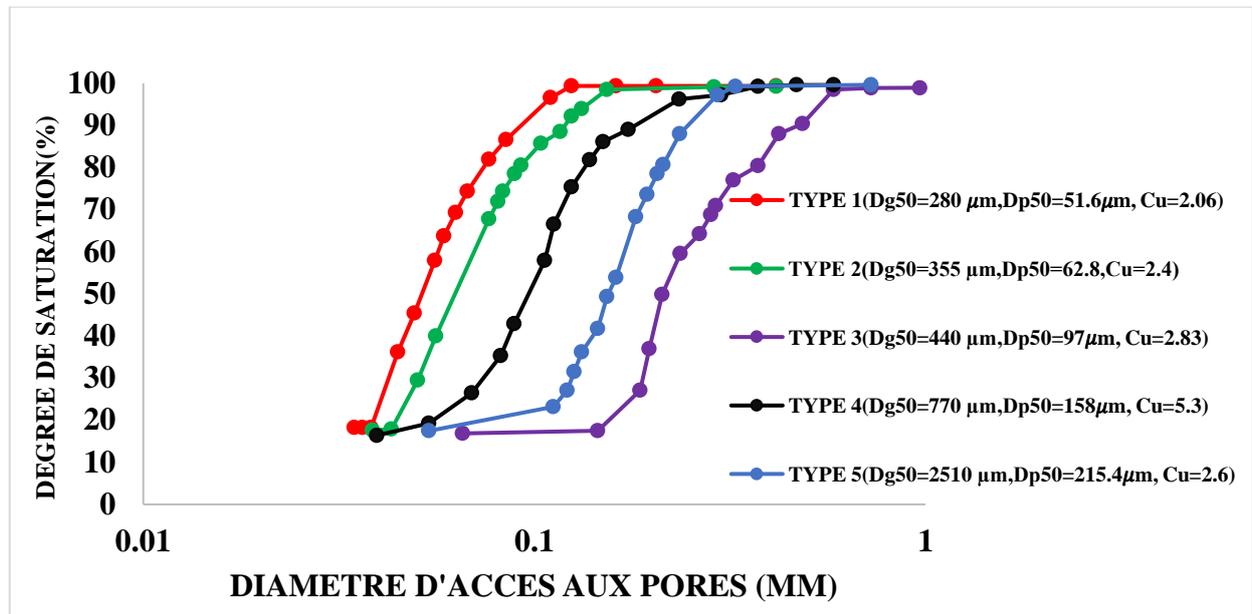


Figure 3.9. Distribution de la taille d'accès aux pores pour les cinq types de sable (différentes tailles des grains)

3.3. Corrélation entre la perméabilité, le diamètre des pores et l'indice de densité

Cette série de mesures de perméabilité vise à établir une corrélation expérimentale entre la perméabilité et la taille d'accès aux pores et l'état de densité des éprouvettes. Compte tenu du fait que l'écoulement dans un milieu poreux est principalement influencé par la taille d'accès aux pores, un paramètre qu'on a évalué à partir des courbes de rétention d'eau obtenu par l'essai tentiométrique effectué sur cinq types de sable, nous cherchons à corréler la perméabilité avec la taille d'accès aux pores du sable et l'indice de densité.

En analysant les données expérimentales présentés ci-haut nous observons que les tendances des courbes obtenues sont de forme linéaire (équation 3-3)

$$y = ax + 0.002 \quad (3-3)$$

Afin d'obtenir une relation généralisée qui relie la perméabilité avec l'indice de densité I_D et le diamètre des pores D_{p50} des grains nous avons ploté l'évolution du paramètre « a » en fonction de l'indice de densité I_D . Les résultats sont présentés sur la Figure (3.10).

