

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider –Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et d'Hydraulique
Référence : .../2020



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية والري
المرجع /2020.

Mémoire de Master

Spécialité : Géotechnique

Thème :

***CORRELATION EXPERIMENTALE ENTRE LA
PERMEABILITE D'UN MATERIAU GRANULAIRE
ET SES CARACTERISTIQUE PHYSIQUE***

Nom et Prénom de l'étudiant :

.Hamza Ghollassa

Encadreur :

.Mme. Linda Bouacida

Année universitaire : 2019 - 2020

DÉDICACES

Je remercie Dieu Tout-Puissant pour lui et son aide pour mener à bien cette recherche
A celui qui m'a donné tout ce qu'il avait pour que je puisse réaliser ses espoirs envers lui, à
celui qui m'a poussé en avant

Pour atteindre le désiré, à la personne qui possédait l'humanité avec tout pouvoir, à celle qui
veillait sur mon éducation

Avec d'énormes sacrifices traduits en sa vénération pour la science, à ma première école dans
la vie,

Mon cher père, que Dieu prolonge sa vie.

A celle qui a donné à la joie de son cœur toute la tendresse et la tendresse, à celle qui est
patiente avec tout,

Celle qui a pris soin de moi et a été mon soutien dans l'adversité, et sa prétention à moi était
de la chance,

Elle m'a suivi pas à pas dans mon travail, à qui je me détendais chaque fois que je me
souvenais de son sourire sur mon visage

Source de tendresse, ma mère est l'ange le plus cher dans le cœur et l'œil. Que Dieu la
récompense pour moi

Darin; A eux je leur dédie cet humble acte pour apporter un peu de bonheur à leur cœur

À mes frères et sœurs qui ont partagé avec moi le fardeau de la vie ;

Je dédie également le fruit de mes efforts à mon professeur **Mme. Linda Bouacida**, qui
chaque fois que la route s'assombrit

Devant moi j'y ai recouru, puis ça l'a éclairé pour moi, et chaque fois que je devenais
désespéré, je semais l'espoir d'un captif

Et plus je demandais des connaissances qu'elle me donnait, et plus je lui demandais le temps
précieux que je pouvais lui consacrer

Lee malgré ses multiples responsabilités ; À tous les professeurs du département de génie
civil et d'irrigation ;

Et à mes amis **Samir Aouad, Rahal Nour El houda** et **Amri Meriem** je les remercie
beaucoup pour leur aide et leur soutien.

À tous ceux-ci, je dédie ce travail.



REMERCIEMENTS

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

Faites ce travail

J'adresse mes sincères remerciements et ma gratitude à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir cela

Ce travail et pour surmonter les difficultés auxquelles nous avons été confrontés, en particulier le professeur superviseur

Mme. Linda Bouacida, qui n'a pas lésiné sur ses précieux conseils et conseils qui m'ont aidé

Terminez cette recherche.

Et je remercie tout particulièrement le professeur **Dr. Feia Sadok** de nous avoir apporté une aide précieuse dans la réalisation de cette recherche.

Je remercie également les êtres chers à mon cœur qui m'ont été un soutien et une aide à ce stade

Je ne manque pas de remercier tous les professeurs qui m'ont appris une lettre.



Résumé

La connaissance de la perméabilité est très importante dans de nombreux domaines. Par exemple, dans le domaine du génie pétrolier, la connaissance de la perméabilité de sable est nécessaire pour comprendre le phénomène de colmatage lors de l'injection d'eau de production. Dans cette étude, nous avons utilisé dix types de sable pour l'évaluation de la perméabilité avec la variation de diamètre moyen des grains, et l'indice de densité. À partir de cette étude nous avons pu avoir une loi qui relie la perméabilité avec le diamètre moyen des grains et l'indice de densité. Cette loi permet d'éviter d'effectuer des mesures expérimentales de perméabilité relativement longues. Donc, la perméabilité d'un sable pourrait être évaluée en connaissant juste son diamètre moyen des grains ainsi son état de densité. Dans cette étude, nous avons utilisé la méthode tensiométrique sur un type de sable afin d'évaluer sa distribution de la taille d'accès aux pores. Cette méthode consiste à augmenter par paliers la succion régnant au sein de l'éprouvette et à mesurer les variations correspondantes de la teneur en eau. Nous utilisons la méthode tensiométrique pour obtenir la courbe de rétention d'eau. À partir cette courbe et la loi de Jurin qui permet d'exprimer la succion en fonction du rayon d'accès des pores nous pouvons évaluer la distribution de la taille d'accès aux pores. L'objectif à moyen terme de cette mesure est d'avoir une relation empirique reliant la perméabilité avec les tailles moyennes d'accès aux pores et grains ainsi que l'indice de densité.

Mots-clefs : *perméabilité -courbes des rétention d'eau – taille des pores – taille des grains*

Abstract

The knowledge of permeability is very important in many areas. For example, in the field of petroleum engineering, knowledge of sand permeability is necessary to understand the clogging phenomenon during the injection of production water. In this study, we used ten types of sand for assessing permeability with mean grain diameter variation, and density index. From this study we could have a law that relates the permeability with the mean grain diameter and the density index. This law makes it possible to avoid carrying out relatively long experimental measurements of permeability. So the permeability of a sand could be evaluated by just knowing its mean grain diameter and its density state. In this study, we used the tensiometric method on one type of sand to evaluate its pore size distribution. This method consists in incrementally increasing the suction prevailing within the specimen and measuring the corresponding variations in the water content. We use the tensiometric method to obtain the water retention curve. From this curve and the law of Jurin which allows to express the suction according to the radius of access of the pores we can evaluate the distribution of the size of access to the pores. The medium-term goal of this measure is to have an empirical relationship between permeability with mean pore and grain access sizes and density index.

Key Words: *permeability-Water retention curve – pore size – grain size.*

Liste des Figures

CHAPITRE 01 : Etude bibliographique

fig. 1 Représentation graphique de la rondeur, R (redessiné de Muszynski et Stanley, 2012)	5
Fig. 2 Représentation graphique de la sphéricité, S (redessiné de Muszynski et Stanley, 2012).	5
Fig. 3 Tableau comparatif (Santamarina et Cho 2004)	6
Fig.4 : SEM images des CSS (haut) et NS (bas) utilisés lors de l'étude expérimentale étude ..	7
fig.5 Distribution granulométrique des sables utilisés lors de l'étude expérimental.....	7
Fig.6 échantillons (la ligne droite représente la ligne de Comparaison de la conductivité hydraulique mesurée (k) avec les prédictions de divers modèles pour l'égalité parfaite NS	7
Fig.7 Comparaison des échantillons de conductivité hydraulique mesurés (la ligne droite représente la ligne d'égalité parfaite) (k) avec des prédictions de divers modèles pour CSS	8
Fig.8 Effets de la gradation sur les valeurs de conductivité hydraulique des échantillons NS et CSS	9
Fig.9 Effets de la forme des grains sur les valeurs de conductivité hydraulique des échantillons testés	9
Figure 1-10 – Evolution de la perméabilité en fonction de la porosité des cinq types de matériaux (David et al. 1994)	12
Figure. 11. 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 et Santamarina 2017)	13
Figure. 12. Conductivité hydraulique mesurée k par rapport à la taille moyenne estimée des pores d_p (Ren et Santamarina 2017).....	15
Figure 13. Actions de forces sur une molécule d'eau(Technique de l'ingénieur 2012)	16
Figure 14 : Modèle physique du phénomène d'effet capillaire.....	17
Figure 15 : ménisque capillaire, a : sol granulaire ; b : sol fin (P. Dalage et Y.J Cui, 2000).....	18
Figure 16.Principe de la plaque tensiométrique (faibles succions)(Technique de l'ingénieur 2012)	20
Figure 17. Cellule de Richards pour le contrôle de succionpar translation d'axe(Technique de l'ingénieur 2012)	21
Figure 18.Mise en œuvre de la technique Osmotique (Technique de l'ingénieur 2012	21
Figure 29.Contrôle de succion par phase vapeur (Technique de l'ingénieur 2012).....	22
Figure 20.Principe de la mesure de la succion par tensiométrie(Technique de l'ingénieur 2012)	22
Figure 21.Méthode du papier-filtre (Technique de l'ingénieur 2012).....	23

Liste des figures et tableau et Sommaire

CHAPITRE 02 : Dispositif expérimentale et matériau étude

Figure 2.1. : Série des tamis utilisé pendant les essais granulométriques (source internet).....	27
Figure 2.2. Courbe granulométrique (source internet)	28
Figure 2.3. Présentation le tube de mariotte (source internet)	29
Figure 2.4. Présentation de dispositif de mesure de perméabilité a) vue générale b) schéma fonctionnel	29
Figure 2.5. Préparation l'indice de densité minimal, a) versement d'une petite quantité pour former une couche, b) compactage et vibration	30
Figure 2.6. Préparation l'indice des vides maximum.....	30
Figure 2.7. Schéma explicatif des processus de séchage et mouillage dans le réseau poreux constitué de cylindres de rayon r , (r_m est le rayon du ménisque de l'interface air-eau) (d'après Do, 1998).....	32
Figure 2.8. – Schéma de principe de la méthode tensiométrique de mesure de la succion (Feia et al. 2014).....	34
Figure 2.9. Préparation d'une éprouvette de sable, a) versement d'une petite quantité pour former une couche, b) compactage et vibration, c) recouvrement de l'éprouvette par un film cellophane afin d'éviter l'échange d'humidité avec l'extérieure	35
Figure 2.10. Vue générale de dispositif	35
Figure 2.11. Vue des dix types de sable étudiés.....	36
Figure 2.12. Courbes granulométriques des sables étudiés	37

CHAPITRE 03 : Résultats expérimentaux et discussion

Figure.3.1. Perméabilité des sables en fonction de l'indice de densité	40
Figure.3.2. Perméabilité des sables en fonction de diamètre moyen	41
Figure 3.3 évolution du paramètre « a » ainsi que la paramètre « b » en fonction du diamètre moyen des grains	42
Figure 3.4. Courbe de rétention d'eau d'un sable (w est la teneur en eau).....	43
Figure 3.5. Distribution de la taille des pores et de la taille des grains d'un sable ($ID = 0,9$).....	43
Figure 3.6. 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)	44
Figure 3.7. La distribution de la taille des pores à partir le courbe de séchage	45

Liste des Tableaux

CHAPITRE 01 : Etude bibliographique

Tableau 1 : Relation succion /humidité relative, selon la relation de kelvin..... 20

CHAPITRE 02 : Dispositif expérimentale et matériau étude

Tableau 2.1. Caractéristiques des sables utilisés 36

CHAPITRE 03 : Résultats expérimentaux et discussion

Tableau 3-1. Caractéristiques des sables utilisés..... 39

Table des matières

➤ Résumé ET Abstract	III
➤ Dédicaces.....	I
➤ Remerciements	II
➤ Liste des figures	III
➤ Liste des tableaux.....	VII
➤ Introduction Générale... ..	X

Sommaire

CHAPITRE 1. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Sommaire

1.1. Introduction:	1
1.2 Formule empirique établie	2
1.3. Effet de la microstructure sur la perméabilité des milieux poreux.....	11
2. Compilation de données - le rôle de la taille des pores	13
Pertinence des valeurs macroscopiques e et S_s	14
Variation de la perméabilité (k) en fonction de la taille des pores.....	15
3. Succion dans les sols	16
3.1- Capillarité	16
3.2-Définition de la succion.....	18
3.3-Relation succion - humidité relative	18
4. Techniques de contrôle et de mesure de la succion	20
Contrôle par plaque tensiométrique ;	20
Contrôle par « translation d'axes » ;	21
Technique de contrôle osmotique ;	21
Technique de contrôle par phase vapeur ;	22
Mesure tensiométrique de la succion ;	22
Mesure psychrométrique de la succion ;	22
Méthode du papier-filtre ;	23
Mesures de succion par d'autres systèmes.	23
5. Propriétés de rétention d'eau	23
6. Techniques de mesure de perméabilité des sols non saturés	22

CHAPITRE 2. Dispositifs expérimentaux et matériaux étudiés

Liste des figures et tableau et Sommaire

Sommaire

Introduction.....	27
Méthodes de caractérisation des matériaux testés.....	27
Analyses granulométriques.....	27
Dispositif de mesure de perméabilité.....	28
Détermination de l'indice des vides minimum et maximum.....	30
Dispositif et procédure de mesure de la distribution de la taille d'accès aux pores :31	2.4
Principe de la méthode tensiométrique.....	32
Programme expérimental.....	33
Matériels et procédure d'essai.....	33
Préparation des éprouvettes.....	34
Caractéristiques des matériaux étudiés.....	35
2.7. Conclusion.....	37

CHAPITRE 3. Résultats expérimentaux et discussion

Sommaire

Introduction.....	39
Programme d'essais.....	39
Évolution de la perméabilité en fonction de l'indice de densité ID33.....	40
Évolution de la perméabilité en fonction du diamètre moyen des grains d50.....	40
Corrélation entre la perméabilité, le diamètre moyen et l'indice de densité Les tendances des courbes obtenues sont de forme linéaire (équ 3-2).....	31
Evaluation de la distribution de la taille des pores d'un sable par la méthode tensiometrique.....	32
Conclusion.....	35

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

➤ Conclusions.....	47
➤ Références bibliographiques.....	48

INTRODUCTION GENERALE

La compréhension de l'écoulement multiphasique au niveau des pores est d'une grande importance dans de nombreux domaines, tels que l'hydrologie pendant la circulation des eaux souterraines et l'ingénierie pétrolière pendant l'injection d'eau de production contenant des particules solides. Ces particules peuvent obstruer les pores de la formation, ce qui peut entraîner une augmentation de la pression d'injection au-delà de la capacité des pompes. Il est nécessaire donc, de connaître les traits géométriques du réseau poreux du milieu, tels que la taille et la forme des pores. En ce qui concerne la modélisation, le réseau poreux d'un sol est représenté à l'échelle microscopique par un réseau de pores interconnectés par des rainures. Ce type de modèle permet d'estimer la perméabilité absolue et relative du sol (Fischer et Celia, 1999; Vogel, 2000, Valvatne, 2004).

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

Dans cette étude, nous présentons les résultats d'une étude expérimentale de perméabilité, en termes de variation de diamètre moyen des grains, et l'indice de densité. Nous utilisons la méthode tensiométrie pour évaluer la distribution de la taille des pores à partir la courbe de rétention d'eau. Nous présentons en premier lieu, une description des matériaux étudiés (les sables) puis les tests utilisés pour caractériser ces matériaux (e_{min} , e_{max} , $C_u...$). Nous décrivons par la suite en détail l'équipement expérimental utilisé dans cette étude.

CHAPITRE 1. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Sommaire

1.1. Introduction:	1
1.2 Formule empirique établie.....	2
1.3. Effet de la microstructure sur la perméabilité des milieux poreux	11
2. Compilation de données - le rôle de la taille des pores.....	13
Pertinence des valeurs macroscopiques e et S_s	14
Variation de la perméabilité (k) en fonction de la taille des pores	15
3. Succion dans les sols	16
3.1- Capillarité	16
3.2-Définition de la succion	18
3.3-Relation succion - humidité relative	18
4. Techniques de contrôle et de mesure de la succion.....	20
Contrôle par plaque tensiométrique ;.....	20
Contrôle par « translation d'axes » ;.....	21
Technique de contrôle osmotique ;.....	21
Technique de contrôle par phase vapeur ;.....	22
Mesure tensiométrique de la succion ;.....	22
Mesure psychrométrique de la succion ;.....	22
Méthode du papier-filtre ;	23
Mesures de succion par d'autres systèmes.	23
5. Propriétés de rétention d'eau	23
6. Techniques de mesure de perméabilité des sols non saturés	22

1.1. Introduction :

Il est connu depuis longtemps que la conductivité hydraulique est lié à la distribution granulométrique des milieux poreux granulaires (Freeze et Cherry, 1979). Cette interrelation est très utile pour l'estimation des valeurs de la conductivité hydraulique lorsque les données de perméabilité directe sont rares, comme dans les premiers stades de l'exploration d'un aquifère. à la fois dans la zone saturée et insaturée, et le transport de polluants solubles dans l'eau dans le sol. C'est également un paramètre important pour la conception du drainage d'une zone et pour la construction d'un barrage en terre et d'une digue. De plus, il est d'une importance primordiale. Cependant, une estimation précise de le **coefficient de perméabilité** dans l'environnement sur le terrain par les méthodes de terrain est limité par le manque de connaissance précise de la géométrie des aquifères et des limites hydrauliques (UMA et al. 1989). 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 de granulométrie sont comparativement moins chères et ne dépendent pas de la géométrie et des limites hydrauliques de l'aquifère. Plus important encore, étant donné que les informations sur les propriétés texturales des sols ou des roches sont plus faciles à obtenir, une alternative potentielle pour estimer la conductivité hydraulique des sols consiste en une distribution granulométrique. Bien qu'en hydromécanique, il serait plus utile de caractériser les diamètres des pores que ceux des grains, la distribution de la taille des pores est très difficile à déterminer, de sorte que l'approximation des propriétés hydrauliques est principalement basée sur la taille des grains facile à mesurer distribution en remplacement (Cirkpa 2003). En conséquence, les professionnels des eaux souterraines tentent depuis des décennies d'établir un lien entre la conductivité hydraulique et la taille du grain. Les tâches semblent assez simples mais il a été constaté que cette corrélation n'est pas facile à établir (Pinder et Celia 2006).

