

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie Civil et hydraulique
Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية والري:
المرجع.

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat en sciences
En : Génie Civil
Option : Géotechnique

**Investigation Expérimentale de l'endommagement
des grains sous fortes contraintes : évolution de la
microstructure**

Présentée par :
Linda BOUACIDA

Soutenue publiquement le : 31/01/2024

Devant le jury composé de :

Pr. Abdelhak MABROUKI	Professeur	Président	Université de Biskra
Dr. Sadok FEIA	MCA	Rapporteur	Université de Biskra
Pr. Khelifa ABBECHE	Professeur	Examineur	Université de Batna
Dr. Hamza LOUALBIA	MCA	Examineur	Université de Djelfa

À la mémoire de mon cher père

À la mémoire de ma chère mère

À mon mari

À mes adorables enfants

À mes frères

À mes sœurs

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ma thèse de doctorat. Leur soutien inconditionnel, leurs conseils précieux et leur encouragement constant ont été d'une importance capitale tout au long de ce parcours de recherche.

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers mon directeur de thèse, Sadok, Feia, pour sa confiance, son expertise et sa guidance tout au long de cette aventure scientifique. Ses conseils éclairés, sa disponibilité et sa capacité à stimuler ma réflexion ont été essentiels pour le développement de mes compétences de recherche et la réalisation de cette thèse.

Je souhaite tout d'abord remercier le professeur Mabrouki Abdelhak, qui m'a fait l'honneur de présider mon jury.

Je souhaite également exprimer ma gratitude envers les membres de mon comité de thèse, le professeur Khelifa Abbeche et le docteur Loualbia Hamza, qui ont accepté d'être rapporteurs de ma thèse.

Je remercie le professeur Nourdine Della pour avoir pris part au jury en tant que membre invité, mais surtout pour avoir cru dans mon travail dès le début et avoir contribué à son développement avec ses compétences scientifiques et sa qualité humaine.

Un grand merci à mon mari Mesmoudi Abdelaziz qui m'a apporté un soutien considérable.

Je tiens également à remercier mes adorables enfants Abdelmouaiz, Meyes et Niyar, pour l'amour et leurs encouragements tout au long de ces années.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers les deux talentueuses doctorantes, Afaf Zeroual et Amina Masmoudi, pour leur précieuse assistance. Je suis vraiment reconnaissant(e) de leur dévouement, de leurs connaissances. Merci infiniment, Afaf et Amina, pour votre collaboration exceptionnelle.

Enfin, j'adresse toute ma gratitude à ma chère famille, à mes deux frères Salah Eddine et Fares, ainsi qu'à mes sœurs, tout particulièrement Souad et Karima, pour leurs encouragements, leur soutien constant et leur appui à distance.

En conclusion, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers tous ceux qui ont contribué à la réalisation de cette thèse de doctorat. Leur appui et leurs encouragements ont été inestimables et ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail de recherche.

Merci du fond du cœur.

Sincèrement,

Linda

Résumé

Cette recherche se concentre sur la compréhension fondamentale de la perméabilité et de sa relation avec divers paramètres physiques, 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 dix types de sables, aboutissant au développement d'une corrélation expérimentale novatrice entre la perméabilité d'un matériau granulaire, son diamètre moyen, 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.

Le travail explore également deux aspects majeurs. Tout d'abord, il présente le développement d'un modèle analytique basé sur le modèle de van Genuchten, visant à prédire la courbe de rétention d'eau des matériaux granulaires, avec une étude approfondie des paramètres influents. Notamment, le modèle se base sur un critère unique dans la sélection des sols : la propriété physique de la courbe de distribution des particules, permettant la détermination des valeurs de D_{g50} et de C_u . Ce modèle propose une description précise de la courbe de rétention d'eau et permet d'estimer la distribution de la taille d'accès aux pores sans recourir à des essais expérimentaux. L'utilisation du modèle proposé a permis de prédire les courbes de rétention d'eau du sol granulaire pour n'importe quelle valeur de 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 concorde avec les données expérimentales, mettant en lumière les propriétés distinctives des sols non saturés. Par la suite, l'étude se penche sur l'évolution de la microstructure des matériaux granulaires sous différentes conditions physiques et mécaniques. Les courbes de rétention d'eau sont converties en courbes de distribution de taille d'accès aux pores, permettant d'analyser de manière approfondie les changements de microstructure sous contraintes élevées.

En résumé, ce travail apporte une contribution significative en fournissant des corrélations pratiques pour évaluer la perméabilité des matériaux granulaires et en développant un modèle analytique robuste pour prédire la courbe de rétention d'eau. En outre, il explore de manière approfondie l'évolution de la microstructure sous différentes conditions, offrant ainsi des perspectives cruciales pour la compréhension des matériaux granulaires soumis à des contraintes élevées.

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

Abstract

This research focuses on the fundamental understanding of permeability and its relationship with various physical parameters due to its importance in different contexts, such as the field of petroleum engineering, the design of drainage systems, and the construction of earth dams. A comprehensive study was conducted on ten types of sands, leading to the development of an innovative experimental correlation between the permeability of a granular material, its average diameter, and its density index. This correlation provides an efficient method for evaluating sand permeability based on its physical characteristics, thus avoiding the need for lengthy experimental procedures.

The research also explores two major aspects. Firstly, it introduces the development of an analytical model based on the van Genuchten model to predict the water retention curve of granular materials, accompanied by an in-depth study of influential parameters. Notably, the model relies on a singular criterion in soil selection: the physical property of the particle size distribution curve, allowing the determination of D_{g50} and C_u values. This model offers a precise description of the water retention curve and enables the estimation of the pore size distribution without the necessity for experimental tests. The use of the proposed model allowed predicting the water retention curves of granular soil for any value of the density index. The results confirm that the uniformity of particle size distribution curves corresponds to a satisfactory uniformity of the pore size distribution. Additionally, the observation of an increase in suction with an increase in density index aligns with experimental data, highlighting distinctive properties of unsaturated soils.

Subsequently, the study delves into the evolution of the microstructure of granular materials under various physical and mechanical conditions. Water retention curves are transformed into pore size distribution curves, allowing for an in-depth analysis of microstructural changes under high constraints.

In summary, this work provides a significant contribution by offering practical correlations for evaluating the permeability of granular materials and developing a robust analytical model to predict the water retention curve. Furthermore, it thoroughly explores the evolution of microstructure under different conditions, providing crucial insights into the understanding of granular materials subjected to high constraints.

Keywords: *Permeability - porous medium - sand - pore size distribution - water retention curve - average grain size - average pore size - damage.*

ملخص

يركز هذا البحث على الفهم الأساسي للنفاذية وعلاقتها بمختلف العوامل الفيزيائية، وذلك لأهميتها في سياقات مختلفة مثل مجال هندسة البترول، وتصميم أنظمة الصرف الصحي، وكذلك بناء السدود في الأرض. تم إجراء دراسة معمقة على عشرة أنواع من الرمال، مما أدى إلى تطوير علاقة تجريبية مبتكرة بين نفاذية المادة الحبيبية، ومتوسط قطرها، ومؤشر كثافتها. توفر هذه العلاقة طريقة فعالة لتقييم نفاذية الرمال بناءً على خصائصها الفيزيائية، وبالتالي تجنب الحاجة إلى إجراءات تجريبية طويلة.

يستكشف العمل أيضًا جانبين رئيسيين: أولاً، يعرض تطوير نموذج تحليلي يعتمد على نموذج فان جينوتشتن، بهدف التنبؤ بمنحنى احتفاظ الماء للمواد الحبيبية، مع دراسة معمقة للعوامل المؤثرة. وعلى وجه الخصوص، يعتمد النموذج على معيار واحد وهو الخاصية الفيزيائية لمنحنى توزيع الجسيمات، مما يسمح بتحديد قيم D_{g50} و C_u .

يوفر هذا النموذج وصفاً دقيقاً لمنحنى احتفاظ الماء ويجعل من الممكن تقدير توزيع حجم الوصول إلى المسام دون اللجوء إلى إجراء تجارب في المختبر. استخدام النموذج المقترح سمح بتوقع منحنيات احتفاظ الماء في التربة الحبيبية لأي قيمة لمؤشر الكثافة. النتائج أن انتظام منحنيات توزيع الجسيمات يتوافق مع انتظام مرضي لتوزيع المسام. علاوة على ذلك، فإن ملاحظة زيادة امتصاص التربة مع زيادة مؤشر الكثافة تتوافق مع المعطيات التجريبية، مما يسلط الضوء على الخصائص المميزة للتربة غير المشبعة. وبعد ذلك، تركز الدراسة على تطور البنية المجهرية للمواد الحبيبية في ظل ظروف فيزيائية وميكانيكية مختلفة. يتم تحويل منحنيات احتفاظ الماء إلى منحنيات توزيع حجم الوصول إلى المسام، مما يسمح بتحليل التغيرات الهيكلية الدقيقة تحت الضغط العالي بدقة. باختصار، يقدم هذا العمل مساهمة كبيرة من خلال توفير علاقات عملية لتقييم نفاذية المواد الحبيبية وتطوير نموذج تحليلي قوي للتنبؤ بمنحنى احتفاظ الماء. علاوة على ذلك، فهو يستكشف بشكل شامل تطور البنية المجهرية في ظل ظروف مختلفة، مما يوفر رؤى مهمة لفهم المواد الحبيبية تحت ضغط عالٍ.

كلمات مفتاحية: نفاذية - وسط مسامي - رمل - توزيع حجم المسام - منحني احتفاظ الماء - حجم الحبيبة المتوسط - حجم المسام المتوسط - التالف.

SOMMAIRE

Résumé	i
Abstract	ii
Liste des Figures	vii
Liste des tableaux	xi
Liste des symboles	xii
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	6
1.1 Introduction	6
1.2 Relations théoriques et empiriques reliant la perméabilité des sols à des différentes propriétés	8
1.3. Effet de la microstructure sur la perméabilité des milieux poreux	18
1.4. Compilation de données - le rôle de la taille des pores	20
1.4.1. Pertinence des valeurs macroscopiques e et S_s	21
1.4.2. Variation de la perméabilité (k) en fonction de la taille des pores	22
1.5. Succion dans les sols	23
1.5.1. Définition de la succion	23
1.5.2. Capillarité	23
1.5.3. Ménisque capillaire	25
1.5.4. Différents types de la succion	25
1.6. Techniques de contrôle et de mesure de la succion	27
1.6.1. Contrôle par « translation d'axes »	27
1.6.2. Contrôle par plaque tensiométrique	28
1.6.3. Mesure tensiométrique de la succion	29
1.7. Courbe de succion ou de rétention d'eau	30
1.7.1. Définitions et allure générale	31
1.7.2. Points caractéristiques de la courbe de rétention	32
1.7.3. Différentes phases de la courbe de succion	33
1.7.4. Hystérésis de la courbe de succion	34
1.8. Modèles de courbe de rétention	35
1.8.1. Modèles de courbes à fondement mathématique	36
1.8.2. Modèles de courbes à fondement physique	39

1.9. Evolution de la micro-structure d'un sable sous fortes contraintes suite à l'endommagement des grains	42
1.9.1. Evolution de la microstructure suite à la fracturation des grains.....	45
1.9.2. Effet de l'état de contrainte sur la perméabilité	48
1.9.3. Evolution de la micro-structure d'un sable sous fortes contraintes.....	51
1.10. Conclusion	57
CHAPITRE 2 : MATERIAUX ETUDIES ET TECHNIQUE EXPERIMENTALES ...	59
2.1. Introduction	59
2.2. Description des matériaux étudiés.....	59
2.3. Méthodes de caractérisation des matériaux étudiés.....	59
2.3.1. Analyses granulométriques	60
2.3.2. Détermination de l'indice des vides minimum et maximum (Selon la norme ASTM D4253-16 et ASTM D4254-16).....	61
2.4. Dispositif de mesure de perméabilité :	64
2.5. Dispositif et procédure de mesure de la distribution de la taille d'accès aux pores : ...	65
2.5.1. Méthode tensiométrique.....	65
2.5.2. Programme expérimental	66
2.6. Endommagement des grains et son influence sur la courbe de rétention d'eau d'un sable soumis à des fortes contraintes	68
2.6.1. Programme expérimental et procédures d'essais.....	69
2.6.2. Dispositifs expérimentaux.....	71
2.7. Conclusion.....	72
CHAPITRE 3 : PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS.....	73
3.1. Introduction	73
3.2. Corrélation expérimentale entre la perméabilité d'un matériau granulaire et ses caractéristiques physiques	73
3.2.1. Introduction.....	73
3.2.2. Résultats expérimentaux et discussion.....	75
3.2.3. Corrélation entre la perméabilité, le diamètre moyen et l'indice de densité.....	76
3.3. Présentation du modèle proposé sur les matériaux granulaires.....	78
3.3.1. Introduction.....	78
3.3.2. Présentation de modèle proposé.....	79
3.3.3. Calage du modèle proposé sur les données expérimentales	84
3.3.4. Evolution des paramètres de modèle	85
3.3.5. Validation du modèle	86

3.3.6. Application du modèle sur des matériaux granulaires	87
3.3.7. Evaluation des courbes de la distribution de la taille d'accès aux pores	90
3.3.8. Comparaison des résultats obtenus par le modèle proposé avec une loi existante dans la littérature	93
3.4. Application du modèle proposé sur un matériau granulaire soumis à des fortes contraintes et analyse des résultats	94
3.4.1. Influence de la contrainte sur la courbe de rétention d'eau	96
3.4.2. Courbes de la distribution de la taille d'accès aux pores	97
3.4.3. Effet de la taille des grains	97
3.5. Conclusion	98
CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES	100
Conclusions	100
Perspectives	102
Références bibliographiques	104

Liste des Figures

Chapitre 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure 1.1 Représentation graphique de la rondeur, R redessiné (Muszynski and Vitton, 2012).....	12
Figure 1.2 Représentation graphique de la sphéricité, S redessiné de (Muszynski and Vitton, 2012).....	13
Figure 1.3 Tableau comparatif (Santamarina <i>et al.</i> , 2004).....	13
Figure 1. 4 Composantes de la dispersion. (Fried, 1975).....	18
Figure 1. 5 Evolution de la perméabilité en fonction de la porosité des cinq types de matériaux. (David <i>et al.</i> , 1994)	19
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).....	20
Figure 1. 7 Conductivité hydraulique mesurée k par rapport à la taille moyenne estimée des pores dp (Ren and Santamarina, 2018) (Ren and Santamarina, 2018) ... Error! Bookmark not defined.	
Figure 1. 8 Actions de forces sur une molécule d'eau (Techniques-ingenieur, 2012).....	23
Figure 1. 9 Modèle physique du phénomène d'effet capillaire (Szenknect, 2003).....	24
Figure 1. 10 Ménisque capillaire, a : Sol granulaire ; b : Sol fin (Delage and Cui, 2000).....	25
Figure 1. 11 Cellule de Richards pour le contrôle de succion par translation d'axe (Delage and Cui, 2000).....	28
Figure 1. 12 Plaque tensiométrique pour faibles succions (Delage and Cui, 2000).....	29
Figure 1. 13 Principe de la mesure de la succion par tensiométrie (Techniques-ingenieur, 2012).....	29
Figure 1. 14 Courbe typique de rétention d'eau dans le sol (Toll <i>et al.</i> , 2016).....	31
Figure 1. 15 Courbes de rétention pour différents types de sols a et description générale de cette courbe b (Salager, 2011).....	32
Figure 1. 16 Les paramètres caractérisant la courbe de succion (Fredlund, 1997)	33
Figure 1. 17 Différentes phases de la courbe de succion (Vanapalli, Wright and Fredlund, 2000).....	34
Figure 1. 18 Mécanismes invoqués pour l'hystérésis des courbes de rétention d'eau (Masekanya, 2008).	35

Figure 1. 19 Représentation schématique des modèles mathématiques utilisés pour décrire la courbe de rétention d'eau (Bruand and Cousin, 1998).	39
Figure 1. 20 Ecrasement des grains sous la pointe du pieux d'après Miura (1985).....	43
Figure 1. 21 Influence de la densité relative sur les dimensions de la zone perturbée. Sid-Ahmed (1989)	44
Figure 1.23 Phénomène de l'endommagement des grains au niveau des bases des barrages en terre.....	44
Figure 1. 22 Phénomène d'endommagement des ainsi dans les réservoirs pétroliers	44
Figure 1. 24 Modes de fracture d'un grain (Guyon and Troadec, 1994)	46
Figure 1. 25 Taux d'écrasement de (Hardin and Asce, 1985).....	47
Figure 1. 26 Définition du taux d'écrasement (Itai Einav, 2007a).....	48
Figure 1. 27 Evolution de la perméabilité lors de diminution de la contrainte effective moyenne de sable d'Ottawa (Gorban 1981 cité par Scott 1994).....	49
Figure 1. 28 Evolution de la perméabilité lors de différents types de déchargement (Scott et al. 1994).....	49
Figure 1. 29 Augmentation de la perméabilité lors d'un déchargement isotrope de sable bitumineux de Cold Lake (Scot et al. 1994).....	50
Figure 1. 30 Evolution de la perméabilité en fonction de la contrainte effective pour trois différents mécanismes de compaction (David et al. 1994)	50
Figure 1. 31 Granulométries initiales des sables étudiés (DADDA et al. 2015).....	52
Figure 1. 32 L'évolution de la courbe granulométrique en fonction de contrainte.....	54
Figure 1. 33 Evolution de coefficient d'uniformité a) Sable d'Hostun, b) Sable carbonaté (Dadda <i>et al.</i> , 2015).....	54
Figure 1. 34 Les étapes de l'écrasement et durcissement du système granulaire (Russell et al. 2013).....	54
Figure 1. 35 Distribution de la taille des pores, a) cumulé, b) partielle (Dadda <i>et al.</i> , 2015) ..	55
Figure 1. 36 Evolution de la distribution des tailles des pores de sable carbonaté en fonction de contrainte appliquée (Dadda <i>et al.</i> , 2015).....	56
Figure 1. 37 L'influence de saturation sur l'écrasement des grains(Dadda <i>et al.</i> , 2015).....	57

Chapitre 2 : MATERIAUX ETUDIÉS ET TECHNIQUE EXPERIMENTALES

Figure 2. 1 Vue des dix types de sable étudiés.....	59
---	----

Figure 2. 2 Analyse granulométrique. a) Tamiseuse. b) Série des tamis utilisés.....	60
Figure 2. 3 Courbes granulométriques des sables étudiés.....	61
Figure 2. 4 Préparation de l'essai pour la détermination de l'indice des vides minimum.....	62
Figure 2. 5 Préparation de l'essai pour la détermination de l'indice des vides maximum.....	63
Figure 2. 6 Présentation de tube de mariotte (source internet).....	64
Figure 2. 7 Présentation des différentes étapes de la mesure de perméabilité.	65
Figure 2. 8 Schéma explicatif des processus de séchage et mouillage dans le réseau poreux constitué de cylindres de rayon r , (r_m est le rayon du ménisque de l'interface air-eau) (d'après (Do, 1998) a). Processus de mouillage. b) Processus de séchage.....	66
Figure 2. 9 Schéma explicatif de principe de la méthode tensiométrique de mesure de la succion (Feia <i>et al.</i> , 2014).....	67
Figure 2. 10 L'évolution de la courbe granulométrique en fonction de contrainte de sable étudié.	69
Figure 2. 11 Préparation d'un échantillon de sable, a) versement d'une petite quantité pour former une couche, b) compactage et vibration, c) vérification de la densité.....	70
Figure 2. 12 Essai principal de l'odomètre(Terzaghi, 1925).....	71
Figure 2. 13 Bâti œdométrique à haute pression.....	72

Chapitre 3 : PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS

Figure 3. 1 Perméabilité des sables en fonction de l'indice de densité.....	75
Figure 3. 2 Perméabilité des sables en fonction de diamètre moyen D_{g50}	76
Figure 3. 3 Évolution du paramètre « a » et le paramètre « b » en fonction de l'indice de densité I_D	77
Figure 3. 4 Courbe typique de rétention d'eau dans le sol (Toll <i>et al.</i> , 2016).....	81
Figure 3. 5 Résultats expérimentaux utilisés dans cette étude (Feia <i>et al.</i> , 2014).....	82
Figure 3. 6 Variation de degré de saturation résiduelle en fonction de l'indice de densité.	83
Figure 3. 7 Résultats de calage du modèle proposé sur les données expérimentales.....	84
Figure 3. 8 Evolution du paramètre α en fonction de l'indice de densité I_D	85
Figure 3. 9 Evolution du paramètre n en fonction de l'indice de densité I_D	86
Figure 3. 10 Validation du modèle par simulation d'un test, avec un indice de densité $I_D=0,9$ et coefficient d'uniformité $C_u=1,6$	87
Figure 3. 11 Les quatre types de sable étudiés.....	87
Figure 3. 12 Courbes granulométriques des matériaux étudiés.....	88
Figure 3. 13 Courbes de rétention d'eau pour les quatre types de sable étudiés.....	89

Figure 3. 14 Courbes de rétention d'eau pour le type de sable numéro 3 pour différentes valeurs de l'indice de densité	89
Figure 3. 15 Distribution de la taille d'accès aux pores pour les quatre types de sable	90
Figure 3. 16 L'effet de l'indice de densité sur la distribution de la taille d'accès aux pores. ...	91
Figure 3. 17 Effet de l'étalement de la courbe granulométrique sur la distribution de la taille d'accès aux pores.	92
Figure 3. 18 Distribution de la taille d'accès aux pores pour les quatre types de sable (différentes tailles des grains).....	93
Figure 3. 19 Comparaison entre les résultats obtenus par le modèle proposé et ceux calculés par la loi de (DellaandFeia,2017)	94
Figure 3. 20 Courbes granulométriques des matériaux étudiés	96
Figure 3. 21 Courbes de rétention d'eau pour un sable soumis à des fortes contraintes.....	96
Figure 3. 22 Distribution de la taille d'accès aux pores pour un sable soumis à des fortes contraintes.	97
Figure 3. 23 Distribution de la taille d'accès aux pores pour un sable soumis à des fortes contraintes (différentes tailles des grains)	98

Liste des tableaux

Chapitre 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau 1.1 résume les équations empiriques et leurs limites d'application pour le coefficient de perméabilité :	14
Tableau 1. 2 Caractéristiques des sables étudiés (Dadda <i>et al.</i> , 2015).....	52
Tableau 1. 3 Caractéristiques des essais réalisés (Dadda <i>et al.</i> , 2015).....	53

Chapitre 2 : MATERIAUX ETUDIÉS ET TECHNIQUE EXPERIMENTALES

Tableau 2. 1 Caractéristiques des matériaux étudiés.....	63
Tableau 2. 1 Les propriétés du sable examiné exposé à différentes contraintes.....	70

Chapitre 3 : PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS

Tableau 3. 1 Caractéristiques des sables utilisés par (Feia <i>et al.</i> , 2014).	82
Tableau 3. 2 Valeurs des paramètres du modèle proposé pour les trois types de sable	85
Tableau 3. 3 Caractéristiques des matériaux à analyser.....	88
Tableau 3. 4 Les caractéristiques de sable étudié.....	95

Liste des symboles

Grandeurs	Dimensions	Définitions
a et b et n	-	Paramètres du modèle
C_{kc}	-	Constante de Kozeny-Carman
C_c	-	Coefficient de courbure
C_u	-	Coefficient d'uniformité
C_f	-	Constante liée à la topologie des pores.
D_{10}	[L]	Ouvertures de tamis laissant passer 10% en poids des tamisats cumulés
D_{15}	[L]	Ouvertures de tamis laissant passer 15% en poids des tamisats cumulés
D_{30}	[L]	Ouvertures de tamis laissant passer 30% en poids des tamisats cumulés
D_{60}	[L]	Ouvertures de tamis laissant passer 60% en poids des tamisats cumulés
D_{g50}	[L]	Diamètre moyen de grains
D_p	[L]	Diamètre de la taille d'accès aux pores
D_{p50}	[L]	Diamètre moyen d'accès aux pores
e	-	Indice des vides
e_{\min}	-	Taux de vide pour l'état le plus dense possible
e_{\max}	-	Taux de vide pour l'état le plus lâche possible
g	[L.T ⁻²]	Accélération de la pesanteur
H	[L]	Charge hydraulique
h	[M.L ⁻¹ .T ⁻²]	Potentiel de pression
ha	[M.L ⁻¹ .T ⁻²]	Potentiel de pression au point d'entrée d'air en cm.
I_D	-	Indice de densité

$K(h)$ ou $K(\theta)$	$[L \cdot T^{-1}]$	Conductivité hydraulique ou perméabilité
k_0	$[L \cdot T^{-1}]$	Perméabilité initiale
P_{eff}	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$	Contrainte effective MPa
P_0	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$	Contrainte effective initiale MPa
r	$[L]$	Rayon de tube capillaire
S_e	-	Degré de saturation effective
S_{er}	-	Degré de saturation résiduelle.
s	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$	Succion du sol,
s^*	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$	Succion normalisée,
S_m	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$	Succion capillaire
S, S_s	$[L^{-1}]$	Surface spécifique
T_s	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$	Tension superficielle
t_{void}	$[m]$	Epaisseur de la couche des vides
u_a	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$	Pressions d'air
u_w	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$	Pressions d'eau
V_f	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}]$	viscosité cinématique du fluide
w_{sat}	$[L^3 \cdot L^{-3}]$	Teneur en eau de saturation
ϕ	-	Porosité du milieu
π	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$	Succion osmotique
σ_s	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$	Tension de surface eau-air
θ	$[L^3 \cdot L^{-3}]$	Teneur en eau volumique
θ_s	$[L^3 \cdot L^{-3}]$	Teneur en eau volumique à saturation
θ_r	$[L^3 \cdot L^{-3}]$	Teneur en eau volumique résiduelle
ρ_w	$[M \cdot L^{-3}]$	Masse volumique de l'eau
ρ_s	$[M \cdot L^{-3}]$	Masse volumique des grains solides
ρ_d	$[M \cdot L^{-3}]$	Masse volumique sèche
α^*	-	α normalisée paramètre du modèle

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La perméabilité, qui est la mesure de la capacité d'un matériau à permettre le passage de fluides, joue un rôle crucial dans divers domaines. Par exemple, dans la conception du drainage d'une zone, la construction de barrages en terre, la connaissance de la conductivité hydraulique est essentielle. De plus, dans le domaine du génie pétrolier, il est nécessaire de connaître la perméabilité du sable pour comprendre le phénomène de colmatage qui peut survenir lors de l'injection d'eau de production et que dans beaucoup de cas affecte l'injectivité des puits.

L'interrelation entre la conductivité hydraulique et la distribution granulométrique des milieux poreux granulaires est connue depuis longtemps (Freezeget Cherry, j1979). Cette relation est extrêmement précieuse pour l'estimation de la conductivité hydraulique lorsque les données de perméabilité directe sont limitées et les tests de laboratoire, posent des problèmes.

Des nombreux chercheurs ont trouvé des équations empiriques qui relient la perméabilité des sols à des propriétés telles que la taille des grains, la surface spécifique (Iii and Asce, 2003; 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; Kucza and Ilek, 2016; Ren *et al.*, 2016) l'indice des vides et la porosité (Josef Kozeny, 1927; Review and Carman, 1938). L'applicabilité de ces formules dépend du type de sol pour lequel la conductivité hydraulique doit être estimée.

Pour une évaluation plus précise de la perméabilité, il peut être préférable de se baser sur la taille des pores plutôt que sur la porosité ou l'indice des vides seul. En effet, il est clair que l'espace intergranulaire est le paramètre qui gouverne l'écoulement dans un milieu poreux. La distribution de la taille des pores joue donc un rôle déterminant dans l'écoulement de l'eau à travers un milieu poreux. En mécanique des sols non saturés, la taille des pores est généralement évaluée à partir des courbes de rétention d'eau, plus précisément la courbe de séchage, en utilisant la loi de Jurin. Cependant, il était difficile d'évaluer cette courbe de séchage ou en général les courbe des rétentions d'eau, en particulier pour les matériaux granulaires, dans les laboratoires de mécanique des sols classiques.

En géomécanique, il est fortement recommandé de contrôler ou d'imposer la succion afin d'évaluer le comportement hydromécanique des sols. Au cours des dernières années, plusieurs études ont été menées dans le but de souligner l'importance de la succion matricielle dans les

sols non saturés notamment pour les sols cohérents (Jamagne *et al.*, 1977; Gupta and Larson, 1979; Rawls and Brakensiek, 1982, 1985; Jong, CA and Nicholaichuk, 1983; Saxton *et al.*, 1986; Vereecken *et al.*, 1989; Bastet *et al.*, 1997; Lilly *et al.*, 1997; Bigorre F, 2000; Dexter and Bird, 2001) (Bruand and Cousin, 1998; Wösten, Pachepsky and Rawls, 2001; Nèmes, 2002; Nemes, 2003; Pachepsky and W.J, 2003; Tomasella *et al.*, 2003; Pachepsky and Rawls, 2004)

Il est important de mentionner que la littérature propose plusieurs types de modèles et d'approches connexes visant à améliorer la prédiction de la courbe de rétention d'eau lors du processus de séchage. De plus, au fil des années, différents modèles ont été développés pour représenter la relation entre les caractéristiques fondamentales du sol et la succion du sol (van Genuchten, 1980; Fredlund and Rahardjo, 1993; Garbulewski and Zakowicz, 1995; Georgiadis, Potts and Zdravkovic, 2005; Rojas, 2008). Néanmoins, la plupart de ces modèles sont développés pour les sols cohérents et les roches. Très peu de modèles sont développés pour les matériaux granulaires.

En outre, toujours dans le même objectif, l'évaluation de la perméabilité des matériaux granulaires soumis à des fortes pressions revêt une grande importance dans plusieurs domaines. Tout d'abord, dans le domaine de la conception des fondations, des barrages et des tunnels, il est essentiel d'évaluer la perméabilité des sols pour assurer la stabilité des structures et prévenir les problèmes d'infiltration d'eau. De plus, dans le domaine géotechnique, cette évaluation permet de mieux comprendre le comportement hydraulique des sols et d'évaluer les risques de mouvement des eaux souterraines. Elle contribue ainsi à la planification de projets de drainage, à la gestion des eaux souterraines et à la prévention des glissements de terrain. Enfin, dans l'industrie pétrolière et gazière, l'évaluation de la perméabilité est essentielle pour estimer les débits de production et concevoir des stratégies d'exploitation optimales.

Ces matériaux subissant au phénomène d'écrasement des grains à cause de la forte pression qui leur est appliquée ont une perméabilité qui se dégrade en fonction de la pression appliquée et du taux d'endommagement des grains produit. La présence de ces particules fines ainsi que la compaction du matériau modifient donc les propriétés mécaniques, la perméabilité et la succion du sol. Plusieurs facteurs influencent

Ce phénomène, tels que la granulométrie, l'état des contraintes appliquées, la minéralogie et la forme des grains, ainsi que la teneur en eau, parmi d'autres.

Le comportement mécanique des sables sous fortes contraintes ont été étudiés par nombreux auteurs (Gardner, 1958; Vesic and Barksdale, 1963; Insley and Hillis, 1965; Bishop, 1966;

Vesić and Clough, 1968; Marachi, 1969; Hardin and Asce, 1985; Coop and Atkinson, 1993; Einav, 2007). Toutes ces études se sont basées sur l'évolution de la courbe granulométrique et de la surface spécifique lors de chargement.

Le travail présenté dans cette thèse s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche axé sur l'étude de trois volets essentiels, étroitement liés, visant à approfondir notre compréhension de la relation entre la perméabilité d'un matériau granulaire, ses caractéristiques physiques et la taille d'accès aux pores. La première étape consistait à établir une corrélation expérimentale pour analyser l'influence des caractéristiques physiques sur la perméabilité du matériau granulaire. Ensuite, un modèle analytique basé sur le modèle (van Genuchten, 1980), a été développé pour prédire les courbes de rétention d'eau des matériaux granulaires en se basant sur les courbes granulométriques en utilisant uniquement le coefficient d'uniformité C_u l'état de densité I_D de matériau. Grâce à des lois existantes dans la littérature, ces courbes de rétention d'eau peuvent être converties en courbes de distribution de taille d'accès aux pores, ce qui est une donnée essentielle pour étudier l'évolution de la microstructure des matériaux granulaires dans différentes conditions physiques et mécaniques. Par la suite, le modèle a été appliqué à un matériau granulaire soumis à des contraintes élevées, Cela permettra d'évaluer la capacité du modèle à prédire le comportement hydrique du matériau dans des conditions réelles et les résultats ont été analysés pour mieux comprendre l'influence des contraintes sur la rétention d'eau du matériau granulaire et l'impact de la taille d'accès aux pores sur le comportement global du matériau. L'importance accordée à la taille d'accès aux pores dans ces trois volets de recherche met en évidence son rôle crucial dans la perméabilité et les propriétés hydrauliques des matériaux granulaires.

Dans ce contexte une étude expérimentale a été faite sur la perméabilité. Nous avons utilisé dix types de sable pour évaluer la perméabilité en faisant varier le diamètre moyen des grains (D_{g50}) et l'indice de densité (I_D). Grâce à cette étude, nous avons pu établir une relation entre la perméabilité, le diamètre moyen des grains et l'indice de densité. Cette relation permet d'éviter des mesures expérimentales de perméabilité relativement longues. Ainsi, la perméabilité d'un sable peut être estimée en connaissant simplement son diamètre moyen des grains et son état de densité. De plus, nous avons proposé un modèle pour prédire les courbes de rétention d'eau et estimer la distribution de la taille d'accès aux pores pour quatre types de sols sableux différents, sans nécessiter d'expériences. Ce modèle repose sur l'utilisation de deux paramètres : le coefficient d'uniformité (C_u) et l'indice de densité (I_D).

Ensuite une étude paramétrique du modèle empirique proposé a été réalisée pour déterminer les propriétés hydrauliques à utiliser dans la modélisation. La première étape de cette étude a impliqué l'estimation des valeurs des paramètres du modèle et l'ajustement des courbes de rétention. Ensuite, une analyse approfondie de ces paramètres a été effectuée pour évaluer la sensibilité de la courbe de rétention aux variations de ces paramètres d'ajustement.

Cette thèse comporte trois chapitres ainsi qu'un article publié en annexe.