$$a = - 0.677 I_D + 0.10 \quad (3-4)$$

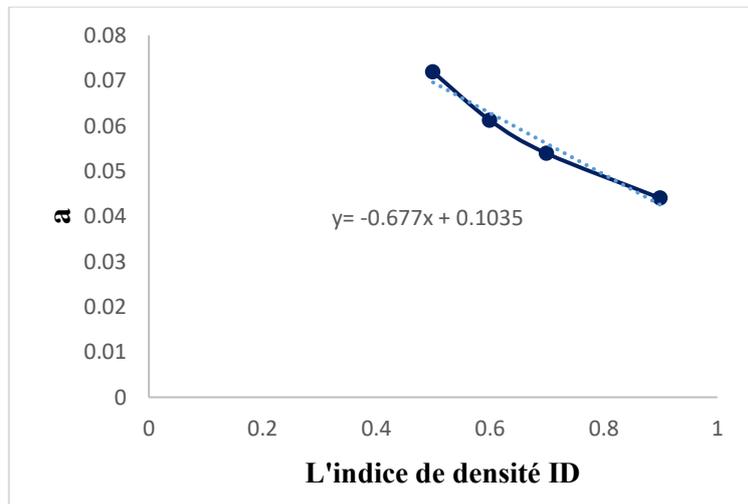


Figure 3.10. Évolution du paramètre « a » en fonction de l'indice de densité I_D

L'évolution de ce paramètre est à son tour de forme linéaire. En intégrant l'équation de tendance, obtenue par ségrégation linéaire à l'aide de l'Excel, dans l'équation (3-3) nous obtenons la relation de la perméabilité avec l'indice de densité et la taille d'accès aux pores recherchée l'équation(3-6);

$$K = aD_{p50} + 0.002 \quad (3-5)$$

$$(3-6) k = 10^{-1}(-6.77 ID + 1)Dp50 + 2 * 10^{-2}$$

Cette relation permet aux modélisateurs d'avoir une estimation de la valeur de la perméabilité k d'un matériau granulaire en connaissant son diamètre d'accès aux pores ainsi que son état de densité sans avoir besoin donc d'effectuer l'essai de mesure de perméabilité au niveau de laboratoire.

Comme évoqué au paravent, l'écoulement dans un milieu poreux est géré principalement par la taille d'accès aux pores du milieu et que ce paramètre est difficile à estimer par des essais classiques au laboratoire. Cependant, grâce à cette relation, la taille d'accès aux pores peut être évaluée en connaissant simplement la perméabilité et l'état de densité de ce matériau granulaire.

3.4. Conclusion

Des essais tensiométriques ont été effectués sur cinq types de sables, permettant de tracer les courbes de rétention d'eau et les courbes de taille d'accès aux pores. Parallèlement, des essais de mesure de perméabilité ont été réalisés avec différents indices de densité (I_D : 0,9 ; 0,7 ; 0,6 ; 0,5). Ces résultats ont permis d'atteindre notre objectif principal : établir une relation expérimentale entre la perméabilité des matériaux granulaires, la taille d'accès aux pores ($Dp50$) et l'indice de densité (ID), comme le montre l'équation (3-6). Cette relation offre aux modélisateurs une estimation relativement précise de la perméabilité d'un matériau granulaire en connaissant ces deux paramètres physiques essentiels.

**CONCLUSIONS
GENERALES ET
PERSPECTIVES**

CONCLUSIONS GENERALES

La présente étude avait pour objectif d'avoir une Corrélation expérimentale entre la perméabilité d'un matériau granulaire et la taille des pores, Des essais de mesures de perméabilité pour cinq types de sables ont été réalisés après une caractérisation expérimentale de ces cinq types. Ces sables ayant différentes granulométries et les éprouvettes ont été préparées avec différents indices de densité. Cette

compagne expérimentale a permis, à l'aide d'un solveur disponible sur Excel, de proposer une loi

Empirique reliant la perméabilité et le diamètre des pores et l'indice de densité (3-3) Modélisation de la perméabilité : Une relation généralisée a été établie permettant d'estimer la perméabilité (k) d'un matériau granulaire en fonction de son diamètre d'accès aux pores (D_{p50}) et de son indice de densité (I_D). Cette relation est donnée par l'équation