De nombreux chercheurs ont étudié cette relation et ont abouti à plusieurs formules basées sur des travaux expérimentaux. Kozeny (1927) a proposé une formule qui a ensuite été modifiée par Carman (1937, 1956) pour devenir l'équation de Kozeny-Carman. Hazen (1892), Shepherd (1989), Alyamani et Sen (1993), Terzaghi et Peck (1964) ont fait d'autres tentatives. L'applicabilité de ces formules dépend du type de sol pour lequel la conductivité hydraulique doit être estimée. De plus, peu de formules donnent des estimations fiables des résultats en raison de la difficulté d'inclure toutes les variables possibles dans un milieu poreux. Vukovic et Soro (1992) ont noté que les applications de différentes formules empiriques au même matériau de milieu poreux peuvent donner différentes valeurs de conductivité hydraulique, qui peuvent différer d'un facteur 10 ou même 20. L'objectif de cet article est donc d'évaluer l'applicabilité et la fiabilité de certaines formules empiriques couramment utilisées pour la détermination de coefficient de perméabilité de matériaux de sol de roche non consolidés.

1.2 Formule empirique établie:

Le coefficient de perméabilité (K) peut être estimée par l'analyse granulométrique du sol d'intérêt, à l'aide d'équations empiriques liant K à une propriété de taille de grain de sol Vukovic et Soro (1992) ont résumé plusieurs méthodes empiriques d'études antérieures et présenté une formule générale:

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

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

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-2)$$

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

$$n = 0.255(1 + 0.83^U) \quad (1-3)$$

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

$$U = \left(\frac{d_{60}}{d_{10}} \right) \quad (1-4)$$

Ici, d₆₀ et d₁₀ dans la formule représentent le diamètre de grain en (mm) pour lequel, respectivement, 60% et 10% de l'échantillon sont plus fins que.

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

Hazen: $K = \frac{g}{v} \times 6 \times 10^{-4} [1 + 10(n - 0.26)] d_{10}^2 \quad (1-5)$

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:
$$K = \frac{g}{\nu} \times 8.3 \times 10^{-3} \left[\frac{n^3}{(1-n)^2} \right] d_{10}^2 \quad (1-6)$$

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 (1927), puis modifiée par Carman (1937, 1956) pour devenir l'équation de Kozeny-Carman.

Breyer:
$$K = \frac{g}{\nu} \times 6 \times 10^{-4} \log \frac{500}{U} d_{10}^2 \quad (1-7)$$

Cette méthode ne prend pas en compte la porosité et par conséquent, la fonction de porosité prend la valeur 1. La formule de Breyer est souvent considérée comme la plus utile pour les matériaux à distribution hétérogène et les 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:
$$K = \frac{g}{\nu} \times 1 \times 10^{-2} n^{3.287} d_{10}^2 \quad (1-8)$$

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

Terzaghi:
$$K = \frac{g}{\nu} \cdot C_t \cdot \left(\frac{n-0.13}{\sqrt[3]{1-n}} \right)^2 d_{10}^2 \quad (1-9)$$

où C_t = coefficient de tri et dans cette étude, une valeur moyenne de C_t est utilisée. La formule de Terzaghi est la plus applicable pour le sable à gros grains (Cheng et Chen, 2007.)

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

Le Bureau de récupération des États-Unis (USBR) calcule la conductivité hydraulique 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 et Chen, 2007).

Alyamani & Sen:
$$K = 1300 [I_o + 0.025(d_{50} - d_{10})]^2 \quad (1-11)$$

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 (1-1) ci-dessus.

Le coefficient de perméabilité a été estimé expérimentalement à une densité relative (D_r) d'environ 40 % et à une température constante de 22 ± 2 °C .Le sable de Narli (NS) avec 0,67 de sphéricité (S) et 0,72 de rondeur(R), et le sable de pierre concassée (CSS) avec 0,55

de S et 0,15 de R étaient des valeurs artificielles. classés en seize fractions granulométriques différentes (4.75-2, 2-1.18, 1.18-0,6, 0.6-0.425, 0.425-0.3, 0.3-0.075, 4.75-0.075, 2-0.075, 1.18-0.075, 0.6-0.075, 0.425-0.075, 4.75-0.6, 2-0.6, 4.75-0.425, 2-0.425, 1.18-0.425 mm). Le coefficient de perméabilité de NS est estimées à l'aide d'un essai à tête constante variait de 1,61 à 0,01 cm/s, tandis que celles de la CSS est estimé par le même essai variait de 2,45 à 0,012 cm/s.

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 et Peck 1964 ; Moore et al. 1982 ; Wintsch et al. 1995 ; Person et al. 1996 ; Boadu 2000 ; Chapuis 2012). Il y a eu des tentatives d'estimation de la conductivité hydraulique selon la distribution granulométrique (Mualem 1976 ; Freeze et Cherry 1979 ; Uma 1989 ; Salarashayeri et Siosemarde 2012). Empirique (Hazen 1911 ; Krumbein et Monk 1942 ; Alyamani et Sen 1993) et les méthodes prédictives (Kozeny 1927 ; Carman 1937 ; Boadu 2000 ; Goktepe et Sezer 2010) d'estimer la conductivité hydraulique 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 ; Lees 1964 ; Olson et Mesri 1970 ; Abbireddy et al. 2009 ; Clayton et al. 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 incomplète**. 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 et D'Appolonia (1973) ont indiqué que les résultats de la pénétration dynamique dans le sable dépendent des caractéristiques de forme des grains. Cornfort (1973), et Holtz et Kovacks (1981) a souligné comment la forme du grain affecte l'angle de frottement interne (ϕ). Cedergen (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 (Kramer 1996). Wadell (1932), Krumbein (1941), Powers (1953), Holubec et D'Appolonia (1973), Youd (1973) et Cho et coll 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. Wadell (1932) a proposé un paramètre de sphéricité (S) simplifié ($D_{\max\text{-inse}}/D_{\min\text{-circ}}$), où $D_{\max\text{-min}}$ 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 $D_{i\text{-ave}}/D_{\max\text{-inse}}$,

Les figures 1, 2 et 3 décrivent R, S et un tableau comparatif entre eux pour identifier la

forme de grain (Krumbein 1941 ; Powers 1953).

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.

En effet le couplage inhérent entre la taille et la forme des grains de sable et les changements du **coefficient de perméabilité** par l'exploitation d'essais de perméabilité à tête constante sur seize taille de grain différents

(4,75-2, 2-1,18, 1,18-0,6, 0,6-0,425, 0,425-0,3, 0,3-0,075, 4,75-0,075, 2-0,075, 1,18-0,075, 0,6-0,075, 0,425-0,075, 4,75-0,6, 2-0,6, 4,75-0,425, 2-0,425,

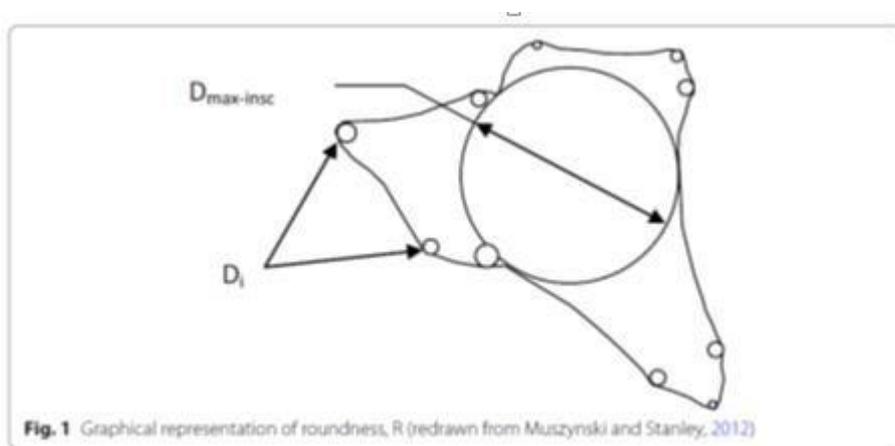


Fig. 1 Représentation graphique de la rondeur, R (redessiné de Muszynski et Stanley, 2012)

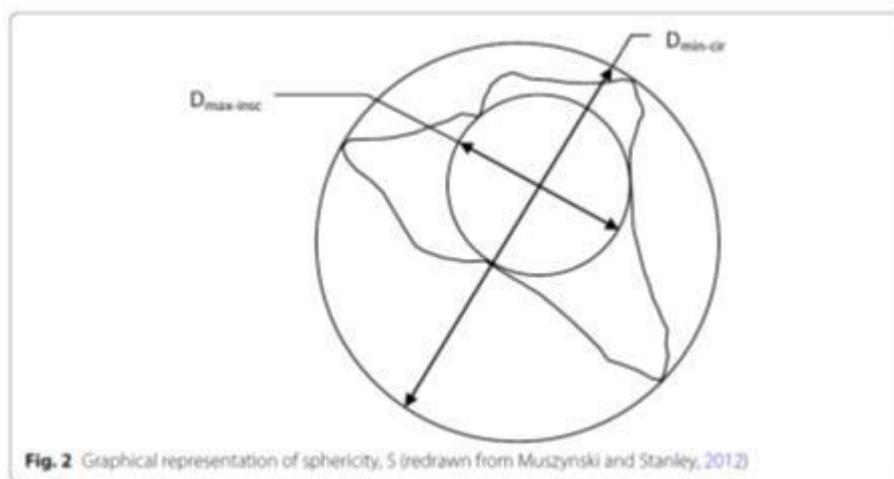


Fig. 2 Représentation graphique de la sphéricité, S (redessiné de Muszynski et Stanley, 2012).

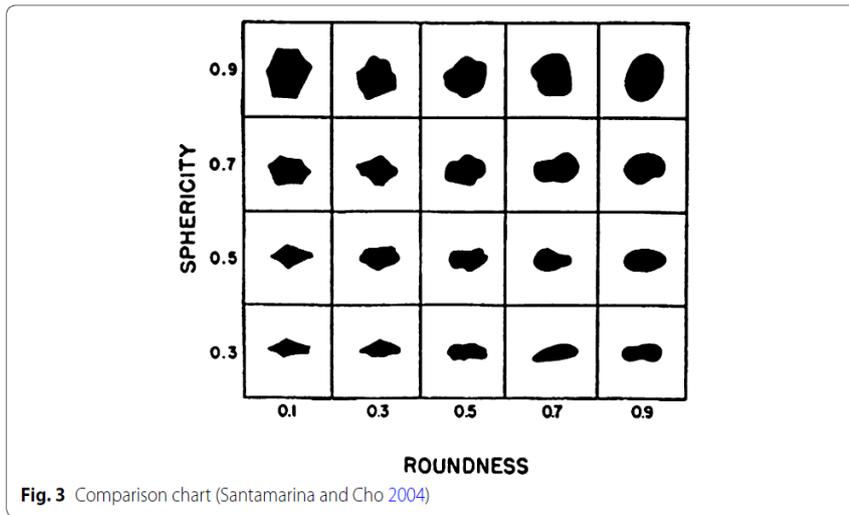


Fig. 3 Tableau comparatif (Santamarina et Cho 2004)

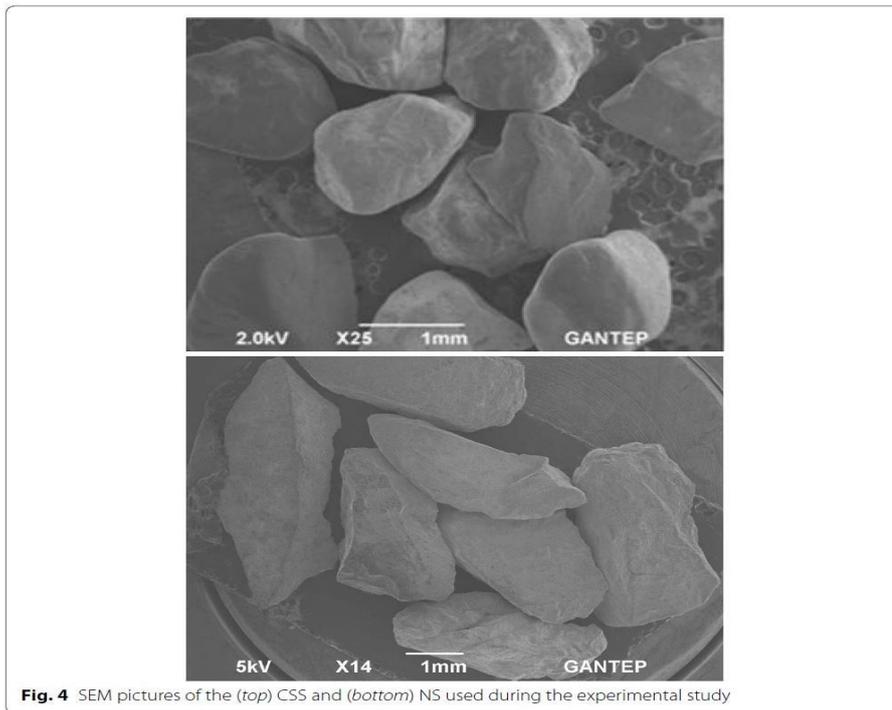


Fig.4 : SEM images des CSS (haut) et NS (bas) utilisés lors de l'étude expérimentale étude

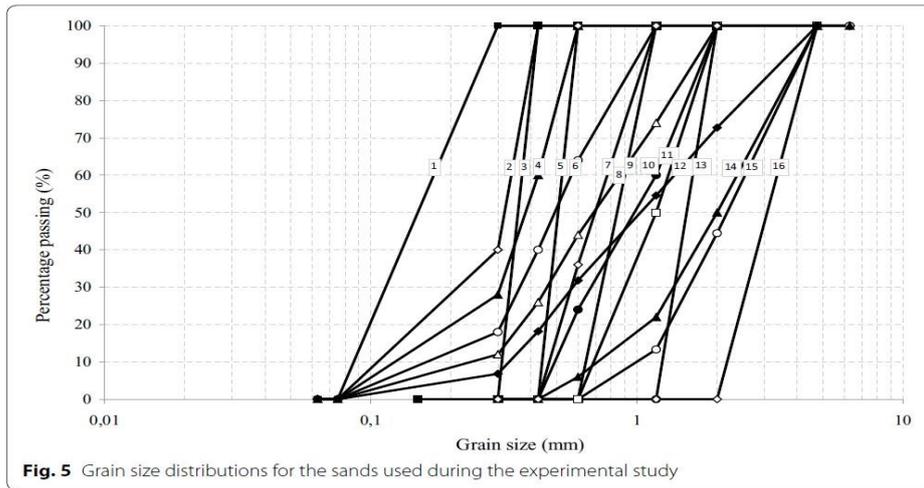


fig.5 Distribution granulométrique des sables utilisés lors de l'étude expérimental

Le tableau 4 présente les équations empiriques et leurs limites d'application pour le coefficient de perméabilité :

Table 4 Empirical equations and their limitations for permeability estimates

Researcher/organization	Equation	Limitations
Hazen	$k = 6 \times 10^{-4} \times \frac{g}{v} \times [1 + 10(n - 0.26)] \times (d_{10})^2$	$C_u < 5$ $0.1 < d_{10} < 3.0$
Kozeny-Carman	$k = 8.3 \times 10^{-3} \times \frac{g}{v} \times \left[\frac{n^3}{(1-n)^2} \right] \times (d_{10})^2$	$0.5 < d_{10} < 4.0$
Terzaghi	$k = 0.0084 \times \frac{g}{v} \times \left[\frac{n-0.13}{\sqrt{1-n}} \right]^2 \times (d_{10})^2$	-
Chapuis	$k = 1.5 \times (d_{10})^2 \times \frac{e^2}{1+e} \times \frac{1+e_{max}}{(e_{max})^3}$	-
Slitcher	$k = 1 \times 10^{-2} \times \frac{g}{v} \times n^{3.287} \times (d_{10})^2$	$0.01 < d_{10} < 5.0$
USBR	$k = 4.8 \times 10^{-3} \times \frac{g}{v} \times (d_{20})^{0.3} \times (d_{20})^2$	$C_u < 5$
NAVFAC	$k = 10^{1.291e-0.6435} \times (d_{10})^{10^{(0.5504-0.2937e)}}$	$2 < C_u < 12$ $0.1 < d_{10} < 2.0$ $0.3 < e < 0.7$ $1.4 < \frac{d_{10}}{d_5}$
Alyamani and Sen	$k = 1300 \times [l_0 + 0.025(d_{50} - d_{10})]^2$	-
Breyer	$k = 6 \times 10^{-4} \times \frac{g}{v} \times \log \left[\frac{500}{C_u} \right] \times (d_{10})^2$	$0.06 < d_{10} < 0.6$ $1 < C_u < 20$

Néanmoins, malgré les bonnes prédictions dans certaines classifications d'échantillons, les auteurs ont interprété que la fiabilité de ces approches est relativement faible, car tout système d'évaluation négligeant l'effet de la forme du grain serait incomplète.