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur la détermination et l'importance de la conductivité hydraulique et on met l'accent à la fois sur les différentes formules expérimentales utilisées pour la détermination de perméabilité et leur domaine d'application. Nous présentons aussi l'effet de la microstructure sur la perméabilité des milieux poreux, Variation de la perméabilité (k) en fonction de la taille des pores ainsi que les différents types de la succion des sols et les techniques de contrôle et de mesure de la succion et les propriétés de rétention d'eau.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons tout d'abord une description des matériaux étudiés, puis les essais utilisés pour la caractérisation de ces matériaux. Ensuite, nous décrivons les dispositifs expérimentaux utilisés ainsi que les procédures d'essais réalisés.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats expérimentaux. On présente tout d'abord l'évolution de la perméabilité en fonction de l'indice de densité I_D et l'évolution de la perméabilité en fonction du diamètre moyen des grains D_{g50} et ensuite la Corrélation entre la perméabilité, le diamètre moyen et l'indice de densité. Pour avoir les paramètres du modèle on a fait un Calage du modèle à l'aide des courbes de rétention d'eau. L'application du modèle a été faite sur les matériaux granulaires après la validation de ce dernier. On présente ensuite une étude paramétrique sur les effets de l'indice de densité sur les courbes de rétention d'eau, les courbes de la distribution de la taille d'accès aux pores sont présentées en utilisant le modèle proposé, et enfin nous présentons une comparaison entre les résultats du modèle proposé et ceux obtenus par la relation de [\(Della and Feia, 2017\)](#).

Dans la finalité de cette étude, on s'intéresse à l'application du modèle proposé sur un type de sable soumis à des fortes contraintes et aux modifications qu'elles peuvent induire sur la courbe de rétention d'eau et son effet sur la taille d'accès aux pores et la taille moyenne des grains.

Ce rapport de thèse se termine par des conclusions et quelques perspectives sur une corrélation expérimentale entre la perméabilité des matériaux granulaires et la taille d'accès aux pores. Cette approche approfondirait notre compréhension de la relation entre la structure poreuse d'un matériau granulaire et sa perméabilité. De plus, elle aurait des implications significatives dans divers domaines tels que l'ingénierie des sols, la filtration des fluides et la conception de matériaux poreux et sur le développement d'un modèle prédictif de la perméabilité basé sur la taille d'accès aux pores.

CHAPITRE 1
ETUDE
BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction

La littérature regorge de nombreux travaux sur la perméabilité et ses liens avec les propriétés physiques des sols. Ces études couvrent différents domaines, tels que la compréhension de l'écoulement multiphasique à l'échelle des pores. Par exemple, dans le contexte des renforcements des sols par la technique d'injection de ciment, ainsi que dans le domaine du génie pétrolier. Dans ce dernier, la connaissance de la perméabilité du sable est indispensable pour appréhender le phénomène de colmatage lors de l'injection d'eau de production.

Des nombreux chercheurs ont trouvé des équations empiriques qui relient la perméabilité des sols à des propriétés telles que la taille des grains, la surface spécifique (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) (Kucza and Ilek, 2016) (Iii and Asce, 2003), l'indice des vides et la porosité (Josef Kozeny, 1927) ;(Review and Carman, 1938) . La perméabilité peut être plus correctement exprimée par la taille d'accès aux pores étant donné que l'écoulement d'eau dans un milieu poreux est géré par la distribution de la taille d'accès aux pores plutôt que la porosité ou bien 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, plus précisément la courbe de séchage en utilisant la loi de Jurin. Néanmoins, il y a quelques temps la taille des pores était difficilement évalué au laboratoire classique de mécanique des sols notamment pour les matériaux granulaires.

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

Dans le domaine de la mécanique des sols, la succion est utilisée de plus en plus pour l'étude des sols non saturés. La connaissance de la succion dans un sol non saturé a de multiples intérêts. En effet, la succion conditionne les mouvements et l'équilibre de l'eau dans la zone non saturée. En outre, elle influence fortement le comportement mécanique des sols. L'évaluation de la courbe de rétention d'eau joue un rôle important dans la définition de comportement d'un sol non saturé. La courbe de rétention d'eau peut être utilisée pour estimer des fonctions des propriétés non saturées d'un sol telles que la conductivité, la rétention de l'eau, et les fonctions de résistance au cisaillement.

Le phénomène d'écrasement des grains se produit lorsque les grains subissent une réduction de taille et un étalement de la granulométrie, ce qui entraîne un arrangement plus dense des grains. Cela peut entraîner la formation de particules fines en quantité significative. La présence de ces particules fines ainsi que la compaction du matériau modifient les propriétés mécaniques, la perméabilité et la succion du sol. Plusieurs facteurs influencent ce phénomène, tels que la granulométrie, l'état des contraintes appliquées, la minéralogie et la forme des grains, ainsi que la teneur en eau, parmi d'autres.

Le phénomène d'endommagement génère plusieurs changements sur les caractéristiques physiques, mécaniques et hydriques de ces sols. Pour éviter ces problèmes, il est important de comprendre les comportements des sols granulaires soumis à des fortes contraintes. En outre Les sols granulaires peuvent être soumis à des contraintes élevées dans diverses situations, telles que l'injection d'eau de production à forte pression dans les réservoirs pétroliers, la fondation de grands barrages et les pointes des pieux de grande hauteur. Lorsque ces contraintes sont appliquées, les forces de contact inter granulaires peuvent dépasser la résistance à l'écrasement des particules, entraînant ainsi la rupture d'une partie d'entre elles.

Le comportement mécanique des sables sous fortes contraintes ont été étudiés par nombreux auteurs (Gardner, 1958; Vesic and Barksdale, 1963; Insley and Hillis, 1965; Bishop, 1966; Vesic and Clough, 1968; Marachi, 1969; Hardin and Asce, 1985; Coop and Atkinson, 1993; I Einav, 2007) Toutes ces études se sont basées sur l'évolution de la courbe granulométrique et de la surface spécifique lors de chargement.

L'écoulement des fluides dans un milieu poreux est influencé par plusieurs paramètres tels que : propriétés du milieu poreux (porosité, perméabilité, taille et forme des grains, taille et forme des pores) et la succion ainsi que l'état de contrainte qui lui est appliqué.

Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique des principaux travaux publiés sur les équations théorique et empiriques de perméabilité ainsi que sur les courbes de rétention d'eau et les différents modèles existants et on s'intéresse à l'évolution des propriétés de la courbe de la succion et de la microstructure d'un matériau granulaire soumis à des fortes contraintes.

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 (Taylorn 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 (Taylorn 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).

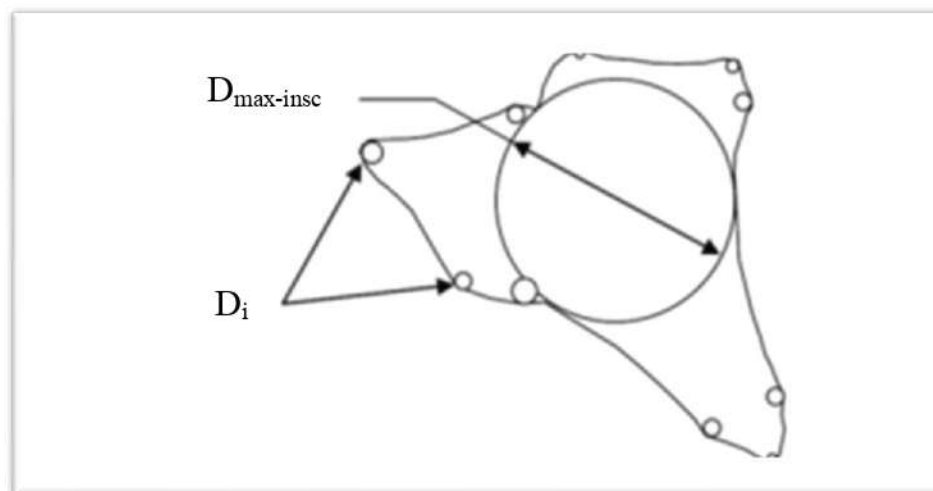


Figure 1.1. Représentation graphique de la rondeur, R redessiné (Muszynski and Vitton, 2012)

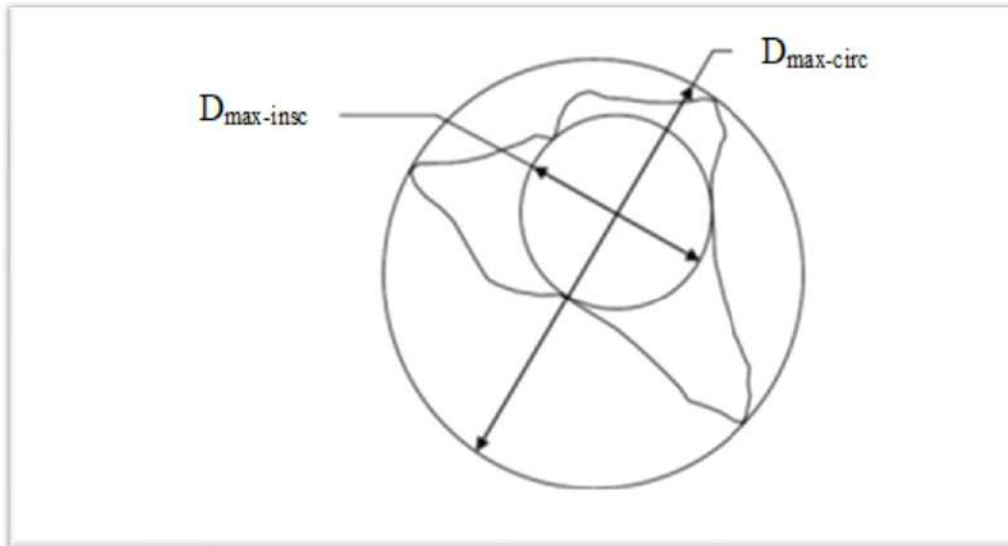


Figure 1. 2 Représentation graphique de la sphéricité, S redessiné de (Muzynski)

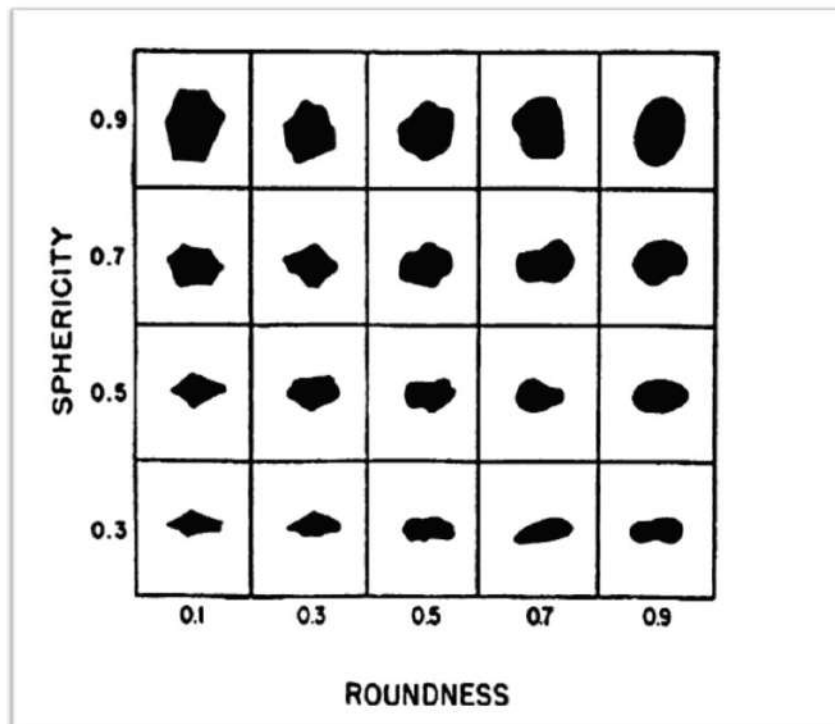


Figure 1.3 Tableau comparatif (Santamaria et al.,2004)

Tableau 1.1 résume les équations empiriques et leurs limites d'application pour le coefficient de perméabilité :

Methodes	Equations	Définition des variables	β	Utilisations
(Alyamani and Şen, 1993)	$K \left[\frac{m}{d} \right] = \beta [I_0 + 0.025(d_{50} - d_{10})]^2$	I_0 est l'interception en mm de la ligne formée par d_{50} [mm] et d_{10} [mm] avec l'axe granulométrique	1300	Échantillon bien distribué
Barr (2000)	$K \left[\frac{m}{s} \right] = \beta \frac{\rho g}{\mu} n m^2$ $m = \frac{n}{S}$ $S = C_s S_0 (1 - n)$ $S_0 = \sum_i S_{0i}$ $S_{0i} = \frac{3}{r_i} \cdot w f_i$	m est le rayon hydraulique S est la surface C_s est un paramètre d'ajustement de surface S_{0i} est la surface par unité de masse de solide Matériel r_i est le rayon de la sphère représentant le grain (taille du tamis), en mètres $w f_i$ est la fraction de poids retenue dans le tamis i	1/5	$1 < C_s < 1.35$
Beyer (1964)	$K \left[\frac{m}{s} \right] = \beta \frac{g}{v} \log \frac{500}{C} d_{10}^2$ $C = \frac{d_{60}}{d_{10}}$	C est le coefficient d'uniformité	6×10^{-4}	$0.06\text{mm} < d_{10} < 0.6\text{mm}$ $1 < C < 20$
(Chapuis <i>et al.</i> , 2005)	$K \left[\frac{cm}{s} \right] = \beta \left(\frac{d_{10}^2}{1+e} e^3 \right)^{0.7825}$ $e = \frac{n}{1-n}$	e est l'indice de vide d_{10} est le diamètre efficace des grains en mm	2.4622	$0.03\text{mm} < d_{10} < 3\text{mm}$ $0.3 < e < 0.7$
(Fair, G. M. and L. P Hudson, 1933)	$K \left[\frac{m}{s} \right] = \beta \frac{\rho g}{\mu} \frac{n^3}{(1-n)^2} \frac{1}{m \left(\frac{6}{100} \sum_i \frac{p_i}{d_{mi}} \right)}$ $p_i = 100 \cdot w f_i$ $d_{mi} = \sqrt{d s_i \cdot d s_{i+1}}$	m est un facteur d'emballage θ est un facteur de forme de sable P_i est le pourcentage de sable retenu entre tamis adjacents d_{mi} est la moyenne géométrique	1	$m = 5$ $6 < \theta < 7.7$, sphérique à angulaire respectivement

Sauerbrei (Vuković and Soro, 1992a)	$K \left[\frac{m}{s} \right] = \beta \frac{g}{v} \frac{n^3}{(1-n)^2} d_{17}^2$		3.75×10^{-3}	Sable et Argile Sableuse $d_{17} < 0.5\text{mm}$
Slichter (1899)	$K \left[\frac{m}{s} \right] = \beta \frac{g}{v} n^{3.287} d_{10}^2$		0.01	$0.01\text{mm} < d_{10} < 5\text{mm}$
(Terzaghi, 1925)	$K \left[\frac{m}{s} \right] = \beta \frac{g}{v} \left(\frac{n-0.13}{\sqrt[3]{1-n}} \right)^2 d_{10}^2$		$10,7 \times 10^{-3}$ pour les lisses grains 6.1×10^{-3} pour les céréales secondaires	Sables à gros grains
U.S.Bureau de reclamation from (Vuković and Soro, 1992b)	$K \left[\frac{m}{s} \right] = \beta \frac{g}{v} d_{20}^{2.3}$	d_{20} est en mm	4.8×10^{-4}	Sables à grain moyen
Zamarin (from Lu et al.2012)	$K \left[\frac{m}{s} \right] = \beta_z \frac{g}{v} \frac{n^3}{(1-n)^2} d_e^2$ $\frac{1}{d_e} = \frac{3 \Delta_{g1}}{2 d_1} + \sum_{i=2}^{i=n} \Delta g_i \left(\frac{\ln \frac{d_i^g}{d_i^d}}{d_i^g - d_i^d} \right)$	d_e est le plus grand diamètre du plus fin fraction Δg_1 est le poids du matériau du fraction la plus fine en parties du poids total d_i^g et d_i^d grain maximum et minimum diamètres de la fraction, respectivement Δg_i est la fraction de poids en parties du poids total	8.2×10^{-3}	$C < 5$ Sables à gros grains

		d_{si} est la taille du tamis i		
Harleman et al. (1963)	$K \left[\frac{m}{s} \right] = \beta \frac{\rho g}{\mu} d_{10}^2$		6.54×10^{-4}	
(Hazen, 1892)	$K \left[\frac{m}{s} \right] = \beta \frac{g}{v} [1 + 10(n - 0.26)] d_{10}^2$		6×10^{-4}	$0.1 \text{mm} < d_{10} < 3 \text{mm}$ $C < 5$
Hazen-new(Hazen, 1892) (modifiée)	$K \left[\frac{m}{s} \right] = \beta C d_{10}^2$	C est le coefficient de Hazen en $1 / [\text{cm} \cdot \text{s}]$ d_{10} est en cm	1	$100 < C < 150$
Kozeny (1953)	$K \left[\frac{m}{s} \right] = \beta \frac{g}{v} \frac{n^3}{(1-n)^2} d_{10}^2$		8.3×10^{-4}	Sables à gros grains
(Carman and C., 1956), 1956; Kozeny 1927, 1953)	$K \left[\frac{m}{s} \right] = \beta \frac{\rho g}{\mu} \frac{n^3}{(1-n)^2} d_{10}^2$		1/180	Sables, sables et sables graveleux $d_{10} < 3 \text{mm}$
Kruger from (Vuković and Soro, 1992a)	$K \left[\frac{m}{s} \right] = \beta \frac{g}{v} \frac{n^3}{(1-n)^2} d_e^2$ $\frac{1}{d_e} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta g_i}{d_i}$	g_i est le pourcentage en poids retenu sur des tamis individuels d_i est le diamètre moyen des grains en mm d_e fraction correspondante	4.35×10^{-5}	$C > 5$ Sables à grain moyen
(Navfac, 1974; Chesnaux <i>et al.</i> , 2011)	$K \left[\frac{m}{s} \right] = \beta 10^{1.291e - .6435} d_{10}^{10^{0.5504 - .2937e}}$ $e = \frac{n}{1-n}$	e est l'indice des vides d_{10} est en mm	1	$0.1 \text{mm} < d_{10} < 2 \text{mm}$ $0.3 < e < 0.7$ $2 < C < 12$ d_{10} $d_5 > 1.4$
Pavchich (Pravedny1966)	$K \left[\frac{m}{s} \right] = \beta \frac{g}{v} d_{17}^2$		0.35	$0.06 \text{mm} < d_{17} < 1.5 \text{mm}$

<p>Zunker (1932; from Lu et al.2012)</p>	$K \left[\frac{m}{s} \right] = \beta_z \frac{g}{v} \left(\frac{n}{1-n} \right) d_e^2$ $\frac{1}{d_e}$ $= \frac{3 \Delta_{g1}}{2 d_1}$ $+ \sum_{i=2}^{i=n} \Delta_{g_i} \left(\frac{d_i^g - d_i^d}{d_i^g d_i^d \ln \frac{d_i^g}{d_i^d}} \right)$	<p>d_e est le plus grand diamètre du plus fin fraction</p> <p>Δ_{g_1} est le poids du matériau du fraction la plus fine en parties du poids total</p> <p>d_i^g et d_i^d grain maximum et minimum diamètres de la fraction, respectivement</p> <p>Δ_{g_i} est la fraction de poids en parties du poids total</p>	<p>$2,4 \times 10^{-3}$ pour le sable uniforme à grains lisses et arrondis</p> <p>$1,4 \times 10^{-3}$ pour l'uniforme composition à grain grossier</p> <p>$1,2 \times 10^{-3}$ pour non uniforme composition</p> <p>$0,7 \times 10^{-3}$ pour non uniforme compositions, argileuses, avec grains ou forme irrégulière</p>	<p>Sables fins et moyens</p>
--	--	--	--	------------------------------

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

La perméabilité d'un milieu est grandement influencée par sa porosité, ce qui a conduit à la formulation de plusieurs lois dans la littérature qui établissent une relation entre la perméabilité et la porosité. Parmi ces lois, le modèle le plus largement utilisé est le modèle de Kozeny-Carman (j Kozeny, 1927), Kozeny a développé une expression de la perméabilité en fonction de la porosité, en tenant compte de la tortuosité comme paramètre d'ajustement. La tortuosité prend en compte le fait que les chemins d'écoulement réels sont plus longs que la distance directe à travers le milieu, ce qui entraîne une variation de vitesse de l'écoulement. Ce phénomène de mélange est illustré dans la Figure (1.4) (Fried, 1975) Ainsi, plusieurs facteurs peuvent être déduits de cette relation :

- Distribution des vitesses au sein d'un pore (a) : Les particules situées à proximité des parois des pores présentent une mobilité réduite par rapport à celles situées au centre des pores.
- Distribution des tailles de pores (b) : La différence de vitesse entre les particules peut être attribuée à la variation de la dimension des pores.
- Tortuosité du milieu (c) : En raison de la complexité du milieu, les particules solides voisines peuvent suivre des trajectoires distinctes, empruntant ainsi des voies différentes, en raison de la tortuosité du milieu.

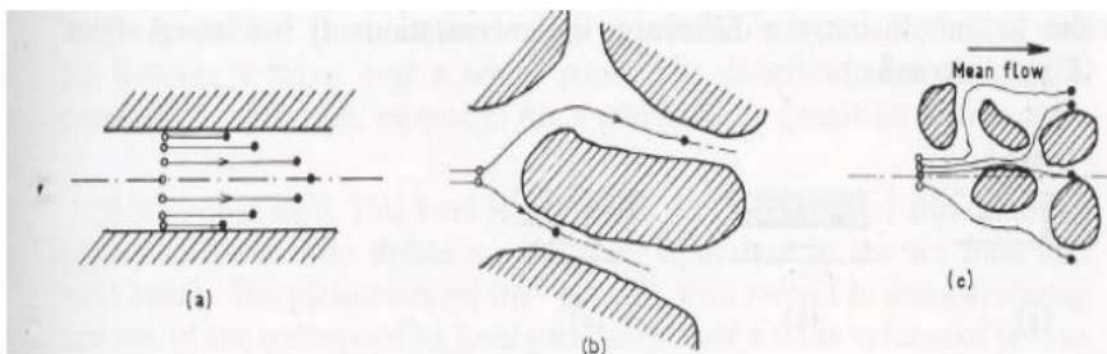


Figure 1. 4 Composantes de la dispersion. (Fried, 1975)

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.

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

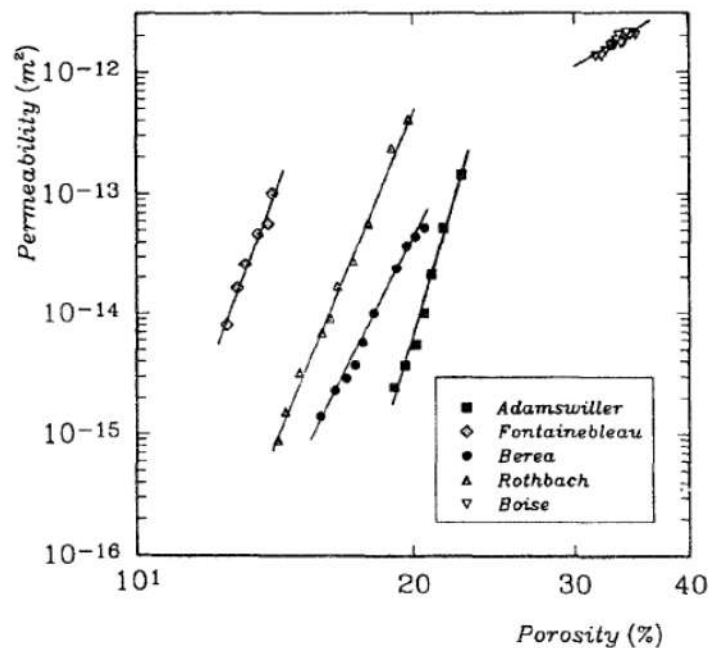


Figure 1. 5 Evolution de la perméabilité en fonction de la porosité des cinq types de matériaux (David et al., 1994)

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).

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

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.

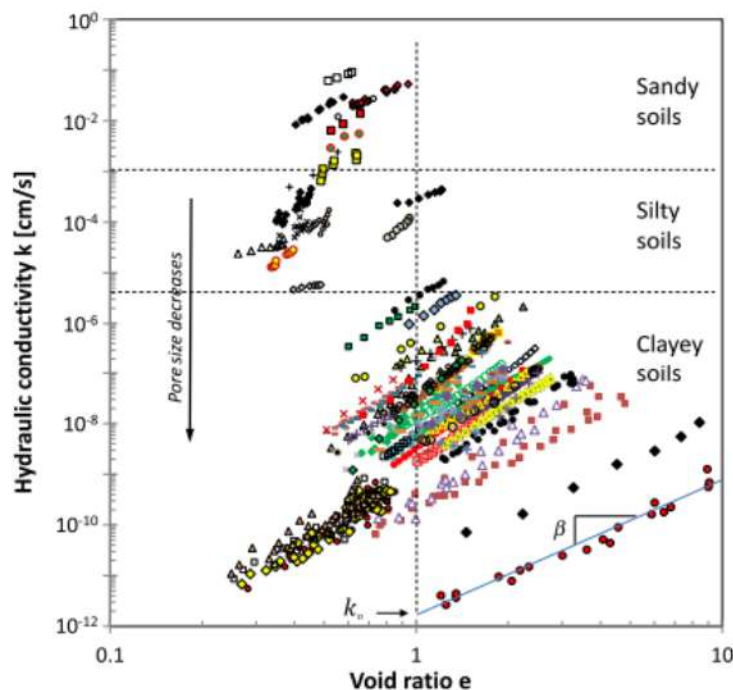


Figure 1. 6 Conductivité hydraulique en fonction de l'indice de vide. Les données recueillies pour naturel et remodelé sédiments, des sables grossiers aux argiles à grains fins (Ren and Santamarina, 2018)

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.

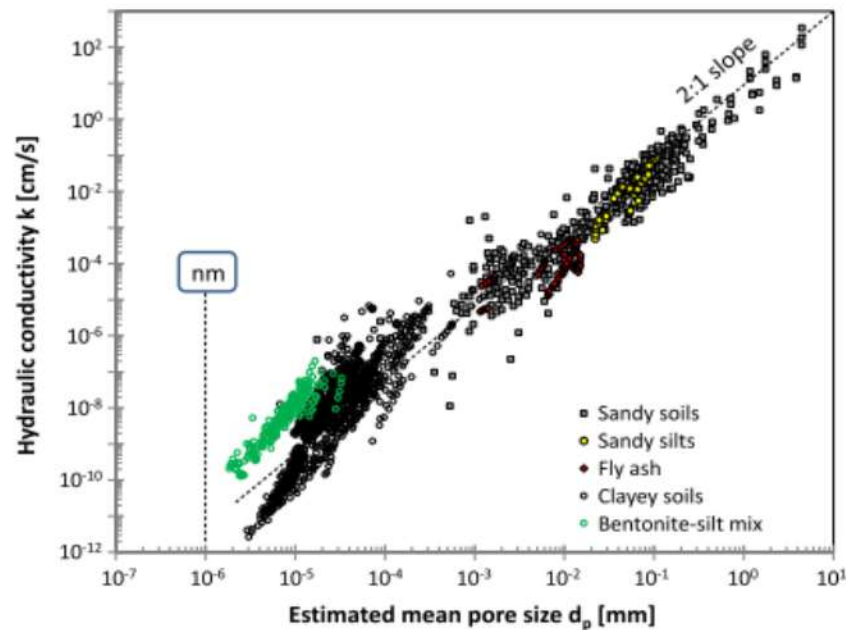


Figure 1.7 Conductivité hydraulique mesurée k par rapport à la taille moyenne estimée des pores d_p (Ren and Santamarina, 2018)

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

Nous appliquons l'équation (1-17) $d_p = 2e / Ss\rho_m$ 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 .

1.5. 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 1-8 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 1-8 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 (1.8) pour le cas d'une interface plane.

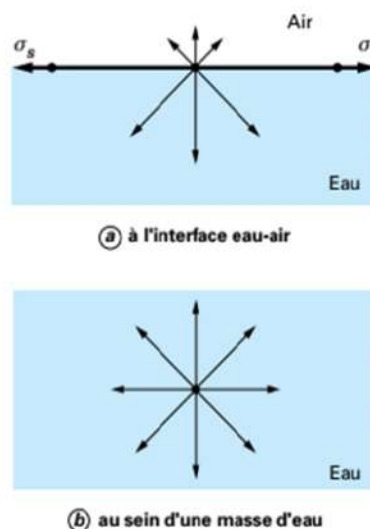


Figure 1. 8 Actions de forces sur une molécule d'eau (Techniques-ingenieur,2012)

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 1.9). Plus le diamètre du tube est petit, plus la hauteur h est importante. (Szenknect, 2003).

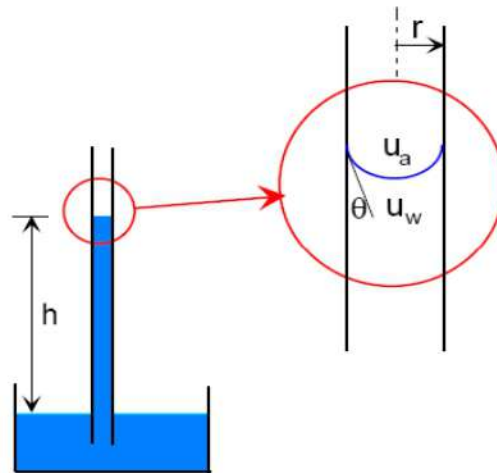


Figure 1. 9 Modèle physique du phénomène d'effet capillaire (Szenknect,2003)

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 1.9.

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 1.9).

1.5.3. Ménisque capillaire



Figure 1.10 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 1.10.

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

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 $0,29 \mu\text{m}$. 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).

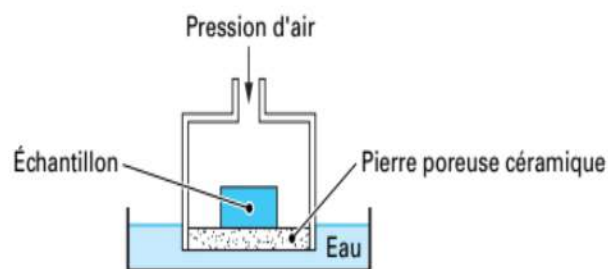


Figure 1. 11 Cellule de Richards pour le contrôle de succion par translation d'axe
(Delage and Cui, 2000)

1.6.2. Contrôle par plaque tensiométrique

Une méthode couramment utilisée pour imposer une succion est la technique de la plaque tensiométrique (Figure 1.12). 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.

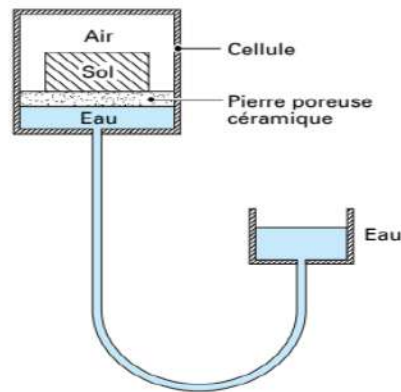


Figure 1. 12 Plaque tensiométrique pour faibles succions (Delage and Cui,2000)

1.6.3. Mesure tensiométrique de la succion

Le dispositif de tensiométrie est conçu pour mesurer la pression négative de l'eau dans le sol in situ. Il se compose d'un réservoir d'eau désaérée de petite taille (Figure 1.13), avec une extrémité recouverte d'une couche de céramique poreuse qui est imperméable à l'air mais perméable à l'eau, permettant ainsi d'empêcher le passage de l'air. Il est relié à un manomètre par l'intermédiaire d'un tube rempli d'eau désaérée. Pour évaluer la pression négative du sol, le tensiomètre est inséré dans un trou préalablement foré dans le sol ou l'échantillon. Lorsque l'eau du réservoir atteint un équilibre avec l'eau du sol, la pression négative mesurée par le manomètre correspond directement à la pression négative de l'eau dans le sol. Cependant, cette méthode présente une limite de succion maximale d'environ 90 kPa en raison du phénomène de cavitation. En pratique, le tensiomètre doit être placé dans une éprouvette ou dans le sol préalablement foré. Donc, il est nécessaire d'assurer à tout moment un bon contact entre le sol et le réservoir d'eau, au travers de la céramique poreuse, afin d'assurer une continuité de la phase d'eau entre le réservoir et le sol, et cela malgré le retrait éventuel du sol.

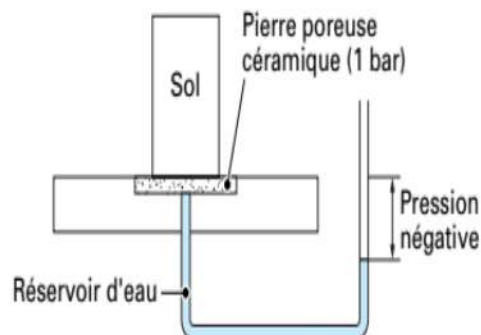


Figure 1. 13 Principe de la mesure de la succion par tensiométrie (Techniques-ingenieur. 2012)

(Feia *et al.*, 2014) et (Della and Feia, 2017) ont étudié en profondeur les caractéristiques de rétention d'eau d'un sable. Ils ont employé une pierre céramique d'une capacité de 50 kPa, ce qui s'est avéré amplement adéquat pour examiner en détail les caractéristiques de rétention d'eau d'un sable. La détermination des courbes de rétention d'eau, notamment la courbe de séchage, repose sur la mesure de la succion par la méthode tensiométrique, telle que décrite par (Delage and Cui, 2000). Le chapitre 02 de la thèse fournit une description détaillée du protocole expérimental utilisé.

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 1.14). 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%.

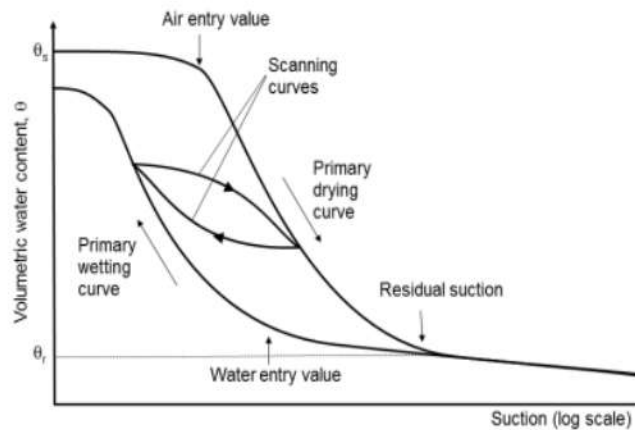


Figure 1. 14 Courbe typique de rétention d'eau dans le sol (Toll *et al.*, 2016)

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) .