$$k = 10^{-1}(-6.77 I_D + 1)D_{p50} + 2 * 10^{-2}$$

- Cette relation permet aux modélisateurs d'avoir une estimation de la valeur de la perméabilité k d'un matériau granulaire en connaissant son diamètre moyen des pores ainsi que son état de densité
- Corrélation entre la perméabilité et le diamètre des pores : Il a été observé que la perméabilité augmente avec l'augmentation de diamètre des pores (D_{p50}). Cette tendance est valide pour toutes les valeurs de l'indice de densité étudiées.
- Relation entre la perméabilité et l'indice de densité : Une diminution significative de la perméabilité est constatée à mesure que l'indice de densité augmente. Ceci est attribué à la réduction de la taille des pores dans des sables plus denses.
- Effet de la taille des grains sur la perméabilité : Il existe une relation directe entre la taille moyenne des grains (D_{g50}) et la taille moyenne des pores (D_{p50}). Une augmentation de la taille moyenne des grains entraîne une augmentation correspondante de la taille des pores, ce qui, à son tour, influence positivement la perméabilité.
- Distribution de la taille d'accès aux pores : Les courbes de distribution de la taille des pores, obtenues par la méthode tensiométrique et l'application de la loi de Jurin, montrent que la taille des pores varie avec l'indice de densité. Les sables lâches présentent des pores plus grands comparativement aux sables denses qui ont des pores plus fins.
- 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.

- La forme des courbes de rétention d'eau obtenues par l'essai tentiométrique est similaire à celle des courbes fournies dans la littérature, pour des matériaux similaires d'où le degré de saturation diminue avec l'augmentation de la succion du sol ;
- Les résultats obtenus par l'essai tentiométrique ont révélé que la succion augmente avec l'augmentation de l'indice de densité,

Perspectives

Ces résultats permettent une meilleure compréhension des facteurs influençant la perméabilité des matériaux granulaires et offrent une base solide pour modéliser et prédire cette perméabilité en fonction des propriétés physiques essentielles du matériau.

Les résultats de cette corrélation expérimentale offrent une base solide pour le développement de modèles prédictifs plus précis de la perméabilité des matériaux granulaires. Ces modèles permettraient d'évaluer de manière rapide et efficace la taille des accès aux pores d'autres échantillons de matériaux granulaires similaires, sans nécessiter des essais tensiométriques coûteux et chronophages.

Références bibliographiques

Alshihabi, O. (2002) *Étude en laboratoire du comportement d'un sol compacté non saturé: influence des cycles de séchage-humidification*. Lille 1.

Alyamani, M.S. and Şen, Z. (1993) 'Determination of hydraulic conductivity from complete grain-size distribution curves', 31(4), pp. 551–555.

ARSENIE, I.M. (2009) *Interprétation en contraintes effectives du comportement réversible des matériaux granulaires compactés non-saturés sous sollicitations triaxiales cycliques*. Doctoral d.

Bachmann, J. and Ploeg, R.R. Van Der (2002) 'A review on recent developments in soil water retention theory : interfacial tension and temperature effects', pp. 468–478.

Bakkari, A. (2007) *Observation et modélisation d'ouvrages en terre soumis à des processus de séchage et d'humidification*. Marne-la-vallée, ENPC.

Barbour, S.L. (1998) 'Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium: The soil-water characteristic curve: a historical perspective', *Canadian Geotechnical Journal*, 35(5), pp. 873–894. Available at: <https://doi.org/10.1139/t98-040>.

Blatz, J.A., Cui, Y.J. and Oldecop (2009) 'Vapour equilibrium and osmotic technique for suction contro', *Laboratory and field testing of unsaturated soils*, 26(6), pp. 49–61. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10706-008-9194-3>.

Boadu, F K (2000) 'Hydraulic conductivity of soils from grain-size distribution: new models', *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(8), pp. 739--746. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2001\)127:10\(899\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2001)127:10(899)).

Boadu, Fred Kofi (2000) 'Hydraulic Conductivity of Soils from Grain-Size Distribution: New Models'. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.

Cabalar, A.F. and Akbulut, N. (2016) 'Evaluation of actual and estimated hydraulic conductivity of sands with different gradation and shape', *SpringerPlus*, 5(1). Available at: <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2472-2>.

Carman and C., P. (1956) 'Flow of gases through porous media'.

Carman, E.C. (1938) 'Should the States Be Permitted to Make Compacts Without the Consent of Congress', *Cornell LQ*, 23(2), p. 280.

Carter, MR, & Gregorich, E. (Eds. . (2007) *Prélèvement de sol et méthodes d'analyse*. Presse CRC.

Carter, M.R. and Gregorich, E.G. (2007) *Soil sampling and methods of analysis*. CRC press.

Cedergren, H.R. (1989) *Seepage, drainage, and flow nets*. John Wiley.

Chapuis, R.P. (2004) 'Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio', *Canadian Geotechnical Journal*, 41(5), pp. 787–795. Available at: <https://doi.org/10.1139/T04-022>.