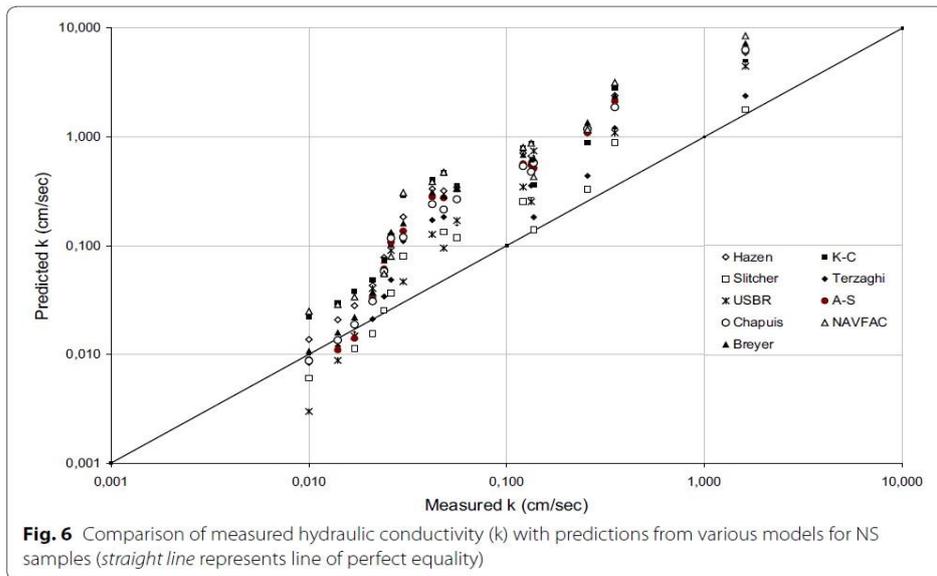


Fig.6 échantillons (la ligne droite représente la ligne de Comparaison de la conductivité hydraulique mesurée (k) avec les prédictions de divers modèles pour l'égalité parfaite NS)

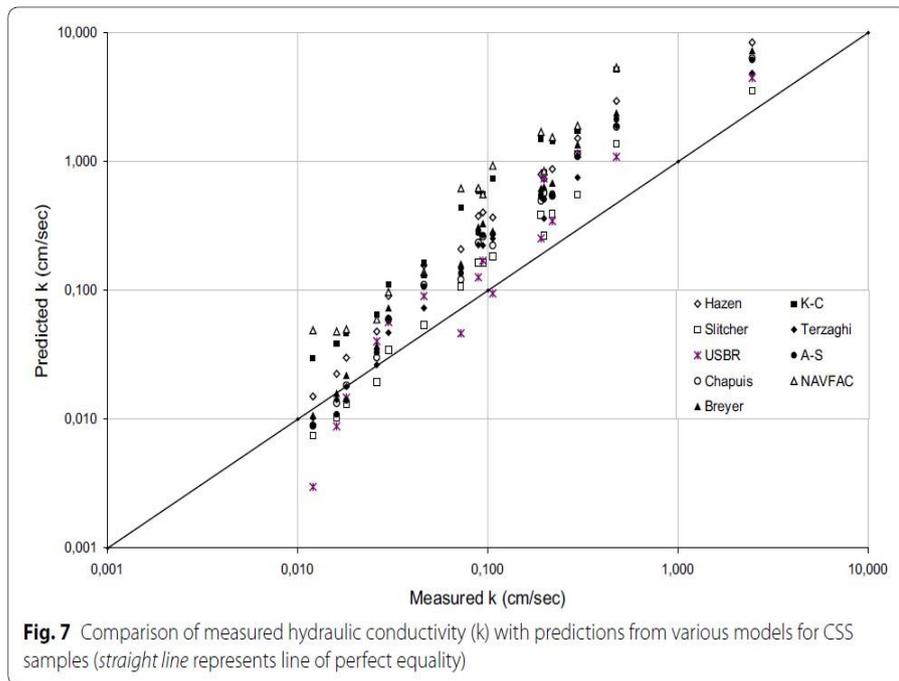


Fig.7 Comparaison des échantillons de conductivité hydraulique mesurés (la ligne droite représente la ligne d'égalité parfaite)

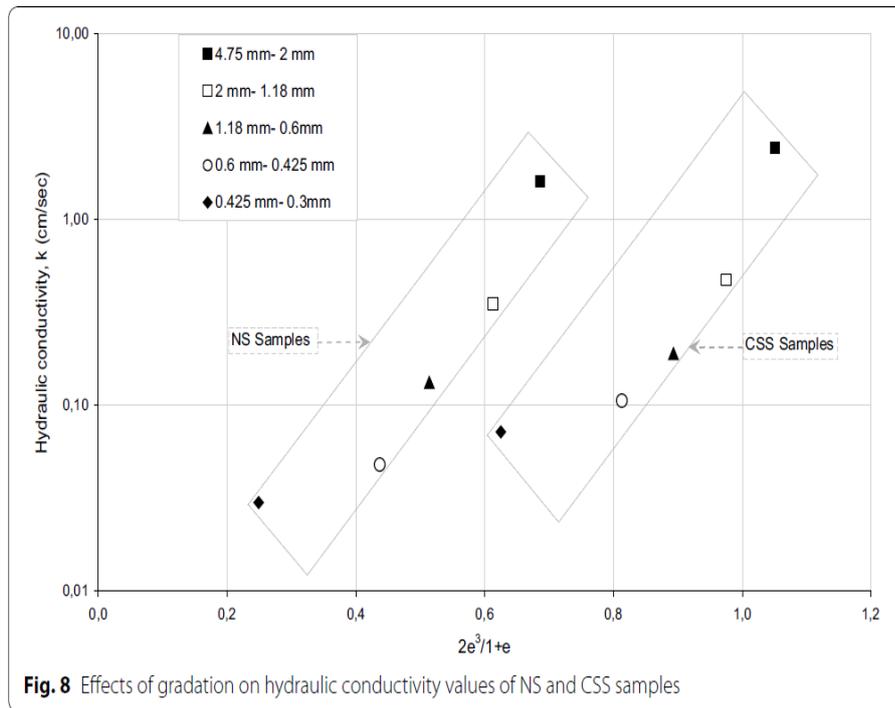


Fig.8 Effets de la gradation sur les valeurs de conductivité hydraulique des échantillons NS et avec des prédictions de divers modèles pour CSS CSS

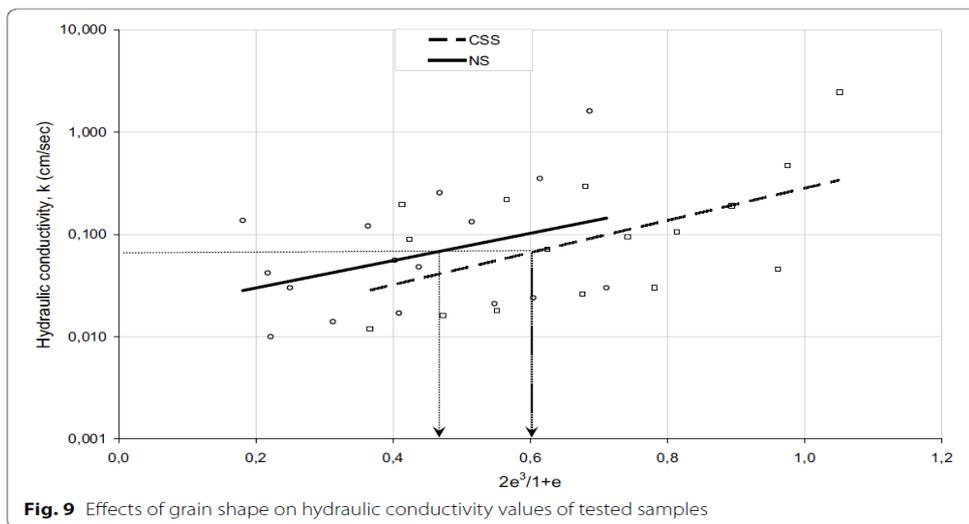


Fig.9 Effets de la forme des grains sur les valeurs de conductivité hydraulique des échantillons testés

Les résultats des tests et l'étude comparative dont il est question dans cette recherche indiquent les aspects suivants du comportement :

1. Les valeurs de coefficient de perméabilité des échantillons NS à grains arrondis étaient plus faibles que ceux des échantillons CSS à grains très angulaires, qui sont probablement les plus susceptibles d'être les suivants résultat de caractéristiques de forme conduisant à des taux de vide différents.
2. Le **coefficient de perméabilité** peut être influencé de manière significative par les caractéristiques de nivellement y compris d_{10} , d_{20} , d_{30} , d_{50} , d_{60} , c_u , c_c , n et I_o .
3. La granulométrie des grains a un effet significatif sur le **coefficient de perméabilité** des deux échantillons NS et CSS.
4. L'étude comparative sur les perceptions des résultats estimés et prédits par rapport aux résultats des approches disponibles dans la littérature ont indiqué que la meilleure prédiction de l'effet des changements de **coefficient de perméabilité** en fonction de la granulométrie et des propriétés de forme de l'eau.sables testés.

Les équations théoriques et empiriques relient le coefficient de perméabilité des sols à des propriétés telles que la taille des grains, la surface spécifique, teneur en argile, porosité et géométrie des pores (Taylor, 1948 ; Malusis et al., 2003 ; Zhang et al., 2005 ; Roque and Didier, 2006 ; Dolinar, 2009 ; Mejias et al., 2009 ; Chapuis, 2012 ; Wang et al., 2013 ; Ilek and Kucza,2014; Sante et al., 2015; Ren et al., 2016; Kucza and Ilek, 2016). L'équation de Kozeny-Carman (KC) dérivée analytiquement considère le réseau poreux dans les sols comme un faisceau de tubes et elle assume l'écoulement de fluide laminaire dans les tubes. Le coefficient de perméabilité k [m / s] peut alors être exprimé en termes de surface spécifique S_s [m²/g] et l'indice des vides (Taylor, 1948):

$$k = \frac{C_{fg}}{V_f \rho_m} S_s^{-2} \frac{e^3}{1+e} \quad (1-12)$$

Où ρ_m [kg / m³] est la densité de masse minérale, ν_f [m² / s] est la viscosité cinématique du fluide et $C_{fg} \approx 0,2$ 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 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 (Hazen, 1892):

$$k(\text{cm/s}) \approx (D_{10})^2 (\text{mm}) \quad (1-13)$$

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 (Lambe et Whitman, 1969, Shepherd, 1989, Carrier, 2003). 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 (Sherard et al., 1984, Kenney et al., 1984, Indraratna et al., 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, 1948 a corrigé les valeurs calculées pour l'indice des vides rapport, suivant l'équation de Kozeny-Carman). D'autre coté les équations empiriques pour les sols fins présentent une dépendance du coefficient K avec l'indice des vides. Deux formes ont été proposées:

(a) une relation exponentielle ou log-linéaire

$$\text{Log} [k / (\text{cm} / \text{s})] = a + b \cdot e \quad (1-14)$$

(b) une autre relation de pouvoir

$$k = \alpha e^\beta \quad (1-15)$$

Les paramètres dans les deux cas ont été liés soit au limite de liquidité W_L ou au limite de plastique W_p du sol, En outre, étant donné le parallélisme entre l'eq. (1-3) et la compressibilité de Terzaghi

$e = e_0 - C_c \log (\sigma' / \sigma_0)$, Les paramètres du modèle a et b peuvent être aussi associée à la compressibilité des sols

Les équations (1-14) et (1-15) ont été utilisés pour les sols normalement consolidés (Pane et Schiffman, 1997), que pour les sols sur consolidés (Al-Tabbaa et Wood, 1987, Nagaraj et al., 1994), ainsi que pour les roches (David et al., 1994).

L'étude comprend une large gamme de sols cela peut justifier les tendances dominantes et anticiper les limites potentielles et les écarts.

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

La perméabilité est très influencée par la porosité du milieu, pour cela on trouve dans la littérature plusieurs lois qui exprime la perméabilité en fonction de la porosité. Le modèle le plus utilisé est le modèle de Kozeny-Carman. Kozeny (1927) a développé sous certaine hypothèse, une expression de la perméabilité basée sur la porosité et la tortuosité qui à été ajoutée comme paramètre d'ajustement pour décrire le fait que les chemins d'écoulements réels sont plus longs que la longueur du milieu. Carman (1937) 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 :

$$k = \frac{\phi^3}{C_{kc} \cdot S^2 \cdot (1 - \phi)^2} \quad (1-16)$$

David et al. (1994) ont étudié l'évolution de la perméabilité en fonction de la porosité des cinq types de matériaux pendant un chargement hydrostatique. Ils ont constaté que cette évolution suit bien une loi puissance qui relie la perméabilité à la porosité (équation 1-16) (Voir Figure 1-1). Le paramètre n varie de 4,6 à 25,4 selon de type de matériau.

$$k = k_0 \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^n \quad (1-17)$$

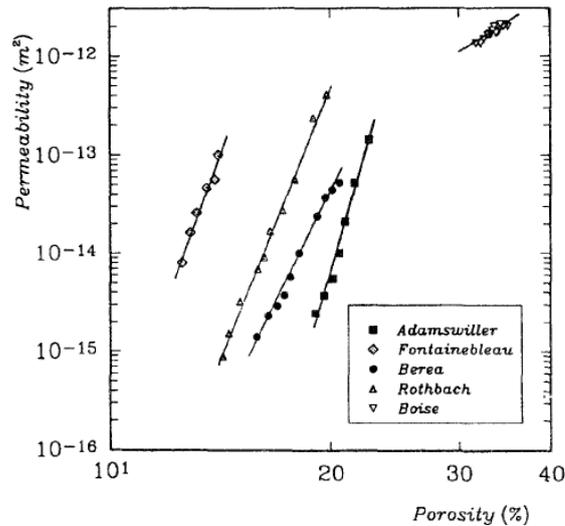


Figure 1-10 – Evolution de la perméabilité en fonction de la porosité des cinq types de matériaux (David et al. 1994)

La perméabilité est également influencée par la taille des grains du milieu Hazen (1892), Herzin's (1911) et Ducan et al. (1972) ont trouvé des corrélations qui relient la perméabilité à la taille des grains, mais ces lois sont développées avec des hypothèses différentes, qui ne sont forcément pas vérifiables pour tout les matériaux. A titre d'exemple la loi de Hazen n'est applicable qu'aux sables et donneraient, en présence de limon ou d'argile, même en faible quantités, des résultats sans signification et par, conséquent, inutilisables.