1.7.1. Définitions et allure générale

La Figure (1.15-a) illustre les formes typiques des courbes de rétention d'eau pour différents types de sol. La teneur en eau de saturation (w_{sat}) est inversement proportionnelle à la compacité

du sol. Ainsi, les argiles, qui sont souvent présentes sous une forme moins compacte, ont une teneur en eau de saturation plus élevée que les sols plus granulaires tels que les limons et les sables. La succion d'entrée d'air (s_a) (Figure 1.15-b) correspond à la succion à laquelle le sol commence à se désaturer. Elle peut être liée par la loi de Jurin à un rayon moyen des pores, qui correspond aux rayons des pores les plus larges dans le milieu. Par conséquent, les sols de granularité plus fine tels que les argiles, qui ont une porosité plus fine, présentent des succions d'entrée d'air plus élevées que les sols plus grossiers tels que les limons et les sables.

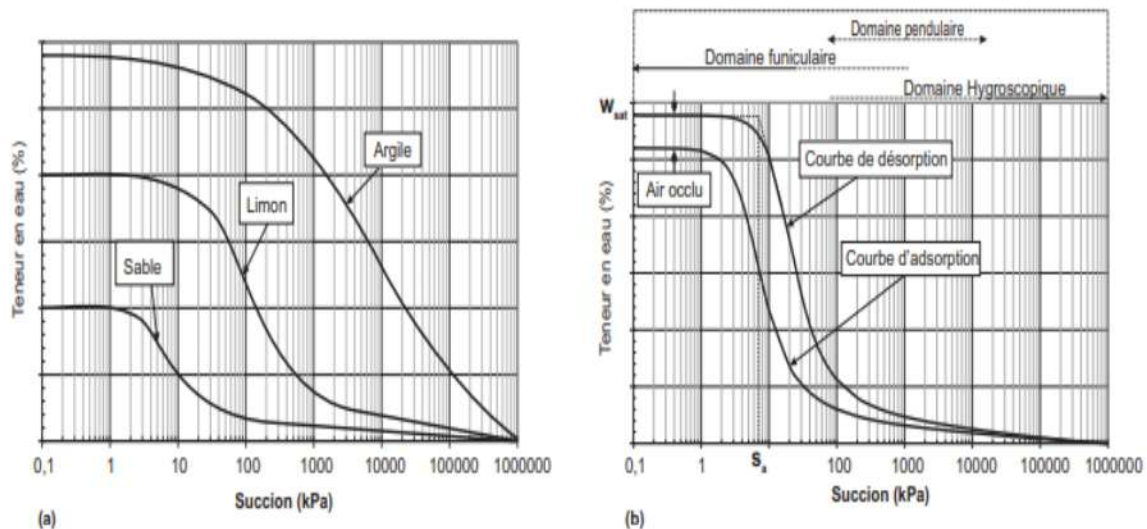


Figure 1. 15 Courbes de rétention d'eau pour différents types de sols (a)

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

1.7.2. Points caractéristiques de la courbe de rétention

Les caractéristiques initiales de la courbe de rétention d'eau d'un sol peuvent être identifiées à travers des paramètres tels que le point d'entrée d'air, la teneur en eau à saturation (θ_s) et la teneur en eau résiduelle (θ_r) (Figure 1.16). Le point d'entrée d'air correspond à la succion ψ_b à partir de laquelle le sol cesse d'être saturé et les pores les plus larges commencent à se vider (Fredlund and Xing, 1994; Fredlund, Fredlund and Wilson, 1994; Weynants, 2005). La teneur en eau résiduelle représente le point où la phase liquide cesse d'être connectée et l'eau cesse de circuler, restant piégée dans les pores non connectés. Quelle que soit la valeur du gradient hydrique, il est impossible de faire circuler l'eau, ce qui entraîne une conductivité hydraulique nulle.

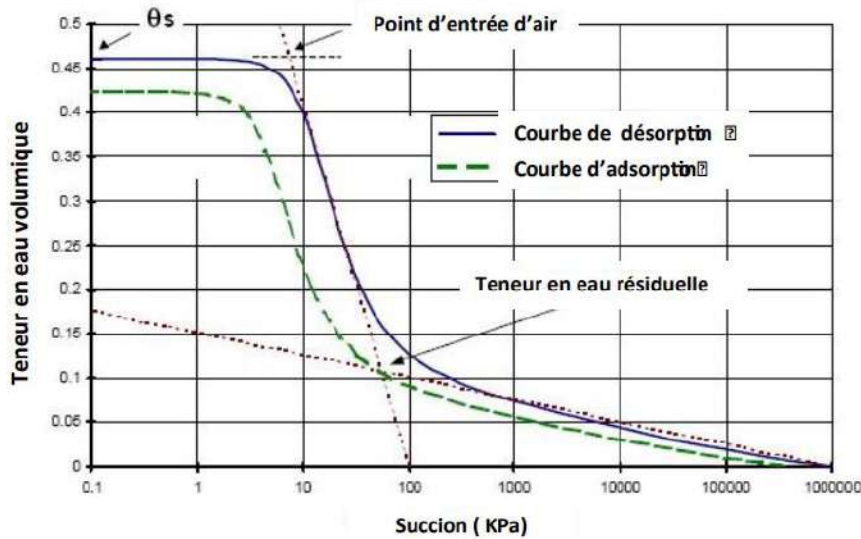


Figure 1.16 Les paramètres caractérisant la courbe de succion (Fredlund, 1997)

1.7.3. Différentes phases de la courbe de succion

La Figure (1.17) illustre les divers stades de la courbe de retenue d'humidité.

▪ Première phase

C'est la phase d'effet limite, qui se situe près de la teneur en eau à saturation et où la courbe est pratiquement horizontale. Cette partie de la courbe est connue sous le nom de "frange capillaire" et reflète le fait qu'il est généralement nécessaire d'appliquer une dépression non nulle pour drainer un milieu poreux. Cela est dû au fait que les pores ne dépassent pas une certaine taille maximale et que les rayons de courbure des interfaces eau-air sont nécessairement inférieurs à une valeur seuil R_0 .

▪ Deuxième phase

C'est la phase de transition où la courbe de succion présente une pente relativement forte.

▪ Troisième phase

C'est la phase d'effet résiduel où la courbe se réduit à une ligne droite avec une pente faible, voire infinie, à mesure que l'on s'approche de la teneur en eau résiduelle. Lorsque le sol se dessèche progressivement, les interfaces eau-air acquièrent un rayon de courbure de plus en plus petit, ce qui entraîne une augmentation de la succion.

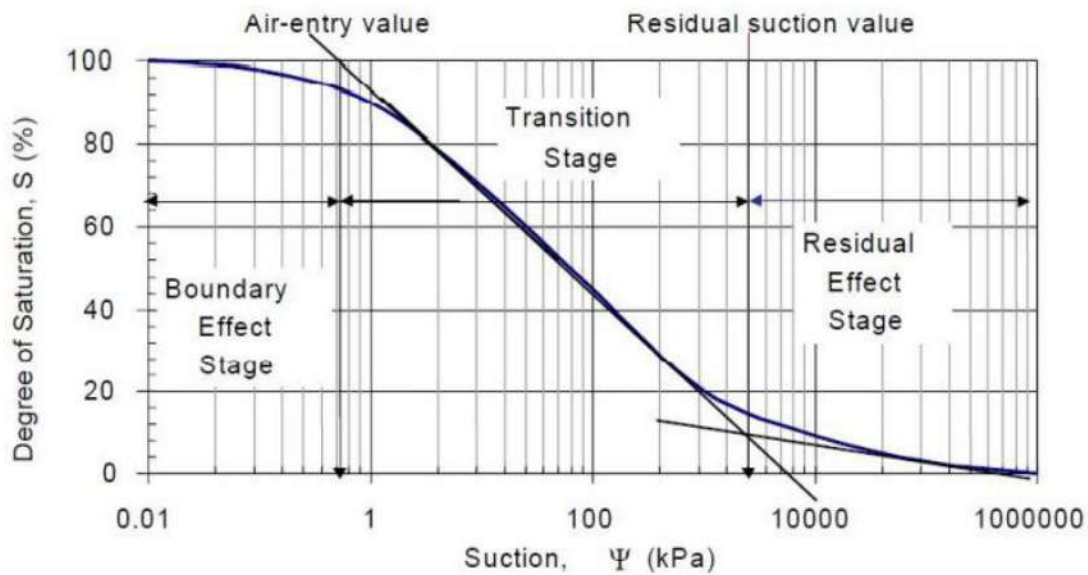


Figure 1.17 Différentes phases de la courbe de succion (Vanapalli, Wright and Fredlund, 2000)

1.7.4. Hystérésis de la courbe de succion

Lorsqu'on détermine expérimentalement les courbes de rétention d'un matériau donné en désorption et en adsorption, on constate que les chemins de drainage et d'imbibition ne se superposent pas (Figure 1.15-b). On observe que le chemin suivi lors du drainage se trouve au-dessus du chemin d'imbibition, révélant ainsi un phénomène d'hystérésis. Alors dans le cas général, il n'existe pas de correspondance biunivoque entre la succion et sa variable associée (comme la teneur en eau, par exemple). La Figure 1.18 présente les trois mécanismes auxquels on attribue classiquement ce phénomène d'hystérésis (Delage and Cui, 2000).

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

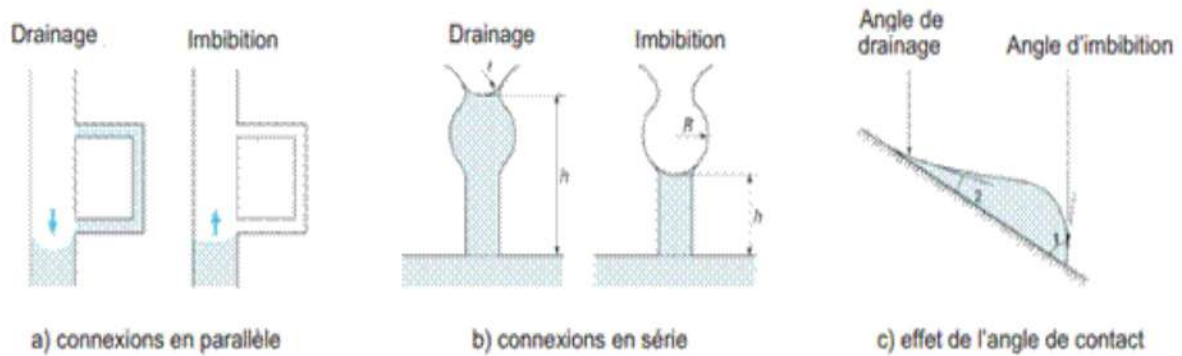


Figure 1. 18 Mécanismes invoqués pour l'hystérésis des courbes de rétention d'eau(Masekanya, 2008)

1.8. Modèles de courbe de rétention

Les mesures directes de la succion sont à la fois coûteuses et chronophages. Par conséquent, des modèles ont été développés afin de prédire la courbe de succion du sol en se basant sur des propriétés du sol facilement mesurables, telles que la distribution granulométrique, la teneur en matières organiques et la densité sèche du sol. Ces modèles sont connus sous le nom fonctions de pedo-transfert FPT (Pedo-Transfer Function (PTF)). Leur rôle principal consiste à transformer les données de base collectées lors des prospections pédologiques en paramètres exploitables, que ce soit pour des simulations ou pour répondre à des besoins spécifiques. Initialement, les fonctions de transfert pédologique étaient établies à l'aide de régressions simples, comme mentionné par (Pachepsky and Rawls, 2004), basées sur les travaux de (Salter, Berry and Williams, 1965). L'utilisation des fonctions de transfert pédologique (PTF) présente des avantages significatifs pour estimer les propriétés des sols non saturés. Il est particulièrement intéressant d'estimer indirectement la courbe caractéristique du sol en raison de la simplicité et de l'économie de la procédure. Les PTF peuvent être regroupées en deux catégories principales, comme indiqué par (Bruand and Cousin, 1998): Ceux à fondement mathématique et ceux à fondement physique. Les modèles mathématiques doivent être suffisamment souples pour s'adapter à la texture et structure des différentes sortes de sols. Les modèles physiques utilisent directement certaines caractéristiques physiques du sol (granulométrie, densité, etc.) pour estimer les propriétés hydrodynamiques.

1.8.1. 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), où la définition du degré de saturation effectif est généralement adopté pour caractériser le comportement de rétention d'eau comme :

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

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^f 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 de De Jong

(Jong, CA and Nicholaichuk, 1983) ont développé un modèle constitué de deux segments linéaires qui suivent la même forme mathématique mais avec des paramètres distincts. Ces deux segments linéaires sont utilisés pour représenter les variations de la rétention d'eau dans la plage de $-10.105 < h < -50$ hPa. Les équations des deux segments linéaires sont exprimées sous la forme suivante :

$$W = a + b_1 [\log(h)-t] \quad \text{pour } h \leq 10t \quad (1-31)$$

$$W = a + b_2 [\log (h)-t] \quad \text{pour } h > 10t \quad (1-32)$$

Avec h exprimé initialement en bar.

Les deux segments de droite proposés par (Jong, CA and Nicholaichuk, 1983) pour calculer W [h] se joignent pour une valeur de h qui est fonction de la teneur en argile des sols :

$$t = -1.12 + 0.029A_r \quad (1-33)$$

Cette valeur de h , prise comme positive dans le calcul de W , varie de 200 hPa pour les textures grossières à 1200 hPa pour les textures fines. Le paramètre t est aussi utilisé pour déterminer W . Les paramètres a , b_1 et b_2 , sont reliés à A_r , Li et CO à l'aide de fonction de pédotransfert (FPT).

e) Modèle de Saxton

(Saxton *et al.*, 1986) ont remis en question l'idée de décrire la distribution des valeurs de θ [h] des sols à l'aide d'un seul formalisme dans toute la plage de potentiel matriciel, allant de la saturation au point de flétrissement. Ils ont proposé de subdiviser cette plage en trois domaines distincts pour h_a , afin de mieux rendre compte de la variabilité des sols : (h_a variant en fonction de la composition granulométrique), (Saxton *et al.*, 1986) considèrent que :

Pour $h < 0$:

$$\theta = \theta_s \quad (1-34)$$

Pour $100 \text{ hPa} \leq h < h_a$, (Figure 1-23) :

$$\theta = \left[\frac{(100 - h)(\theta_s - \theta_{100})}{(100 - h_a)} \right] + \theta_{100} \quad (1-35)$$

Pour $15.103 \leq h < 100 \text{ hPa}$, la teneur en eau varie suivant une loi de puissance :

$$\theta = \left(\frac{h}{A} \right)^{1/B} \quad (1-36)$$

L'établissement de FPT a porté, d'une part, sur les paramètres θ_{100} , h_a et θ_s de la relation (1-35) pour $100 \text{ hPa} < h < h_a$ et, d'autre part, sur les paramètres A et B de la relation (1-36) pour $15.103 \leq h < 100 \text{ hPa}$ (Saxton *et al.*, 1986).

Par ailleurs, l'estimation de θ_s permet de déterminer θ pour $h > h_a$ puisque dans ce domaine de h , $\theta = \theta_s$.

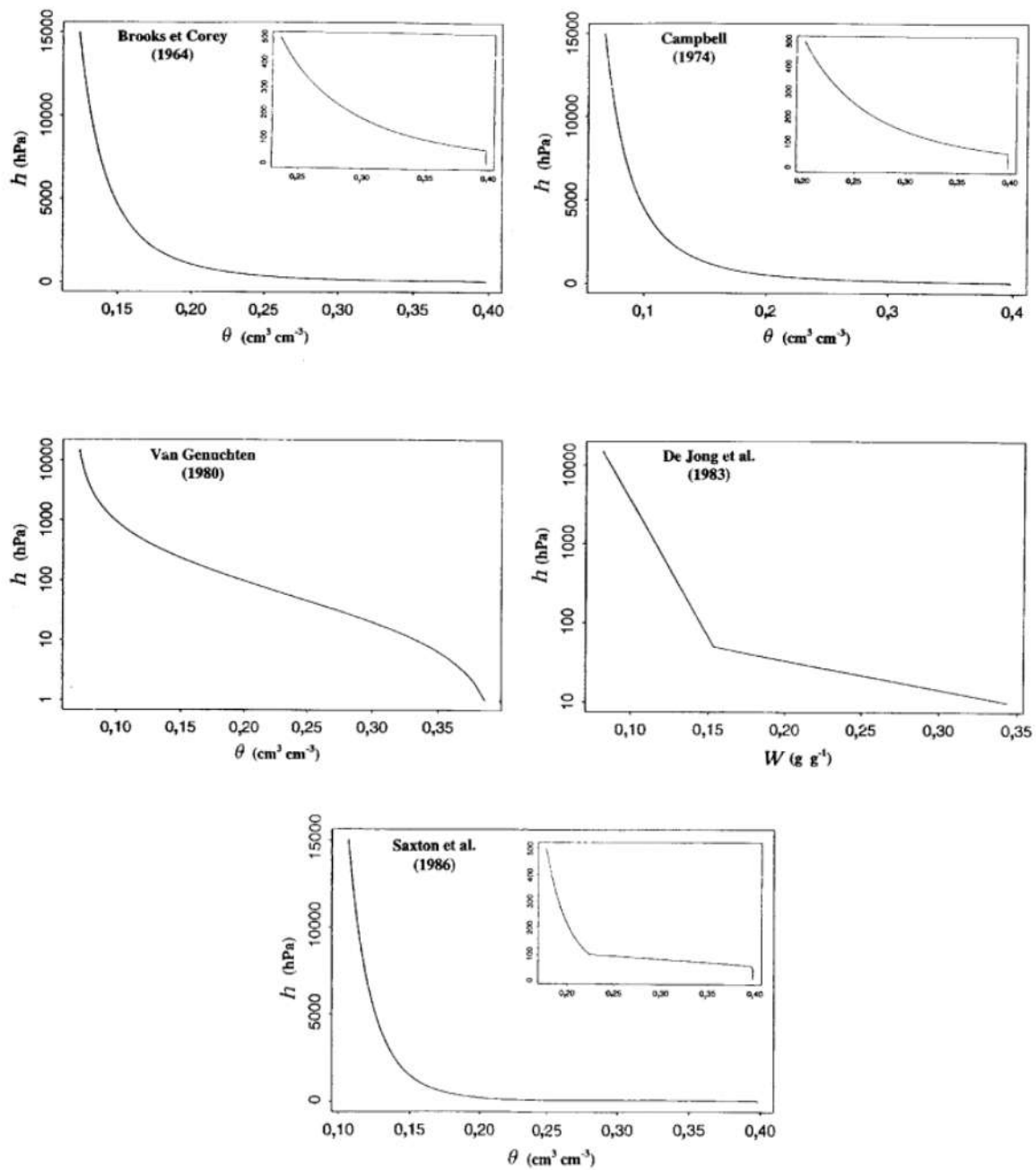


Figure 1. 19 Représentation schématique des modèles mathématiques utilisés pour décrire la courbe de rétention d'eau (Bruand and Cousin, 1998).

1.8.2. Modèles de courbes à fondement physique

Dans ce deuxième ensemble, les modèles de courbe établis peuvent être le plus souvent assimilés à une FPT puisque l'expression analytique utilise directement des caractéristiques de constitution du sol.

a) Modèle Arya et Paris (1981)

(Arya and Paris, 1981) ont développé une méthode qui permet de déterminer la relation $\theta[h]$ à partir d'une distribution de taille de particules en n classes. Leur approche consiste à associer un ensemble de pores à un ensemble de particules spécifique, puis à utiliser un modèle capillaire pour calculer les propriétés de rétention d'eau correspondantes. Le concept utilisé pour calculer une distribution de taille de pores repose sur l'idée que plus les particules sont fines, plus leur agencement crée des vides de petite taille. Dans cette approche, chaque classe de taille de particules est associée à un unique pore cylindrique, donnant ainsi un total de n pores. La classe de particules ayant un rayon R_i est considérée comme étant composée de particules sphériques, et le nombre n_i de ces particules peut être déterminé. Le pore cylindrique associé est supposé être formé par l'agencement côte à côte des particules de rayon R_i , ce qui définit sa longueur :

$$l_i = n_i 2R_i \alpha \quad (1-37)$$

Posent que l'indice des vides e est le même pour chaque classe de particules et qu'il est égal à celui de l'échantillon tout entier, le calcul donne alors :

$$r_i = R_i [4en_i^{(1-\alpha)}/6]^{1/2} \quad (1-38)$$

La teneur en eau pour chaque classe de particules est calculée en utilisant le volume des pores (V_{pi}) qui est considéré comme étant saturé en eau, et en rapportant ce volume à la volume total ($\theta_i = V_{pi} / V_t$).

La valeur du potentiel matriciel est obtenue à partir de l'équation de capillarité de Laplace :

$$h_i = (2\gamma \cos\theta_i) / (\rho_{eau} g r_i) \quad (1-39)$$

Le paramètre α est un paramètre empirique déterminé à partir des données expérimentales et par ajustement à partir des données calculées. Sa valeur moyenne, d'après (Arya and Paris, 1981) est égale à 1,38.

Ainsi, ce modèle capillaire se compose d'un ensemble de n tubes capillaires indépendants associés à n particules sphériques, ce qui permet de calculer n paires de valeurs (θ , h). Ce modèle, considéré comme "physico-empirique", peut être considéré comme une fonction de pédotransfert (FPT) car il permet d'associer les caractéristiques de la composition granulométrique aux propriétés de rétention en eau des sols. (Arya and Paris, 1981) ont jugé les résultats satisfaisants pour les sols non gonflants en négligeant les phénomènes d'hystérésis).

b) Modèle de Haverkamp et Parlange

(Haverkamp and Parlange, 1986) adoptent une approche similaire en associant une fonction de distribution cumulée de taille de particules $F(d)$ à une fonction de distribution cumulée de taille de pores $F(R)$. L'hypothèse fondamentale est que le diamètre des particules (d) est lié au rayon des pores (R) par une constante de proportionnalité (γ), qui représente la structure d'agencement des particules.

$$d = \gamma R \quad (1-40)$$

c) Modèle d'Assouline (1998)

(Assouline, 1998) ont développé une formulation mathématique de la courbe de rétention en eau en supposant que le sol présente une distribution uniforme de particules et d'agrégats, en référence à un volume qui varie en fonction de l'état hydrique du sol. Le modèle proposé utilise, comme les modèles précédents, l'équation de capillarité pour décrire les interactions eau-sol.

Pour $h_L \leq h \leq 0$

$$\theta = (\theta_s - \theta_L) \{ [1 - \exp[-\xi(h^{-1} - h_L^{-1})]]^\eta \} + \theta_L \quad (1-41)$$

Où (θ_L, h_L) : point de flétrissement déterminé par (van Genuchten, 1980)

$$h_L = -1,5 \text{ MPa} \approx 153 \text{ m}$$

θ_s : teneur en eau à saturation

θ_L : teneur en eau au point de dessèchement où la conductivité est négligeable

Ce modèle utilise deux paramètres de calibrage (ξ et η) qui sont déterminés par une procédure itérative basée sur l'algorithme Marquardt-Levenberg. Ces paramètres permettent d'obtenir des ajustements plus précis que ceux obtenus avec le modèle de van Genuchten, comme l'ont démontré Bastet et al en 1998.

La courbe de rétention d'eau ou de succion a été largement utilisée par de nombreux chercheurs pour évaluer les fonctions de pédotransfert (DTP). Parmi les chercheurs qui ont exploité ces courbes, on peut citer :

- (Xu, XT, Jian, WB, Wu, NS, Xu, X., & Shao, 2020) ont utilisé la courbe de rétention d'eau pour évaluer différentes fonctions de pédotransfert dans le but d'estimer la conductivité hydraulique du sol. Ils ont comparé les valeurs prédites par les DTP avec

les mesures expérimentales de la courbe de rétention d'eau, et ont évalué la performance des modèles en termes d'ajustement et d'erreur.

- (van Genuchten, 1980) ont développé une fonction de pédotransfert basée sur la courbe de succion pour estimer la conductivité hydraulique du sol. Ils ont ajusté les paramètres du modèle en utilisant les données de la courbe de succion mesurées expérimentalement, puis ont validé le modèle en comparant les valeurs prédites avec de nouvelles mesures de la courbe de succion.
- (Vogel and Cislerova, 1988) ont utilisé la courbe de succion pour évaluer différentes fonctions de pédotransfert pour estimer la rétention en eau du sol. Ils ont comparé les valeurs prédites par les modèles de DTP avec les mesures expérimentales de la courbe de succion, en mettant l'accent sur la précision des modèles dans la prédiction des teneurs en eau à différents potentiels de succion.
- (Celia, Bouloutas and Zarba, 1990) ont développé un modèle de pédotransfert pour estimer la conductivité hydraulique non saturée en utilisant la courbe de rétention d'eau. Ils ont utilisé des données expérimentales de la courbe de rétention d'eau pour ajuster les paramètres du modèle, puis ont validé le modèle en le comparant à de nouvelles mesures de la courbe de rétention d'eau.

1.9. Evolution de la micro-structure d'un sable sous fortes contraintes suite à l'endommagement des grains

L'endommagement se réfère à l'état d'un matériau qui a été soumis à diverses contraintes, ce qui entraîne des modifications de ses caractéristiques. Cela peut être considéré comme un processus de détérioration progressive du matériau sous l'effet de charges, qui conduit éventuellement à la rupture. Ce phénomène se manifeste physiquement par l'apparition de défauts microscopiques tels que des microfissures ou des micropores à l'intérieur de la substance. Ces microdéfauts influent sur le comportement global du matériau, entraînant notamment une dégradation de certaines propriétés macroscopiques, telles que le module de Young (J Lemaitre and Dufailly, 1987). En réalité, malgré une étude assez approfondie du phénomène d'endommagement, en particulier au cours des trente dernières années il manque encore une définition rigoureuse du variable « endommagement » telle qu'il en existe par exemple pour l'élasticité, la plasticité, etc.

Du point de vue mécanique, l'endommagement est accompagné par une dégradation des propriétés du matériau, ce qui peut éventuellement mener à sa rupture. Cette définition de l'endommagement permet de considérer l'ensemble des phénomènes observés (détérioration des

propriétés mécaniques, augmentation de la perméabilité, augmentation de la succion, etc.) comme une manifestation d'un unique processus : celui du changement de la structure. Il existe plusieurs situations dans lesquels les sols granulaires sont soumis à des fortes contraintes, on cite l'exemple des réservoirs pétrolières lors de l'injection de l'eau de production à forte pression (Figure 1.22), sous la fondation des grands barrages (Figure 1.23), sous les pointes des pieux de grande hauteur (Figure 1.20, Figure 1.21),...etc. Sous l'action de ces contraintes, les forces de contact inter-granulaires peuvent dépasser la résistance à l'écrasement des grains et provoquer la rupture d'une fraction des particules. Ce phénomène génère plusieurs changements sur les caractéristiques physiques, mécaniques et hydriques de ces sols.

De plus, dans certaines conditions, les forces de contact entre les grains peuvent dépasser la résistance à l'écrasement des particules, entraînant la rupture d'une partie d'entre elles. En général, la rupture des grains, également appelée "comminution" dans les activités du broyage, se produit dans les sols granulaires soumis à des contraintes élevées, tels que les pointes de pieux, sous les barrages de grande hauteur, les zones d'injection intense d'eau dans les puits pétroliers, ou lorsque les matériaux sont constitués de grains à faible résistance.

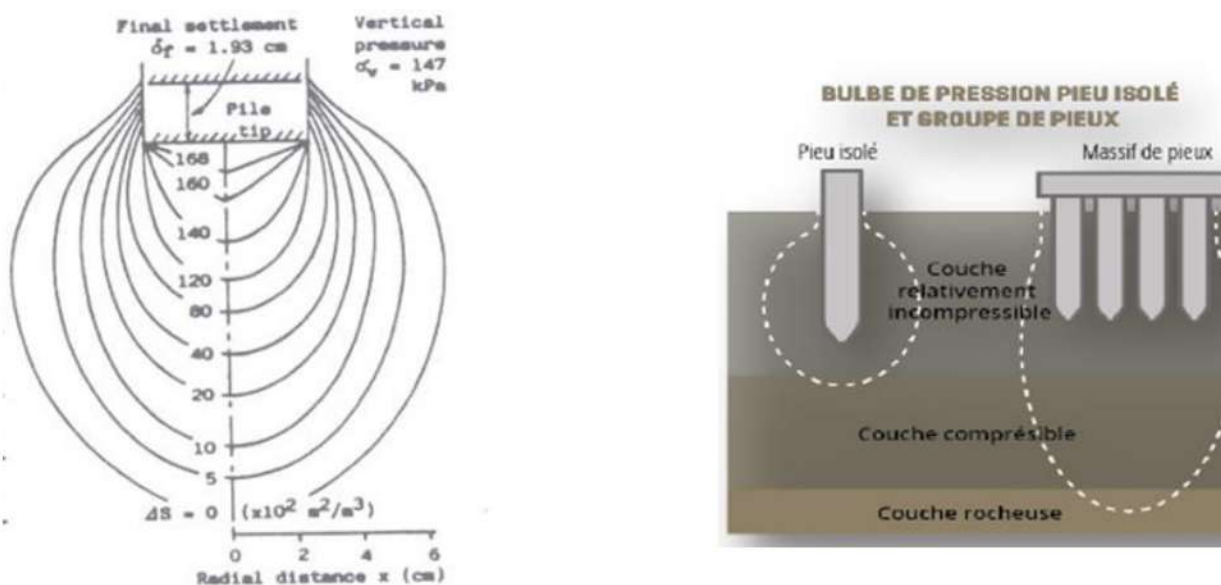


Figure 1. 20 Ecrasement des grains sous la pointe du pieux d'après (Miura, 1985)

(Surface d'égal écrasement des grains)

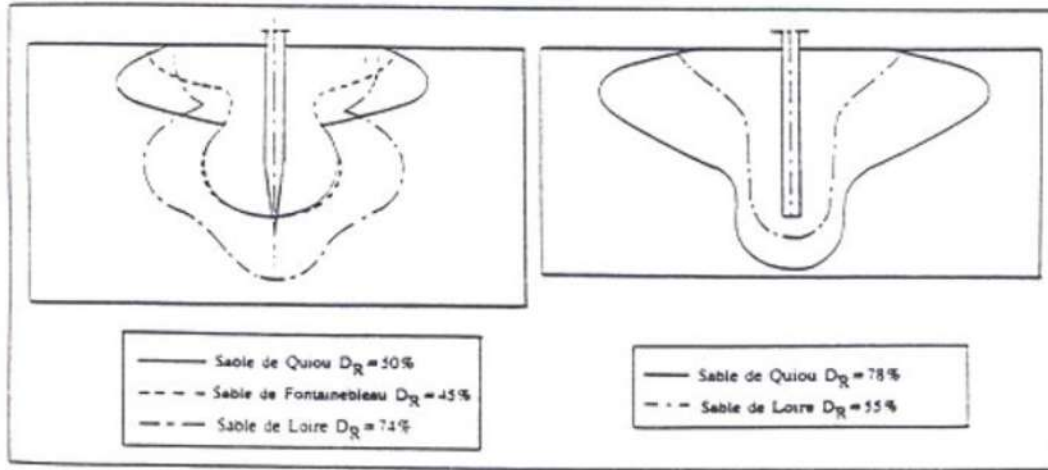


Figure 1. 21 Influence de la densité relative sur les dimensions de la zone perturbée. (Sid-Ahmed, 1989)

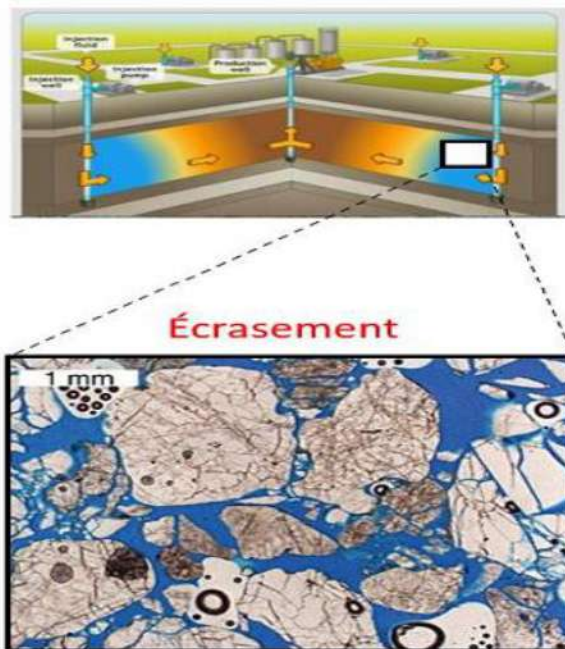


Figure 1. 22 Phénomène de l'endommagement des grains dans les réservoirs pétroliers.

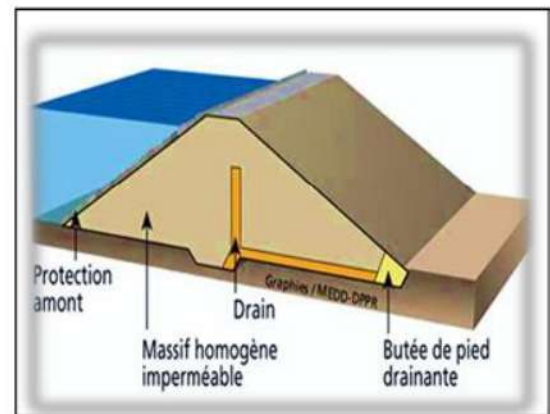


Figure1.23 Phénomène de l'endommagement des grains au niveau des bases des barrages en terre.

Le phénomène d'écrasement des grains implique une réduction de la taille des grains et un étalement de la granulométrie, ce qui génère un arrangement plus dense des grains. Ce phénomène peut conduire à la production d'une quantité significative de particules fines. La présence de ces particules et la densification du matériau entraînent une réduction de la taille des pores et modifie le comportement mécanique du matériau, notamment en termes de perméabilité et de succion. Plusieurs facteurs influencent ce phénomène, tels que la

granulométrie, l'état des contraintes appliquées, la minéralogie des grains, la forme des grains, la teneur en eau, la succion, etc. Dans ce contexte, nous cherchons à étudier l'impact de l'écrasement des grains sur la courbe de rétention d'eau.