Chapuis, R.P. et al. (2005) 'Evaluating the hydraulic conductivity at three different scales within an unconfined sand aquifer at Lachenaie, Quebec', *Canadian Geotechnical Journal*, 42(4), pp. 1212–1220. Available at: <https://doi.org/10.1139/t05-045>.

Chapuis, R.P. (2012) 'Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: A review', *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71(3), pp. 401–434. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10064-012-0418-7>.

Chapuis, R.P. and Aubertin, M. (2004) 'Reply to the discussion by D. Hansen on "On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils"', *Canadian Geotechnical Journal*, 41(5), pp. 994–996. Available at: <https://doi.org/10.1139/T04-029>.

Cheng, C. and Chen, X. (2007) 'Evaluation de méthodes de détermination des propriétés hydrauliques dans un système aquifère-aquitard hydrologiquement relié à une rivière.' *Journal d'hydrogéologie*.

Clayton, C.R.I., Abbireddy, C.O.R. and Schiebel, R. (2009) 'A method of estimating the form of coarse particulates', *Geotechnique*, 59(6), pp. 493–501. Available at: <https://doi.org/10.1680/geot.2007.00195>.

David, C. et al. (1994) 'Laboratory measurement of compaction-induced permeability change in porous rocks: Implications for the generation and maintenance of pore pressure excess in the crust', 143(1), pp. 425–456.

Delage, P. and Cui, Y.J. (2000) 'L'eau dans les sols non saturés (Water in unsaturated soils.' Available at: *Techniques*.

Do, D. (1998) 'Analyse d'adsorption : Équilibres et cinétique (avec cd contenant des programmes informatiques MATLAB)'. *Scientifique mondial*.

Dolinar, B. (2009) 'Predicting the hydraulic conductivity of saturated clays using plasticity-value

correlations', *Applied Clay Science*, 45(1–2), pp. 90–94. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.04.001>.

Farrar, D.M. and Coleman, J.D. (1967) 'The correlation of surface area with other properties of nineteen British clay soils', *Journal of Soil Science*, 18(1), pp. 118–124.

Feia, S. et al. (2014) 'Experimental evaluation of the pore-access size distribution of sands', *Geotechnical Testing Journal*, 37(4). Available at: <https://doi.org/10.1520/GTJ20130126>.

Fleureau, J.M. and Taibi, S. (1995) 'Water-air permeabilities of unsaturated soils', 2.

Fredlund, D. 1997 (1997) 'Introduction à la mécanique des sols non saturés.', *Dans la pratique de l'ingénierie des sols non saturés*, pp. 1-37 ASCE.

Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993) *Soil mechanics for unsaturated soils*. Edited by J.W. & Sons.

Fredlund, D.G., Vanapalli, S.K. and Pufahl, D.E. (1995) 'Predicting the shear strength function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve.', In *PROCEEDINGS OF THE FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS/UNSAT'95/PARIS/FRANCE/6-8 SEPTEMBER, 1*.

Fredlund, D.G. and Xing, A. (1994) 'Equations for the soil-water characteristic curve', *ICanadian geotechnical journal*, 31(4), pp. 521--532. Available at: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(95\)96992-k](https://doi.org/10.1016/0148-9062(95)96992-k).

Fredlund, M.D., Fredlund, D.G. and Wilson, G.W. (1994) 'Prediction of the SWCC from grain size distribution and volume mass properties', *3rd Brazilian Symposium on Unsaturated Soils, 1*, pp. 1–12.

Fredlund, M.D., Wilson, G.W. and Fredlund, D.G. (2002) 'Use of Grain-Size distribution for estimation of the soil water characteristic curve', *Canadian Geotechnical Journal*, pp. 1103–1117.

Gardner, W.R. (1958) 'Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table', *Soil science*, 85, pp. 228–232.

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), pp. 892–898. Available at: <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.

Gilboy, G. (1928) 'The compressibility of sand-mica mixtures', In *Proceedings of the American*

Society of Civil Engineers, 54(2), pp. 555–568.

Göktepe, A.B. and Sezer, A. (2010) 'Effect of particle shape on density and permeability of sands', *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*, 163(6), pp. 307–320. Available at: <https://doi.org/10.1680/geng.2010.163.6.307>.