Chapuis (2004) a présenté une corrélation reliant la perméabilité avec la taille des grains et l'indice des vides (1-18).

$$k = 1,5D_{10}^2 \frac{e^3 (1 + e)}{e_{max} (1 + e)} \quad (1-18)$$

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.

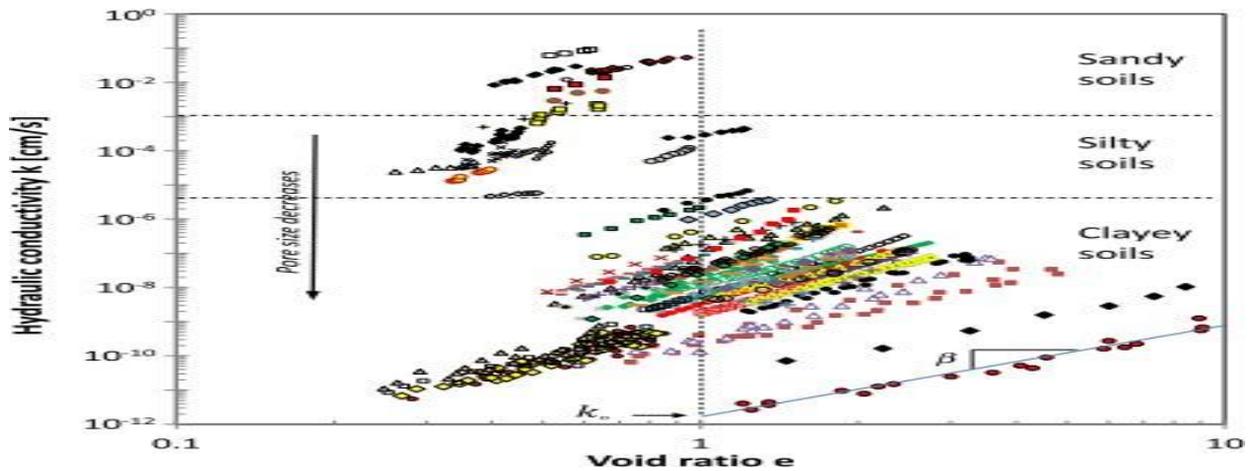


Figure. 11. Conductivité hydraulique en fonction du l'indice de vide. Les données recueillies pour naturel et remodelé sédiments, des sables grossiers aux argiles à grains fins (Ren et Santamarina 2017)

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

La base de données du coefficient de perméabilité de sol comprend à la fois un sol naturel et un mélange de sol (graviers grossiers à argiles) avec des densités différent (I_D) (sol lâche et sol dense), on remarque que les différents courbes de différents types de sols sont linéaires nous notons que les ensembles de données individuels tracent comme des tendances linéaires sur l'espace $\log(k) - \log(e)$ comme il est montré sur la Fig. (1-2).

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.

Pertinence des valeurs macroscopiques e et S_s

La contradiction apparente dans la dernière déclaration montre l'importance de la "taille des pores" plutôt que de la "porosité" sur le transport des fluides. La taille moyenne des pores d_p peut être calculée pour des différents formes des grains en fonction de l'indice des vides e et de la surface spécifique S_s [m^2/g] (Phadnis et 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 $d_p = 2t_{\text{void}}$ est alors considérée comme une estimation de la taille moyenne des pores :

$$d_p = 2e / S_s \rho_m \quad (1-19)$$

Où ρ_m [kg / m³] 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 Fig. (1-2) ; alors nous estimons la surface spécifique en utilisant d'autres publications :

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

$$S_s = 1,8w_L - 34 \quad (1-20)$$

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

$$S_s = \frac{3(cu+7)}{4(PwGsD50)} \quad (1-21)$$

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

La surface spécifique dans les mélanges est estimée comme sommation de la surface apportée par les différentes fractions granulométriques pondéré par leurs fractions massiques.

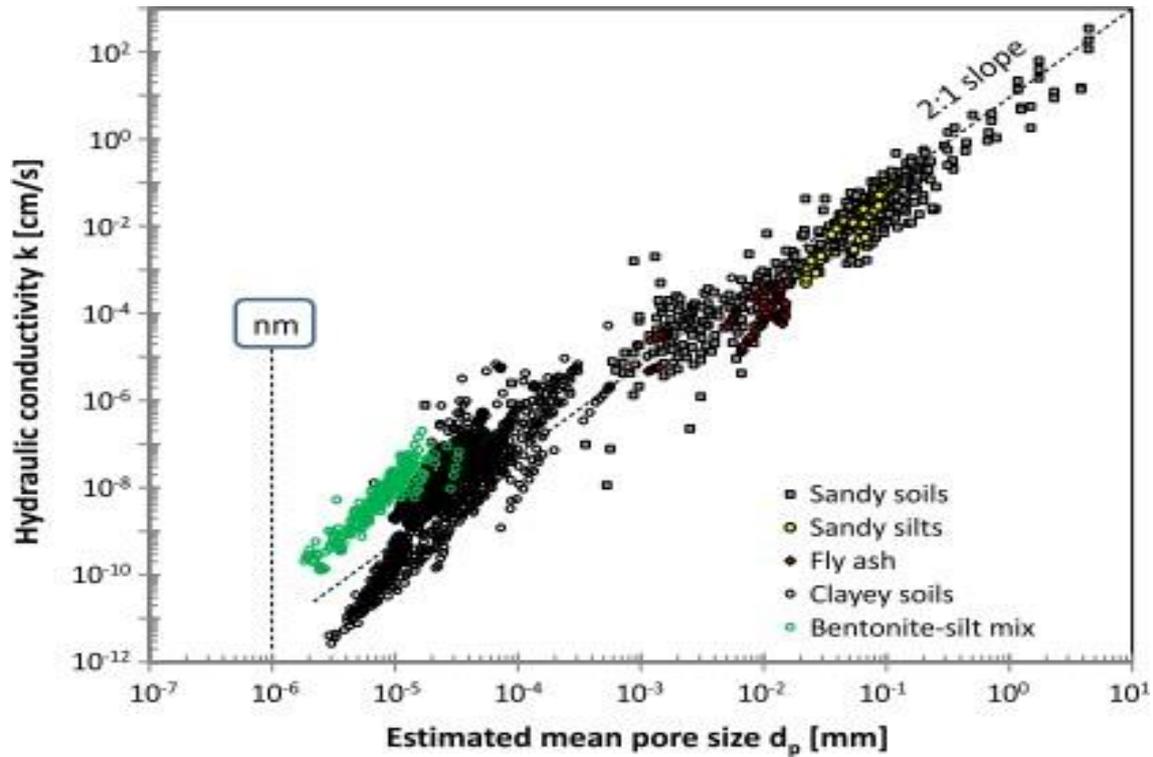


Figure. 12. Conductivité hydraulique mesurée k par rapport à la taille moyenne estimée des pores d_p (Ren et Santamarina 2017)

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

Nous utilisons l'éq. (1-19) $d_p = 2e / S_s \rho_m$ pour estimer la taille moyenne des pores pour l'ensemble de données tracé dans la Fig. (1-2) ; Les données de coefficient de perméabilité sont ensuite remplacées en fonction de la taille moyenne des pores calculée d_p , sur la Fig. (1-3). Données supplémentaires pour les sables avec des distributions granulométriques connues sont inclus dans cette figure.

Nous observons :

(1) tous les sols (de gros grains à fins grains) s'effondrés sur une tendance unique relativement étroite dans l'espace k - d_p ; (2) l'équation de Hagen-Poiseuille pour l'écoulement de fluide dans des tubes cylindriques prédit une relation de puissance-2 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 Fig. (1-3) 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

3. Succion dans les sols

3.1- Capillarité

Les phénomènes de capillarité se produisent à l'interface entre deux fluides, car les molécules y sont soumises à un ensemble de forces d'interactions non équilibrées, à la différence d'une molécule située au sein du fluide. Une molécule d'eau au sein d'une masse d'eau est soumise à des actions de même nature (figure 1-4 b), alors que celle à l'interface entre deux fluides, eau-air par exemple, est soumise à des actions différentes : actions dues à l'eau et actions dues à l'air (figure 1-4 a). Les molécules d'eau à l'interface eau-air sont donc attirées vers la masse d'eau et la surface de l'eau est soumise à une force perpendiculaire à la surface libre. C'est cette attraction qui engendre une tension de surface σ_s à l'interface, représentée sur la figure 1 dans le cas d'une interface plane.

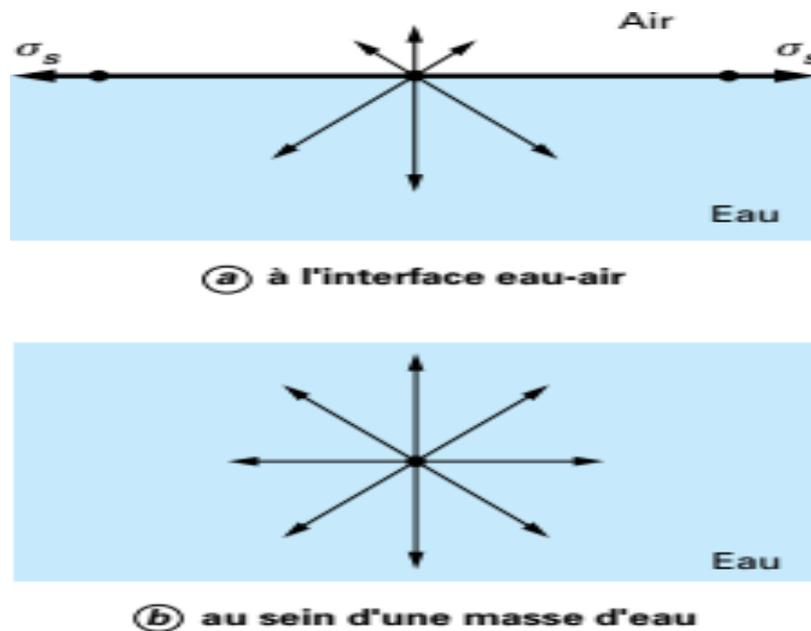


Figure 13. Actions de forces sur une molécule d'eau(Technique de l'ingénieur 2012)

Dans la zone non saturée, contrairement aux aquifères, les forces de pression capillaire deviennent importantes et même dominantes. A l'équilibre, il s'établit dans la zone non saturée un profil décroissant de la saturation de 100 % dans la frange capillaire juste au dessus

de la nappe phréatique jusqu'à une valeur minimale S_r dite saturation critique ou résiduelle. 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 effet direct sur la teneur en eau par rapport à la relation succion matricielle dans les sols. Expérimentalement, lorsqu'on plonge un tube capillaire de rayon r dans un réservoir d'eau on constate que le niveau de l'eau dans le tube s'élève à une hauteur h au dessus du niveau de l'eau dans le réservoir (Figure I-7). Plus le diamètre de tube est petit, plus la hauteur h est grande. [Szenknect S., 2003]

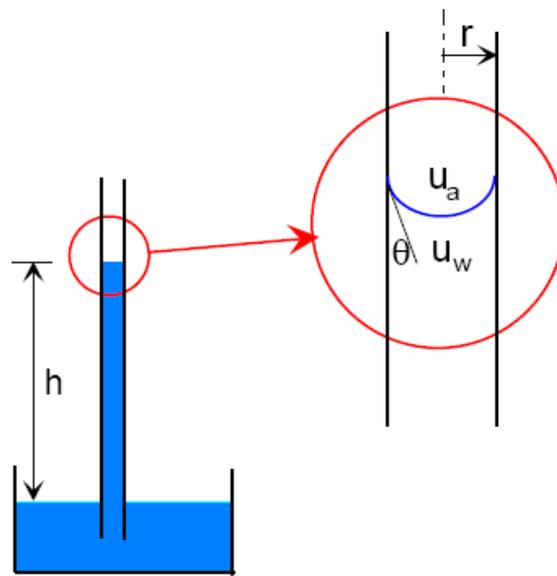


Figure 14 : Modèle physique du phénomène d'effet capillaire

Lorsque l'eau est mise en contact avec l'air et un solide, une tension superficielle T_s se produit le long de la ligne de contact au solide à cause de la différence entre les pressions de l'eau u_w et de l'air u_a agissant sur l'interface. Physiquement, cette tension superficielle se traduit par le phénomène de capillarité qu'illustre la Figure I-7.

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 I-8).

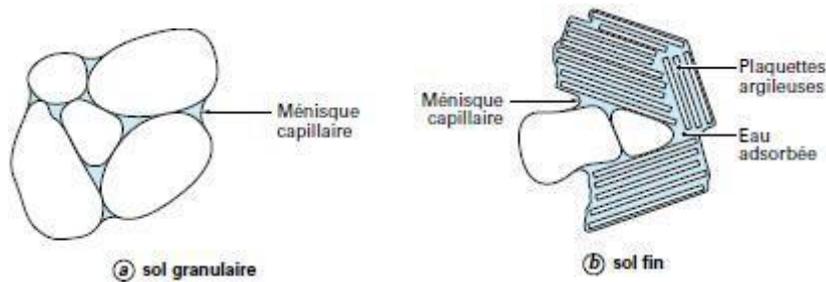


Figure 15 : ménisque capillaire, a : sol granulaire ; b : sol fin (P. Dalage et Y.J Cui, 2000)

La différence entre la pression de l'air et celle de 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 (simplification de la loi de Laplace basée sur l'hypothèse que l'interface est de forme sphérique) (figure I-5) :

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

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:

$$U_a - U_w = \frac{2T_s}{r} \quad (1-23)$$

3.2-Définition de la succion

La succion dans les sols a été définie en géotechnique en 1965, dans un contexte thermodynamique, comme une énergie potentielle comparable à la charge hydraulique dans les sols saturés, lors d'un symposium consacré à l'équilibre et aux variations de l'humidité des sols dans les zones couvertes (Symposium on Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas, Statement of the advisory panel). Cette définition est analogue à celle du potentiel électrique d'une charge dans un champ électrique : pour amener, à altitude constante, de l'eau libre de l'infini jusqu'au sol non saturé, il faut fournir une énergie pour résister à l'attraction exercée ; il s'ensuit, par définition, que la valeur du potentiel capillaire ou matriciel est négative. Ce potentiel est égal à « la quantité de travail par unité de volume d'eau pure, nécessaire pour transporter de façon réversible, isotherme, à altitude constante et à la pression atmosphérique, une quantité infinitésimale d'eau depuis un état d'eau pure loin du sol, à celui d'eau interstitielle dans le sol non saturé ».

3.3-Relation succion - humidité relative

L'humidité relative est définie comme la pression partielle de la vapeur d'eau rapportée à la pression de la vapeur d'eau saturante. Elle est exprimée en pour-cent (%).

La relation entre l'humidité ambiante et la succion correspondante est indépendante du sol. Elle est définie par une des relations fondamentales de la thermodynamique, la loi de Kelvin, dont l'expression est la suivante :

$$u_a - u_w = \frac{RT}{gM} \ln h \quad (1-24)$$

Cette relation est fonction de la température, qui influencera donc le comportement des sols non saturés ; dans le cas d'actions exclusivement capillaires (sables propres), elle montre que l'humidité relative de l'atmosphère dans laquelle le sol est placé définit le rayon du ménisque, et que, à proximité du ménisque, la pression partielle de la vapeur d'eau est inférieure à la pression de vapeur saturante, et d'autant plus faible que le rayon de courbure est faible.

Une humidité relative donnée impose donc aux échantillons de sol une succion donnée, selon les valeurs du Tableau (1-1); il lui correspond une teneur en eau d'autant plus forte que l'attraction exercée par le sol sur l'eau est importante, donc que le sol est plastique. En fait, on constate dans le tableau que les succions deviennent très importantes en dessous de 98 % d'humidité relative. À de telles valeurs de succion, l'expérience montre que les pores intergranulaires des sables propres sont complètement désaturés, et que seules les interactions eau-argile dans les sols fins assez plastiques sont capables de retenir de l'eau (cf. le cas de l'argile FoCa évoqué plus haut). La relation de Kelvin intervient évidemment dans l'évaporation des sols et dans les transferts d'eau sous forme de vapeur au sein de la phase gazeuse du sol qui en résultent.