La rupture dans les matériaux granulaires a été étudiée par de nombreux chercheurs, qui ont réalisé des travaux expérimentaux, théoriques et numériques, sur différents matériaux et par des différentes méthodes. (Dadda *et al.*, 2015) ont effectué des essais œdométriques à haute pression sur le sable carbonaté et le sable d'Hostun afin d'étudier l'évolution du comportement mécanique et hydraulique d'un sable soumis à de fortes contraintes (Dadda *et al.*, 2015). Ils ont trouvé que le pourcentage des particules fines augmente avec l'augmentation de chargement, et ils ont trouvé une diminution de la porosité et la perméabilité avec l'augmentation du chargement.

(Cil and Alshibli, 2014) ont réalisé des essais de compression unidimensionnelle sur un sable composé de particules de silice de différentes tailles d'échantillons (Cil and Alshibli, 2014). En plus de cela, ils ont utilisé la microtomographie synchrotron tridimensionnelle en combinaison avec la méthode des éléments discrets pour examiner comment la fracture des particules évolue à différents niveaux de charge. Ils ont constaté que la taille de l'échantillon affecte le début d'écrasement des particules, et ils ont trouvé également que la majorité de la fracture des particules se produit dans la partie supérieure de l'échantillon. (Zheng and Tannant, 2016) ont effectué des essais de compression unidimensionnelle sur des grains de quartz de forme ronde. Ils ont utilisé la technique de traitement d'images pour examiner comment l'endommagement des grains affecte la morphologie des particules. Leurs résultats ont révélé que les grains écrasés ont subi une transformation, devenant allongés et anguleux.

1.9.1. Evolution de la microstructure suite à la fracturation des grains

1.9.1.1. Généralité sur les mécanismes d'écrasement des grains

L'écrasement des grains dans un assemblage granulaire est à mettre en regard de la distribution des forces de contact sur les grains. Si ces forces dépassent une valeur limite, la particule s'écrase. En raison de la variabilité dans la forme et la taille des grains, la répartition de l'intensité des forces exercées sur les grains peut être complexe. Par conséquent, le taux de rupture des grains dépend du rapport entre la résistance individuelle des particules et la contrainte macro-mécanique appliquée. Lorsque ce rapport est faible, la probabilité de rupture des grains est augmentée (Ortega, 2013) Selon (Guyon and Troadec,

1994), dans un assemblage granulaire, on peut distinguer trois modes de rupture (voir Figure 1.24).

- **Fracture** : cassure du grain en plus petits grains de taille similaire (disons 25 à 50% de la taille des grains d'origine),
- **Attrition** : lorsqu'un grain se fracture en un fragment principal légèrement plus petit que le grain initial, ainsi que plusieurs fragments plus petits qui résultent généralement de la rupture des aspérités.
- **Abrasion** : production de particules fines résultant du frottement entre les grains.

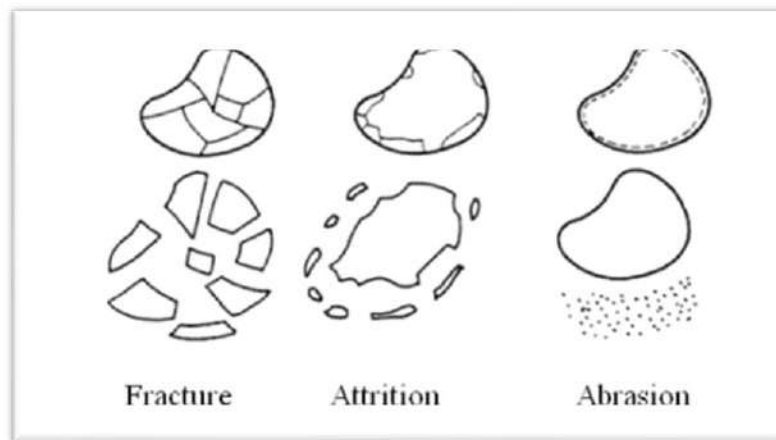


Figure 1. 24 Modes de fracture d'un grain (Guyon and Troadec, 1994)

Depuis un certain temps déjà, des recherches sont menées sur les mécanismes d'écrasement des grains et leur impact sur les propriétés de transport des matériaux et les propriétés mécaniques. Ces études visent à résoudre des problèmes pratiques dans le domaine du génie civil, tels que les barrages en terre, les fondations profondes et les réservoirs pétroliers où le sol est soumis à des contraintes plus élevées que celles généralement rencontrées dans la mécanique des sols conventionnelle.

Le comportement mécanique des sables sous fortes contraintes ont été étudiés par nombreux auteurs (Vesic and Barksdale, 1963; Insley and Hillis, 1965; Lee and Seed, 1967; Vesic and Clough, 1968; Green and Reades, 1975; Luong and Touati, 1983; Coop and Atkinson, 1994). Toutes ces études se sont basées sur l'évolution de la courbe granulométrique et de la surface spécifique lors de chargement.

1.9.1.2. Taux d'écrasement des grains

Différentes méthodes ont été développées pour mesurer le taux d'écrasement afin de quantifier la rupture des grains. Ces méthodes sont basées sur l'analyse des variations des paramètres de la courbe granulométrique avant et après l'application de la charge. (Lee and Farhoomand, 1967) ont utilisé le rapport D_{15i}/D_{15a} , (où D_{15} est le diamètre qui correspond à 15% de passant du matériau à l'état initial et l'état final), afin de définir un paramètre de comparaison entre les états de chargement. (Hardin and Asce, 1985) a introduit le concept d'écrasement relatif en se basant sur l'hypothèse selon laquelle il existe un potentiel de rupture jusqu'à une taille de référence de 0,074 mm. Il a ainsi défini ce qu'il a appelé le "potentiel de rupture B_p ", qui représente la surface entre la courbe granulométrique du matériau et une distribution de taille uniforme de 0,074 mm, comme illustré dans la Figure 1.25a. Pour quantifier le taux de rupture, Hardin (1985) a proposé de comparer les surfaces des courbes granulométriques avant et après l'application de la charge (voir Figure 1.25b), ainsi que le potentiel B_r :

$$B_r = \frac{B_t}{B_p} \quad (1-42)$$

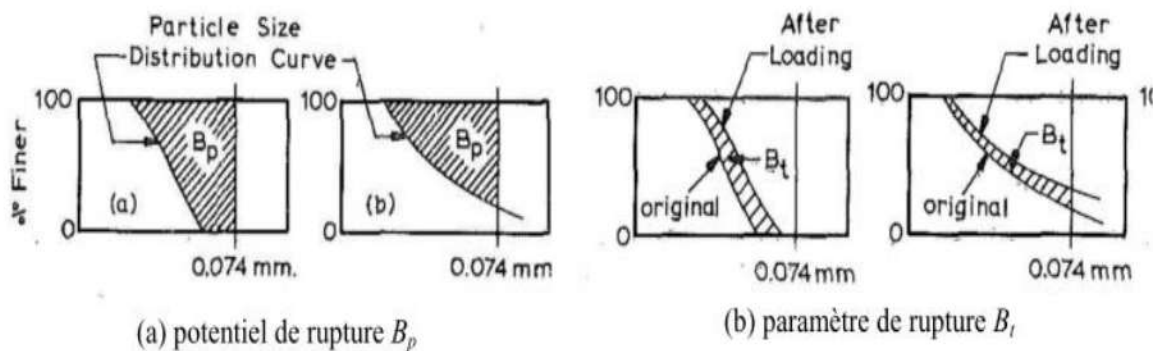


Figure 1. 25 Taux d'écrasement de (Hardin and Asce, 1985)

Le concept de l'écrasement relatif a été largement appliqué pour « définir le degré auquel les particules d'un élément de sol sont broyées ou brisées au cours du chargement ». Selon Turcotte (1986), lorsqu'un matériau est soumis à une charge, toute distribution initiale des grains tend à se transformer en une distribution finale. Cette distribution finale est expliquée par un équilibre thermodynamique dans le système, car une certaine géométrie des grains permet d'éliminer la concentration des contraintes. En d'autres termes, l'énergie est dispersée sur un plus grand nombre de particules, ce qui peut être considéré comme des micro-états thermodynamiques. Cette hypothèse a été validée par les travaux de (Coop *et al.*, 2004).

La définition de (Hardin and Asce, 1985) a été reprise par différents auteurs, mais en changeant la distribution ultime. (Itai Einav, 2007a) Einav (2007a) a postulé que la distribution granulométrique finale est toujours fractale.

La Figure 1.26 présente une représentation de la définition adoptée par (Itai Einav, 2007a), où B_r représente le rapport entre la surface délimitée par la distribution granulométrique initiale et toute courbe intermédiaire B_t , et la zone située entre les distributions granulométriques initiale et finale supposée être fractales, notée B_p .

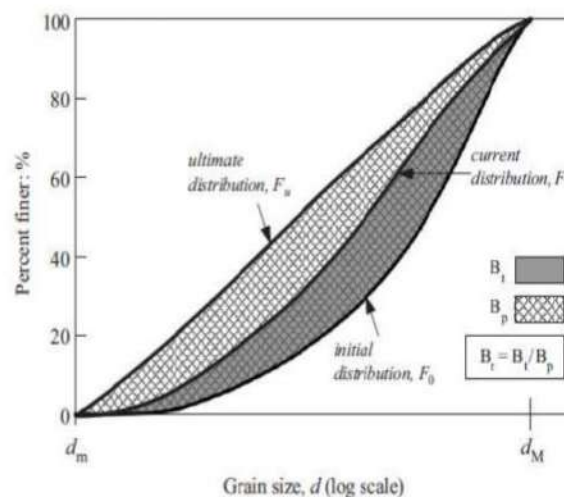


Figure 1. 26 Définition du taux d'écrasement (Itai Einav, 2007a)

Le concept d'écrasement de (Itai Einav, 2007a) et (Hardin and Asce, 1985) sont largement utilisés actuellement et plusieurs auteurs ont utilisé ces définitions pour étudier le phénomène d'écrasement des grains (e.g (Coop *et al.*, 2004; Sadrekarimi and Olson, 2010; Chen *et al.*, 2012; Zhang and Baudet, 2013)).

1.9.2. Effet de l'état de contrainte sur la perméabilité

Lorsqu'on injecte de l'eau de production dans les réservoirs d'hydrocarbures pour améliorer leur productivité, cela entraîne des modifications de l'état de contrainte en raison de l'augmentation de la pression interstitielle, ce qui entraîne une diminution de la contrainte effective moyenne dans le milieu. Ces changements induisent des variations de la porosité et de la perméabilité du réservoir. La littérature contient de nombreuses études qui se sont penchées sur l'évolution de la perméabilité d'un milieu poreux soumis à divers types de charges. (Wong, Barr and Kry, 1993) ont réalisé des essais de chargement et déchargement en appareil triaxial sur le sable d'Ottawa et sur les grès de Barea, leurs résultats ont révélé que la réduction de la perméabilité lors d'un chargement isotrope n'est pas linéaire. Ils ont observé que la diminution de la

perméabilité était plus prononcée dans le cas du sable d'Ottawa, qui présentait une porosité relativement élevée, par rapport aux grès de Berea. Les mesures de la perméabilité de l'éprouvette lors d'un déchargement isotrope montre une augmentation réversible de perméabilité. La Figure 1.27 présente deux évolutions de la perméabilité de deux échantillons de sable d'Ottawa. L'un montre la variation lors d'un déchargement par réduction de la contrainte isotrope, tandis que l'autre montre la variation lors d'une augmentation de la pression interstitielle, comme rapporté par Gorbran en 1981. On observe qu'une diminution de la contrainte effective isotrope de 16 MPa entraîne une augmentation de la perméabilité de 13 %, tandis qu'une diminution de la contrainte effective de 16 MPa due à l'augmentation de la pression interstitielle ne produit qu'une diminution de 7 % de la perméabilité. La Figure 1.28 présente l'augmentation de la perméabilité sous deux types de déchargement (Morita et al. 1984), par une diminution de la contrainte isotrope de 60 à 5 MPa, (Zoback, 1975), pour des contraintes effectives isotropes initiales de 21 et 81 MPa).

Il est observé que l'augmentation de la perméabilité est plus significative lorsque la pression interstitielle est augmentée, par rapport à une diminution de la contrainte effective isotrope.

La Figure 1.29 présente une augmentation de 16% de la perméabilité d'une éprouvette de sable bitumineux de Cold Lake soumise à un déchargement isotrope de 12 MPa à 0 MPa

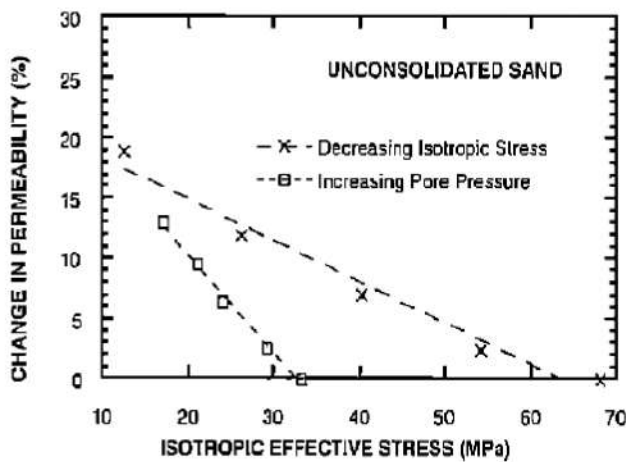


Figure 1. 27 Evolution de la perméabilité lors de diminution de la contrainte effective moyenne de sable d'Ottawa (Gorban 1981 cité par Scott 1994)

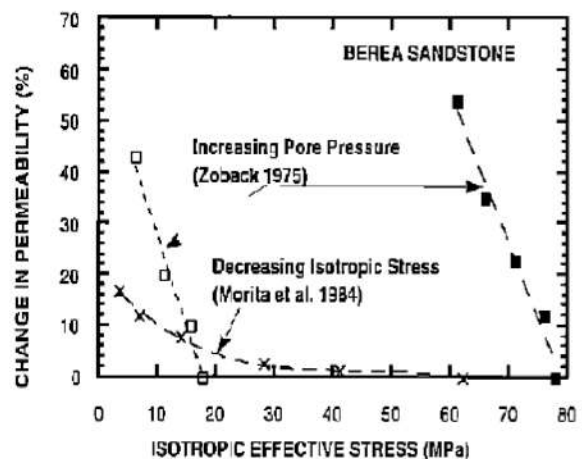


Figure 1. 28 Evolution de la perméabilité lors de différents types de déchargement (Scott et al. 1994)

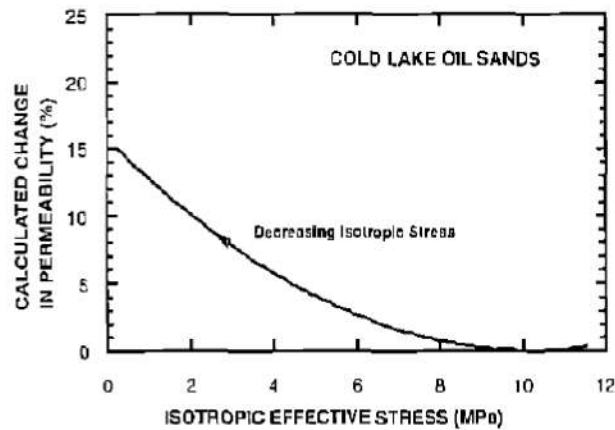


Figure 1. 29 Augmentation de la perméabilité lors d'un déchargement isotrope de sable bitumineux de Cold Lake (Scot et al. 1994)

D'après (David et al. 1994), il existe trois mécanismes de compaction lors du chargement hydrostatique, ce qui entraîne différentes variations de la perméabilité. Ces mécanismes dépendent du type de matériau testé. La Figure 1.30 présente ces différentes variations de perméabilité. On observe une diminution non linéaire de la perméabilité pour le granite de Westerly (courbe convexe) et le sable d'Ottawa (courbe concave), tandis qu'une diminution linéaire est observée pour les grès de Berea.

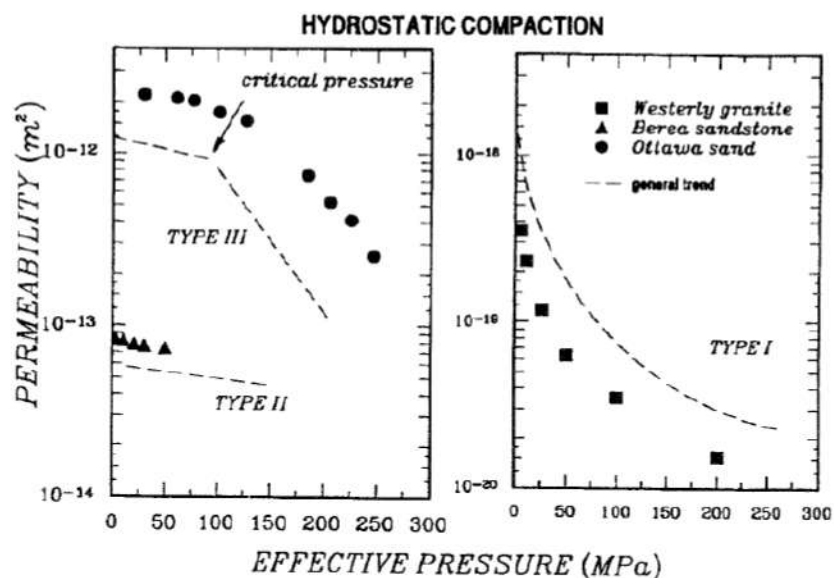


Figure 1. 30 Evolution de la perméabilité en fonction de la contrainte effective pour trois différents mécanismes de compaction (David et al. 1994)

Différentes lois empiriques ont été proposées dans la littérature pour modéliser la variation de la perméabilité d'un milieu poreux soumis à une charge. Parmi celles-ci, on peut citer la loi développée par (Tortike and Farouq Ali 1991), qui exprime la perméabilité en fonction de la déformation volumique et de la porosité du milieu.

$$\frac{\Delta k}{k_0} = \left(\frac{1 + 3\varepsilon_v / \phi + 3\varepsilon_v^2 / \phi^2 + \varepsilon_v^3 / \phi^3}{1 + \varepsilon_v} \right) - 1 \quad (1-43)$$

D'où k_0 est la perméabilité initiale ε_v est la déformation volumique et ϕ est la porosité du milieu. Une autre loi empirique qui relie la perméabilité à la pression effective est présentée dans l'équation (1-44). Riepe et al. (1983) et Debschutz et al. (1989) ont montré que cette loi est plus valable pour les grés que pour les sables.

$$k = k_0 \exp[-\gamma(P_{eff} - P_0)] \quad (1-44)$$

Ici, P_{eff} représente la contrainte effective et P_0 représente la contrainte effective initiale, tandis que γ est un coefficient qui reflète la forme de diminution de la perméabilité en fonction de la pression effective P_{eff} . Selon David et al. (1994) ce coefficient varie entre $6,62 \cdot 10^{-3}$ à $18,1 \cdot 10^{-3}$ MPa^{-1} pour les cinq matériaux qu'ils ont étudiés.

1.9.3. Evolution de la micro-structure d'un sable sous fortes contraintes

(Dadda et al., 2015) ont entrepris des essais œdométriques à haute pression dans le but de comprendre les facteurs qui influent sur l'écrasement des grains dans un sable, ainsi que les répercussions de cet écrasement sur la microstructure, la perméabilité et les propriétés mécaniques du matériau. Pour ce faire, ils ont associé ces essais à des mesures de perméabilité et à une évaluation de la distribution de la taille des pores à l'aide des techniques tensiométriques et de la porosimétrie au mercure. L'objectif était d'analyser l'effet de la création de fines sur les modifications de la microstructure du matériau. De plus, ces mesures ont permis de confirmer expérimentalement les modèles théoriques existants dans la littérature concernant le phénomène d'écrasement des grains dans les matériaux granulaires.

1.9.3.1. Changements de la microstructure :

(Dadda et al., 2015) ont sélectionné deux types de sable présentant des caractéristiques minéralogiques et mécaniques différentes. Le premier est un sable de référence largement utilisé dans différents laboratoires français et européens, notamment le CERMES. Il s'agit du sable d'Hostun HN34, qui est principalement composé de silice (99%) et il est classifié comme un sable propre mal gradué selon la classification LCPC/USCS. Les grains de ce sable sont

anguleux. Le deuxième sable est un sable carbonaté, principalement dérivé de matériaux carbonatés tels que les coraux, les coquilles de mollusques et les algues. Sa composition chimique est principalement de la calcite (98%), et il est plus fragile en compression par rapport au sable siliceux. Les courbes granulométriques de ces deux sables sont illustrées dans la Figure 1.31. Il est évident que le sable d'Hostun HN34 est fin et uniforme, tandis que le sable carbonaté présente une granulométrie plus étalée. Les paramètres permettant leur classification sont présentés dans le tableau 1.2.

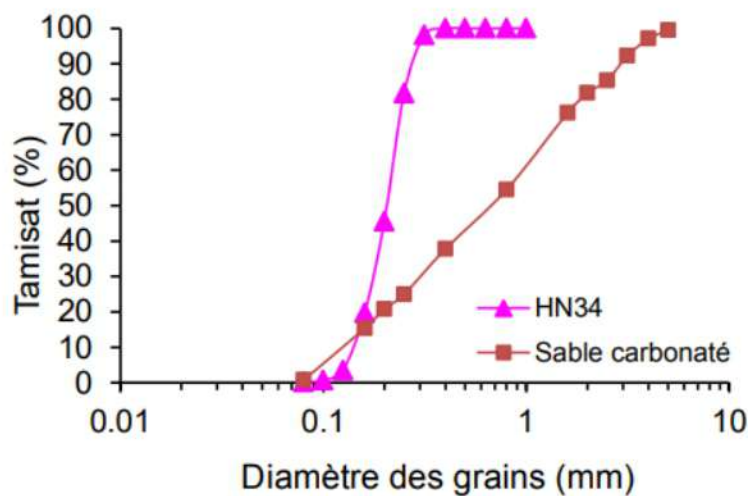


Figure 1. 31 Granulométries initiales des sables étudiés (DADDA et al. 2015)

Tableau 1. 2 Caractéristiques des sables étudiés (Dadda et al., 2015)

Sable	$D_{50}(mm)$	C_u	e_{min}	e_{max}	$\rho_s(g/cm^3)$
HN34	0,207	1,57	0,696	1,145	2,65
Sable carbonaté	0,629	7,67	0,33	0,59	2,65

Les essais effectués par (Dadda et al., 2015) consistent en des essais œdométriques à haute pression, suivis d'une mesure de perméabilité à chaque palier de charge. Une analyse granulométrique de l'échantillon est ensuite réalisée après chaque chargement afin de déterminer l'évolution de la distribution des grains initiale à chaque niveau de contrainte. Avant de procéder à l'analyse granulométrique, certains tests ont été effectués pour mesurer la distribution de la taille des pores à l'aide de la méthode tensiométrique ou du porosimètre au mercure. Ces mesures ont permis d'étudier l'évolution microstructurale à chaque palier de chargement. Les caractéristiques de ces essais sont répertoriées dans le tableau 1.3. Un effort a été fait pour obtenir des indices de densité proches de 0,9.

Tableau 1. 3 Caractéristiques des essais réalisés (Dadda *et al.*, 2015)

Contrainte maximale (MPa)	Sable HN34		Sable carbonaté	
	I_D	Porosité (%)	I_D	Porosité (%)
8	0,88	23,53	0,9	42,55
15	0,87	26,67	0,89	42,70
30	0,89	26,39	0,91	42,40
50	0,9	26,25	0,86	43,14
80	0,89	26,39	0,87	42,99
105	0,9	26,95	0,9	42,55

Suite aux essais œdométriques effectués à différentes contraintes, des analyses granulométriques ont été réalisées afin d'étudier la production de particules fines après chaque chargement. La Figure 1.32 illustre l'évolution des courbes granulométriques pour différents niveaux de chargement pour le sable d'Hostun et le sable carbonaté. Il est remarquable de constater l'évolution de la granulométrie en fonction de la contrainte appliquée. Cependant, cette évolution ralentit au-delà d'une certaine valeur de contrainte. La courbe granulométrique correspondant à cette valeur est désignée par (Einav 2007a) comme la "courbe granulométrique ultime". Cela est illustré par l'évolution du coefficient d'uniformité, présentée dans la Figure 1.33. On peut observer que le coefficient d'uniformité se stabilise au-delà d'une certaine contrainte. Cette courbe traduit physiquement l'existence d'un équilibre géométrique, où le système granulaire augmente le nombre de contacts entre les particules jusqu'à atteindre un réseau de contacts stable (Hardin, 1985). Dans cette situation, on observe une réduction de la concentration des contraintes sur certaines particules, ce qui entraîne une résistance accrue contre l'écrasement pour l'ensemble du système. Ce mécanisme est représenté de manière schématique par (Russell *et al.*, 2003) dans la Figure 1.34.

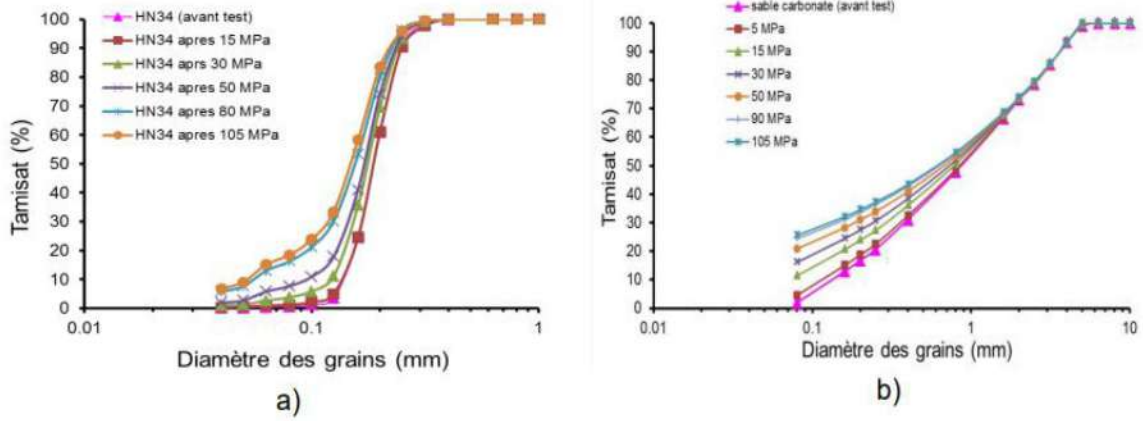


Figure 1. 32 L'évolution de la courbe granulométrique en fonction de contrainte
 a) Sable d'Hostun, b) Sable carbonaté (DADDA et al. 2015)

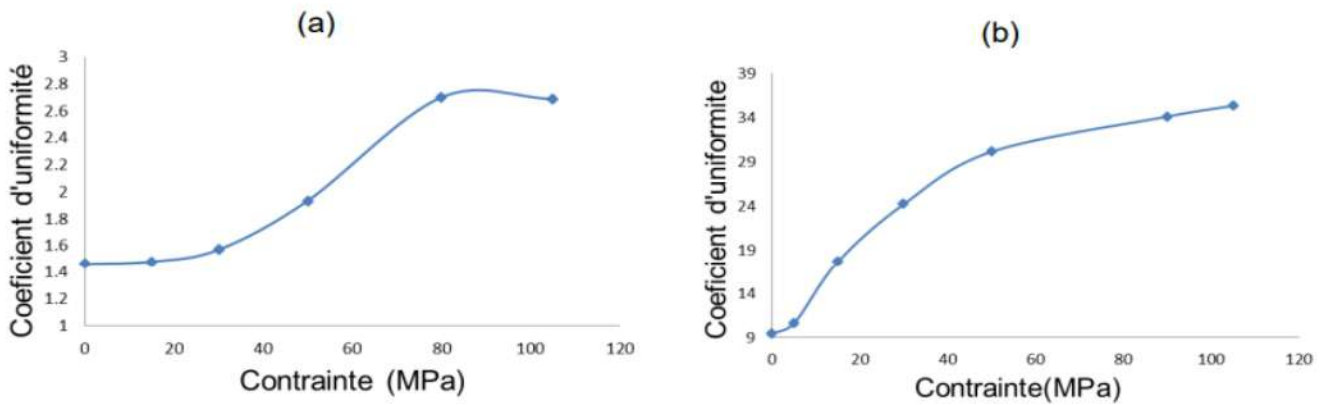


Figure 1. 33 Evolution de coefficient d'uniformité a) Sable d'Hostun, b) Sable carbonaté(Daddda et al., 2015)

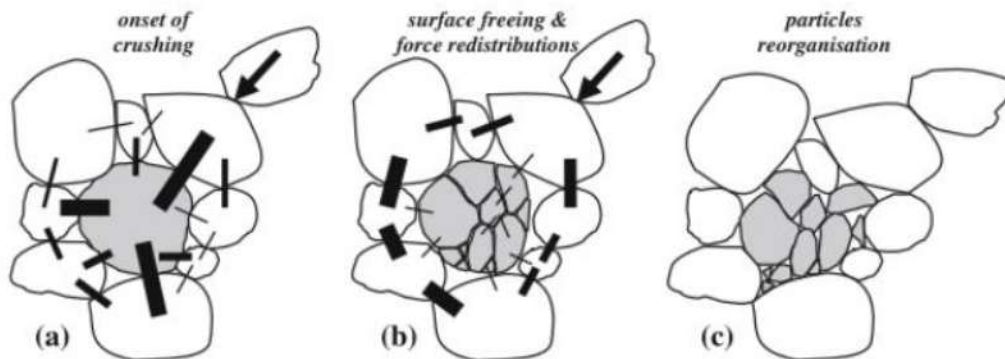


Figure 1. 34 Les étapes de l'écrasement et durcissement du système granulaire (Russell et al. 2013)

Lorsqu'un sable est soumis à une forte contrainte, cela entraîne des changements dans sa microstructure, tels que la porosité et la distribution de la taille des pores, qui dépendent du niveau de chargement appliqué. Afin d'étudier l'effet du niveau de chargement sur la porosité et la distribution de la taille des pores, des essais tensiométriques et porosimétriques ont été réalisés sur des échantillons soumis à différents paliers de chargement pour les deux types de sable étudiés. Les modifications de la microstructure d'un sable sous chargement sont causées par les déformations plastiques (telles que l'effondrement des pores) et/ou l'écrasement des grains. Pour le sable HN34 des mesures tensiométriques sont réalisés sur un seul palier de chargement (5 MPa). En comparant les mesures effectuées sur un échantillon non chargé (Figure 1.35), il a été observé qu'avant le seuil d'écrasement, il y a seulement un réarrangement des grains, ce qui entraîne un décalage complet de la distribution de la taille des pores par rapport à l'état initial (sans chargement), comme illustré dans la Figure 1.35a. La Figure 1.35b met en évidence qu'une charge de 5 MPa ne provoque pas la génération de fines particules par écrasement des grains, mais plutôt un effondrement des pores (déformation plastique) qui change la microstructure au niveau de la taille médiane des pores, de l'ordre de 13 μm . On observe une augmentation de la quantité des pores inférieur à 50 μm et une diminution de la porosité de 11% par rapport à la valeur initiale.

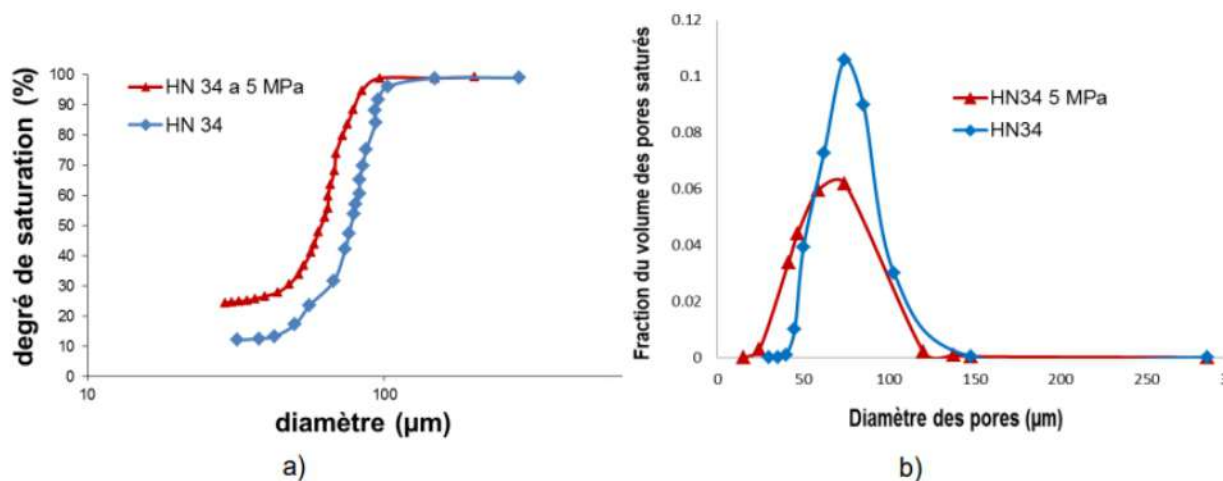


Figure 1. 35 Distribution de la taille des pores, a) cumulé, b) partielle (Dadda *et al.*, 2015)

Afin d'étudier plus précisément l'effet de l'écrasement sur la distribution de la taille des pores, (Dadda *et al.*, 2015) ont réalisé des mesures tensiométriques sur du sable carbonaté, qui présente un seuil d'écrasement faible. Cette approche a été choisie pour éviter de soumettre la pierre céramique à des contraintes élevées. Pour des contraintes supérieures à 10 MPa ils ont trouvé

que les échantillons de sable carbonaté présentent une certaine cohésion (Figure 1.36), ce qui donne la possibilité d'utiliser la porosimétrie au mercure. Quelques résultats concernant la distribution des tailles des pores en fonction des contraintes de chargement sont présentés dans la Figure suivante :

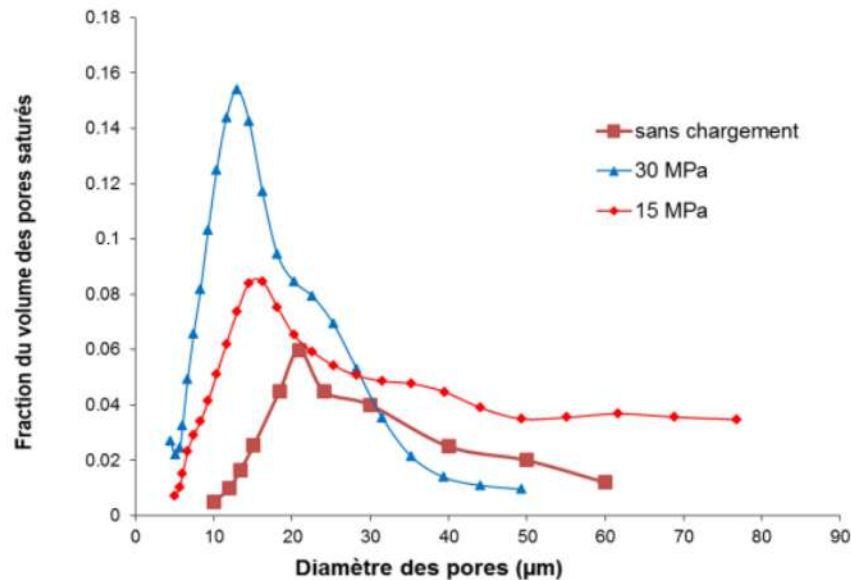


Figure 1. 36 Evolution de la distribution des tailles des pores de sable carbonaté en fonction de contrainte appliquée (Dadda *et al.*, 2015)

L'observation des résultats permet de constater clairement un décalage de la taille médiane des pores, résultant des deux phénomènes étudiés précédemment, à savoir l'effondrement des pores et l'écrasement des grains. Dans un échantillon non chargé, la taille médiane des pores est d'environ 21 µm. Avec l'application de différentes charges successives, cette valeur diminue à 14,5 µm sous une contrainte axiale de 15 MPa, puis à 12 µm sous une contrainte axiale de 30 MPa. Parallèlement, la porosité diminue également, passant de sa valeur initiale de 0,26 à 0,2 sous 15 MPa et à 0,16 sous 30 MPa.