Hazen, A. (1892) 'Some Physical Properties of Sands and Gravels, with Special Reference to their Use in Filtration', *Massachusetts State Board of Health*, 34, pp. 539–556.

Holtz, R.D. and Kovacs, W.D. (1981) 'An introduction to geotechnical engineering. PrenticeHall, Inc.', Englewood Cliffs, New Jersey, p. 733.

Holubec, I. and D'appolonia, E. (1973) 'Effect of particle slope on the engineering properties of granular soils', in.

Houston, S., Houston, W.N. and Wagner (1994) 'Laboratory filter paper suction measurements.', *Geotechnical Testing Journal*, 17(2), pp. 185–194.

Iii, W.D.C. and Asce, F. (2003) 'Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman', (November), pp. 1054–1056.

Ilek, A., Kucza, J. and Szostek, M. (2015) 'The effect of stand species composition on water storage capacity of the organic layers of forest soils', *European Journal of Forest Research*, 134(1), pp. 187–197. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10342-014-0842-2>.

Indraratna, B., Nguyen, V.T. and Rujikiatkamjorn, C. (2012) 'Hydraulic conductivity of saturated granular soils determined using a constriction-based technique', *Canadian Geotechnical Journal*, 49(5), pp. 607–613. Available at: <https://doi.org/10.1139/T2012-016>.

Ishaku, J.M., Gadzama, E.W. and Kaigama, U. (2011) 'Evaluation of empirical formulae for the determination of hydraulic conductivity based on grain-size analysis', 3(April), pp. 105–113.

Jamin, F. (2003) *Contribution à l'étude du transport de matière et de la rhéologie dans les sols non saturés à différentes températures*. Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc.

Kenney, T.C., Lau, D. and Ofoegbu, G.I. (1984) 'Permeability of compacted granular materials.', *Canadian Geotechnical Journal*, 21(4), pp. 726–729. Available at: <https://doi.org/10.1139/t84-080>.

Kozeny, j (1927) 'Über kapillare Leitung des Wassers im Boden-Aufstieg, Versickerung und Anwendung auf die Bewässerung, Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften Wien', *Mathematisch Naturwissenschaftliche Abteilung*, 136, pp. 271–306.

Kozeny, Josef (1927) 'Über kapillare Leitung des Wassers im Boden-Aufstieg, Versickerung und Anwendung auf die Bewässerung, Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften Wien', *Mathematisch Naturwissenschaftliche Abteilung*, pp. 271–306.

Kozeny, J. (1927) 'Über kapillare Leitung des Wassers im Boden-Aufstieg, Versickerung und Anwendung auf die Bewässerung, Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften Wien', *Mathematisch Naturwissenschaftliche Abteilung*, 136, pp. 271-306.

Krumbein, W.C. (1941a) 'Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles.', 11(2), pp. 64–72.

Krumbein, W.C. (1941b) 'OF SEDIMENTARY', 11(2), pp. 64–72.

Krumbein, W.C. and Monk, G.D. (1942) 'Permeability as a function of the size parameters of unconsolidated sand: Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers', 151.

Kuczka, J. and Ilek, A. (2016) 'The effect of the shape parameters of a sample on the hydraulic conductivity', *Journal of Hydrology*, 534, pp. 230–236. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.010>.

Mualem, Y. (1976) 's. = (9 - (2))', 12(3).

Muhunthan, B. (1991) 'Liquid limit and surface area of clays', (1), pp. 135–138.

Nemes, A. (2003) 'Multi-scale hydraulic pedotransfer functions for Hungarian soils', p. 115.

Olson, R.E. and Mesri, G. (1970) 'Mechanisms controlling compressibility of clays.', *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96(6), pp. 1863–1878.

Phadnis, H.S. and Santamarina, J.C. (2011) 'Bacteria in sediments : pore size effects', (November), pp. 91–93.

Pham, H.Q. and Fredlund, D.G. (2011) 'Volume-mass unsaturated soil constitutive model for drying-wetting under isotropic loading-unloading conditions', *Canadian Geotechnical Journal*, 48(2), pp. 280–313. Available at: <https://doi.org/10.1139/T10-061>.

Powers, M.C. (1953a) 'A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*', *Journal of Sedimentary Research*, 23(2), pp. 117–119. Available at: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.4.p2131-2148>.