Tableau 1 : Relation succion /humidité relative, selon la relation de kelvin

Tableau 1 – Relation succion/humidité relative, selon la relation de Kelvin	
Succion (MPa)	Humidité relative (%)
0	100
10 ⁻²	99,9993
10 ⁻¹	99,927
1	99,277
70	60
126	40
221	20
316	10

4. Techniques de contrôle et de mesure de la succion

La succion est une grandeur physique difficile à mesurer, et diverses approches sont nécessaires pour couvrir toute la gamme des succions rencontrées dans les sols et qui peuvent atteindre plusieurs centaines de mégapascals. Cette difficulté technique est probablement l'une des causes du manque de données expérimentales relatives au comportement des sols non saturés, tant en termes mécanique que de transfert d'eau et d'air. Croney et al.

Ont cependant fourni très tôt une description très complète de la plupart des techniques de contrôle et de mesure de la succion dans les sols. De nombreuses techniques reposent sur l'utilisation de pierres poreuses céramiques de très fine porosité, qui ne peuvent être désaturées que sous des succions beaucoup plus fortes que celles appliquées aux sols : ces pierres restent donc toujours saturées, même lorsqu'elles sont soumises à des pressions d'air, et permettent d'assurer la continuité de l'eau entre le système de contrôle et de mesure, et le sol.

Les Techniques de contrôle et de mesure de la succion peuvent être mentionnées par :

Contrôle par plaque tensiométrique ;

Une des premières techniques utilisées, la plaque tensiométrique (Figure 1-5), consiste à mettre l'eau d'un échantillon sous tension en le mettant au contact d'une pierre poreuse céramique saturée d'eau, connectée à un récipient d'altitude variable par le biais d'un tube en U.

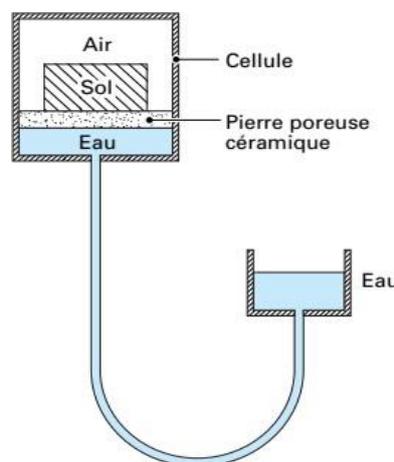


Figure 16. Principe de la plaque tensiométrique (faibles succions) (Technique de l'ingénieur 2012)

Contrôle par « translation d'axes » ;

La technique de translation d'axes a été mise en œuvre à l'aide du dispositif de la Figure (1-6), il s'agit d'une cellule étanche à l'air dont la base, sur laquelle repose l'échantillon, est constituée d'une pierre poreuse céramique de fine porosité immergée dans un récipient d'eau à la pression atmosphérique ; comme on l'a vu, les pores de la pierre poreuse sont suffisamment petits pour qu'elle ne soit pas désaturée par la pression maximale d'air appliquée dans la cellule.

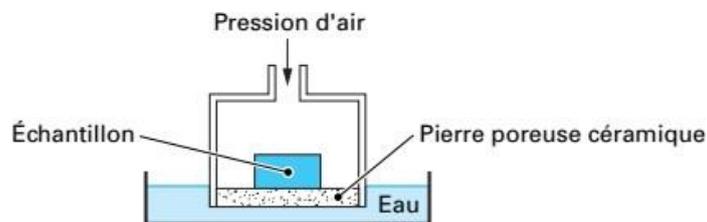


Figure 17. Cellule de Richards pour le contrôle de succion par translation d'axe (Technique de l'ingénieur 2012)

Technique de contrôle osmotique ;

La technique osmotique provient de la biologie, où elle est utilisée en particulier pour les dialyses. Elle est basée sur l'utilisation de membranes (de dialyse) semi-perméables et d'une solution aqueuse de molécules organiques de polyéthylène glycol (PEG) de grande taille, constituées de longues chaînes de radicaux éthyle (C_2H_4), ce qui leur confère une masse molaire considérable. La mise en œuvre de la technique osmotique pour la détermination de la rétention d'eau se fait suivant le principe de la Figure (1-7).

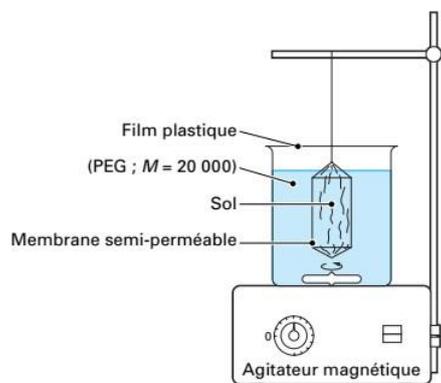


Figure 18. Mise en œuvre de la technique Osmotique (Technique de l'ingénieur 2012)

Technique de contrôle par phase vapeur ;

La technique de contrôle de succion par phase vapeur est basée sur la loi de Kelvin. Elle consiste à placer un échantillon dans une atmosphère confinée à humidité contrôlée dans un dessiccateur, et à laisser les transferts d'eau s'effectuer sous phase vapeur jusqu'à l'équilibre, ce qui est assez long et peut durer jusqu'à une dizaine de jours, voire plus selon la taille de l'échantillon et la valeur de la succion, (Figure 1-8).

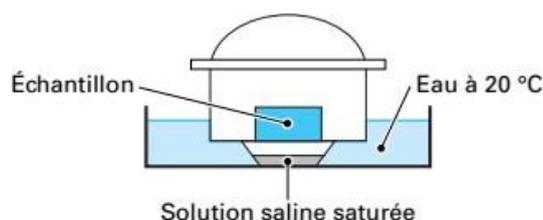


Figure 19. Contrôle de succion par phase vapeur (Technique de l'ingénieur 2012)

Mesure tensiométrique de la succion ;

La technique la plus répandue et la plus simple est la tensiométrie, illustrée par le schéma de la Figure (1-9). C'est une mesure de la pression négative de l'eau sous tension, analogue, dans son principe, à celle des pressions positives ; il est cependant nécessaire d'utiliser une pierre poreuse céramique fine, qui doit rester saturée à tout niveau de succion, et qui assure la continuité de l'eau entre le sol non saturé et la chambre du capteur, qui doit rester pleine d'eau.

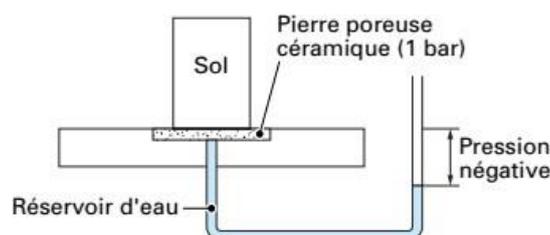


Figure 20.. Principe de la mesure de la succion par tensiométrie (Technique de l'ingénieur 2012)

Mesure psychrométrique de la succion ;

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

Méthode du papier-filtre ;

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

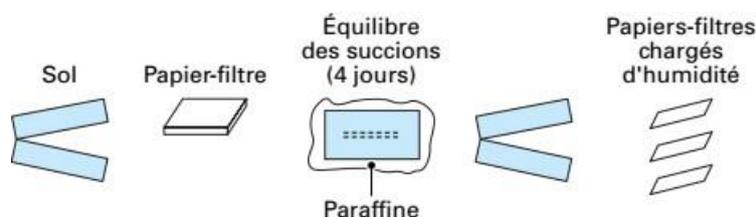


Figure 21. Méthode du papier-filtre (Technique de l'ingénieur 2012)

Mesures de succion par d'autres systèmes.

Une méthode ancienne consiste à mettre en contact le sol à tester avec des corps poreux, dont la variation de résistivité en fonction de la teneur en eau a été étalonnée, et à mesurer la résistivité du corps, une fois l'équilibre hydrique avec le sol atteint.

5. Propriétés de rétention d'eau

La capacité des sols non saturés à attirer et retenir l'eau est quantifiée par la détermination des courbes de rétention d'eau, qui en constituent une caractéristique essentielle. Ces courbes sont déterminées en soumettant un échantillon à un cycle de séchage et de remouillage par application de paliers de succion croissante, puis décroissante, le plus souvent à l'aide de la cellule de Richards. À chaque étape, la mesure de teneur en eau se fait en annulant la pression d'air au sein de la cellule pour retirer rapidement l'échantillon à peser ; l'échantillon est ensuite replacé en cellule pour être soumis à l'étape suivante en succion, par application d'une autre pression d'air qui engendrera soit une infiltration, si elle est inférieure (chemin de remouillage), soit un drainage, si elle est supérieure (chemin de séchage). Les courbes

de rétention d'eau sont obtenues en reportant les valeurs de teneur en eau dans un diagramme « logarithme de la succion/teneur en eau ». On peut également les représenter en reportant le degré de saturation en abscisse, ce qui permet d'observer la valeur de la succion de désaturation, qui n'est pas nécessairement nulle.

6. Techniques de mesure de perméabilité des sols non saturés

Les mesures de la perméabilité des sols non saturés sont délicates et assez peu répandues actuellement. Comme à l'état saturé, elles peuvent s'effectuer en régime transitoire ou permanent. Des techniques basées sur l'analyse inverse, en utilisant l'équation de Richards, de cinétiques d'infiltration au sein de colonnes se sont également révélées pertinentes pour déboucher sur des valeurs de perméabilités.

CHAPITRE 2. Dispositifs expérimentaux et matériaux étudiés

Sommaire

Introduction.....	27
Méthodes de caractérisation des matériaux testés.....	27
Analyses granulométriques.....	27
Dispositif de mesure de perméabilité.....	28
Détermination de l'indice des vides minimum et maximum	30
Dispositif et procédure de mesure de la distribution de la taille d'accès aux pores :31	2.4
Principe de la méthode tensiométrique.....	32
Programme expérimental	33
Matériels et procédure d'essai	33
Préparation des éprouvettes	34
Caractéristiques des matériaux étudiés.....	35
Conclusion	37

Introduction

Nous présentons dans cette section les caractéristiques des différents sables étudiés et les dispositifs expérimentaux utilisés. Nous décrivons aussi brièvement les procédures d'essais réalisés dans le cadre de ce travail et les raisons d'utilisation de chaque méthode et essai, ainsi que les protocoles expérimentaux développés dans le cadre de cette étude.

Méthodes de caractérisation des matériaux testés

Il est nécessaire de caractériser les éprouvettes avant et après l'essai afin de mieux expliquer nos résultats expérimentaux. Pour cela nous avons été amenés à réaliser les essais suivants :

Analyses granulométriques

Pour bien décrire un sol, il faut donc connaître sa granulométrie, c'est-à-dire la répartition de ses particules suivant leurs diamètres équivalents. Deux essais de laboratoire permettent d'établir la granulométrie des sols (Figure 2-1) :

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

a. Analyse granulométrique par tamisage

En emboîte les tamis utilisée les uns sur les autres dans un ordre croissant de bas en haut en commençant par un récipient à fond plein (pour recueillir les éléments fin) et le dessus on met un couvercle pour éviter la dispersion des poussières (voir Figure 2-1). On procède au tamisage en versant le matériau sec. On récupérera un refus (partie qui reste sur le premier tamis) et un tamisât (partie qui reste passe à travers le tamis) et une partie du tamisât sera retenue et une autre partie passera et ainsi de suite jusqu'au dernier tamis qui laissera passer les éléments inférieurs à 0.08 mm. Si le tamisage est manuel on secoue les différents tamis pour faire passer la partie à diamètre inférieur à celui du tamis, Les résultats sont portés sur un graphique semi-logarithmique ou ils construisent une courbe granulométrique.



Figure 2.1. : Série des tamis utilisé pendant les essais granulométriques (source internet)

b. Analyse granulométrique par sédimentation

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

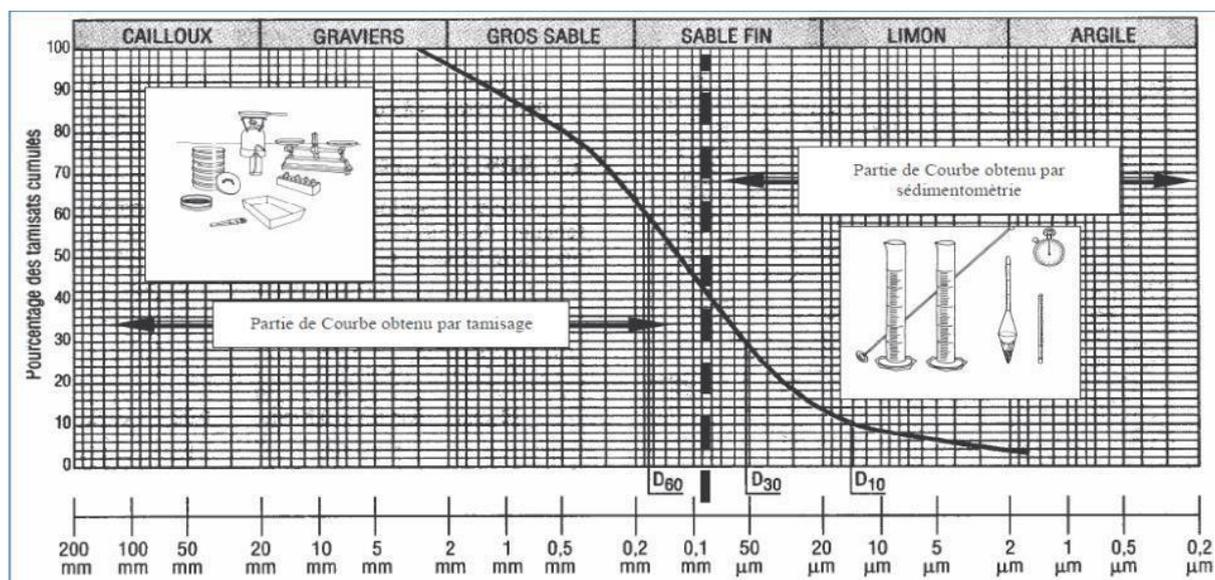


Figure 2.2. Courbe granulométrique (source internet)

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 $80\mu\text{m}$ était très faible (voir la figure 2.12).

Dispositif de mesure de perméabilité :

Le dispositif de mesure de perméabilité à charge constante est basé sur un 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. Dans le dispositif montré sur la Figure (2-4), 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 (2-3).

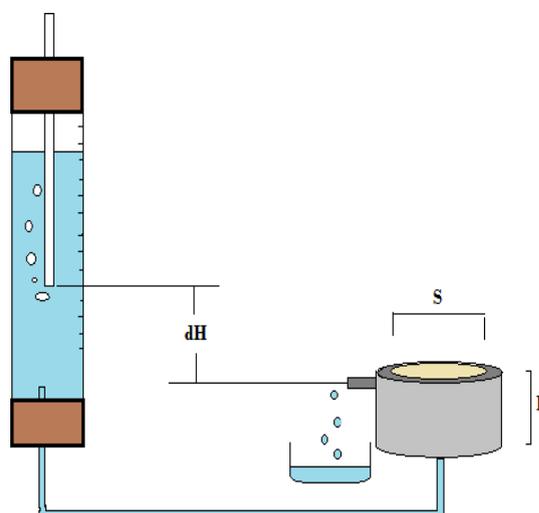
Dans ce dispositif, le tube de Mariotte permet, d'avoir une charge constante, est branché au système de drainage de la cellule œdométrique. Une pierre poreuse est placée sur les parties inférieure et supérieure de l'éprouvette afin de faciliter la sortie de l'eau. Les mesures de volume d'eau entrant dans l'éprouvette sont effectuées dans chaque intervalle de temps à l'aide d'un tube gradué (Figure 2.4).