1.9.3.2. Effet de la saturation

Afin d'étudier l'impact de la saturation sur le taux d'écrasement des grains, les mêmes essais ont été réalisés sur le sable HN34, mais cette fois-ci en saturant l'échantillon préalablement. Ensuite, les courbes granulométriques des échantillons secs ont été comparées. Pour mieux distinguer les différences entre les deux états (sec et saturé), les courbes granulométriques ont été représentées selon une échelle logarithmique (Log-Log) sur la Figure 1.37. Une légère

différence entre l'état sec et l'état saturé est observée entre les courbes granulométrique correspondants au même niveau de chargement.

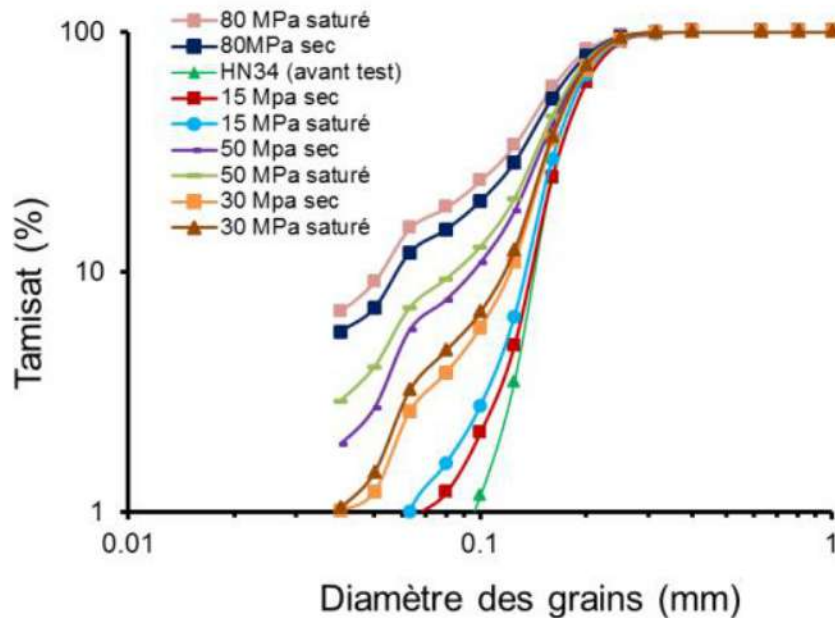


Figure 1.37 L'influence de saturation sur l'écrasement des grains (Dadda *et al.*, 2015)

On observe une légère augmentation du taux d'écrasement pour les échantillons saturés. L'origine de ces effets liés à l'eau se situe au niveau des particules individuelles. En effet, la présence d'eau entraîne une diminution de la résistance des particules, ce qui conduit à une augmentation du taux de rupture. Ce phénomène a également été observé sur des matériaux partiellement saturés par (Chávez et Alonso, (2003).

1.10. 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.

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés également à l'évolution de la perméabilité des matériaux granulaires soumis à des fortes contraintes suite à l'endommagement des grains. En effet, le phénomène d'écrasement des grains implique une réduction de la taille des grains et un étalement de la granulométrie, ce qui génère un arrangement plus dense. Ce phénomène peut conduire à la production d'une quantité significative de particules fines. Alors voir l'effet de production des particules fines sur la modification de la microstructure du matériau et par conséquent sur la perméabilité des milieux poreux était une des priorités dans ce chapitre.

Dans le prochain chapitre, une caractérisation des matériaux étudiés dans le cadre de ce travail sera présentée. Ensuite, les procédures des différents essais au laboratoires mis en œuvre seront détaillées notamment les essais de mesure de perméabilité à charge constante à l'aide du tube de Mariot, les essais granulométriques, les essais tensiométriques visant à évaluer les courbes de rétention d'eau dans les matériaux granulaires.

CHAPITRE 2

MATERIAUX ETUDIES
ET TECHNIQUE
EXPERIMENTALES

CHAPITRE 2 : MATERIAUX ETUDIÉS ET TECHNIQUE EXPERIMENTALES

2.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord une description des matériaux étudiés, puis les essais utilisés pour la caractérisation de ces matériaux. Ensuite, nous décrivons les dispositifs expérimentaux utilisés ainsi que les procédures d'essais réalisés

2.2. Description des matériaux étudiés

Afin de mieux interpréter les résultats expérimentaux, une caractérisation des matériaux est nécessaire. Dans cette étude dix types des sables ont été testés (Figure 2.1). Le sable (type 1) est ramené de la région (el khanga -biskra), et le sable (type 2) est ramené de la région (liwa), et les deux type (3 et 4) ont été ramenés de la région (zriba), les sables (5et7) sont ramenés de la région(meniaa), le sable (6) est ramené de la région (Hassi Mesaoud), et les deux type (8 et 10) ont été ramenés de la région de Constantine et le type (9) nous l'avons eu du mélange entre les deux types (4 et 8). La Figure (2.1) présente une vue des différents sables testés.



Figure 2. 1 Vue des dix types de sable étudiés

2.3. Méthodes de caractérisation des matériaux étudiés

Afin de caractériser ces matériaux les essais d'identification suivants ont été mis en œuvre :

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

(3) Mesures de perméabilité à charge constante.

Ces essais sont décrits dans la suite de cette section.

2.3.1. Analyses granulométriques

Pour bien décrire un sol, il faut donc connaître sa granulométrie, c'est-à-dire la répartition des particules en fonction de leurs diamètres équivalents. Deux essais de laboratoire sont couramment utilisés pour déterminer la granulométrie des sols (Figure 2.1) :

- l'analyse granulométrique par tamisage ;
- l'analyse granulométrique par sédimentation.

a. Analyse granulométrique par tamisage

Pour déterminer la granulométrie d'un sol, on utilise une méthode de tamisage en laboratoire. Les tamis sont empilés les uns sur les autres dans un ordre croissant, en commençant par un récipient à fond plein pour recueillir les éléments les plus fins. Un couvercle est placé sur le dessus pour éviter la dispersion des poussières (voir Figure 2.2). On procède au tamisage en versant le matériau sec sur les tamis, et le tamisage est effectué. On récupère ce qui reste sur le premier tamis, appelé "refus", ainsi que ce qui passe à travers le tamis, appelé "tamisât". Une partie du tamisât est retenue à chaque tamis, tandis qu'une autre partie passe à travers. Ce processus se répète jusqu'au dernier tamis, qui laisse passer les éléments inférieurs à 0,08 mm. Si le tamisage est effectué manuellement, les tamis sont secoués pour faire passer la partie du matériau dont le diamètre est inférieur à celui du tamis. Les résultats obtenus sont ensuite représentés sur un graphique semi-logarithmique, permettant de construire une courbe granulométrique.

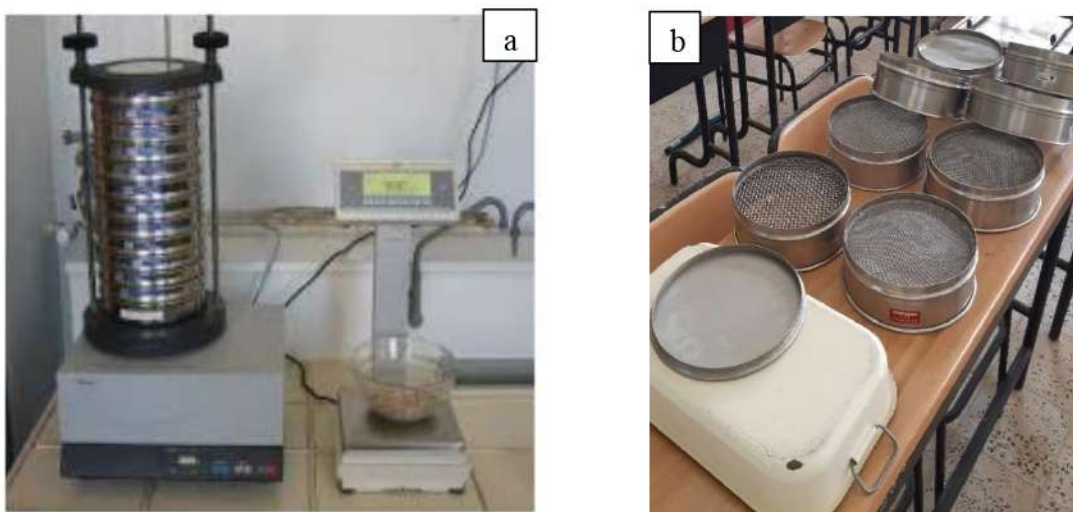


Figure 2. 2 Analyse granulométrique. a) Tamiseuse. b) Série des tamis utilisés

b. Analyse granulométrique par sédimentométrie :

Comme il est connu que la granulométrie se fait par tamisage jusqu'aux grains de 80µm de diamètre et la sédimentométrie se fait sur la fraction inférieure à 80µm c'est une méthode couramment utilisée pour déterminer la distribution des tailles de particules dans un échantillon de sol. Cette technique est basée sur le principe de la décantation des particules dans un liquide en fonction de leur poids et de leur taille. Dans le processus de sédimentation, l'échantillon de sol est dispersé dans un liquide de densité connue, généralement de l'eau. Les particules plus grosses se déposent plus rapidement que les plus petites, ce qui permet de séparer les différentes fractions granulométriques. Et en enregistrant le temps de chute des particules dans une colonne d'eau, et on calcule la vitesse de sédimentation, c'est-à-dire la vitesse à laquelle les particules se déposent.

Dans le cadre de ce travail on s'est limité à réaliser seulement l'analyse granulométrique par tamisage étant donné que la quantité des particules fines inférieure à 80µm était très faible (Figure 2.3).

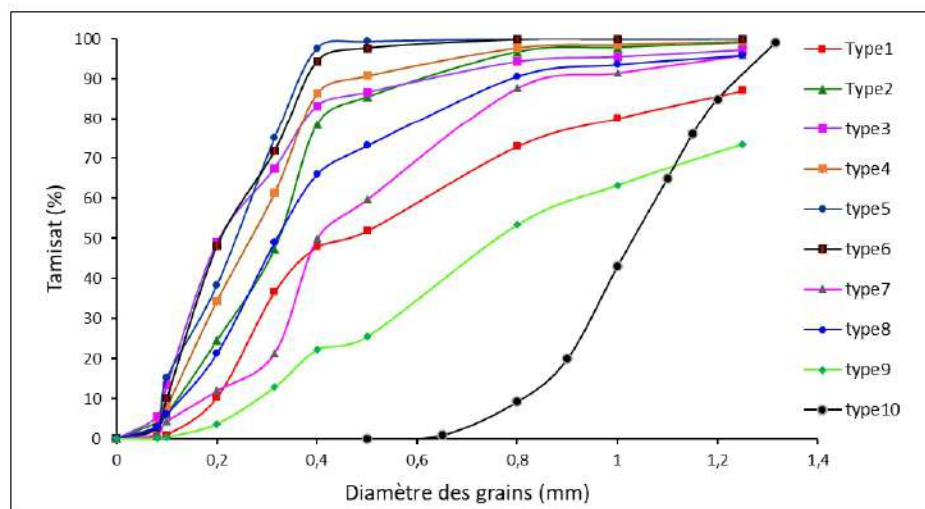


Figure 2. 3 Courbes granulométriques des sables étudiés.

2.3.2. 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

Nous déposons soigneusement une couche de sable dans le moule à l'aide d'une cuillère, puis secouons le moule à l'aide d'un petit marteau. Ce processus est répété jusqu'à ce que le moule soit complètement rempli, et avec une règle, nous éliminons l'excédent de matériau sur le dessus du moule (voir Figure 2.4). Ensuite, nous pesons l'échantillon sur la balance et extrayons la valeur de l'indice des vides minimum (e_{\min}) à travers la loi suivante :

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

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

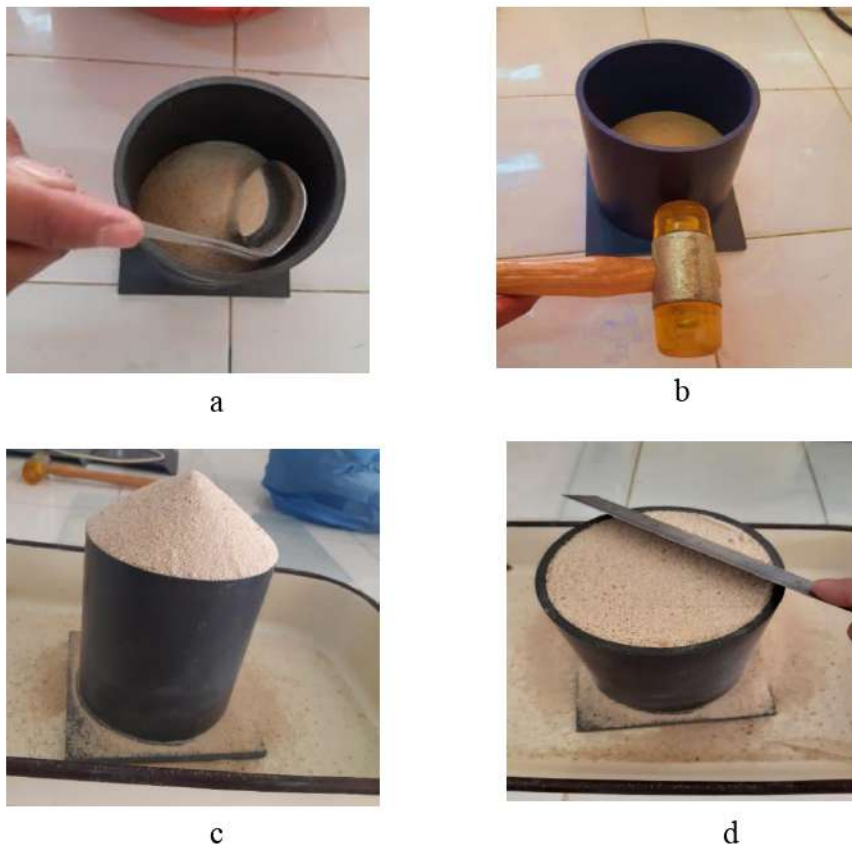


Figure 2. 4 Préparation de l'essai pour la détermination de l'indice

- a) Disposition Meticuleuse d'une Couche de Sable dans le Moule b) Secousses du Moule avec un Petit Marteau c) remplissage du moule d) Élimination de l'Excédent sur le Moule

b. Indice des vides maximum

Pour réaliser l'essai de détermination de l'indice des vides maximum, la procédure suivante est adoptée. Initialement, l'entonnoir en verre est positionné au fond du moule. Ensuite, l'échantillon de sable est soigneusement versé dans l'entonnoir, suivi d'un soulèvement progressif de ce dernier, en veillant à ce qu'il reste constamment rempli d'échantillon jusqu'à la conclusion de l'expérience (voir Figure 2.5). Une fois l'entonnoir retiré délicatement, l'échantillon est pesé sur une balance, et la valeur de l'indice des vides maximum (e_{max}) est ensuite extraite en utilisant la relation fournie dans la loi (2-3).



Figure 2.5 Préparation de l'essai pour la détermination de l'indice des vides maximum
(a) Versement de sable par l'entonnoir. (b) Élimination de l'Excédent sur le Moule.

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

Tableau 2. 1 . Caractéristiques des matériaux étudiés

Sable	$d_{g50}(\mu m)$	Cu	Distribution	e_{min}	e_{max}	$\rho_s(t/m^3)$
Type1	325	2,852459	Étalée	0,45	0,75	2,65
Type2	205	2,888889	Étalée	0,46	0,75	2,65
Type3	185	1.5	Étalée	0,46	0,79	2,65
Type4	239	3	Étalée	0,46	0,75	2,65
Type5	320	2,820313	Étalée	0,42	0,74	2,65
Type6	205	2,6	Étalée	0,47	0,77	2,65
Type7	370	2,85	Étalée	0,44	0,74	2,65
Type8	350	3,021	Étalée	0,47	0,75	2,65
Type9	420	2.47	Étalée	0,41	0,72	2,65
Type10	1020	1.53	Uniforme	0.56	0.80	2.65

2.4. Dispositif de mesure de perméabilité :

Le dispositif de mesure de perméabilité à charge constante, mis en œuvre dans le cadre de ce travail, est basé sur le principe du tube de Mariotte. Le tube de Mariotte est un récipient qui est fermé 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 (Figure 2.6). Dans le dispositif montré sur la Figure (2.6b), la plaque de métal fait un joint hermétique au sommet du cylindre en plastique par l'intermédiaire d'un joint en caoutchouc graissé, et le tube d'entrée traverse la plaque par l'intermédiaire d'un raccord de compression qui scelle avec un joint. La pression au fond du tube d'entrée est toujours la pression atmosphérique, mais la pression à l'intérieur du trou de sortie dépasse la pression atmosphérique. Dès que l'eau commence à sortir du trou de sortie, la pression à l'intérieur du récipient diminue, entraînant une chute de la pression au fond du tube d'entrée au-dessous de la pression atmosphérique. Cela provoque l'entrée d'air dans le tube, en maintenant la pression au fond du tube à la pression atmosphérique. Ainsi, tant que le niveau d'eau à l'intérieur du cylindre est au-dessus du fond du tube d'entrée, la pression au niveau du trou de sortie restera constante. L'air qui entre dans le système fait des bulles depuis le bas du tube jusqu'à l'espace situé en haut du cylindre, comme vous pouvez le voir sur la Figure (2.6 a).

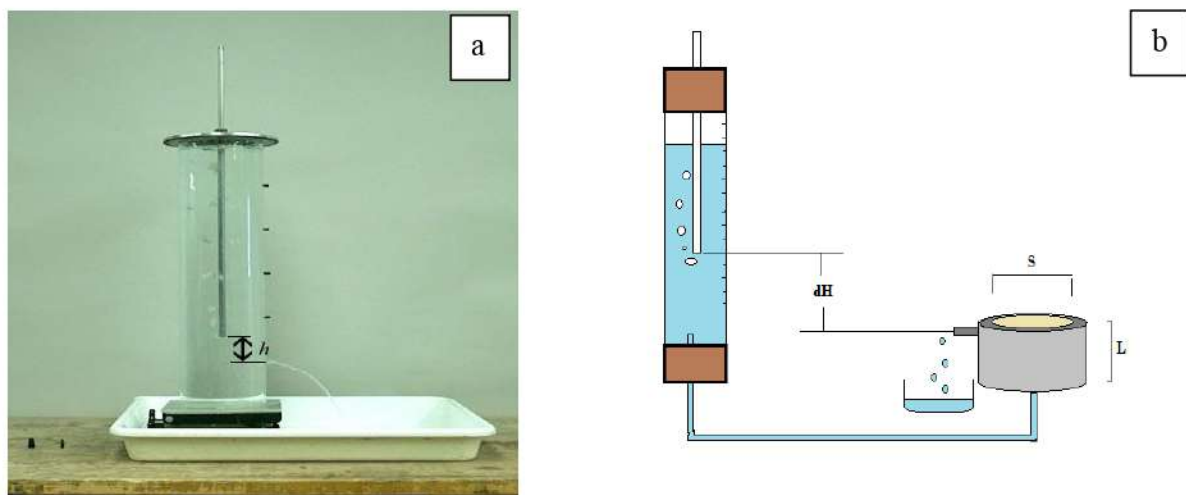


Figure 2. 6 Présentation de tube de mariotte

Dans ce dispositif, le tube de Mariotte permet, d'avoir une charge constante, est branché au système de drainage de la cellule œdométrique. Une pierre poreuse est placée sur les parties inférieure et supérieure de l'éprouvette afin de faciliter la sortie de l'eau. Les mesures de volume d'eau entrant dans l'éprouvette sont effectuées dans chaque intervalle de temps à l'aide d'un tube gradué (Figure 2.7).



A : compactage de l'échantillon pour assurer l'état de densité



B : Fermeture de la cellule



C : Installation de la cellule dans le dispositif



D : Remplissage du tube de Mariotte avec de l'eau



E : mesure de la perméabilité

Figure 2. 7 Présentation des différentes étapes de la mesure de perméabilité.

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

2.5.1. Méthode tensiométrique

L'estimation de la taille des pores est réalisée en analysant les courbes de rétention d'eau, en particulier la courbe de séchage. Le modèle d'écoulement sous-jacent suppose l'existence d'un réseau de pores composé de tubes cylindriques parallèles, où l'écoulement de l'eau se produit dans la direction de l'axe des cylindres. Cette hypothèse correspond au chemin de séchage,

lorsque les pores sont initialement remplis d'eau liquide (Figure 2.8 b). Lorsqu'il s'agit du mouillage des pores, la condensation de la vapeur d'eau présente à l'intérieur se produit par la formation de ménisques cylindriques le long des parois des pores (Figure 2.8 a). Ces courbes sont déterminées par la mesure tensiométrique de la succion (Delage and Cui, 2000). La méthode tensiométrique est une technique utilisée pour mesurer la pression négative de l'eau sous tension. Elle fonctionne de manière similaire aux mesures de pression positive, mais nécessite l'utilisation d'une fine pierre poreuse en céramique. Cette pierre doit rester saturée en tout point de succion et garantir la continuité de l'eau entre le sol non saturé et le tube, qui doit rester rempli d'eau. Il est essentiel que la pierre céramique soit parfaitement saturée d'eau désaérée pour assurer le bon fonctionnement du tensiomètre. La mesure maximale de succion réalisable dépend de la capacité maximale de pression négative que la pierre céramique peut supporter, car au-delà de sa capacité, la pierre risque de se désaturer. Lors des essais effectués par Feia et al., une pierre céramique d'une capacité de 50 kPa a été employée, ce qui s'est avéré amplement adéquat pour examiner en détail les caractéristiques de rétention d'eau d'un sable.

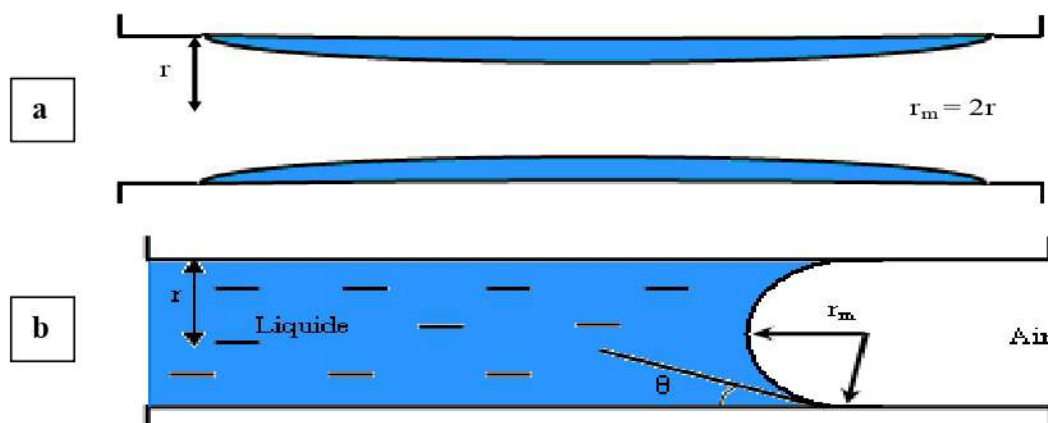


Figure 2. 8 Schéma explicatif des processus de séchage et mouillage dans le réseau poreux constitué de cylindres de rayon r , (r_m est le rayon du ménisque de l'interface air-eau) (d'après(Do, 1998) a). Processus de mouillage. b) Processus de séchage

2.5.2. Programme expérimental

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

en enregistrant les variations correspondantes de la teneur en eau. Le niveau d'eau dans le tube gradué est maintenu plus bas que celui de l'échantillon afin de créer une succion dans le sol. Après l'établissement de l'équilibre hydrique, cela entraîne une variation du niveau d'eau dans le tube gradué. Au vu de la surface relativement petite du tube gradué, on peut négliger la quantité d'eau évaporée pendant l'équilibre hydrique. En lisant les changements de niveau d'eau dans le tube, il est possible de déterminer le volume d'eau échangé entre le sol et le tube. En appliquant différents niveaux successifs de succion, il devient possible de générer des courbes de rétention d'eau pour les processus d'humidification et de séchage. Le tube est gradué avec une résolution de 1mm, la précision de la mesure de volume d'eau dans le tube (diamètre 7mm) est donc d'environ 40 mm^3 , ce qui est négligeable en comparaison du volume poreux de l'éprouvette de sol (environ 57000 mm^3).

A partir de la courbe de rétention d'eau (courbe de séchage) et en appliquant la loi de Jurin (équation 2-4) qui permet d'exprimer la succion en fonction du rayon d'accès des pores, on peut évaluer la distribution de la taille des pores.

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

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 $\sigma_s 72,75 \times 10^{-3} \text{ N/m}$

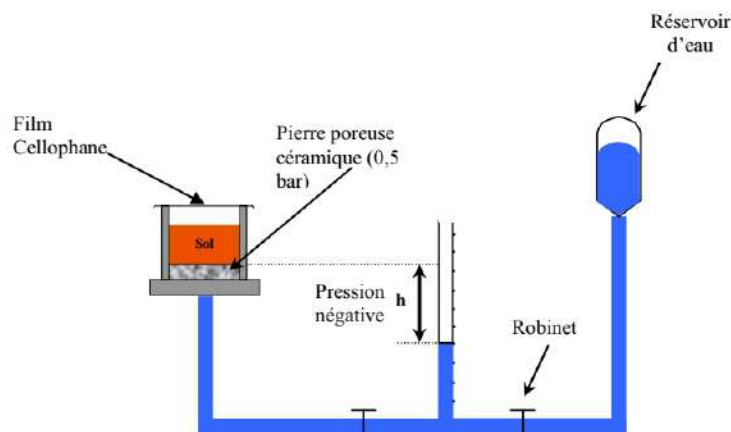


Figure 2. 9 Schéma explicatif de principe de la méthode tensiométrique de mesure de la succion (Feia *et al.*, 2014)

Afin de calibrer le modèle développé dans le cadre de notre étude des courbes de rétention obtenues à l'aide de l'essai tensiométrique sont nécessaires. Des données expérimentales issues des travaux de (Feia *et al.*, 2014) ont été donc utilisées.

2.6. Endommagement des grains et son influence sur la courbe de rétention d'eau d'un sable soumis à des fortes contraintes

Les sols granulaires sont largement utilisés dans diverses applications du domaine du Génie Civil. Ils se rencontrent à la fois sous forme naturelle, tels que les sables et les graviers présents dans les lits de cours d'eau, et sous forme artificielle, tels que les ballasts ferroviaires et les enrochements utilisés dans la construction des barrages. Les sols granulaires artificiels sont généralement obtenus par le concassage de roches extraites des carrières. L'étude du comportement hydromécanique des sols granulaires revêt une importance fondamentale dans le développement et l'application des méthodes de conception utilisées dans les ouvrages géotechniques actuels. Ces méthodes englobent des calculs liés aux fondations des bâtiments, à la stabilité des pentes, ainsi qu'à la construction de remblais et de digues. Outre ces domaines, la mécanique des matériaux granulaires trouve également des applications dans d'autres domaines tels que la fabrication de matériaux de construction, comme le béton, les technologies des poudres dans les industries pharmaceutique ou agro-alimentaire, ainsi que le traitement des agrégats de roche dans les activités minières. La compréhension approfondie du comportement hydromécanique de ces matériaux permet ainsi d'améliorer les pratiques et de garantir la sécurité et la durabilité des structures géotechniques. En outre, sous certaines conditions, les forces de contact inter-granulaires peuvent dépasser la résistance à l'écrasement des grains et provoquer la rupture d'une fraction des particules. En général, la rupture des grains, se produit dans des sols granulaires sous fortes contraintes, comme en pointe des pieux, sous des barrages de grande hauteur, aux zones de forte injection d'eau dans les puits pétroliers ou bien quand les matériaux sont composés de grains à faible résistance. Le phénomène d'écrasement des grains implique une réduction de la taille des grains et un étalement de la granulométrie, ce qui génère un arrangement plus dense. Ce phénomène peut conduire à la production d'une quantité significative de particules fines. Plusieurs facteurs influent sur ce phénomène tels que ; la granulométrie, état des contraintes appliquées, la minéralogie des grains, la forme des grains, teneur en eau la succion...etc. Lorsque les grains de sable subissent des charges ou des contraintes excessives, ils peuvent se briser ou se déformer, entraînant une diminution de la taille des pores. Cela peut avoir un impact significatif sur la perméabilité et la succion du matériau, car des pores plus petits réduisent

la capacité du fluide à circuler à travers le sol. Dans ce contexte nous essayons à étudier l'influence d'écrasement des grains sur la courbe de rétention d'eau.

La rupture dans les matériaux granulaires a été étudiée par de nombreux chercheurs, qui ont réalisé des travaux expérimentaux, théoriques et numériques, sur différents matériaux et par des différentes méthodes. (Dadda *et al.*, 2015) ont effectué des essais œdométriques à haute pression sur le sable carbonaté et le sable d'Hostun afin d'étudier l'évolution du comportement mécanique et hydraulique d'un sable soumis à de fortes contraintes. Ils ont trouvé que le pourcentage des particules fines augmente avec l'augmentation de chargement, et ils ont trouvé une diminution de la porosité et la perméabilité avec l'augmentation du chargement.

2.6.1. Programme expérimental et procédures d'essais

Nous présentons dans cette section le sable étudié et le dispositif expérimental utilisé. Nous décrivons également de manière succincte les procédures de l'essai réalisé et expliquons les raisons justifiant son utilisation.

2.6.1.1. Caractérisation de sable étudié

Les distributions granulométriques des trois types des sables utilisés sont illustrées à la Figure 2.10 ci-dessous

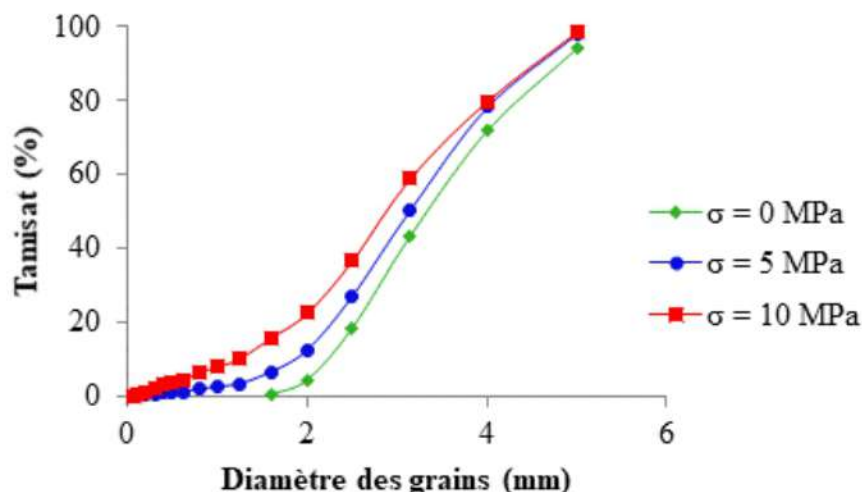


Figure 2. 10 L'évolution de la courbe granulométrique en fonction de contrainte de sable étudié.

Tableau 2. 2 Les propriétés du sable examiné exposé à différentes contraintes

Contrainte (MPa)	Dg ₅₀ (mm)	C _u	ρ (g/cm ³)
σ = 0	0.350	1,62	2.65
σ = 5	0.315	1,94	2.65
σ = 10	0.290	2.4	2.65

2.6.1.2. Préparation de l'éprouvette

Il y a diverses méthodes disponibles pour préparer des échantillons de sable en laboratoire, et ces méthodes peuvent être regroupées en deux catégories selon (Butterfield and Andrawes, 1970).

- Les méthodes où la densité est ajustée après la déposition, pour des éprouvettes denses.
- Les méthodes où la densité est contrôlée pendant la déposition, pour n'importe quelle densité.

La méthode utilisée dans ces essais consiste à placer le sable dans la cellule par couches tout en vérifiant la densité. Afin d'atteindre la densité souhaitée lors de la mise en place du sable, nous avons tenté de vibrer l'éprouvette plutôt que de recourir au compactage dynamique, qui pourrait endommager les grains. La Figure 2.11 montre les principales étapes pour la préparation des éprouvettes pour l'essai œdométrique.



Figure 2. 11 Préparation d'un échantillon de sable, a) versement d'une petite quantité pour former une couche, b) compactage et vibration, c) vérification de la densité.

2.6.2. Dispositifs expérimentaux

- Dispositif œdométrique à haute pression :

La Figure 2.12 illustre l'essai fondamental d'oedomètre tel qu'introduit par Terzaghi en 1925.(Terzaghi, 1925).

Dans notre étude les essais sont réalisés à l'aide d'un œdomètre à double bras de levier qui permet d'atteindre des pressions très élevées (110 MPa). Les essais sont réalisés sur une cellule œdométrique de 50 mm de diamètre et de 40 mm de hauteur. La déformation axiale est mesurée par un capteur de déplacement électronique installé en haut du bâti et relié avec un système d'acquisition la Figure (2-13) montre le dispositif œdométrique utilisé.