Powers, M.C. (1953b) 'A New Roundness Scale for Sedimentary Particles', 23(2), pp. 117–119.

- Rawls, W.J. and Brakensiek, D.L. (1982) 'Estimating soil water retention from soil properties', *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(2), pp. 166--171.
- Ren, X. et al. (2016) 'A relation of hydraulic conductivity — void ratio for soils based on Kozeny-Carman equation', *Engineering Geology*, 213, pp. 89–97. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.08.017>.
- Ren, X.W. and Santamarina, J.C. (2018) 'The hydraulic conductivity of sediments: A pore size perspective', *Engineering Geology*, 233(2), pp. 48–54. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.11.022>.
- Roque, A.J. and Didier, G. (2006) 'Calculating hydraulic conductivity of fine-grained soils to leachates using linear expressions', *Engineering Geology*, 85(1–2), pp. 147–157. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.09.034>.
- Saix, C. (1987) *Contribution à l'étude des sols non saturés en température: application à l'exploitation thermique du sous-sol*. Montpellier 2.
- Salager (2007) *Etude de la rétention d'eau et de la consolidation des sols dans un cadre thermo-hydro-mécanique* (Doctoral dissertation, Université Montpellier 2. Available at: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00567000>).
- Salager, S. et al. (2006) 'Influence de la température sur la courbe de rétention d ' eau de milieux poreux', 334, pp. 393–398. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.crme.2006.05.003>.
- Salager, S. et al. (2013) 'Investigation into water retention behaviour of deformable soils', *Canadian Geotechnical Journal*, 50(2), pp. 200–208. Available at: <https://doi.org/10.1139/cgj-2011-0409>.
- Salarashayeri, A.F. and Siosemarde, M. (2012) 'Prediction of Soil Hydraulic Conductivity from Particle-Size Distribution', 6(1), pp. 16–20.
- Santamarina, J.C. et al. (2002) 'Specific surface: Determination and relevance', *Canadian Geotechnical Journal*, 39(1), pp. 233–241. Available at: <https://doi.org/10.1139/t01-077>.
- Santamarina, J.C. et al. (2004) 'Soil behaviour : The role of particle shape', pp. 1–14.
- Shepherd, R.G. (1989) 'Correlations of permeability and grain size', *Groundwater*, 27(5), pp. 633–638. Available at: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(90\)94977-2](https://doi.org/10.1016/0148-9062(90)94977-2).
- Szenknect, S. (2003) *Transfert de radioéléments en zone non saturée: étude expérimentale et modélisation appliquée au site pilote de Tchernobyl*. Grenoble 1.

Taylor W, D. (1948) *'Fundamentals of Soil Behavior'*. New York, 42., p. 592. Available at: <http://www.scirp.org/journal/doi.aspx?DOI=10.4236/jacen.2017.61003>.

Techniques-ingenieur (2012) *'techni'*. Available at: <https://www.techniques-ingenieur.fr/>.

Terzaghi, K. (1925) *'Principles of soil mechanics. IV. Settlement and consolidation of clay.'*, *Engineering News-Record*, 95, p. 874.

Terzaghi, K., Peck, R. and Mesri, G. (1996) *'Mécanique des sols dans la pratique de l'ingénierie'*, John Wiley et fils. [Preprint].

Terzaghi, K. and R. Peck (1948) *Soil mechanics. John Wiley, Engineering Practice. John Wiley. New York.*

Uma, K.O., Egboka, B.C.E. and Onuoha, K.M. (1989) *'New statistical grain-size method for evaluating the hydraulic conductivity of sandy aquifers'*, *Journal of Hydrology*, 108, pp. 343--366.

Vanapalli, S.K., Wright, A. and Fredlund, D.G. (2000) *'Shear strength behavior of a silty soil over the suction range from 0 to 1,000,000 kPa'*, *Proceedings of the 53th Canadian Geotechnical Conference*, p. 2.

Vuković, M. and Soro, A. (1992a) *'Hydraulics of water wells: theory and application.'*

Wadell, H. (1932) *'Volume, shape, and roundness of rock particles.'*, *The Journal of Geology*, 40(5), pp. 443--451.

Zhang, X. et al. (2005) *'Determination of soil hydraulic conductivity with the lattice Boltzmann method and soil thin-section technique'*, *Journal of Hydrology*, 306(1-4), pp. 59-70. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.039>.