Figure 2.3. Présentation le tube de mariotte (source internet)



(a)



(b)

Figure 2.4. Présentation de dispositif de mesure de perméabilité a) vue générale b) schéma fonctionnel

Détermination de l'indice des vides minimum et maximum

e_{min} : est le taux de vide pour l'état le plus lâche possible. Nous mettons soigneusement une couche de sable dans le moule avec une cuillère et secouons le moule avec un petit marteau. Nous répétons le processus jusqu'à ce que le moule soit rempli et avec une règle nous enlevons la quantité excédentaire sur le moule. Nous pesons l'échantillon dans la balance et extrayons la valeur (e_{min}) à travers la loi(2-1)



Figure 2.5. Préparation l'indice de densité minimal, a) versement d'une petite quantité pour former une couche, b) compactage et vibration

e_{max} : est le taux de vide pour l'état le plus dense possible. Nous prenons l'entonnoir du papier, Et le mettre au fond du moule. Nous remplissons l'entonnoir par le sable, puis on soulève lentement l'entonnoir en veillant à ce que l'entonnoir reste plein d'échantillon jusqu'à la fin de l'expérience, Nous pesons l'échantillon dans la balance et extrayons la valeur (e_{max}) à travers la loi(2-1)

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



Figure 2.6. Préparation l'indice des vides maximum

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

La compréhension du phénomène de transport et de dépôt des particules dans un milieu poreux doit se baser sur la distribution de la taille des pores de ce dernier, car tout mouvement des particules dépend forcément de l'espace poreux. Afin d'étudier ce paramètre, plusieurs auteurs ont étudié différentes granulométries de matériaux mais pour se faire, il faudrait avoir une bonne maîtrise de la densité de l'éprouvette car pour un matériau donné, si on change l'indice de densité on peut avoir différentes distributions de tailles des pores. Il est donc nécessaire de connaître les caractéristiques de l'espace poreux du matériau granulaire telles que la taille, la forme, etc avant de le tester. Dans la littérature, ce paramètre est rarement étudié malgré son importance étant donné que son évaluation dans les matériaux granulaires en laboratoire est mal connue.

Il existe plusieurs techniques d'évaluation de la distribution de la taille des pores selon la nature du sol testé. On peut citer la porosimétrie au mercure, la porosimétrie par sorption de vapeur d'eau et les méthodes basées sur la résonance magnétique nucléaire (relaxometry (Jaeger et al., 2009) et cryoporometry (Mitchell et al. 2008)). Le choix de la méthode appropriée pour un matériau donné dépend de la nature du sol. La plupart des méthodes citées sont appropriées pour les sols cohérents et avec des petites tailles d'éprouvette et sont difficiles à appliquer pour un sol pulvérulent comme le sable. Pour utiliser la porosimétrie au mercure pour un sable, des techniques spécifiques de préparation de l'éprouvette doivent être mises en œuvre comme celle proposée par Juang et Holtz (1986b) dans laquelle le sable est mélangé avec une résine pour donner à l'éprouvette une cohésion après chauffage de l'ensemble. La distribution de la taille des pores peut également être évaluée de manière approximative à partir des lois empiriques qui relient la taille des pores à la taille des grains (e.g. Fredlund et al., 2002).

Dans ce travail, nous avons utilisé une méthode similaire à la méthode dite « Hanging column » (ASTM D6836, 2008) afin d'évaluer la distribution de la taille des pores d'un matériau granulaire et d'étudier l'effet de paramètres tels que ; la taille et la forme des grains ainsi que l'état de densité de l'éprouvette et l'étalement de la courbe granulométrique sur la distribution de la taille des pores. Cette technique appelée « technique tensiométrique » est décrite dans un travail de Feia et al. (2014).

Principe de la méthode tensiométrique :

La taille des pores est évaluée à partir des courbes de rétention d'eau. Le modèle d'écoulement sous-jacent fait l'hypothèse d'un réseau de pores constitué de tubes cylindriques parallèles pour lequel l'écoulement de l'eau se fait dans la direction de l'axe des cylindres. Cette hypothèse correspond au chemin de séchage, lorsque les pores sont initialement remplis d'eau liquide (Figure 2-7.a). Pour le chemin de mouillage, la condensation de la vapeur d'eau contenue dans les pores se fait par la formation de ménisques cylindriques le long de la paroi des pores. (Figure 2-7.b).

Ces courbes sont déterminées par la mesure tensiométrique de la succion (Delage et Cui 1998). C'est une technique de mesure de la pression négative de l'eau sous tension, analogue, dans son principe, à celle des pressions positives ; il est cependant nécessaire d'utiliser une pierre poreuse céramique fine, qui doit rester saturée à tout niveau de succion, et qui assure la continuité de l'eau entre le sol non saturé et le tube qui doit rester rempli d'eau. La parfaite saturation de la pierre céramique par l'eau désaérée est une condition essentielle au bon fonctionnement d'un tensiomètre. Dans cette technique la succion maximale qu'on peut mesurer dépend de la pression négative maximale que peut supporter la pierre céramique car au-delà de sa capacité, la pierre risque de se désaturer. Dans nos essais, nous utilisons une pierre céramique d'une capacité de 50 kPa. Cette pression est largement suffisante pour étudier les caractéristiques de rétention d'eau d'un sable.

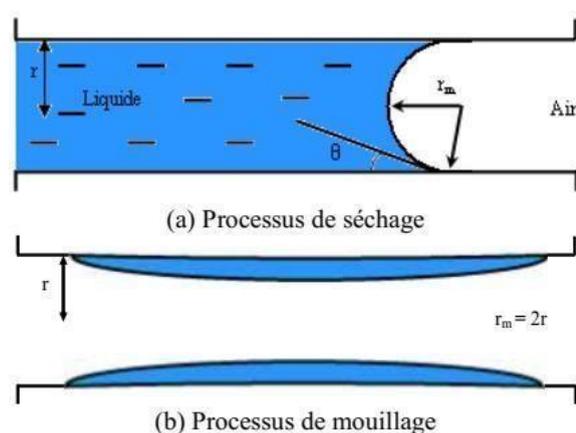


Figure 2.7. Schéma explicatif des processus de séchage et mouillage dans le réseau poreux constitué de cylindres de rayon r , (r_m est le rayon du ménisque de l'interface air-eau) (d'après

Do, 1998)

Programme expérimental

Matériels et procédure d'essai :

La Figure (2-8) présente le dispositif d'essai qui est composé d'une cellule œdométrique (70 mm de diamètre et de 37 mm de hauteur), d'une pierre céramique d'une capacité de -50 kPa au séchage, et d'un tube d'eau gradué (diamètre 7mm) relié à un réservoir d'eau désaérée. Le dispositif est mis dans une salle climatisée à 20°C et durant tout l'essai, l'éprouvette est couverte par un film de cellophane qui empêche l'évaporation d'eau.

La technique de mesure tensiométrique de la succion consiste à augmenter par palier la succion régnant au sein de l'éprouvette et à mesurer les variations correspondantes de la teneur en eau. Le niveau de l'eau dans le tube gradué est plus bas que l'éprouvette afin d'appliquer une succion dans le sol. Il en résulte, après l'équilibre hydrique, 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. La lecture de la variation de niveau d'eau dans le tube permet de calculer le volume d'eau échangé entre le sol et le tube.

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

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

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

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. On a pour l'eau $\sigma_s = 72,75 \times 10^{-3}$ N/m et $\theta = 15^\circ$, on peut donc prendre $\cos\theta \approx 1$.

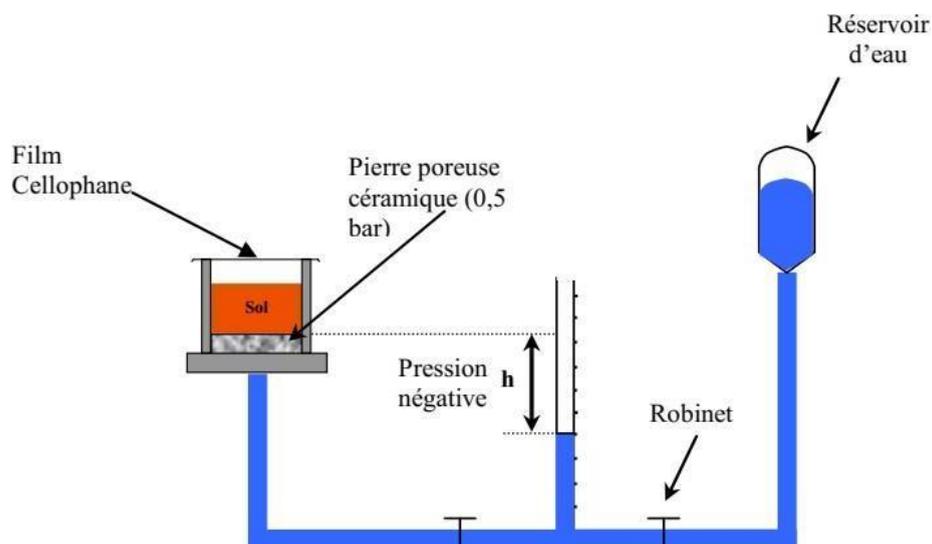


Figure 2.8. – Schéma de principe de la méthode tensiométrique de mesure de la succion (Feia et al. 2014)

Préparation des éprouvettes

Il existe différentes techniques de fabrication des éprouvettes de sable en laboratoire, ces techniques peuvent être classées en deux catégories (Butterfield et 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 ce travail se trouve dans la première classe où on met en place le sable par couche avec une vérification de la densité obtenue à la fin de cette opération. Les éprouvettes obtenues par cette méthode sont fortement anisotropes et la densité n'est pas uniforme dans la direction verticale, mais pour éviter l'endommagement de sable on a évité le maximum le compactage dynamique et on a essayé seulement de vibrer notre échantillon avec un léger compactage, après ça l'éprouvette est couverte par un film de cellophane qui empêche l'évaporation d'eau la Figure (2-9) montre les principales étapes pour la préparation des éprouvette pour l'essai tensiométrique.

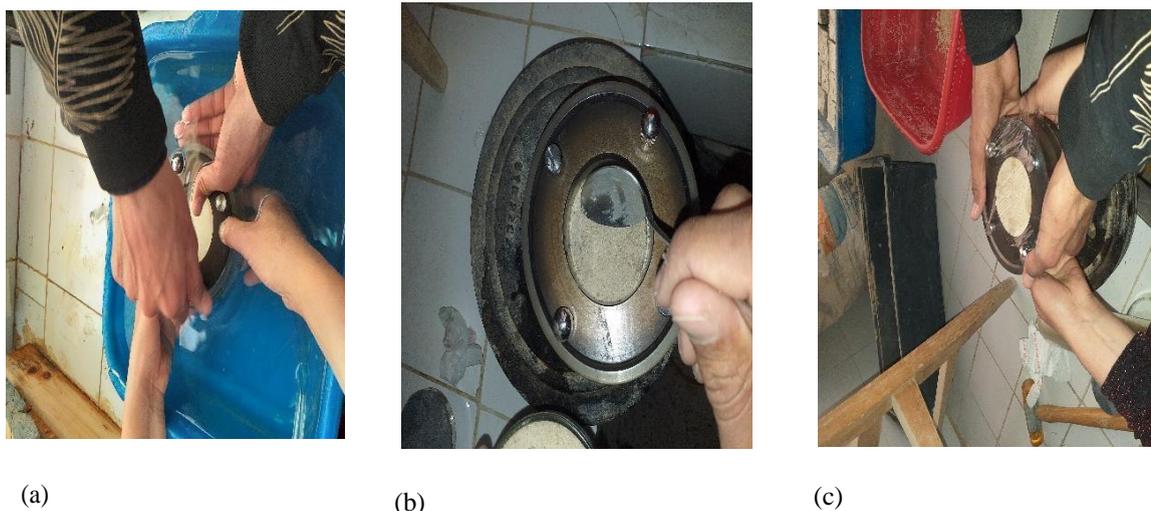


Figure 2.9 : méthode de montage de la cellule dans l'eau ; a) . Préparation d'une éprouvette de sable,b). Recouvrement de l'éprouvette par un film cellophane afin d'éviter l'échange d'humidité avec l'extérieure,c)



Figure 2.10. Vue générale de dispositif

Caractéristiques des matériaux étudiés

Dans cette étude dix types des sables ont été testés. Le sable (type 1) qui est ramené de la région (el khanga -biskra),et le sable (type 2) qui est ramené de la région (liwa), et les deux type (3 et 4) ont été ramenés de la région (zriba), les sables (5 et 7) sont ramenés de la région (meniaa), le sable (6) est ramené de la région (hassi mesaoud), et les deux type (8 et 10) ont été ramenés de la région (Constantine) et le type (9) nous l'avons eu du mélange entre les deux types (4 et 8). La Figure (2-11) présente une vue des différents sables testés. la Figure (2-12) présente les courbes granulométrique de ces dix types des sable. Les diamètres moyens (d_{50}) des sables testés varient entre 0.2 mm et 0.7 mm. Les courbes granulometrique sont plutôt étalées selon leurs coefficients d'uniformité C_U qui varie entre 2 et 3. Cela est selon la classification

LCPC/USCS. Des essais de détermination de l'indice des vides minimum et maximum (e_{\min} , e_{\max}) ont été réalisés. Les résultats de ces essais sont présentés dans le Tableau (2-1).

Tableau 2.1. Caractéristiques des sables utilisés

Sable	dg50(μm)	Cu	Distribution	e_{\min}	e_{\max}	$\rho_s(\text{t/m}^3)$
Type1	362.5	2.47	Étalée	0,47	0,76	2,65
Type2	229.5	28.2	Étalée	68.0	68.0	2,65
Type3	318.9	2,47	Étalée	0,49	0,77	2,65
Type4	278.3	1.82	Étalée	0,47	0,75	2,65
Type5	440.5	3.13	Étalée	0,43	0,73	2,65
Type6	235.7	2,33	Étalée	0,49	0,78	2,65
Type7	146.4	1.64	Étalée	0,51	0,79	2,65
Type8	278.8	3,00	Étalée	0,51	0,84	2,65
Type9	441.3	3,35	Étalée	0,44	0,72	2,65
Type10	2782.7	1.38	Uniforme	0.56	0.77	2.65
Type11	813.8	4.80	Uniforme	0.36	0.65	2.65



Figure 2.11. Vue des dix types de sable étudiés

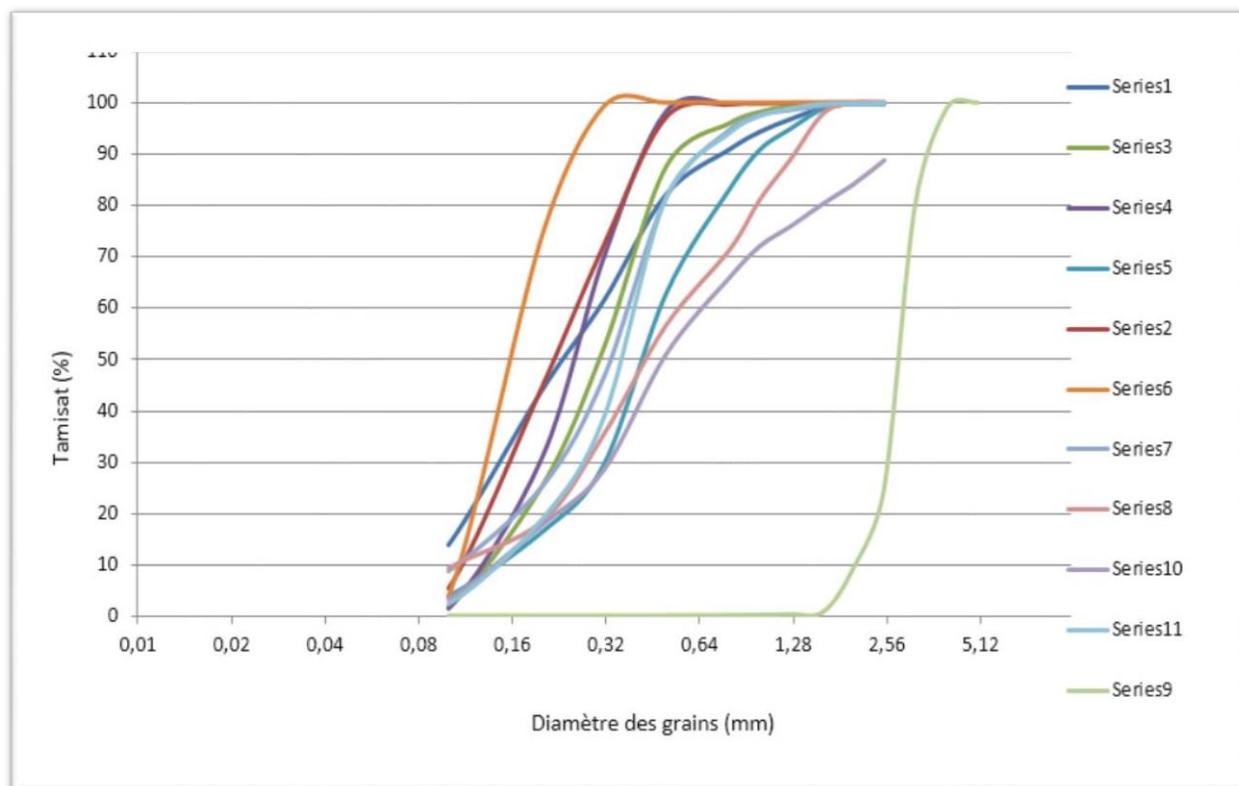


Figure 2.12. Courbes granulométriques des sables étudiés

2.7. Conclusion

Le chapitre présente les caractéristiques des matériaux étudiés, ainsi que les techniques et les procédures expérimentales adoptées dans cette étude. Dans ce chapitre, nous avons utilisé une technique expérimentale, pour l'évaluation de la perméabilité de chaque type de sable Utilisé, cette technique est basée sur un tube de Mariotte. Ensuite, nous avons utilisé un autre technique expérimental pour l'évaluation de la distribution de la taille d'accès aux pores d'un matériau granulaire (sable). Cette technique est basée sur l'évaluation des courbes de rétention d'eau par une méthode appelée « tensiométrique » et l'application de la loi Young-Laplace qui permet d'exprimer la succion en fonction du rayon d'accès aux pores. Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de caractérisation des dix types de sable étudiés. Dans le prochain chapitre, nous présentons l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus et les interprétations de ces résultats.