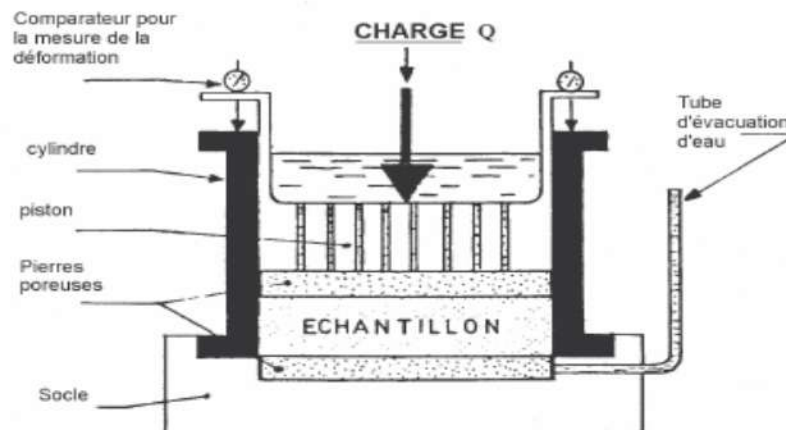


Figure 2. 12 Essai principal de l'oedomètre(Terzaghi, 1925)



Figure 2. 13 Dispositif œdométrique à haute pression

2.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous détaillons les caractéristiques des matériaux étudiés, ainsi que les techniques et procédures expérimentales adoptées dans le cadre de cette étude. Nous avons utilisé une méthode expérimentale basée sur le tube de Mariotte pour évaluer la perméabilité de chaque type de sable utilisé. De plus, nous avons présenté une autre technique expérimentale permettant d'évaluer la distribution de la taille des pores dans un matériau granulaire, en se basant sur les courbes de rétention d'eau obtenues par une méthode tensiométrique. Pour cela, nous avons appliqué la loi Young-Laplace, qui permet de relier la succion à la taille des pores. Enfin, nous avons exposé le dispositif utilisé pour les essais œdométriques à haute pression. Ces différentes méthodes expérimentales nous ont permis d'obtenir des données précieuses sur les propriétés de perméabilité

Dans le chapitre suivant, nous examinerons l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus à partir du dispositif de perméabilité, ainsi que leur analyse et interprétation. Nous mettrons en évidence la corrélation expérimentale entre la perméabilité, le diamètre moyen et l'indice de densité. De plus, nous présenterons la formulation du modèle proposé et son application aux matériaux granulaires, ainsi qu'aux matériaux soumis à de fortes contraintes. Enfin, nous procéderons à une analyse approfondie des résultats afin d'en tirer des conclusions significatives.

CHAPITRE 3
PRESENTATION ET
ANALYSE DES
RESULTATS

CHAPITRE 3 : PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS

3.1. Introduction

Comme il a été cité auparavant dans ce document, l'objectif de ce travail est d'étudier les méthodes d'évaluation des paramètres physiques des matériaux granulaires difficiles à évaluer au laboratoire par les essais classiques et de trouver des corrélations basées sur des données expérimentales reliant ces paramètres physiques notamment la taille d'accès aux pores et la perméabilité. En effet, l'écoulement des fluides dans un milieu poreux est gouverné non seulement par la taille des grains ou bien par la porosité comme évoqué dans plusieurs recherches (Hazen, 1892; J. Kozeny, 1927; Carman, 1938; Carman and C., 1956; Ducan, Featherman and Ducan, 1972; David *et al.*, 1994; Chapuis and Aubertin, 2004) l'écoulement des fluides dans un milieu poreux est influencé par plusieurs paramètres tels que : propriétés du milieu poreux (porosité, perméabilité, taille et forme des grains, taille et forme des pores) et l'état de contrainte qui lui est appliqué.

Dans ce chapitre, trois volets capitaux ont été étudiés à savoir : (1) Corrélation expérimentale entre la perméabilité d'un matériau granulaire et ses caractéristiques physiques ; (2) Développement d'un modèle analytique qui prédit les courbes de rétention d'eau des matériaux granulaire à partir des courbes granulométriques ; (3) Application du modèle proposé sur un matériau granulaire soumis à des fortes contraintes et analyse des résultats.

Nous présentons donc tout d'abord l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus sur le dispositif de la perméabilité ainsi que l'analyse et les interprétations de ces résultats et la corrélation expérimentale entre la perméabilité, le diamètre moyen et l'indice de densité et nous présentons aussi la formulation du modèle proposé et son application sur les matériaux granulaires et l'analyse des résultats

3.2. Corrélation expérimentale entre la perméabilité d'un matériau granulaire et ses caractéristiques physiques

3.2.1. Introduction

Il est connu que la perméabilité est liée à la distribution granulométrique des milieux poreux granulaires (Shepherd, 1989). Cette interrelation est très utile pour l'estimation des valeurs de la perméabilité lorsqu'il n'y a pas de moyen de mesure de cette dernière au laboratoire, comme dans les premiers stades des études de l'exploration d'un aquifère, à la fois dans la zone saturée et insaturée, et dans les études de transport de polluants solubles

dans l'eau dans le sol ...etc. Une estimation précise du coefficient de perméabilité dans l'environnement sur le terrain par les méthodes de terrain est limitée par le manque de connaissance précise de la géométrie des aquifères et des limites hydrauliques (Aubertin et al., 2003). Les opérations et la construction de puits associés peuvent également être prohibitives. Les tests de laboratoire, d'autre part, posent d'énormes problèmes en ce qui concerne l'obtention d'échantillons représentatifs et, très souvent, de longues durées de test. Alternativement, des méthodes d'estimation de la conductivité hydraulique à partir de formules empiriques basées sur les caractéristiques de distribution granulométrique ont été développées et utilisées pour résoudre ces problèmes. Les méthodes d'estimation de la perméabilité basées sur les données issues de la granulométrie sont comparativement moins chères et ne dépendent pas de la géométrie et des limites hydrauliques de l'aquifère.

De nombreux chercheurs ont étudié cette relation et ont abouti à plusieurs formules basées sur des travaux expérimentaux. (J. Kozeny, 1927) a proposé une formule qui a ensuite été modifiée par (Carman, 1938; Carman and C., 1956) pour devenir l'équation de Kozeny-Carman. (Hazen, 1892; Terzaghi, 1925; Shepherd, 1989; Alyamani and Şen, 1993) ont fait d'autres tentatives, mais sans prendre en considération l'état de densité du sol.

Cependant, à notre avis, la perméabilité n'est pas uniquement régie par les caractéristiques de la courbe granulométrique des sables ou la porosité de l'éprouvette. Nous considérons qu'elle est plutôt liée à la densité du matériau et à la taille des grains simultanément. En d'autres termes, la perméabilité d'un matériau granulaire est principalement influencée par la taille d'accès aux pores, laquelle peut être exprimée à travers ces deux paramètres ; une densité et une taille des grains.

Dans cette section, une étude expérimentale a été menée, impliquant une série de mesures de perméabilité sur différentes éprouvettes reconstituées en laboratoire, présentant diverses granulométries et différents indices de densité. L'objectif principal de cette étude est d'avoir une corrélation expérimentale qui permet de relier la perméabilité avec la taille moyenne des grains et l'état de densité des matériaux granulaires.

3.2.2. 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; 0.8; 0.65; 0.45) sur différents types de sable. L'indice de densité est défini par l'équation (3-1) :

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

3.2.2.2. 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 (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.

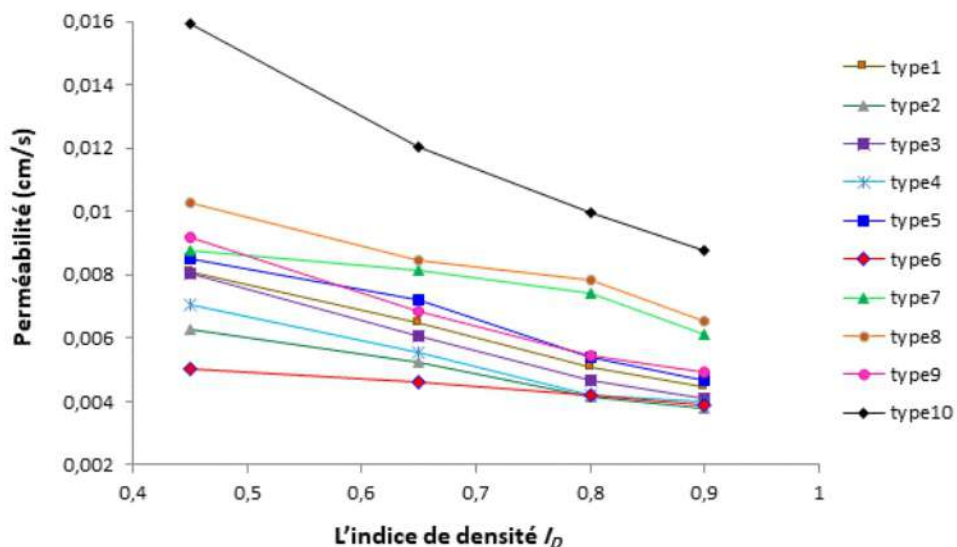


Figure 3. 1 Perméabilité des sables en fonction de l'indice de densité.

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; 0.8; 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.

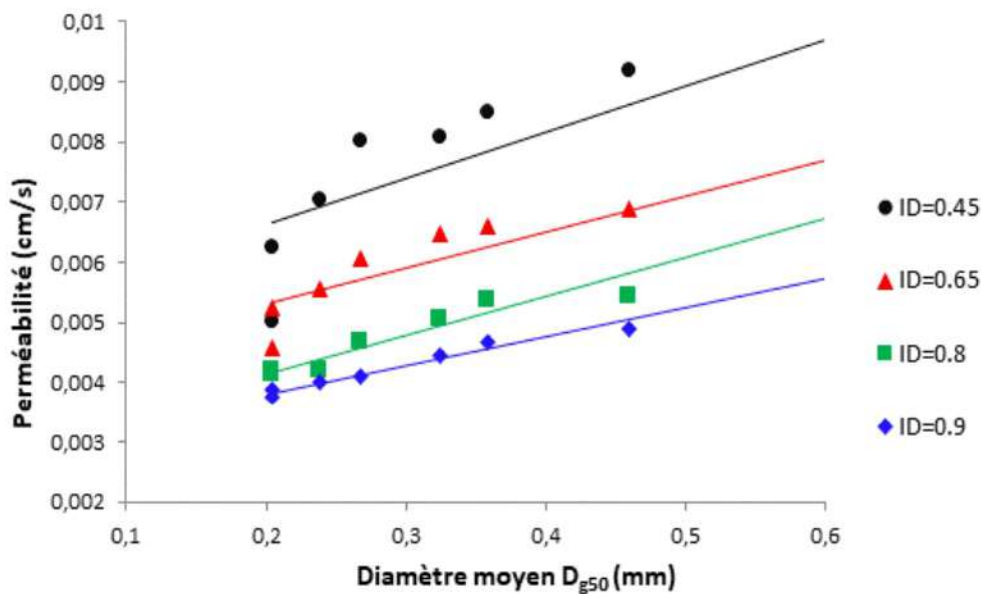


Figure 3. 2 Perméabilité des sables en fonction de diamètre moyen D_{g50} .

3.2.3. Corrélation entre la perméabilité, le diamètre moyen et l'indice de densité

Cette série de mesures de perméabilité vise à établir une corrélation expérimentale entre la perméabilité, la taille des grains 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 difficile à estimer par des essais classiques en laboratoire, nous cherchons à corréler cette caractéristique avec deux paramètres physiques du sable facilement mesurables au laboratoire : l'indice de densité et la taille des grains, l'idée donc est venue pour essayer de corréler ces deux paramètres avec la perméabilité d'un matériau granulaire.

En analysant les données expérimentales présentées ci-haut nous observons que les tendances des courbes obtenues sont de forme linéaire (équation 3-2)

$$y = ax + b \tag{3-2}$$

Afin d’obtenir une relation généralisée qui relie la perméabilité avec l’indice de densité I_D et le diamètre moyen D_{g50} des grains nous avons ploté l’évolution du paramètre « a » ainsi que le paramètre « b » en fonction de l’indice de densité I_D . Les résultats sont présentés sur la Figure (3.3).

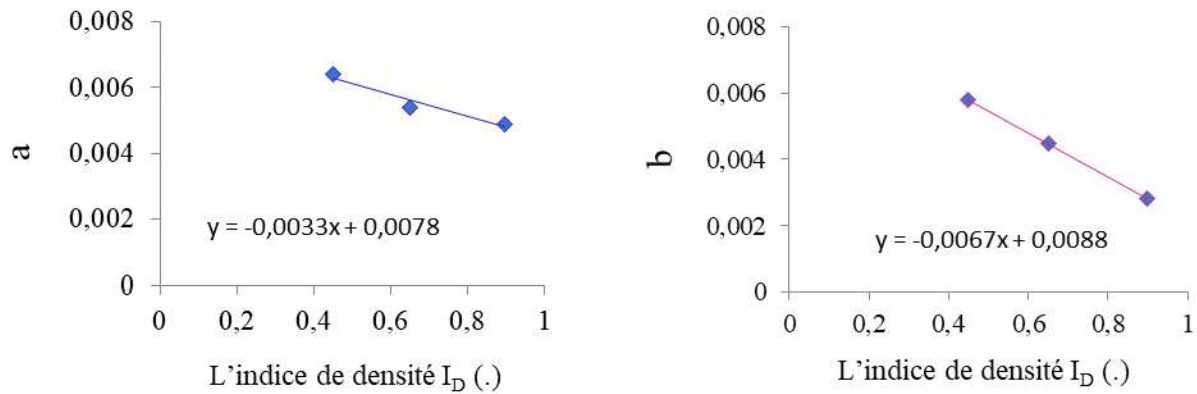


Figure 3. 3 Évolution du paramètre « a » et le paramètre « b » en fonction de l’indice de densité I_D

Les évolutions de ces paramètres sont à leurs tours de forme linéaire. En intégrant les deux équations de tendance, obtenues par ségrégation linéaire à l’aide de l’Excel, dans l’équation (3-2) nous obtenons la relation de la perméabilité avec l’indice de densité et la taille moyenne des grains recherchée l’équation (3-3) :

$$k = 10^{-2}[(+0.7 - 0.3I_D)D_{g50} + (-0.6I_D + 0.8)] \tag{3-3}$$

Cette relation permet aux modélisateurs d’avoir une estimation de la valeur de la perméabilité k d’un matériau granulaire en connaissant juste son diamètre moyen des grains 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 paravant, 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, la taille d’accès aux pores peut être évalué par des essais non conventionnels. On peut citer l’essai tensiometrique (Feia et al. 2014) qui permet à travers la loi du Jurin (équation 2-4) reliant la taille d’accès aux pores à la succion des matériaux granulaires) d’avoir une distribution de la taille d’accès pores à partir des courbes de rétention

d'eau. Or, cet essai, bien que simple à mettre en œuvre, n'est pas disponible dans tous les laboratoires de mécanique des sols. Pour cela, dans le cadre de ce travail, un modèle semi analytique permettant d'avoir les courbes de rétention d'eau à partir des paramètres physiques simple à évaluer au laboratoire a été développé.

Dans la prochaine section, nous présentons en détail ce modèle avec sa validation à l'aide des données expérimentales trouvées dans la littérature.

3.3. Présentation du modèle proposé sur les matériaux granulaires

3.3.1. Introduction

Cette partie a fait l'objet d'une publication dans « *Studia Geotechnica et Mechanica* » : Bouacida, L., Feia, S., Denine, S., Della, N. (2022). An analytical model to predict water retention curves for granular materials using the grain-size distribution curve. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 44(4); 354–369. doi.org/10.2478/sgem-2022-0025.

Au cours des dernières années, plusieurs études ont été menées dans le but de souligner l'importance de la succion matricielle dans les sols insaturés ([Jamagne et al., 1977](#); [Gupta and Larson, 1979](#); [Rawls and Brakensiek, 1982](#); [Jong, CA and Nicholaichuk, 1983](#); [Saxton et al., 1986](#); [Vereecken et al., 1989](#); [Bastet et al., 1997](#); [Lilly et al., 1997](#); [Bigorre F, 2000](#); [Wösten, Pachepsky and Rawls, 2001](#); [Dexter and Bird, 2001](#); [Nêmes, 2002](#); [Nemes, 2003](#); [Pachepsky and W.J, 2003](#); [Tomasella et al., 2003](#); [Morvan et al., 2004](#); [Bruand and Cousine, 2006](#); [Minasny, Mcbratney and Bristow, 2006](#)).

En effet, au cours des dernières années, divers modèles représentant la relation entre les caractéristiques de base du sol et la succion du sol ont été développés ([van Genuchten, 1980](#))([Fredlund and Rahardjo, 1993](#))([Garbulewski and Zakowicz, 1995](#))([Georgiadis, Potts and Zdravkovic, 2005](#))([Rojas, 2008](#)).

Un grand nombre de ces modèles utilisent plusieurs paramètres qui peuvent être évalués à l'aide de la courbe de distribution granulométrique complète, ce qui rend même les applications géotechniques simples très compliquées. En outre, la plupart de ces modèles sont développés pour les sols cohérent et pour les rouches. Très peu de modèle sont disponibles dans la littérature pour les matériaux granulaires.

Dans le présent travail un modèle semi-analytique basé sur le modèle de rétention d'eau de van Genuchten (1980) destiné pour les matériaux granulaires a été développé. Il a été établi dans le but d'étudier les paramètres de rétention d'eau des sols sableux, avec l'introduction de quelques

simplifications et améliorations sur divers points. Une approche semi-statistique, utilisant les caractéristiques clés d'un matériau granulaire, a été utilisée dans ce modèle pour la prédiction des courbes de rétention d'eau basées sur la distribution granulométrique, utilisant uniquement le coefficient d'uniformité C_u et l'effet de l'indice de densité I_D sur la courbe de rétention d'eau a également été étudié.

La validation de ce modèle a été effectuée à l'aide des données expérimentales trouvées dans la littérature (Feia *et al.*, 2014).

Pour déterminer les propriétés hydrauliques à utiliser dans cette modélisation, un calage des paramètres du modèle a été effectué. La première étape implique l'estimation des valeurs des paramètres du modèle et l'ajustement des courbes de rétention. Ensuite, une analyse approfondie de ces paramètres a été effectuée, et la sensibilité de la courbe de rétention aux variations de ces paramètres d'ajustement a été examinée en détail.

Le modèle proposé a été utilisé pour prédire les courbes de rétention d'eau, sans avoir besoin d'effectuer des essais au laboratoire, en utilisant deux paramètres qui sont le coefficient d'uniformité C_u et l'indice de densité I_D .

1.1.1 3.3.2. Présentation de modèle proposé

3.3.2.1. Equation de la courbe de rétention d'eau de modèle de van Genuchten

On se basant sur le modèle de van Genuchten (van Genuchten, 1980) le degré de saturation effective est donné par l'équation suivante :

$$S_e = \left(1 + \left(\frac{s}{\alpha}\right)^n\right)^{\frac{1}{n}-1} \quad (3-4)$$

Sachant que le degré de saturation effectif est défini comme le volume d'eau remplissant partiellement la microporosité du sol. Ce degré de saturation effectif définit la proportion de la succion dominante qui contribue réellement à la contrainte effective.

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

3.3.2.2. Formulation du modèle proposé

(Terzaghi, Peck and Mesri, 1996) ont révélé que les trois tailles de grains d_{10} , d_{30} et d_{60} relatives respectivement à 10%, 30% et 60% du passage dans les tamis correspondants, sont les tailles de particules les plus importantes couramment nécessaires pour la description et la classification

des sols. De plus, il est bien connu que la forme de la distribution granulaire peut être déterminée en utilisant le coefficient de courbure C_c et le coefficient d'uniformité C_u , en plus d'une mesure de la taille moyenne des particules D_{50} .

En outre, il faut souligner que l'analyse dimensionnelle, qui est basée sur le Pi-théorème de Buckingham (Buckingham, 1914), est largement utilisée dans l'analyse technologique et dans la résolution de problèmes de science appliquée dans le but d'identifier les facteurs essentiels et de simplifier les relations physiques. En ce qui concerne les courbes de rétention d'eau, il est important de savoir que le degré de saturation effectif (S_e) dépend de la distribution granulométrique et de la succion et par conséquent, il peut être exprimé en fonction des grandeurs suivant : C_u , C_c , D_{60} , et γ . Le paramètre γ est un paramètre du modèle. En outre, le théorème de Pi de Buckingham peut alors être appliqué et S_e peut être simplifié et écrit sous la forme suivante :

$$S_e = f(C_u, D_{60}, I_D, s, \alpha, \gamma) \quad (3-5)$$

De plus, selon (Ji Peng *et al.*, 2017) le paramètre C_c est directement dépendant de C_u , qui est lui-même un paramètre physique dépendant de D_{60} . Ainsi, l'expression précédente peut être simplifiée de la manière suivante :

$$S_e \approx f' \left(C_u, \frac{s C_u}{\gamma} \right) \quad (3-6)$$

D'autre part, en utilisant la succion normalisée ($s^* = s \cdot C_u / \gamma$) et l'équation normalisée ($\alpha = \alpha \cdot C_u / \gamma$), l'équation de van Genuchten peut être réécrite comme suit :

$$S_e = \left(1 + \left(\frac{s^*}{\alpha^*} \right)^n \right)^{\frac{1}{n}-1} \quad (3-7)$$

Pendant le processus de séchage, il a été observé que le degré de saturation reste constant et égal à 1 jusqu'à ce que la succion atteigne la valeur d'entrée d'air (AEV) (Fredlund, 1997 ; Vanapalli, Wright et Fredlund, 2000). Ensuite, à mesure que l'intensité de la succion augmente, le niveau de saturation diminue de manière significative, entraînant le vidage des grands pores tandis que les petits demeurent remplis d'eau. Cela conduit à une transition où les phases eau et air deviennent continues. De plus, il a été noté que la phase d'eau persiste sous forme de ponts d'eau isolés et de couches d'adsorption lorsque la valeur de succion atteint des niveaux élevés. Il est important de noter que l'augmentation de la succion n'a pas beaucoup d'effet sur le degré de saturation, lequel

correspond à l'état résiduel. De plus, la courbe de rétention sol-eau (SWRC) peut s'aplatir pour des valeurs de la succion très faibles, avec une teneur en eau résiduelle correspondante. De plus, toute modification de la teneur volumétrique en eau entraînerait une augmentation de la succion. Il convient de mentionner que, à l'intérieur de la zone résiduelle (Figure 3.4) et au-delà de la succion résiduelle, l'eau est retenue sous forme d'eau adsorbée sur les particules du sol (McQueen and Miller, 1974) plutôt que sous forme d'eau capillaire maintenue par l'action des forces capillaires créées par le ménisque aquatique, comme le montre clairement la Figure 3.4.

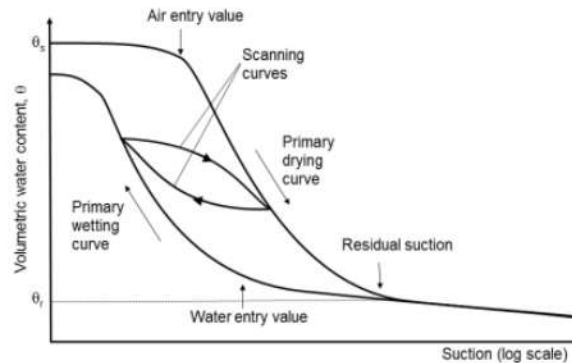


Figure 3. 4 Courbe typique de rétention d'eau dans le sol (Toll et al., 2016)

En se basant donc sur les résultats ci-dessus, on trouve qu'il est intéressant d'introduire le degré de saturation résiduelle dans le modèle proposé afin d'avoir un modèle plus fiable qui peut décrire le comportement de rétention d'eau. Le modèle peut donc être écrit comme suit :

$$S_e = \left(1 + \left(\frac{s^*}{\alpha^*}\right)^n\right)^{\frac{1}{n}-1} - S_{er} \quad (3-8)$$

Où :

s^* est la succion normalisée, avec $s^* = s \cdot c_u$

α^* est α normalisé , avec $\alpha^* = \alpha \cdot c_u$

Notez que α et n sont les paramètres du modèle.

En outre, γ est un paramètre du modèle qui est égal à 1, et S_{er} est le degré de saturation résiduelle.

La difficulté était sur la manière de l'identification de l'évolution du degré de saturation résiduelle. Pour surmonter ce souci, les données expérimentales issues des essais tensiométriques trouvées dans la littérature ont été utilisées (Feia et al., 2014) et (Della and Feia, 2017)

3.3.2.3. Introduction des données expérimentales

Comme nous l’avons mentionné le calage du modèle proposé a été effectué en utilisant les données expérimentales des essais tensiométriques établie par (Feia *et al.*, 2014).

Le choix donc a été fait sur trois tests qui ont été effectués à différents indices de densité I_D , ($I_D = 0,5, 0,7$ et $0,9$) (Figure 3.5).

Il est à rappeler que l’indice de densité est exprimé par l’équation (3-9) comme suit :

$$I_D = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \tag{3-9}$$

Tableau 3. 1 Caractéristiques des sables utilisés par (Feia *et al.*, 2014).

sable	D_{g50} (μm)	C_u	e_{min}	e_{max}	ρ_s (t/m^3)
NE34	206	1.5	0.557	0.884	2.65
Type de sable		NEI-1	NEI-2	NEI-3	
Indice de densité I_D		0.9	0.7	0.5	

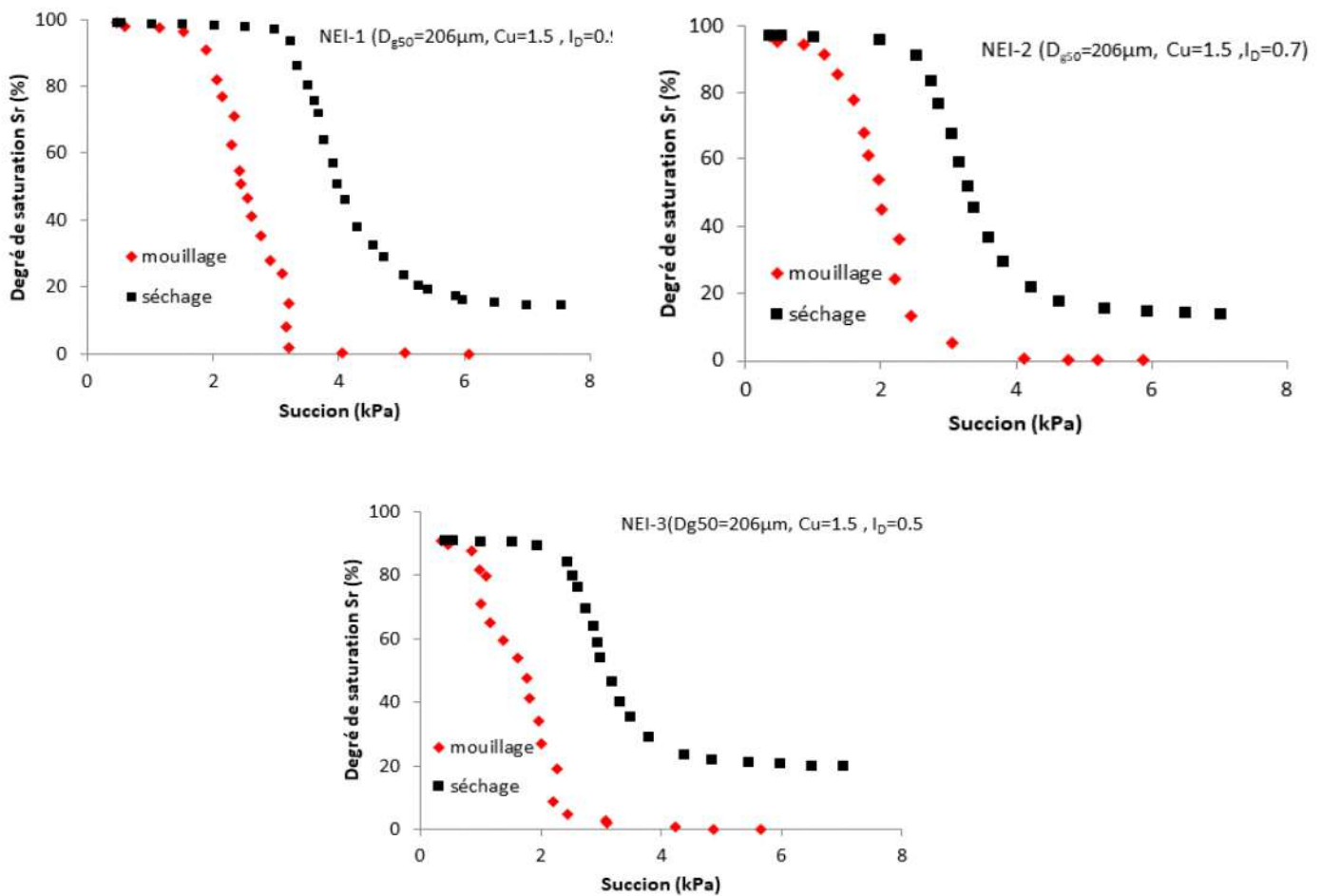


Figure 3. 5 Résultats expérimentaux utilisés dans cette étude (Feia *et al.*, 2014)

La Figure 3.5 présente les courbes de rétention d'eau des trois essais choisis pour la procédure de calage du modèle. Il s'agit des courbes de séchage et de modification des éprouvettes de sable de Fontainebleau (sable typique de référence utilisé couramment dans les laboratoires de recherche de mécanique des sols) ayant un diamètre moyen de 206 μm .

Au cours d'un essai tensiométrique, et plus exactement en fin de la phase de séchage, il reste une certaine quantité d'eau dans l'échantillon. Cette quantité d'eau qui correspond au degré de saturation résiduelle, est principalement attribuée à la discontinuité de l'eau entre le tube et le milieu poreux. En outre, comme indiqué dans la littérature, la valeur du degré de saturation résiduelle dépend de plusieurs paramètres physiques du sol. L'un de ces paramètres est l'indice de densité I_D .

La Figure 3.6 illustre l'évolution du degré de saturation résiduelle par rapport à l'indice de densité, d'après les données obtenues des essais tensiométriques présentés précédemment effectués par (Feia *et al.*, 2014). On peut facilement constater que ce paramètre varie linéairement en fonction de la relation exprimée par l'équation (3-10) qui est donnée ci-dessous comme :

$$S_{er} = 0.12 I_D + 0.26 \quad (3-10)$$

En introduisant cette relation à l'équation du modèle, la nouvelle forme de cette équation peut donc s'exprimer comme suit :

$$S_e = \left(1 + \left(\frac{s^*}{\alpha^*}\right)^n\right)^{\frac{1}{n}-1} - (0.12 I_D + 0.26) \quad (3-11)$$

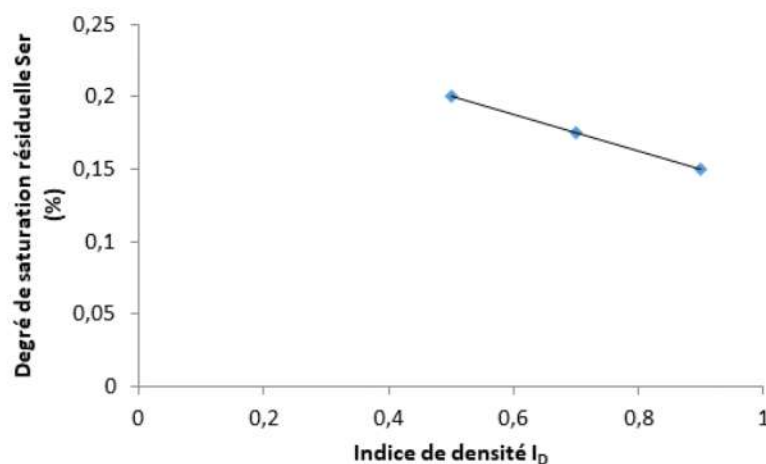


Figure 3. 6 Variation de degré de saturation résiduelle en fonction de l'indice de densité.

3.3.3. Calage du modèle proposé sur les données expérimentales

On a utilisé la courbe de rétention d'eau de séchage pour le calage du modèle en raison de l'intérêt principal porté sur le séchage du matériau, plutôt que le mouillage et afin de reproduire fidèlement le comportement hydraulique pendant cette phase particulière, et les données expérimentales sur la courbe de rétention d'eau de séchage soient plus facilement disponibles or plus abondantes que celles sur la courbe de mouillage. Ainsi, l'utilisation de la courbe de rétention d'eau de séchage simplifie le processus de calibrage du modèle en utilisant les données disponibles, tout en facilitant l'ajustement des paramètres du modèle.

La Figure 3.7 illustre les résultats de calage de trois types de sable utilisé.

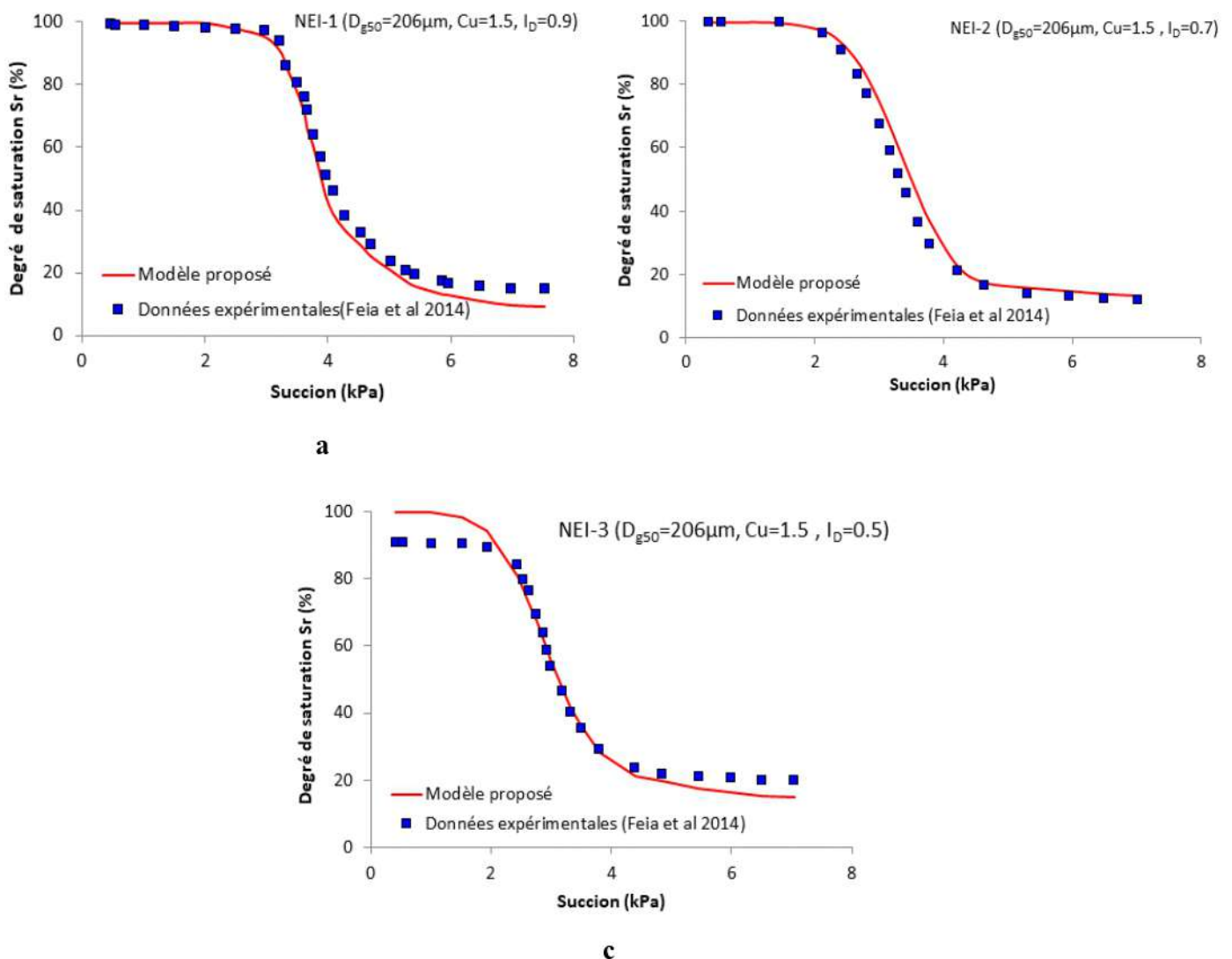


Figure 3. 7 Résultats de calage du modèle proposé sur les données expérimentales

a) Sable NEI-1 b) Sable NEI-2 c) Sable NEI-3

Sur ce niveau de calage, une bonne cohérence entre les résultats donnés par le modèle proposé et ceux obtenus à partir des essais expérimentaux peut être observée. Les résultats indiquent que le modèle proposé fournit une meilleure prédiction de la courbe de rétention d'eau que ceux de la littérature par l'ajustement de deux paramètres seulement (α et n). Le tableau 3.2 résume les paramètres du modèle issus de ce calage.

Tableau 3. 2 Valeurs des paramètres du modèle proposé pour les trois types de sable

Sable	NEI-1 $I_D= 0.9$	NEI-2 $I_D= 0.7$	NEI-3 $I_l \mathbf{b} \ 5$
Paramètres du modèle			
α	4.5	3.4	3
n	8.5	7.3	6

3.3.4. Evolution des paramètres de modèle

La Figure 3.8, présente la variation du paramètre α par rapport à l'indice de densité I_D . On peut facilement observer que la courbe d'évolution tend à suivre une forme linéaire, c'est-à-dire $y = ax + b$. La tendance générale de ces données montre que cette courbe évolue selon l'équation ci-dessous :

$$\alpha = 3.75I_D + 1 \tag{3-12}$$

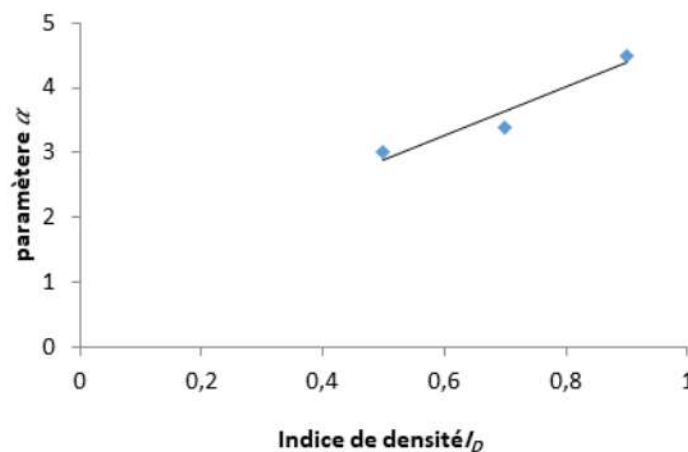


Figure 3. 8 Evolution du paramètre α en fonction de l'indice de densité I_D

La Figure 3.9, qui montre l'évolution du paramètre n en fonction de l'indice de densité, montre que l'évolution de la courbe suit une forme linéaire ($y = ax+b$). De plus, la tendance générale de ces données montre que cette courbe évolue selon l'équation ci-dessous :

$$n = 6.25I_D + 2.89 \tag{3-13}$$

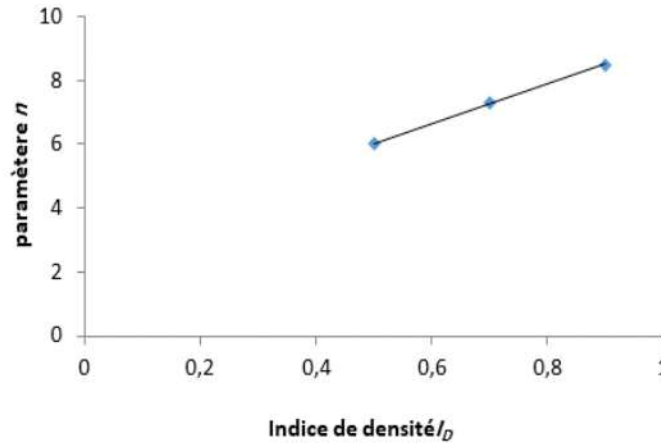


Figure 3. 9 Evolution du paramètre n en fonction de l'indice de densité I_D

A l'issue de ces résultats la nouvelle forme du modèle proposé peut s'écrire de la façon suivante :

$$S_e = \left(1 + \left(\frac{s^*}{(3.75I_D+1)*cu} \right)^{(6.25I_D+2.89)} \right)^{\frac{1}{(6.25I_D+2.89)^{-1}}} - (0.12I_D + 0.26) \tag{3-14}$$

3.3.5. Validation du modèle

Une fois le processus de calage terminé, le modèle proposé peut être validé par la simulation d'un essai qui n'a pas été utilisé pendant le calage. Pour ce faire, un choix a été fait sur un essai tensiometrique réalisé sur une éprouvette de sable d'Hostun HN34 ayant un diamètre moyen de 207 μm , un coefficient d'uniformité $C_u = 1,6$ et un indice de densité $I_D = 0,9$.

Ensuite, en utilisant l'interpolation linéaire, présentée par les formules (3-12) et (3-13), on a trouvé que $n = 8,51$ et $\alpha = 4,37$, $\alpha^* = \alpha \times C_u = 6,992$. La comparaison entre les résultats de modèle relatif à cet essai avec les données expérimentales du même essai est présenté sur la Figure 3-10. La figure montre que le modèle proposé offre une bonne prédiction des résultats expérimentaux ce qui peut témoigner sur la validation du présent modèle.

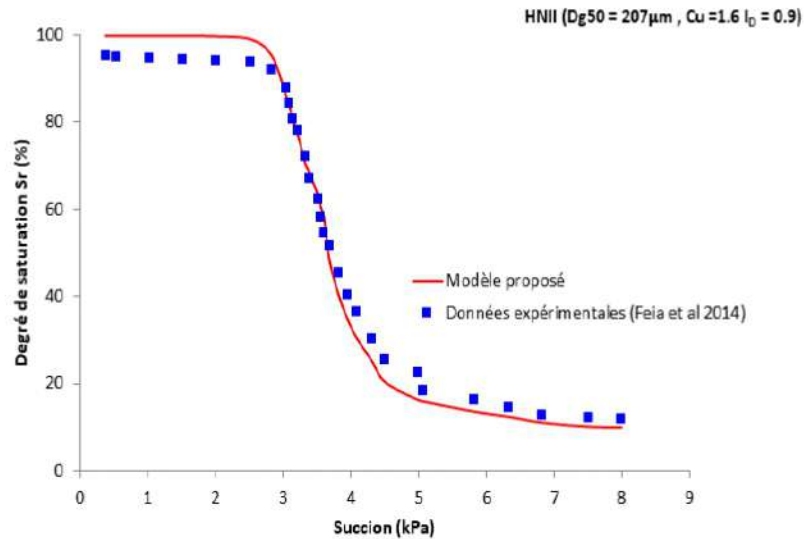


Figure 3. 10 Validation du modèle par simulation d’un test, avec un indice de densité $I_D=0,9$ et coefficient d’uniformité $C_u=1,6$

3.3.6. Application du modèle sur des matériaux granulaires

3.3.6.1. Caractéristiques des matériaux analysés

Le modèle a été appliqué sur quatre types de sable possédant les caractéristiques illustrées au tableau 3.3 et représentées par la Figure 3.11 :



Figure 3. 11 Les quatre types de sable étudiés.

Tableau 3. 3 Caractéristiques des matériaux à analyser

Sable	$D_{g50}(mm)$	C_u	e_{min}	e_{max}	$\rho_s(g/cm^3)$
Type1	0.18	1.5	0.51	0.79	2.65
Type2	0.37	2.85	0.47	0.75	2.65
Type3	0.42	2.47	0.47	0.76	2.65
Type4	0.5	5	0.44	0.77	2.65

Les distributions granulométriques des quatre types des sables obtenues par l’analyse par tamisage sont illustrées à la Figure 3.12 ci-dessous :

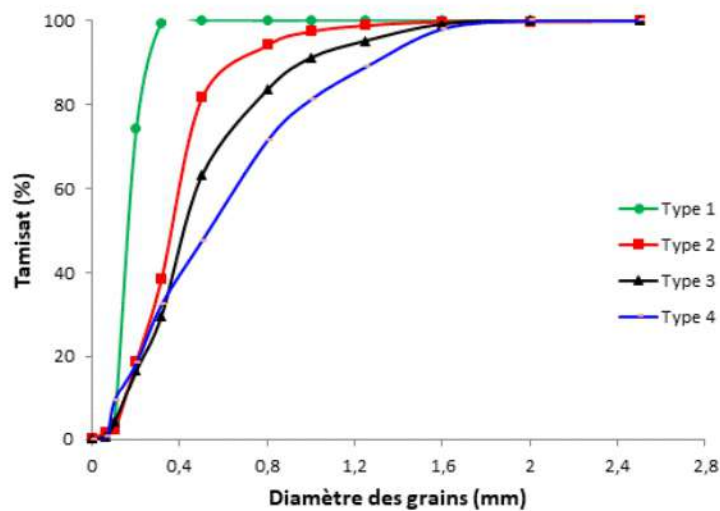


Figure 3. 12 Courbes granulométriques des matériaux étudiés

3.3.6.2. Courbes de rétention d'eau

La Figure 3.13 illustre les courbes de rétention d'eau pour les quatre types de sable, obtenues en utilisant le modèle proposé avec un indice de densité de 0,90. 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.

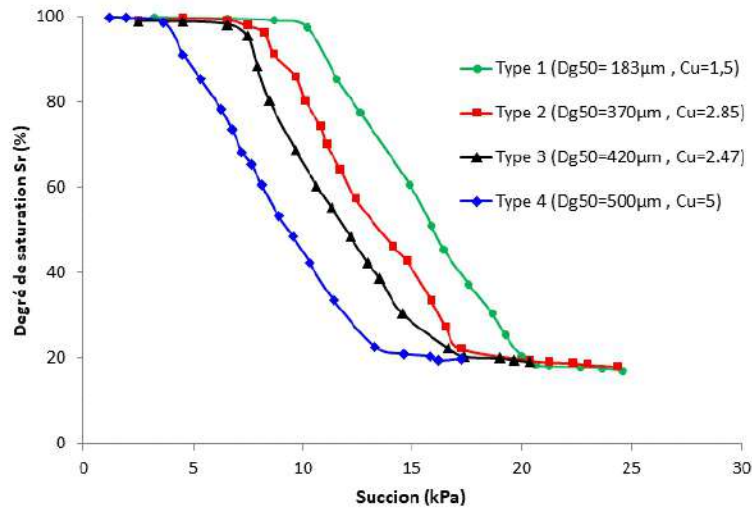


Figure 3. 13 Courbes de rétention d'eau pour les quatre types de sable étudiés.

3.3.6.3. Effet de l'indice de densité

La Figure 3.14 montre les courbes de rétention d'eau pour le type de sable numéro 3, 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 (0,3, 0,50, 0,70 et 0,90). 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

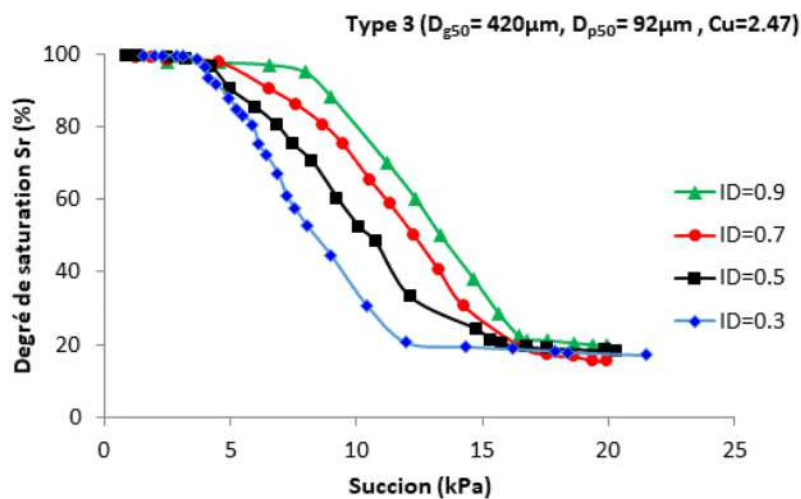


Figure 3. 14 Courbes de rétention d'eau pour le type de sable numéro 3 pour différentes valeurs de l'indice de densité

3.3.7. 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, obtenues à partir de l'utilisation de notre modèle (en utilisant l'équation (3-14)). Et on met en évidence le fait que l'équation du modèle proposé permet de tracer ces courbes à partir des données de rétention d'eau (Figure 3.15)

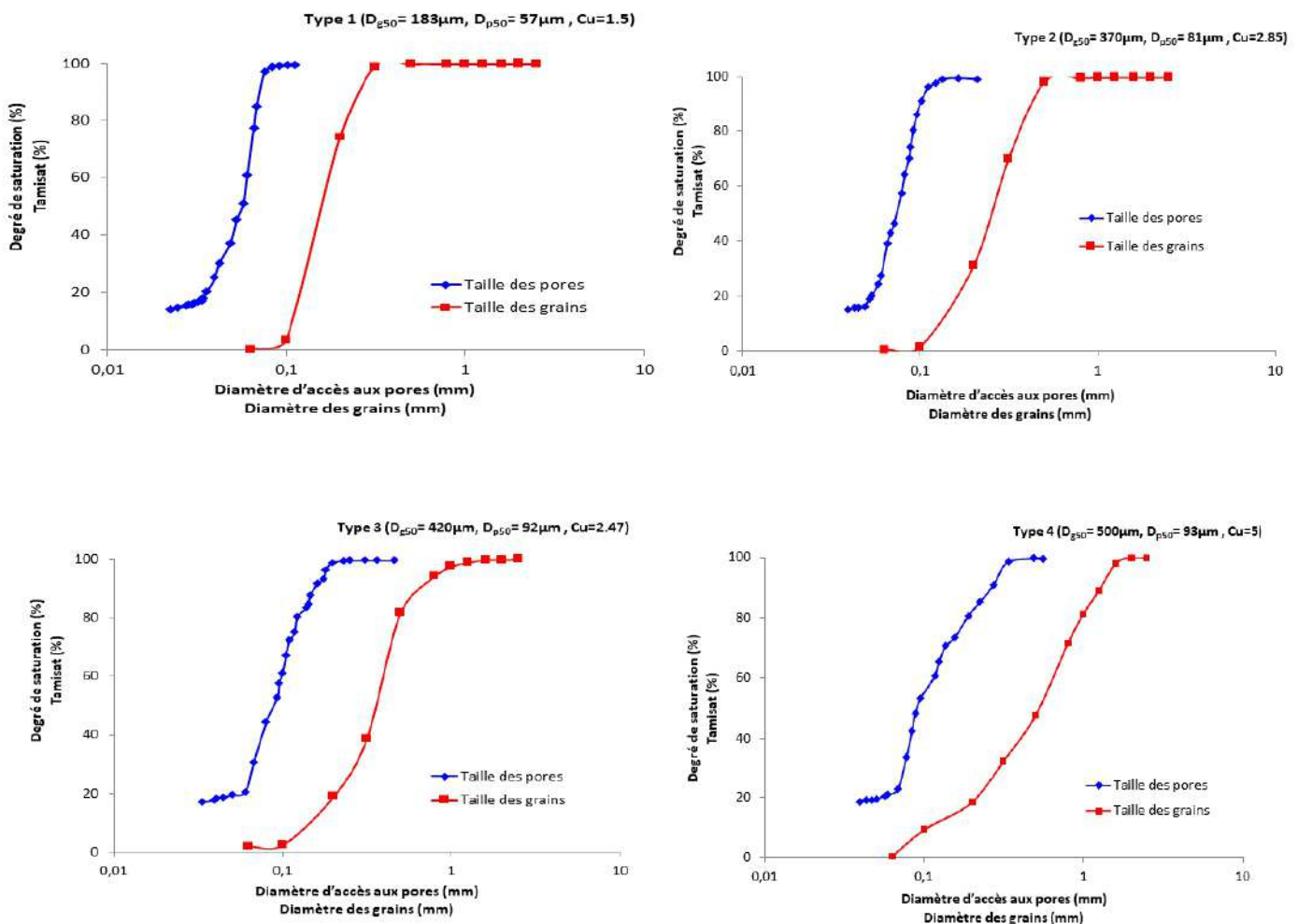


Figure 3. 15 Distribution de la taille d'accès aux pores pour les quatre types de sable

La Figure 3.15 montre un résultat typique des courbes de distribution de la taille d'accès aux pores pour les quatre types de sable avec un indice de densité $I_D = 0,50$. 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.

$$D_p = \frac{4\sigma_s \cos\theta}{s} \quad (3-15)$$

3.3.7.1. Effet de l'indice de densité

La Figure 3.16 compare la distribution de la taille d'accès aux pores pour le type 3 de sable avec quatre indices de densité différents (0,3, 0,50, 0,70 et 0,90). 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.

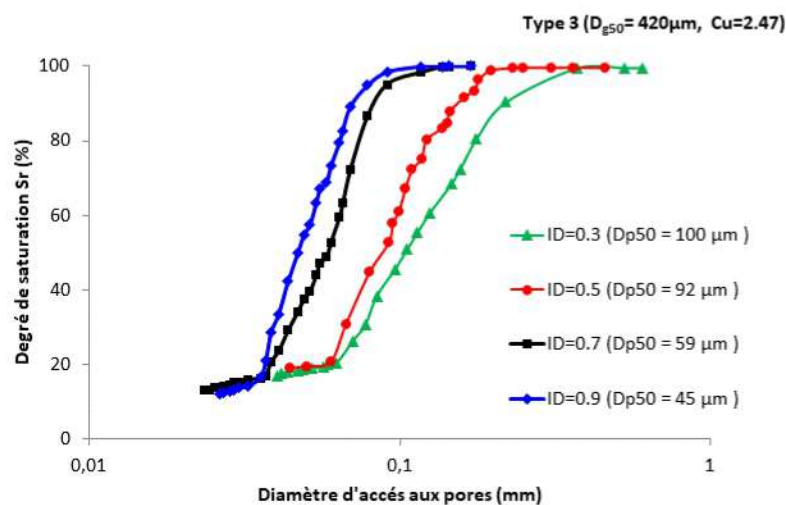


Figure 3. 16 L'effet de l'indice de densité sur la distribution de la taille d'accès aux pores.

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.

3.3.7.2. Effet de l'étalement de courbe granulométrique

Comme on l'a montré sur la Figure 3.12 et dans le Tableau 3.3, le sable type 4 a une taille médiane de grains plus grande ($D_{g50}=500\mu\text{m}$) tandis que le sable type 1 possède une plus petite taille médiane de grains ($D_{g50}=183\mu\text{m}$) alors la courbe granulométrique du sable 4 est plus étalée que celle du sable 1 (coefficient d'uniformité égal à 5 pour le sable 4 et 1.5 pour le sable 1). La comparaison des distributions de la taille des pores, présentée sur la Figure 3.17, montre une taille médiane de pores plus grande pour le sable 4 ($D_{p50} = 93 \mu\text{m}$) (granulométrie étalée) et une taille médiane des pores plus petite pour le sable 1 ($D_{p50} = 57 \mu\text{m}$) (granulométrie uniforme). On peut conclure que l'on opte pour une granulométrie étalée lorsque la taille médiane des pores est plus grande, et pour une granulométrie uniforme lorsque la taille médiane des pores est plus petite.

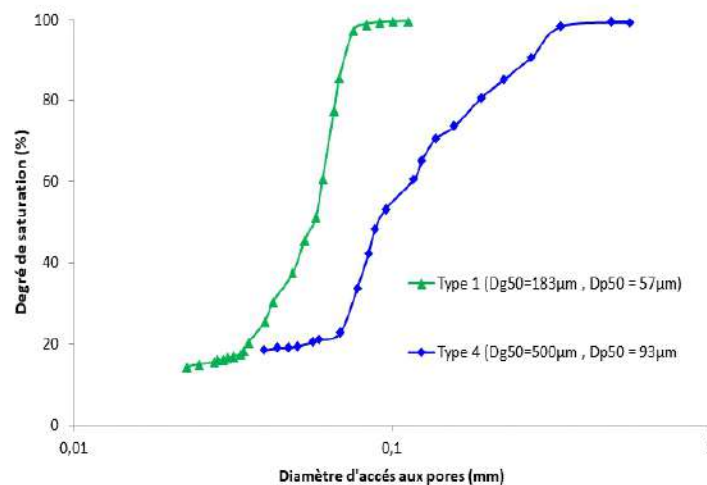


Figure 3. 17 Effet de l'étalement de la courbe granulométrique sur la distribution de la taille d'accès aux pores.

3.3.7.3. Effet de la taille des grains

La Figure 3.18 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 183 à 500 μm , on constate que la taille médiane des pores (D_{p50}) augmente également, passant de 57 à 93 μm .

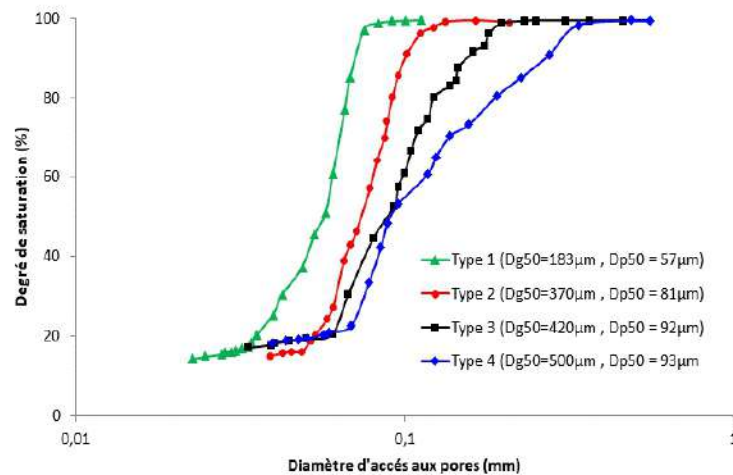


Figure 3. 18 Distribution de la taille d'accès aux pores pour les quatre types de sable (différentes tailles des grains)

3.3.8. Comparaison des résultats obtenus par le modèle proposé avec une loi existante dans la littérature

Dans ce contexte, la Figure 3.19 illustre la variation du rapport entre la taille moyenne des grains et la taille d'accès aux pores en fonction du coefficient d'uniformité C_u . Les données utilisées pour cette courbe, qui ont été obtenues à partir de notre modèle, ont été comparées à celles calculées en utilisant la relation susmentionnée de (Della and Feia, 2017) trouvée dans la littérature.

Le modèle proposé permet de déduire la relation entre le rapport D_{g50}/D_{p50} et le coefficient C_u , où le D_{g50} utilisé est défini comme la valeur du diamètre du grain à 50% du tamisage, et D_{p50} , qui est le diamètre d'accès aux pores à 50% de saturation obtenue par le modèle proposé pour les quatre types de sol. Compte tenu de la valeur C_u pour chaque sol, le rapport D_{g50}/D_{p50} du modèle

proposé peut être facilement obtenu par la loi (Della and Feia, 2017). Ainsi, les valeurs de D_{p50} sont obtenues pour les quatre types de sols, et le rapport empirique D_{g50}/D_{p50} peut être déduit.

Il convient de noter que le rapport de la taille moyenne des grains et la taille d'accès aux pores est augmenté avec l'augmentation de coefficient d'uniformité. Ce rapport est bien décrit par l'expression établie par (Della and Feia, 2017):

$$\frac{D_{g50}}{D_{p50}} = 1.18C_u + 1.24 \tag{3-15}$$

La Figure 3.19 démontre clairement la concordance notable entre les résultats obtenus à l'aide du modèle proposé et ceux obtenus à l'aide de la relation établie par Della et Feia, confirmant ainsi la validité du modèle proposé.

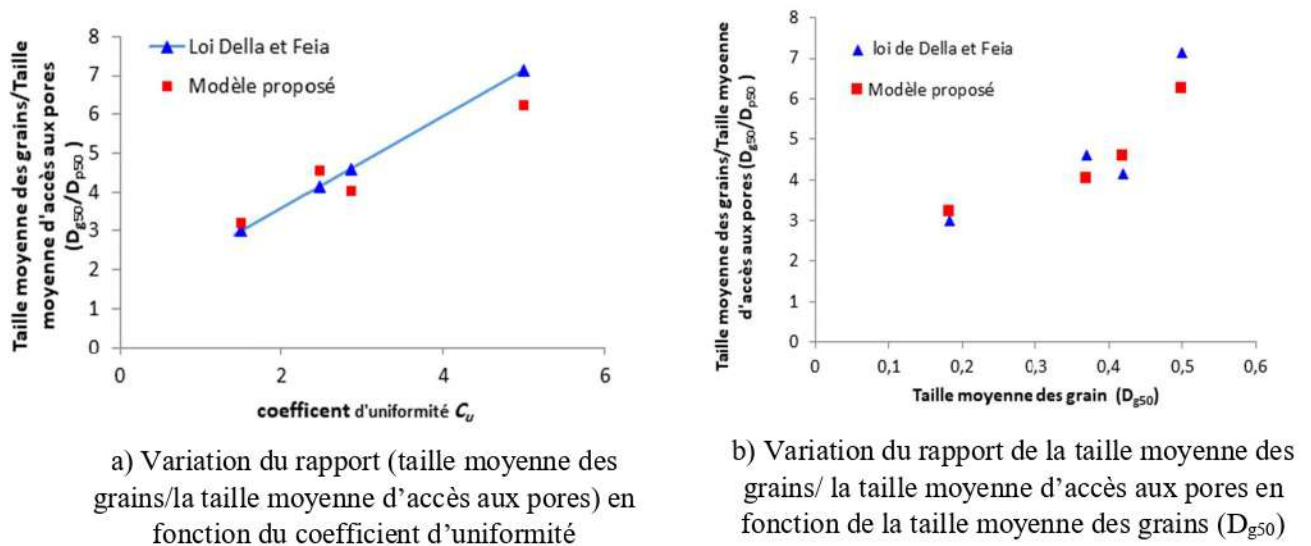


Figure 3. 19 Comparaison entre les résultats obtenus par le modèle proposé et ceux calculés par la loi de (Della and Feia,2017)

3.4. Application du modèle proposé sur un matériau granulaire soumis à des fortes contraintes et analyse des résultats

Du point de vue mécanique, l'endommagement est accompagné par une dégradation des propriétés du matériau, pouvant conduire éventuellement à la rupture. Une telle définition de l'endommagement donne la possibilité de considérer l'ensemble des phénomènes observés (dégradation des propriétés mécaniques, augmentation de la perméabilité, augmentation de la succion, etc.) comme une manifestation d'un seul processus : celui du changement de la structure.

succion, etc.) comme une manifestation d'un seul processus : celui du changement de la structure.

L'endommagement des grains dans les matériaux granulaires sous fortes contraintes peut engendrer plusieurs changements dans leur comportement mécanique notamment l'évolution de la perméabilité de ces matériaux et l'effet des paramètres influençant cette évolution tels que la taille et la forme des grains, l'étalement de la courbe granulométrique, la pression de confinement. Ainsi que l'effet de la contrainte d'endommagement sur la succion pour cela on a appliqué le modèle proposé sur un matériau granulaire soumis à des fortes contraintes et on a analysé les résultats obtenus.

Dans cette étude, on s'intéresse à l'application du modèle proposé sur un type de sable soumis à des fortes contraintes et aux modifications qu'elles peuvent induire sur la courbe de rétention d'eau et son effet sur la taille d'accès aux pores et la taille moyenne des grains.

Pour élargir le champ d'application du modèle proposé on a essayé de l'appliquer sur un sable soumis à des fortes contraintes possède les caractéristiques illustrées au tableau 3.4

Tableau 3. 4 Les caractéristiques de sable étudié

Contrainte (MPa)	Dg_{50}(mm)	C_u
$\sigma = 0$	0.350	1,62
$\sigma = 5$	0.315	1,94
$\sigma = 10$	0.290	2.4

Nous présentons dans la Figure 3.20 ci-dessous les résultats obtenus par l'essai œdométrique à haute pression, ou l'analyse granulométrique de l'échantillon est faite pour chaque palier de charge afin de déterminer l'évolution de la courbe granulométrique de sable étudié en fonction de contrainte. Alors il a été constaté que lorsqu'un sable est soumis à une forte contrainte, cela entraîne des changements dans sa microstructure, tels que la distribution de la taille des grains, alors le phénomène d'écrasement des grains implique une réduction de la taille des grains et un étalement de la granulométrie, ce qui génère un arrangement plus dense des grains.

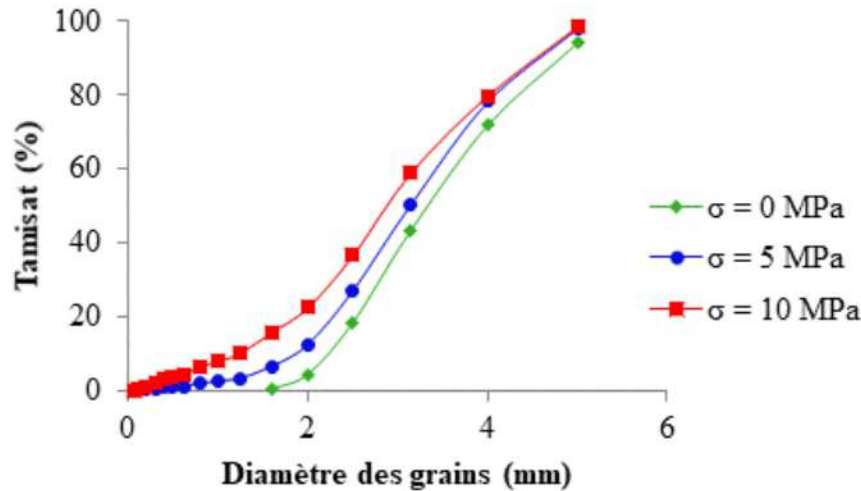


Figure 3. 20 Courbes granulométriques des matériaux étudiés

3.4.1. Influence de la contrainte sur la courbe de rétention d'eau

La Figure 3.21 présente l'effet de l'endommagement sur les courbes de rétention d'eau du sable, obtenues en appliquant le modèle proposé sur un sable soumis à des contraintes. Il a été noté que le degré de saturation a commencé à diminuer à mesure que la succion du sol augmentait. On a constaté que la succion augmente de manière proportionnelle à l'augmentation de la contrainte, tandis que l'accroissement de la contrainte entraîne une réduction de la taille des pores. En outre, il existe une relation inverse entre la taille des pores et la succion, ce qui explique l'augmentation de la succion.

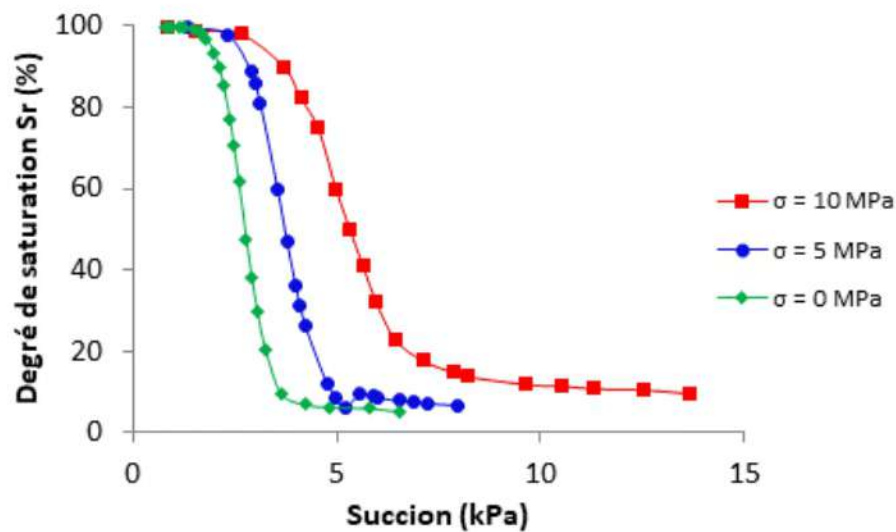


Figure 3. 21 Courbes de rétention d'eau pour un sable soumis à des fortes contraintes.

3.4.2. Courbes de la distribution de la taille d'accès aux pores

La distribution de la taille d'accès aux pores est évaluée à partir des courbes de rétention d'eau obtenues à partir de l'utilisation de notre modèle.

La Figure 3.22 montre un résultat typique des courbes de distribution de la taille d'accès aux pores pour un sable soumis à des fortes contraintes. Une simple comparaison entre ces courbes de distribution de la taille d'accès aux pores et les courbes de distribution de la taille des particules indique que l'uniformité des courbes de taille des particules induit une bonne uniformité des courbes de distribution de la taille d'accès aux pores.