CHAPITRE 3. Résultats expérimentaux et discussion**Sommaire**

Introduction	39
Programme d'essais.....	39
Évolution de la perméabilité en fonction de l'indice de densité ID...34	40
Évolution de la perméabilité en fonction du diamètre moyen des grains d50.....	40
Corrélation entre la perméabilité, le diamètre moyen et l'indice de densité Les tendances des courbes obtenues sont de forme linéaire (équ 3-2)	31
Evaluation de la distribution de la taille des pores d'un sable par la méthode tensiometrique	32
Conclusion	35

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux de la perméabilité sur les sables étudiés. Et en présent aussi le résultat expérimental de La méthode tensiométrie, que représente sur la courbe de rétention d'eau. Dans ce chapitre, nous commenterons les résultats expérimentaux pour la perméabilité et La méthode tensiométrie.

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 (0.45, 0.65, 0.8 et 0.9). L’indice de densité est défini par l’équation (3-1) :

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

Le Tableau 3-1 présente les caractéristiques des essais réalisés tels que : type de sable, sa taille médiane des grains, coefficient d’uniformité, indice de densité, masse de l’éprouvette.

Tableau 3-1. Caractéristiques des sables utilisés

Sable	D _{g50} (µm)	C _U	I _D	M _{épr} (g)	Sable	D _{g50} (µm)	C _U	I _D	M _{épr} (g)
Type1	362.5	2,47	0.9	113.67	Type6	235.7	2,33	0.9	112.18
			0.8	111.52				0.8	110.10
			0.65	108.43				0.65	107.07
			0.45	104.57				0.45	103.30
Type2	229.5	9..2	0.9	110,9	Type7	146.4	1.64	0.9	110.79
			0.8	108,8				0.8	108.81
			0.65	105,8				0.65	105.97
			0.45	102				0.45	102.40
Type3	318.9	2,47	0.9	112.25	Type8	287.8	3,00	0.9	110.43
			0.8	110.23				0.8	108,12
			0.65	107.3				0.65	104.83
			0.45	103.65				0.45	100.74
Type4	278.3	1.82	0.9	113.75	Type9	441.3	3,35	0.9	116.10
			0.8	111.66				0.8	113.90
			0.65	108.67				0.65	110.79
			0.45	104.92				0.45	106.90
Type5	440.5	3.13	0.9	116.71	Type10	2782.7	1.38	0.9	107.78
			0.8	114.36				0.8	106.36
			0.65	111.01				0.65	104.31
			0.45	106.83				0.45	101.70
					Type11	813.8	4.80	0.9	122.67
								0.8	120.17
								0.65	116.59
								0.45	112.14

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 de sables, des mesures de perméabilité ont été réalisées dans 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 les types de sable

Cette diminution résulte de l'augmentation de l'indicateur de densité. Qui diminue la taille des pores, par conséquent, la perméabilité dans le sable diminue à mesure que l'indice de densité augmente.

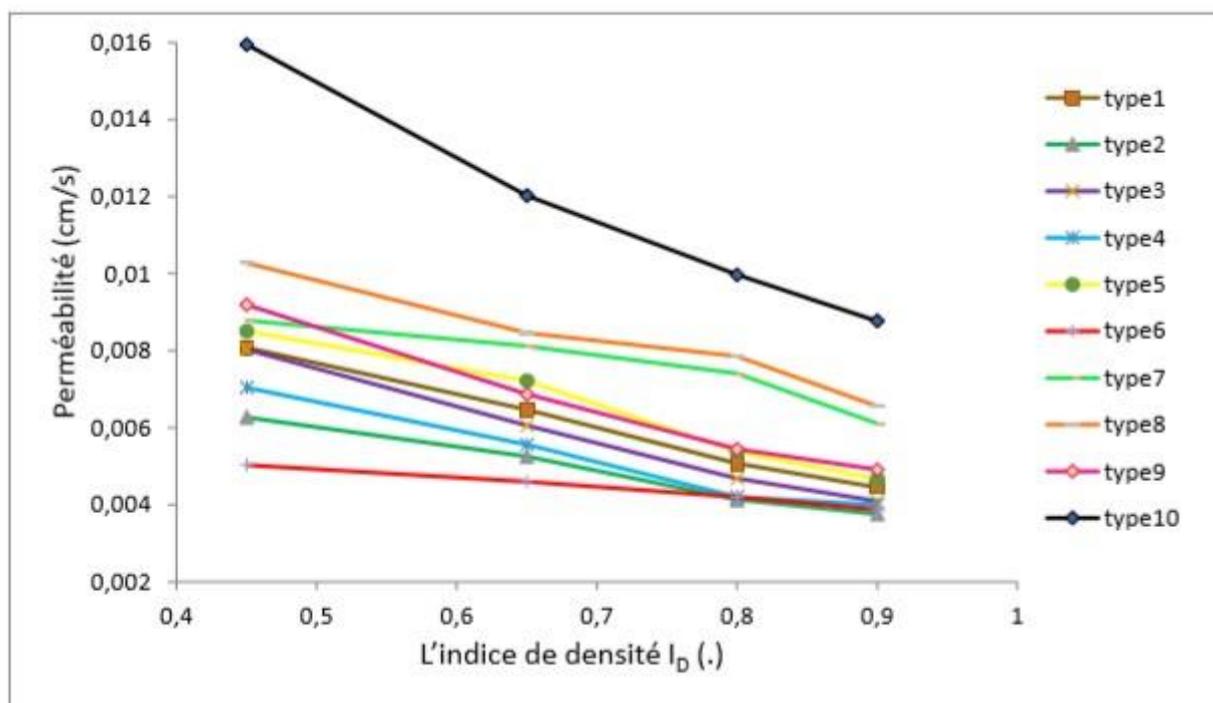


Figure.3.1. Perméabilité des sables en fonction de l'indice de densité

Évolution de la perméabilité en fonction du diamètre moyen des grains d_{50}

La Figure (3.2) présente l'évolution de la perméabilité des sables étudiés en fonction du diamètre moyen d_{50} pour les quatre indices de densité testés (0,9; 0,8; 0,65; 0,45). On remarque une augmentation de la perméabilité en fonction du diamètre moyen des grains pour toutes les valeurs de l'indice de densité.

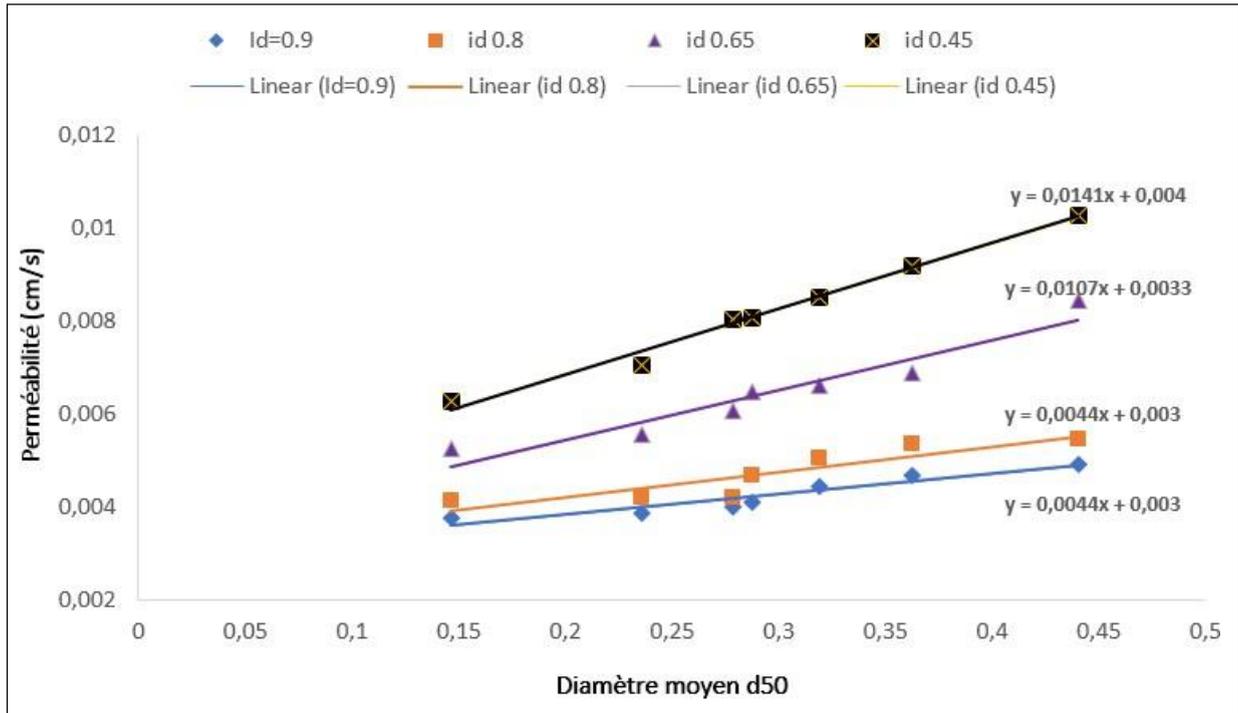


Figure.3.2. Perméabilité des sables en fonction de diamètre moyen

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

Les tendances des courbes obtenues sont de forme linéaire (équ 3-2)

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

Afin d'obtenir une loi généralisée qui relie entre la perméabilité avec l'indice de densité et le diamètre moyen des grains nous avons ploter évolution du paramètre « a » ainsi que la paramètre « b » en fonction du diamètre moyen des grains. Les résultats sont présentés sur la Figure (3-3).

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 (3-3) :

$$K = \frac{1}{10^2} - 2.3I_D + 2.5 D_{50} + -0.2I_D + 0.4 \tag{3-3}$$

Cette relation permet aux modélisateurs d'avoir une estimation de la valeur de la perméabilité 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.

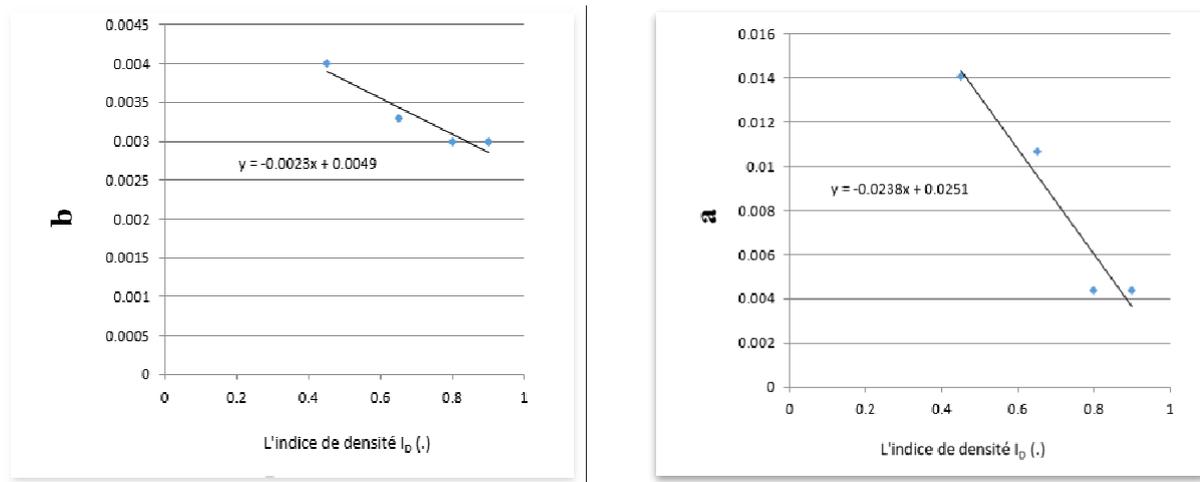


Figure 3.3 évolution du paramètre « a » ainsi que la paramètre « b » en fonction du diamètre moyen des grains

Evaluation de la distribution de la taille des pores d'un sable par la méthode tensiométrique

Après avoir appliqué la méthode de tensiométrie sur d'un sable, nous avons extrait nos courbes de rétention d'eau. La Figure (3-4) présente les Résultats du courbe de rétention d'eau (mouillage – séchage) d'un sable.

Sur ces courbes de rétention d'eau des sols non saturés, ont remarqué Différentes propriétés typiques et ont remarqué que la courbe de chemin de séchage est située au-dessus du chemin d'humidification, Ce qu'il explique le phénomène d'hystérésis.

Cette hystérésis est typique des milieux poreux constitués de pores de taille variable interconnectés en parallèle ou en série. Dans le cas du séchage, lors la connexion en parallèle, lorsque la succion correspond à la vidange d'un grand pore, lors de l'humidification, le petit pore qui est en parallèle reste saturé, ce qui conduit à une teneur en eau plus élevée.

La teneur en eau à la même succion est plus faible du fait que le petit pore est vide.

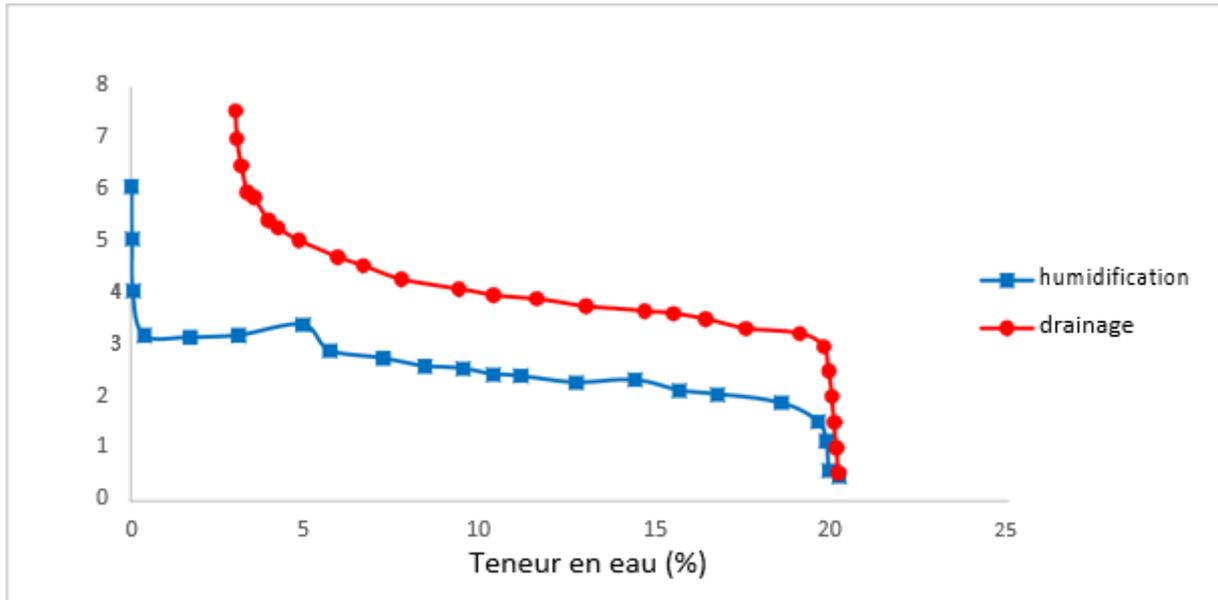


Figure 3.4. Courbe de rétention d'eau d'un sable (w est la teneur en eau)

La Figure (3-5) présente un résultat typique de la distribution de la taille des pores pour d'un sable avec un indice de densité de 0,90. La courbe montre une distribution uniforme de taille des pores, variant entre (35, 110 μm) avec un diamètre moyen de 70 μm pour l'humidification. et (45, 250 μm) avec un diamètre moyen de 110 μm pour du séchage.