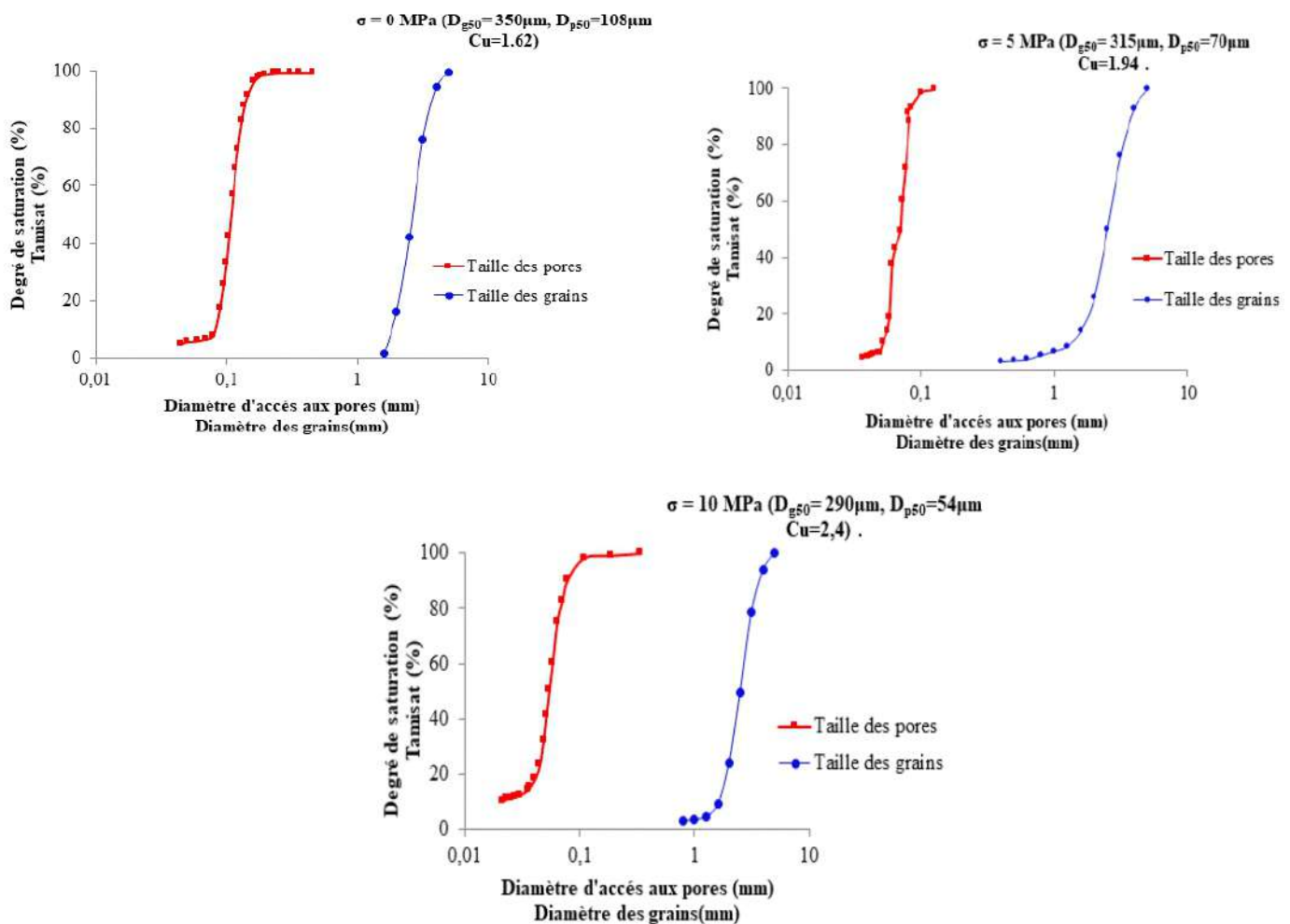


Figure 3. 22 Distribution de la taille d'accès aux pores pour un sable soumis à des fortes contraintes.

3.4.3. Effet de la taille des grains

La Figure 3.23 montre une comparaison entre la taille d'accès aux pores de sable soumis à des fortes contraintes 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}).

On ajoute aussi que la taille des pores augmente avec l'augmentation de la taille des grains. Pour une augmentation de D_{g50} de 290 à 350 μm , la taille médiane des pores D_{p50} augmente de 54 à 108 μm .

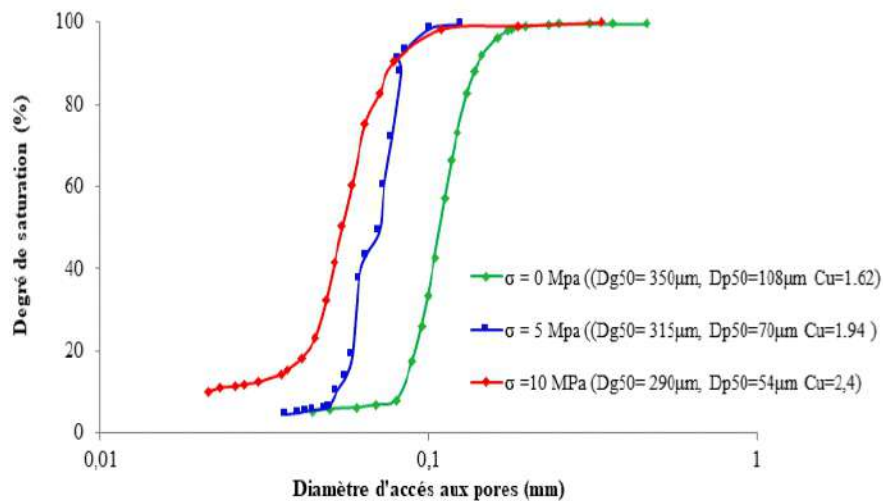


Figure 3. 23 Distribution de la taille d'accès aux pores pour un sable soumis à des fortes contraintes (différentes tailles des grains)

3.5. Conclusion

La présente étude avait pour objectif d'avoir une corrélation expérimentale entre la perméabilité et les autres paramètres physiques d'un matériau granulaire tels que : la taille médiane des grains, l'état de densité. Des essais de mesures de perméabilité pour dix types de sables ont été réalisés après une caractérisation expérimentale de ces dix types. Ces sables ayant différentes granulométries et les éprouvettes ont été préparés avec différents indices de densité. Cette campagne expérimentale a permis, à l'aide d'un solveur disponible sur Excel, de proposer une relation empirique reliant la perméabilité avec la taille médiane des grains D_{g50} et l'indice de densité I_D (équation (3-3)). Cette relation permet au modélisateur d'avoir une idée relativement claire sur la valeur de la perméabilité d'un matériau granulaire en connaissant les deux paramètres physiques cités ci-dessus. Ces paramètres sont très faciles à obtenir à partir des simples essais réalisés dans n'importe quel laboratoire basique de mécanique des sols.

Ensuite le modèle de van Genuchten a été utilisé pour développer un modèle décrivant les courbes de rétention d'eau d'un matériau granulaire. Le modèle proposé a été appliqué aux résultats expérimentaux des essais tensiométriques établie par (Feia et al., 2014). Pour l'évolution de ses paramètres ce modèle a été validé en utilisant un essai qui n'a été pas utilisé dans la procédure de calage ce modèle permet une prévision de l'évolution de la courbe de rétention d'eau de façon plus simple et directement applicable pour les matériaux granulaires et aussi pour estimer la distribution de la taille d'accès aux pores de sols sableux, sans effectuer des essais, en utilisant deux paramètres qui sont le coefficient d'uniformité C_u et l'indice de densité ID . Ce modèle montre une très bonne compatibilité avec les résultats expérimentaux.

Afin d'élargir le champ d'application du modèle proposé, nous examinons son utilisation sur un type de sable soumis à des contraintes et les modifications qu'elles peuvent induire sur la courbe de rétention d'eau et son effet sur la taille d'accès aux pores et la taille moyenne des grains. On résume, que la succion augmente de manière proportionnelle à l'augmentation de la contrainte, tandis que l'accroissement de la contrainte entraîne une réduction de la taille des pores. En outre, il existe une relation inverse entre la taille des pores et la succion, ce qui explique l'augmentation de la succion.

**CONCLUSIONS
GENERALES ET
PERSPECTIVES**

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

Conclusions

Trois volets capitaux ont été étudiés à savoir : (1) Corrélation expérimentale entre la perméabilité d'un matériau granulaire et ses caractéristiques physiques ; (2) Développement d'un modèle analytique qui prédit les courbes de rétention d'eau des matériaux granulaire à partir des courbes granulométriques ; (3) Application du modèle proposé sur un matériau granulaire soumis à des Fortes contraintes et analyse des résultats.

On a présenté tout d'abord une corrélation expérimentale entre la perméabilité et les autres paramètres physique d'un matériau granulaire tels que : la taille médiane des grains, l'état de densité. 40 essais de mesures de perméabilités ont été réalisés pour dix types de sables après une caractérisation expérimentale de ces dix types. Ces sables ayant différentes granulométries et les éprouvettes ont été préparés avec différents indices de densité. Cette campagne expérimentale a permis, à l'aide d'un solveur disponible sur Excel, de proposer une loi empirique reliant la perméabilité avec la taille médiane des grains et l'indice de densité (équation (3-3)).

- Cette relation permet aux modélisateurs d'avoir une estimation de la valeur de la perméabilité k d'un matériau granulaire en connaissant juste son diamètre moyen des grains ainsi que son état de densité ;
- Les résultats de cette corrélation expérimentale peuvent servir de base pour développer des modèles prédictifs plus précis de la perméabilité des matériaux granulaires. Ces modèles peuvent être utilisés pour évaluer rapidement et efficacement la perméabilité d'autres échantillons de matériaux granulaires similaires sans avoir besoin de réaliser des tests de perméabilité coûteux et longs.

Ensuite on a développé un modèle qui peut être utilisé pour prédire la courbe de rétention d'eau pour les matériaux granulaires. Des résultats satisfaisants ont été obtenus et qui sont par ailleurs en accord avec certaines observations déjà établies par d'autres auteurs.

Ces résultats ont permis de tirer des conclusions intéressantes, les plus essentiels sont résumés comme suit :

- L'objectif ultime de cette recherche est de doter la communauté scientifique, les ingénieurs et les chercheurs d'un outil robuste et fiable pour étudier les propriétés hydriques des sols granulaires ;
- Le nouveau modèle analytique proposé peut être utilisé pour prédire les courbes de rétention d'eau d'un matériau granulaire, comme les sols sableux. Il convient de noter que l'équation du modèle proposé est fondée sur les propriétés physiques du sol. Cette équation a permis de décrire la courbe de rétention d'eau et d'estimer la distribution de la taille d'accès aux pores sans effectuer d'essais expérimentaux ;
- Actuellement, plusieurs équations de la courbe de succion ont été proposées, cependant, les équations les plus récemment proposées sont basées sur les propriétés physiques du sol, pour notre modèle un seul critère, qui est la courbe de distribution granulométrique qui a été pris en considération pour la sélection des sols. Cette courbe peut être utilisée pour dériver les valeurs de D_{g50} et C_U ;
- Les courbes de rétention d'eau des sols (Feia *et al.*, 2014) ont été ajustées par le modèle proposé en utilisant la méthode des moindres carrés, ce qui a permis de déterminer les paramètres du modèle proposé α et n . Néanmoins, ces paramètres (n et α) pourraient également être dérivés de la courbe de rétention d'eau tout en tenant compte de l'effet de l'indice de densité I_D ;
- La forme des courbes de rétention d'eau obtenues par le modèle proposé 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 ;
- L'utilisation du modèle proposé a permis de prédire les courbes de rétention d'eau du sol granulaire pour n'importe quelle valeur de l'indice de densité ;
- Les résultats obtenus par l'application du modèle proposé ont révélé que la succion augmente avec l'augmentation de l'indice de densité, ce qui concorde très bien avec les résultats expérimentaux. En outre, il est clairement noté que les différentes propriétés de rétention d'eau des sols non saturés peuvent être observées sur ces courbes ;
- Les courbes de la distribution de la taille d'accès aux pores sont déduites à partir des courbes de rétention d'eau obtenues par le modèle proposé, en particulier de la courbe de séchage ;

- Une simple comparaison entre les courbes de distribution de la taille d'accès aux pores et les courbes de distribution de la taille des particules indique que l'uniformité des courbes de taille des particules induit une bonne uniformité des courbes de distribution de la taille d'accès aux pores ;
- L'indice de densité exerce une influence significative sur la taille d'accès aux pores. Dans le cas du sable lâche, cela se traduit par une augmentation de la taille des pores. En revanche, le sable dense tend à présenter des pores plus fins ;
- Une relation directe est trouvée entre la taille moyenne des grains D_{g50} et la taille moyenne des pores D_{p50}
- La taille des pores augmente avec l'augmentation de la taille des grains ;
- Le modèle proposé permet de déduire la relation entre le rapport D_{g50}/D_{p50} et le coefficient C_u , Il convient de noter que le rapport de la taille moyenne des grains et la taille d'accès aux pores est augmenté avec l'augmentation de coefficient d'uniformité. Ce rapport est bien décrit par l'expression établie par (Della and Feia, 2017). On a démontré clairement la concordance notable entre les résultats obtenus à l'aide du modèle proposé et ceux obtenus à l'aide de la relation établie par Della et Feia, confirmant ainsi la validité du modèle proposé ;
- Lorsqu'un sable est soumis à une forte contrainte, cela entraîne des changements dans sa microstructure, tels que la distribution de la taille des grains, alors le phénomène d'écrasement des grains implique une réduction de la taille des grains et un étalement de la granulométrie, ce qui génère un arrangement plus dense des grains ;
- La succion augmente de manière proportionnelle à l'augmentation de la contrainte, tandis que l'accroissement de la contrainte entraîne une réduction de la taille des pores. En outre, il existe une relation inverse entre la taille des pores et la succion, ce qui explique l'augmentation de la succion.
- Le phénomène d'écrasement des grains se caractérise par la réduction de la taille des grains, induisant ainsi un arrangement plus dense. Cela entraîne une diminution de la taille des pores et modifie le comportement mécanique du matériau.

Perspectives

Nous pourrions poursuivre notre étude afin d'établir une corrélation expérimentale entre la perméabilité des matériaux granulaires et la taille d'accès aux pores. Cette approche approfondirait notre compréhension de la relation entre la structure poreuse d'un matériau

granulaire et sa perméabilité. De plus, elle aurait des implications significatives dans divers domaines tels que l'ingénierie des sols, la filtration des fluides et la conception de matériaux poreux.

Dans le cadre de cette recherche, nous développerions un modèle prédictif de la perméabilité basé sur la taille d'accès aux pores. Pour ce faire, nous caractériserions la taille d'accès aux pores des échantillons de matériaux granulaires à l'aide de techniques appropriées telles que la porosimétrie à mercure ou la méthode des isothermes de sorption d'azote. Nous mesurerions également la perméabilité de ces échantillons à l'aide de tests standardisés en laboratoire, en prenant en compte des conditions représentatives.

Une fois le modèle développé, nous l'appliquerions à des échantillons de matériaux granulaires soumis à des fortes contraintes. Cela nous permettrait d'évaluer la réponse hydraulique du matériau dans des conditions réalistes, en particulier pour prédire son comportement en termes de perméabilité sous des pressions élevées. Ces informations seraient précieuses dans divers domaines d'application, conformément à ce qui a été mentionné précédemment.

Enfin, nous validerions le modèle proposé en comparant les résultats prédits avec des données indépendantes. L'analyse des résultats obtenus permettrait de fournir des informations précieuses sur la perméabilité des matériaux granulaires dans des conditions de contrainte spécifiques, contribuant ainsi à une meilleure compréhension de leur comportement hydraulique.

Cette recherche ouvrirait de nouvelles perspectives pour la compréhension et l'application de la perméabilité des matériaux granulaires, tout en fournissant des informations pratiques pour diverses industries et disciplines scientifiques.

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.
- Arya, L.M. and Paris, J.F. (1981) 'A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data.', *Soil Science Society of America Journal*, 45(6), pp. 1023--1030.
- Assouline, S. (1998) 'A conceptual model of the soil water retention curve', 34(2), pp. 223–231.
- Assouline, S., Tessier, D. and Bruand, A. (1998) 'A conceptual model of the soil water retention curve', *Water Resources Research*, 34(2), pp. 223–231. Available at: <https://doi.org/10.1029/97WR03039>.
- Aubertin, M. *et al.* (2003) 'A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties', *Canadian Geotechnical Journal*, 40(6), pp. 1104–1122. Available at: <https://doi.org/10.1139/t03-054>.
- 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>.
- Bastet, G. *et al.* (1997) 'Performance des fonctions de pédotransfert disponibles pour prédire les propriétés de rétention en eau des sols français.'
- Bigorre F (2000) 'INFLUENCE DE LA PEDOGENESE ET DE L ' USAGE DES SOLS

SUR LEURS PROPRIETES PHYSIQUES .’

Bishop, A.W. (1966) ‘The Strength of Soils as Engineering Materials’, *Géotechnique*, 16(2), pp. 91–130. Available at: <https://doi.org/10.1680/geot.1966.16.2.91>.

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*.

Brooks, R.H. and Corey, A.T. (1964) *Hydraulic properties of porous media*, *Hydrology paper No. 3*. Colorado State Univ., Fort Collins.

Bruand, A. and Cousin, I. (1998) ‘Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à l’ aide de fonctions de pédotransfert (FPT) : Une analyse bibliographique’, (January).

Bruand, A. and Cousine, I. (2006) ‘Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO : Une première proposition combinant le type d’ horizon , sa texture et sa’, 11(table 1), pp. 323–334.

Buckingham, E. (1914) ‘On physically similar systems; Illustrations of the use of dimensional equations’, *Physical Review*, 4(4), pp. 345–376. Available at: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.4.345>.

Burdine, N.T. (1953) ‘Relative Permeability Calculations From Pore Size Distribution Data’, *Journal of Petroleum Technology*, 5(03), pp. 71–78. Available at: <https://doi.org/10.2118/225-g>.

Butterfield and Andrawes (1970) ‘AN AIR ACTIVATED SAND SPREADER FOR FORMING UNIFORM SAND BEDS’, 1.

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>.

- Campbell, G. (1974) 'Relations avec l'eau et modèles d'utilisation de l'eau pour *Artemisia tridentata* Nutt. dans les années humides et sèches', *Écologie*, 58(3), pp. 652-659.
- 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.
- Celia, M.A., Bouloutas, E.T. and Zarba, R.L. (1990) 'A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation', *Water Resources Research*, 26(7), pp. 1483–1496. Available at: <https://doi.org/10.1029/WR026i007p01483>.
- 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>.
- Chen *et al.* (2012) 'Broyage des grains et ses effets sur le comportement rhéologique des sols granulaires altérés'. *Journal de l'Université Central South*: 19 (7), 2022-2028.
- 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*.

- Chertkov, V.Y. (2003) 'Modelling the shrinkage curve of soil clay pastes', *Geoderma*, 112(1–2), pp. 71–95. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00297-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00297-5).
- Chesnaux, R. *et al.* (2011) 'Building a geodatabase for mapping hydrogeological features and 3D modeling of groundwater systems: Application to the Saguenay-Lac-St.-Jean region, Canada', *Computers and Geosciences*, 37(11), pp. 1870–1882. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.04.013>.
- Cil, M.B. and Alshibli, K.A. (2014) '3D evolution of sand fracture under 1D compression', *Geotechnique*, 64(5), pp. 351–364. Available at: <https://doi.org/10.1680/geot.13.P.119>.
- 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>.
- Coop, M.R. *et al.* (2004) 'Particle breakage during shearing of a carbonate sand', *Geotechnique*, 54(3), pp. 157–163. Available at: <https://doi.org/10.1680/geot.2004.54.3.157>.
- Coop, M.R. and Atkinson, J.H. (1993) 'The mechanics of cemented carbonate sands', (1), pp. 53–67.
- Coop, M.R. and Atkinson, J.H. (1994) 'The mechanics of cemented carbonate sands', *Geotechnique*, 44(3), pp. 533–537. Available at: <https://doi.org/10.1680/geot.1994.44.3.533>.
- Dadda, A. *et al.* (2015) 'Fraturation des grains et l'évolution de la micro-structure d'un sable sous fortes contraintes.', in. El Oued, 25-27.: Congrès Algérien de Mécanique (CAM 2015). Available at: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1976.2002>.
- 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.
- Decker, EL, Frank, B., Suo, Y. et Garoff, S. (1999) 'Physique de la mesure de l'angle de contact. Colloïdes et surfaces A : Aspects physicochimiques et techniques'.
- Delage, P. and Cui, Y.J. (2000) 'L'eau dans les sols non saturés (Water in unsaturated soils.)' Available at: Techniques.
- Della, N. and Feia, S. (2017) 'Experimental investigation on the effect of the mode of deposition on the pore-access size distribution of sand', *Geomechanics and Geoengineering*,

13(1), pp. 33–41. Available at: <https://doi.org/10.1080/17486025.2017.1324177>.

Dexter, A. and Bird, N. (2001) ‘Méthodes de prédiction de l’optimum et de la plage de teneurs en eau du sol pour le travail du sol sur la base de la courbe de rétention d’eau.’, *Recherche sur les sols et le travail du sol*, 57(4), pp. 203-212.

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>.

Ducan, O.D., Featherman, D.L. and Ducan, B. (1972) ‘Socioeconomic background and occupational achievement.’, in *New York: Seminar Press*.

Einav, Itai (2007) ‘Breakage mechanics-Part I: Theory’, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 55(6), pp. 1274–1297. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2006.11.003>.

Einav, I (2007) ‘Breakage mechanics—Part I Theory’, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 55(6), pp. 1274–1297.

Espinoza, D.N. and Santamarina, J.C. (2010) ‘Water-CO₂-mineral systems: Interfacial tension, contact angle, and diffusion Implications to CO₂ geological storage’, *Water Resources Research*, 46(7), pp. 1–10. Available at: <https://doi.org/10.1029/2009WR008634>.

Fair, G. M., H. and L. P Hudson, H.E. (1933) ‘Fundamental factors governing the streamline flow of water through sand’, *Journal (American Water Works Association)*, 25(11), pp. 1551-1565.

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.
- Fried, J.J. (1975) 'Groundwater pollution. Theory, methodology, modelling and practical rules', *Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam(Netherlands)*, 4.
- G. Bastet *et al.* (1998) 'Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à l'aide de fonctions pédotransfert (FPT)', *Étude et Gestion des Sols*, 5(1), pp. 1-23.
- Garbulewski, K. and Zakowicz, S. (1995) 'La succion comme indicateur du potentiel expansif du sol', *Dans ACTES DE LA PREMIÈRE CONFÉRENCE INTERNATIONALE SUR LES SOLS NON SATURÉS/UNSAT'95/PARIS/FRANCE/*, 2(6-8 SEPTEMBRE).
- 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.
- Gardner, W.R., Hillel, D. and Benyamini, Y. (1970) 'Post-Irrigation Movement of Soil Water: 1. Redistribution', *Water Resources Research*, 6(3), pp. 851-861. Available at: <https://doi.org/10.1029/WR006i003p00851>.
- 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>.

- Georgiadis, K., Potts, D. and Zdravkovic, L. (2005) 'Modèle constitutif tridimensionnel pour sols partiellement et totalement saturés', *Journal international de géomécanique*, 3(5), pp. 244-255.
- Gilboy, G. (1928) 'The compressibility of sand-mica mixtures', *In Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 54(2), pp. 555–568.
- Giménez, D. *et al.* (1997) 'Fractal models for predicting soil hydraulic properties : a review', 48.
- 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>.
- Green, G.E. and Reades, D.W. (1975) 'Boundary Conditions, Anisotropy and Sample Shape Effects on the Stress-Strain Behaviour of Sand in Triaxial Compression and Plane Strain', *Geotechnique*, 25(2), pp. 333–356. Available at: <https://doi.org/10.1680/geot.1975.25.2.333>.
- Gupta, S. and Larson, W. (1979) 'Estimation des caractéristiques de rétention d'eau du sol à partir de la distribution granulométrique, du pourcentage de matière organique et de la densité apparente.', *cherche sur les ressources en eau*, 6(15), pp. 1633-1635.
- Guyon, É. and Troadec, J.P. (1994) 'Du sac de billes au tas de sable. Odile Jacob'.
- Hardin, B.B.O. and Asce, F. (1985) 'CRUSHING OF SOIL PARTICLES', *Geotechnical Engineering Journal*, III(10), pp. 1177--1192.
- Haverkamp, R. and Parlange, J.Y. (1986) 'PREDICTING THE WATER-RETENTION CURVE FROM PARTICLE-SIZE DISTRIBUTION: 1. SANDY SOILS WITHOUT ORGANIC MATTER: 1', *Soil science*, 142(6), pp. 325--339.
- 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>.
- Innocentini, M.D.M. and Pandolfelli, V.C. (2001) ‘Permeable Porosity of Refractory Castables Evaluated by the Water-Expulsion Porosimetry Technique’, *Journal of the American Ceramic Society*, 84(1), pp. 236–238. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2001.tb00640.x>.
- Insley, A.E. and Hillis, S.F. (1965) ‘Triaxial shear characteristics of a compacted glacial till under unusually high confining pressures.’, *In Sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, p. 244.
- 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.
- Jamagne, M. *et al.* (1977) *Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols*.
- 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.
- Ji Peng, W. *et al.* (2017) ‘From basic particle gradation parameters to water retention curves of unsaturated sandy soils’, *Water Resources Research*, 53(7), pp. 6069–6088. Available at: <https://doi.org/10.1002/2017WR020411>.
- Jong, R., CA, C. and Nicholaichuk, W. (1983) ‘Équations de rétention d’eau et leur relation avec la matière organique du sol et la distribution granulométrique des échantillons perturbés.’, *Revue canadienne des sciences du sol*, 63(2), pp. 291–302.

- Kachanov, M. (1994) 'Sur la notion d'endommagement en fluage et dans le domaine fragile-élastique', *International Journal of DAMAGE MECHANICS*, 4(3), pp. 329–337.
- 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>.
- Klute, A. (1986) 'Water retention: laboratory methods. Methods of soil analysis', *part 1 physical and mineralogical methods*, 5, pp. 635--662.
- 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 S E D I M E N T A R Y', 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.
- Kucza, 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>.
- Lee, K.L. and Farhoomand, I. (1967) 'Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression.', *Can. Geotech. J.*, 4(1), pp. 68–86.
- Lee, K.L. and Seed, H.B. (1967) 'Drained strength characteristics of sands.', *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93(6), pp. 117–141.

- Lemaitre, J. and Chaboche, J.L. (1988) *Endommagement. Mécanique des matériaux solides*,. Dunod, Par.
- Lemaitre, J and Dufailly, J. (1987) 'Damage measurements.pdf' .
- Lemaitre, Jean and Dufailly, J. (1987) 'Damage measurements', *Engineering Fracture Mechanics*, 28(5–6), pp. 643–661. Available at: [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(87\)90059-2](https://doi.org/10.1016/0013-7944(87)90059-2).
- Lilly, A. *et al.* (1997) 'The development and use of the HYPRES database in Europe.'
- Lourenco, S.D.N. *et al.* (2012) 'Formation and evolution of water menisci in unsaturated granular media', *Geotechnique*, 62(12), pp. 1143–1144. Available at: <https://doi.org/10.1680/geot.12.D.004>.
- Luong, M.P. and Touati, A. (1983) 'Sols grenus sous fortes contraintes. Revue Française de Géotechnique', *Revue Française de Géotechnique*, (24), pp. 51–63. Available at: <https://doi.org/10.1051/geotech/1983024051>.
- Malusis, M.A., Shackelford, C.D. and Olsen, H.W. (2003) 'Flow and transport through clay membrane barriers', *Engineering Geology*, 70(3–4), pp. 235–248. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00092-9](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00092-9).
- Marachi, N.D. (1969) 'Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materials', *Civil engineering*, Doctorate.
- Masekanya, J.P. (2008) 'Stabilité des pentes et saturation partielle-Etude expérimentale et modélisation numérique.'
- McQueen, I. and Miller, R. (1974) 'Approximation des caractéristiques d'humidité du sol à partir de données limitées : preuves empiriques et modèle provisoire.', *Recherche sur les ressources en eau*, 3(10), pp. 521-527.
- Mejías, M., Renard, P. and Glenz, D. (2009) 'Hydraulic testing of low-permeability formations. A case study in the granite of Cadalso de los Vidrios, Spain', *Engineering Geology*, pp. 88–97. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.05.010>.
- Minasny, B., Mcbratney, A.B. and Bristow, K.L. (2006) 'Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves'.
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005) 'Fundamentals of soil behavior'. New York: John Wiley &

Sons.

Morvan, X. *et al.* (2004) 'Prédiction des propriétés de rétention en eau des sols d'un bassin versant à l'aide de fonctions de pédotransfert : influence de la densité apparente et de la teneur en éléments grossiers.', *Etude et Gestion des Sols*, 11(2), p. 20 pp.

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

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

Muszynski, M.R. and Vitton, S.J. (2012) 'Particle Shape Estimates of Uniform Sands: Visual and Automated Methods Comparison', *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(2), pp. 194–206. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000351](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000351).

Navfac, D. (1974) 'Design manual-soil mechanics, foundations, and earth structures. US Government Printing Office, Washington, DC.'

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

Nemes, A. (2002) 'Base de données hydraulique des sols non saturés de Hongrie', *HUNSODA. Agrokemia és Talajtan*, 51(1–2), pp. 17-26.

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.

Ortega, C.E.O. (2013) *Contribution à l'étude de la rupture des grains dans les matériaux granulaires*.

Pachepsky, Y.. and W.J, R. (2003) 'Soil structure and pedotransfer functions', *European Journal of Soil Science*, 54(September), pp. 443–451.

Pachepsky, Y. and Rawls, W. (2004) *Développement des fonctions de pédotransfert en hydrologie des sols*. Elsevier.

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. and Brakensiek, D. (1985) ‘Prédiction des propriétés de l’eau du sol pour la modélisation hydrologique.’, *Dans Gestion des bassins versants dans les années 80*, pp. 293–299.
- 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>.
- Review, C.L. and Carman, E.C. (1938) ‘Should the States Be Permitted to Make Compacts Without the Consent of Congress’, 23(2).
- Rojas, E. (2008) ‘Equivalent Stress Equation for Unsaturated Soils. I: Equivalent Stress’, *International Journal of Geomechanics*, 8(5), pp. 285–290. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1532-3641\(2008\)8:5\(285\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1532-3641(2008)8:5(285)).
- 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>.
- Sadrekarami, A. and Olson, S.M. (2010) ‘Particle damage observed in ring shear tests on sands’, *Canadian Geotechnical Journal*, 47(5), pp. 497–515. Available at: <https://doi.org/10.1139/T09-117>.
- 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. (2011) 'HAL Id: tel-00567000 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00567000> Etude de la rétention d'eau et de la consolidation des sols dans un cadre thermo-hydro-mécanique'. Available at: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00567000>.

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.

Salter, P.J., Berry, G. and Williams, J.B. (1965) 'the Influence of Texture on the Moisture Characteristics of Soils: Ii. Available-Water Capacity and Moisture Release Characteristics', *Journal of Soil Science*, 17(1), pp. 93--98. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1965.tb01442.x>.

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.

Saxton, K.E. *et al.* (1986) 'Estimating soil water characteristics-hydraulic conductivity', *Soil Science Society of America Journal*, 50(4), pp. 1031–1036. Available at: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/sssaj/abstracts/50/4/SS0500041031>.

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).

Silva, J.A. and Bremner, J.M. (1966) 'Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soils', *Soil Science Society of America Journal*, 30(5), pp. 587--594. Available at: <https://doi.org/10.1093/jaoac/68.2.155>.

Szenknect, S. (2003) *Transfert de radioéléments en zone non saturée: étude expérimentale et modélisation appliquée au site pilote de Tchernobyl*. Grenoble 1.

- Tang, A.M. (2005) 'Temperature effect on the behaviour of engineered clay barriers; Effet de la temperature sur le comportement des barrieres de confinement.'
- 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*. ohn Wiley, *Engineering Practice*. ohn Wiley. New York.
- Toll, D.G. *et al.* (2016) 'Tensiometer techniques for determining soil water retention curves', *Unsaturated Soil Mechanics from Theory to Practice - Proceedings of the 6th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils*, (June), pp. 15–22. Available at: <https://doi.org/10.1201/b19248-4>.
- Tomasella, J. *et al.* (2003) 'Comparison of Two Techniques to Develop Pedotransfer Functions for Water Retention', *Soil Science Society of America Journal*, 67(4), pp. 1085–1092. Available at: <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1085>.
- 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.
- Vereecken, H. *et al.* (1989) 'Estimation de la caractéristique de rétention d'humidité du sol à partir de la texture, de la densité apparente et de la teneur en carbone', *Sciences du sol*, 148(6), pp. 389-403.
- Vesic, A.B. and Barksdale, R.D. (1963) 'THEORETICAL STUDIES OF CRATERING MECHANISMS AFFECTING THE STABILITY OF CRATERED SLOPES SMALL-

SCALE CRATERING TESTS.’

Vesić, A.S. and Clough, G.W. (1968) ‘Behavior of granular materials under high stresses.’, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 94(3), pp. 661--688.

Vogel, T. and Cislerova, M. (1988) ‘Sur la fiabilité de la conductivité hydraulique non saturée calculée à partir de la courbe de rétention d’humidité.’, *Transport en milieu poreux*, 3, pp. 1-15.

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

Vuković, M. and Soro, A. (1992b) ‘Hydraulics of water wells: theory and application.’, *Water Resources Publications* [Preprint].

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

Wang, Q. *et al.* (2013) ‘Hydraulic conductivity and microstructure changes of compacted bentonite/sand mixture during hydration’, *Engineering Geology*, 164, pp. 67–76. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.06.013>.

Weynants, M. (2005) *Caractérisation des propriétés hydrodynamiques et étude de la possibilité d’agrégation de trois types de sols au Fakara, Niger.*, *Comptes Rendus - Mécanique*. Université Catholique de Louvain. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.crme.2006.05.003>.

Wong, R.C.K., Barr, W.E. and Kry, P.R. (1993) ‘Stress-strain response of Cold Lake oil sands’, *Canadian Geotechnical Journal*, 30(2), pp. 220–235. Available at: <https://doi.org/10.1139/t93-019>.

Wösten, J.H.M., Pachepsky, Y.A. and Rawls, W.J. (2001) ‘Pedotransfer functions: Bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics’, *Journal of Hydrology*, 251(3–4), pp. 123–150. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00464-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00464-4).

Xu, XT, Jian, WB, Wu, NS, Xu, X., & Shao, L. (2020) ‘Modèle de rétention d’eau dépendant du taux de vide pour une argile résiduelle déformable.’, *ournal international de géomécanique*, 20(8), p. 04020131.

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>.

Zhang, X. and Baudet, B.A. (2013) 'Particle breakage in gap-graded soil', *Geotechnique Letters*, 3(APRIL/JUN), pp. 72–77. Available at: <https://doi.org/10.1680/geolett.13.00022>.

Zheng, W. and Tannant, D. (2016) 'Frac sand crushing characteristics and morphology changes under high compressive stress and implications for sand pack permeability.', 53(9), pp. 1412--1423.