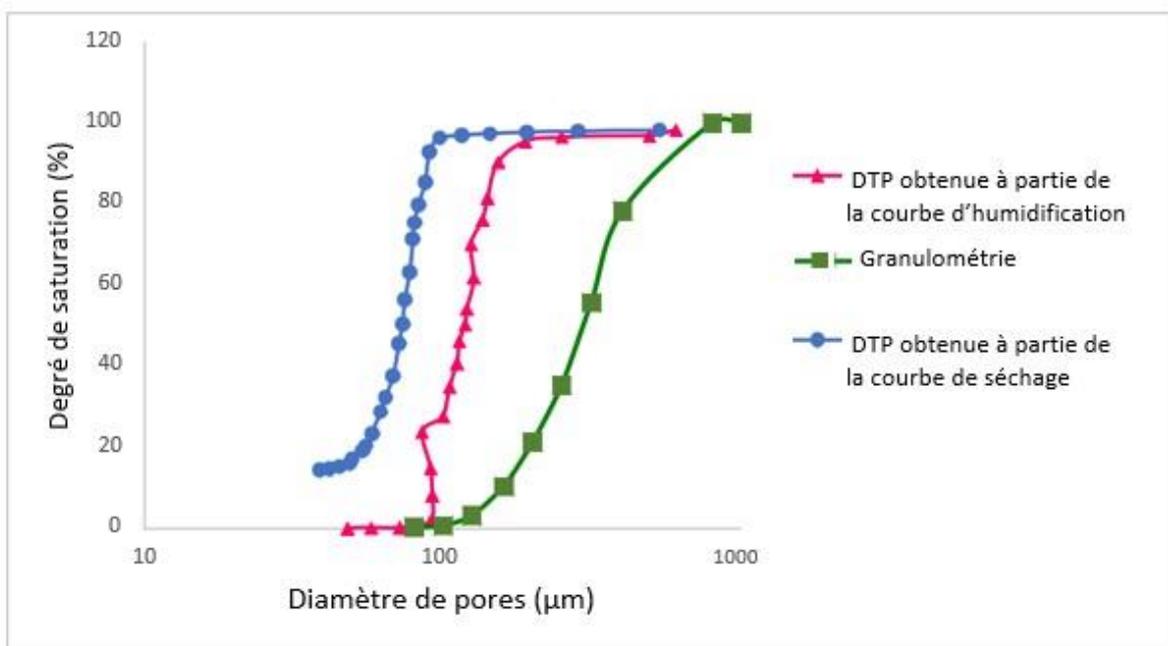


Figure 3.5. Distribution de la taille des pores et de la taille des grains d'un sable ($I_D = 0,9$)

En comparant les courbes de distribution de la taille des pores avec la courbe granulométrique, ce résultat met en évidence que l'uniformité de la courbe granulométrique correspond à une bonne uniformité de la courbe du séchage de la distribution des pores et plus précis que la courbe d'humidification.

Une explication a été donnée par DO (1998) ci que le modèle d'écoulement sous-jacent fait l'hypothèse d'un réseau de pores constitué de tubes cylindriques parallèles pour lequel l'écoulement de l'eau se fait dans la direction de l'axe des cylindres. Cette hypothèse correspond au chemin de séchage, lorsque les pores sont initialement remplis d'eau liquide (Figure 3-6-a). Pour le chemin de mouillage, la condensation de la vapeur d'eau contenue dans les pores se fait par la formation de ménisques cylindriques le long de la paroi des pores. (Figure 3-6-b).

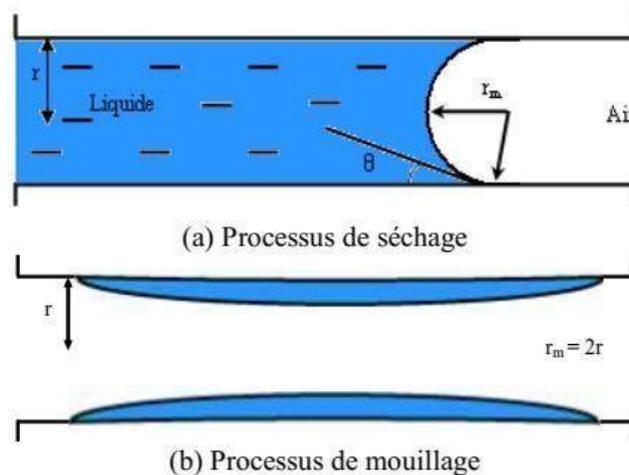


Figure 3.6. Schéma explicatif des processus de séchage et mouillage dans le réseau poreux constitué de cylindres de rayon r , (r_m est le rayon du ménisque de l'interface air-eau) (d'après Do, 1998)

Après cette explication nous pouvons choisir la courbe qui permet d'avoir la distribution la plus précise. La Figure (3-7) présente la distribution de la taille des pores obtenue à partir de la courbe de séchage.

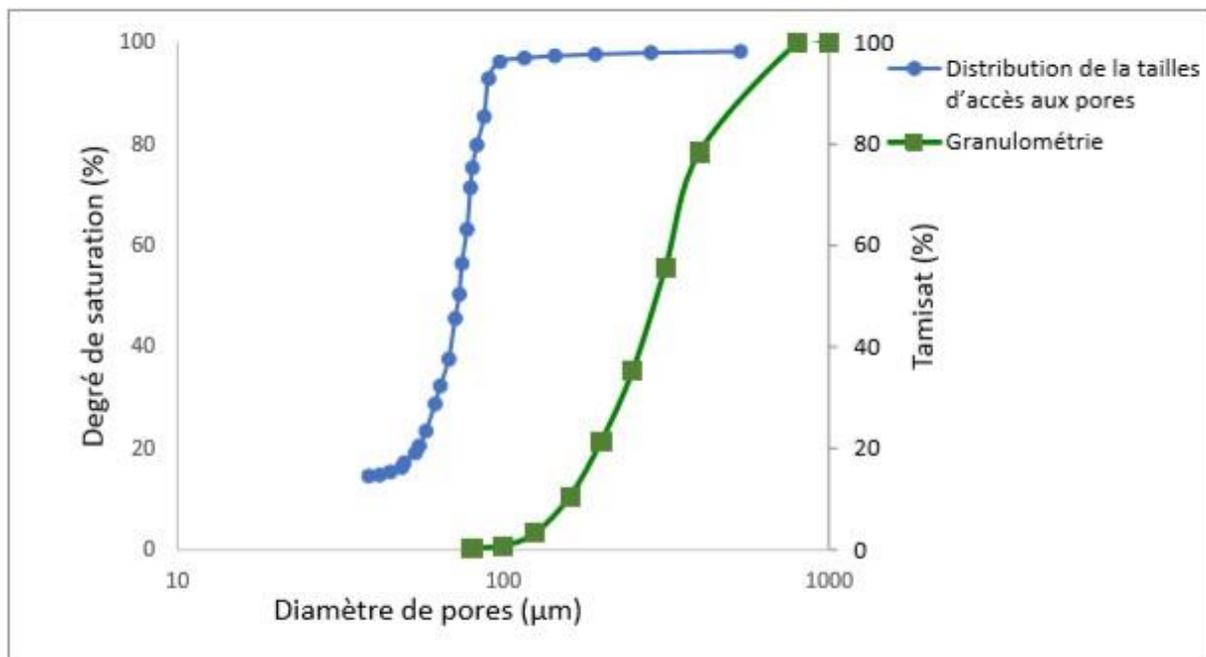


Figure 3.7. La distribution de la taille des pores à partir le courbe de séchage

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les résultats expérimentaux de la perméabilité de chaque type de sable. À partir ce résultat Nous avons pu extraire une loi générale qui combine entre la perméabilité et de diamètre moyen des grains, et l'indice de densité. Et en étudiant les résultats de méthode tensiométrie appliquée à un type de sable, nous avons pu tracer une courbe de rétention d'eau (mouillage – séchage).

À travers la courbe de rétention d'eau. Et spécifiquement la courbe de séchage. Nous avons évalué la distribution de taille des pores. La comparaison entre la distribution de la taille des grains et celle de la taille d'accès aux pores montre un rapport d'environ 1/3 entre les deux distributions.

CONCLUSIONS

La présente étude avait pour objectif d'avoir 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 ainsi que la taille médiane des accès aux pores. Des essais de mesures de perméabilité pour dix types de sables ont été réalisés après une caractérisation expérimentales de ces dix types. Ces sables ayant différentes granulométrie et les éprouvettes ont été préparées 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.

$$K = \frac{1}{10^2} [(-2.3I_D + 2.5)D_{50} + (-0.2I_D + 0.4)]$$

Cette loi 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.

Dans le cadre du même objectif cité auparavant, un essai tensiometrique a été réalisé. Cet essai a permis d'avoir permettant d'avoir la distribution de la taille d'accès aux pores du sable testé à partir de l'une des courbes de rétention d'eau ; à savoir la courbe de séchage et à l'aide de la loi de Jurin qui exprime la succion du sol en fonction du rayon d'accès aux pores. Une comparaison a été effectuée entre la distribution de la taille des grains et celle de la taille d'accès aux pores. Cette comparaison a montré un rapport d'environ 1/3 entre les deux distributions.

Perspectives

La poursuite de ce travail consiste à réaliser plusieurs essais tensiometrique sur les dix types de sables testés sur des éprouvettes préparées à différents indice de densités. Ceci afin d'essayer de trouver une corrélation expérimentales entre la perméabilité et la taille d'accès aux pores

Références bibliographiques

1. Al-Tabbaa, A., Wood, D.M., 1987. Some measurements of the permeability of kaolin. *Geotechnique* 37 (4), 499–503.
2. Berilgen, S.A., Berilgen, M.M., Ozaydin, I.K., 2006. Compression and permeability relationships in high water content clays. *Appl. Clay Sci.* 31, 249–261.
3. Carrier, W.D., Beckman, J.F., 1984. Correlations between index tests and the properties of remoulded clays. *Geotechnique* 34 (2), 211–228.
4. Chapuis, R.P., Aubertin, M., 2004. On the use of the Kozeny-Carman's equation to predict the hydraulic conductivity of a soil: reply. *Can. Geotech. J.* 41 (5), 994–996.
5. David, C., Wong, T.F., Zhu, W.L., Zhang, J., 1994. Laboratory measurements of compaction-induced permeability change in porous rocks: implications for the generation and maintenance of pore pressure excess in the crust. *Pure Appl. Geophys.* 143 (1–3), 425–456.
6. Dolinar, B., 2009. Predicting the hydraulic conductivity of saturated clays using plasticity-value correlation. *Appl. Clay Sci.* 45, 90–94.
7. Dolinar, B., Škrabl, S., 2013. Atterberg limits in relation to other properties of finegrained soils. *Acta Geotech. Slov.* 2, 5–13.
8. Farrar, D.M., Coleman, J.D., 1967. The correlation of surface area with other properties of 19 British clay soils. *J. Soil Sci.* 18 (1), 118–124.
9. Feia, S., Ghabezloo, S., Bruchon, J., Sulem, J., Canou, J., & Dupla, J.-C. (2014). Experimental Evaluation of the Pore-Access Size Distribution of Sands. *Geotechnical Testing Journal*, 37(4).
10. Hazen, A., 1892. Some physical properties of sand and gravel, with special reference to their use in filtration. In: Massachusetts State Board of Health, 24th Annual Report, Boston, pp. 539–556.
11. Ilek, A., Kucza, J., 2014. A laboratory method to determine the hydraulic conductivity of mountain forest soils using undisturbed soil samples. *J. Hydrol.* 519, 1649–1659.
12. Kucza, J., Ilek, A., 2016. The effect of the shape parameters of a sample on the hydraulic conductivity. *J. Hydrol.* 534, 230–236.
13. Malusis, M., Shackelford, C.D., Olsen, H.W., 2003. Flow and transport through clay membrane barriers. *Eng. Geol.* 70, 235–248.

14. Mejias, M., Renard, P., Glenz, D., 2009. Hydraulic testing of low-permeability formations. A case study in the granite of Cadalso de los Vidrios, Spain. *Eng. Geol.* 107, 88–97.
15. Mesri, G., Rokhsar, A., 1974. Theory of consolidation for clays. *ASCE J. Geotech. Eng. Div.* 100, 889–904.
16. Muhunthan, B., 1991. Liquid limit and surface area of clays. *Geotechnique* 41, 135–138. Nagaraj, T.S., Pandian, N.S., Narasimha Raju, P.S.R., 1991. An approach for prediction of compressibility and permeability behaviour of sand-bentonite mixes. *Ind. Geotech.J.* 21 (3), 271–282.
17. Nagaraj, T.S., Pandian, N.S., Narasimha Raju, P.S.R., 1994. Stress-state permeability relations for overconsolidated clays. *Geotechnique* 44 (2), 349–352.
18. Pane, V., Schiffman, R.L., 1997. The permeability of clay suspensions. *Géotechnique* 47, 273–288.
19. Phadnis, H.S., Santamarina, J.C., 2011. Bacteria in sediments: pore size effects. *Geotech. Lett.* 1, 91–93.
20. Ren, X.W., Zhao, Y., Deng, Q.L., Kang, J.Y., Li, D.X., Wang, D.B., 2016. A relation of hydraulic conductivity — void ratio for soils based on Kozeny-Carman equation. *Eng. Geol.* 213, 89–97.
21. Roque, A.J., Didier, G., 2006. Calculating hydraulic conductivity of fine-grained soils to leachates using linear expressions. *Eng. Geol.* 85, 147–157.
22. Santamarina, J.C., Klein, K.A., Wang, Y.H., Prencke, E., 2002b. Specific surface: determination and relevance. *Can. Geotech. J.* 39, 233–241.
23. Santamarina, j.c., Ren, x.w., 2017, " The hydraulic conductivity of sediments: A pore size perspective . *Engineering geology*.
24. Sante, M.D., Fratolocchi, E., Mazzieri, F., Brianzoni, V., 2015. Influence of delayed compaction on the compressibility and hydraulic conductivity of soil–lime mixtures. *Eng. Geol.* 185, 131–138.
25. Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P., Leroueil, S., 1983a. The permeability of natural soft clays. Part I: methods of laboratory measurement. *Can. Geotech. J.* 20 (4), 629–644.
26. Taylor, D.W., 1948. *Fundamentals of Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, Inc., N.Y, pp.97–123.
27. Wang, Q., Cui, Y.J., Tang, A.M., Barnichon, J.D., Saba, S., Ye, W.M., 2013. Hydraulic conductivity and microstructure changes of compacted bentonite/sand mixture during hydration. *Eng. Geol.* 164, 67–76.

28. Yu-Jun, C., Pierre, D., (2012). L ' eau dans les sols non saturés.
29. Zhang, X.X., Deeks, L.K., Bengough, A.G., Crawford, J.W., Young, I.M., 2005. Determination of soil hydraulic conductivity with the Lattice Boltzmann method and soil thin-section technique. *J. Hydrol.* 306, 59–70.