

MODELISATION THEORIQUE DE LA COURBE DE RETENTION - APPLICATION AU LIMON DE LIVET-GAVET

THEORETICAL MODELLING OF THE RETENTION CURVE - APPLICATION TO THE LIVET-GAVET LOAM

Jacques MONNET¹, Luc BOUTONNIER², Dino MAHMUTOVIC², Saïd TAÏBI³, Denis BRANQUE⁴

¹ *Gaiatech, Seyssinet, France*

² *EGIS Géotechnique, Seyssins, France*

³ *LOMC, CNRS UMR 6294, Le Havre, France*

⁴ *ENTPE, Vaulx en Velin, France*

RÉSUMÉ – La présente étude traite d'un modèle théorique de courbe de rétention basé sur l'arrangement de particules sphériques élastiques. Cette approche physique permet d'expliquer et de calculer les courbes avec un nombre limité de paramètres expérimentaux ayant une signification physique. Une application du modèle au limon de livet-Gavet compacté à l'optimum Proctor est présentée.

ABSTRACT – The present study deals with a theoretical model of retention curve based on the arrangement of spherical elastic particles. This physical approach makes it possible to explain and calculate the curves with a limited number of experimental parameters having physical significance. An application of the model to the Livet-Gavet compacted loam under Proctor condition is presented.

1. Introduction

Le développement des calculs numériques et l'augmentation de la puissance des micro-ordinateurs permettent de déterminer le comportement de grands ouvrages en terre tels que digues, barrages, terrassements. Toutes ces structures sont compactées à l'optimum Proctor avec un degré de saturation compris entre 80 et 98%, de sorte que le sol n'est pas saturé. Pour obtenir une estimation précise de l'état final de la densité du sol, il est nécessaire de modéliser le compactage du sol selon un chemin de mouillage. En outre, lorsque la construction en terre est terminée, les aléas de séchage et de mouillage associés aux conditions pluvieuses et ensoleillées se produisent. Comme il est souvent demandé au Maître d'œuvre de garantir un taux de déformation limité, ces événements nécessitent la mise au point d'un modèle capable de simuler les chemins de séchage et de mouillage afin d'anticiper les variations de succion du sol et les déformations associées.

Dans ces modélisations, la courbe de rétention reliant le degré de saturation et la succion joue un rôle clé. Il existe plusieurs façons de la modéliser. La première méthode consiste à utiliser des modèles mathématiques basés sur des travaux expérimentaux relatifs à la distribution des tailles de pores. Elle a été initiée avec le modèle (1) de (Brooks and Corey, 1966) qui nécessite la détermination de la succion d'entrée d'air s_{air} et de la pente δ de la relation semi-logarithmique entre le degré de saturation et la succion. Plus tard, van Genuchten, (1980) a utilisé une nouvelle relation expérimentale (2) capable de simuler des courbes à la fois continues et dont la pente est continue avec 3 paramètres

expérimentaux (α l'inverse de la succion d'entrée d'air, n et m paramètres de forme de la courbe expérimentale de rétention). Gallipoli et al. (2003) ont suivi le même schéma de recherche et proposé une relation expérimentale (3)

plus complète avec 4 paramètres expérimentaux (Φ, Ψ, ν, δ) obtenus par lissage par les moindres carrées de la relation tridimensionnelle entre le degré de saturation S_r , la succion s et l'indice des vides e .

$$S_r = (s/s_{air})^{-\delta} \quad (1)$$

$$S_r = [1+(a.s)^n]^{-m} \quad (2)$$

$$S_r = \{ 1/[1+(\Phi.(v-1)^\Psi .s)] \}^{-\delta} \quad (3)$$

La deuxième méthode consiste à utiliser une modélisation physique. Avec cette approche, la forme de la courbe de rétention n'est pas choisie à l'avance, mais est une conséquence des hypothèses physiques. Une première option consiste à considérer le sol comme un milieu poreux (Or and Tuller, 1999). La difficulté principale de cette méthode est liée à la description de l'espace poral qui n'est pas seulement un ensemble de tubes de percolation parallèles dont le diamètre varie, mais qui est surtout un réseau interconnecté qu'il est très difficile de décrire a priori. La deuxième option consiste à considérer le sol comme une structure constituée de particules sphériques. La présente étude traite d'un modèle théorique basé sur l'arrangement de particules sphériques élastiques. Cette approche suit une nouvelle ligne de recherche afin que le phénomène physique de rétention puisse être expliqué et calculé avec un nombre limité de paramètres expérimentaux ayant une signification physique.

2. Expression de la courbe de rétention théorique du sol non saturé

2.1. Hypothèses et organisation des calculs

De nombreux auteurs comme Gras (2011) ou Salager (2007) ont mentionné l'existence de quatre zones de saturation, chacune ayant un comportement distinct. Cette hypothèse est reprise dans la conception de notre modèle, principalement basée sur les travaux de Boutonnier (2007), repris et développés dans (Boutonnier et al., 2019).

- Domaine D1: $s \geq s_{air}$ et $S_r \leq S_{rair}$

La phase gazeuse est continue dans le sol. Cet état donne une succion s supérieure à la succion d'entrée d'air s_{air} et un degré de saturation S_r plus faible que le degré de saturation à l'entrée d'air S_{rair} .

- Domaine D2: $s \leq s_{air}$ et $S_{rair} \leq S_r \leq S_{re}$ et $u_w \leq 0$

Dans ce domaine, l'air libre disparaît. L'air est occlus dans le sol. L'air est en contact avec les particules du sol. La succion a pour effet d'augmenter la résistance des contacts interparticulaires. Le degré de saturation est supérieur au degré de saturation à l'entrée d'air S_{rair} mais inférieur au degré de saturation pour une succion nulle S_{re} .

- Domaine D3: $S_{re} < S_r < 1$ et $u_w > 0$

L'air est occlus dans l'échantillon de sol sous la forme de bulles en faible interaction avec le squelette. La tension capillaire n'a aucun effet sur les forces de contact entre les particules du sol. Nous considérons ici que D3 correspond au cas des pressions interstitielles positives avec un degré de saturation inférieur à 1.

- Domaine D4: $S_r = 1$

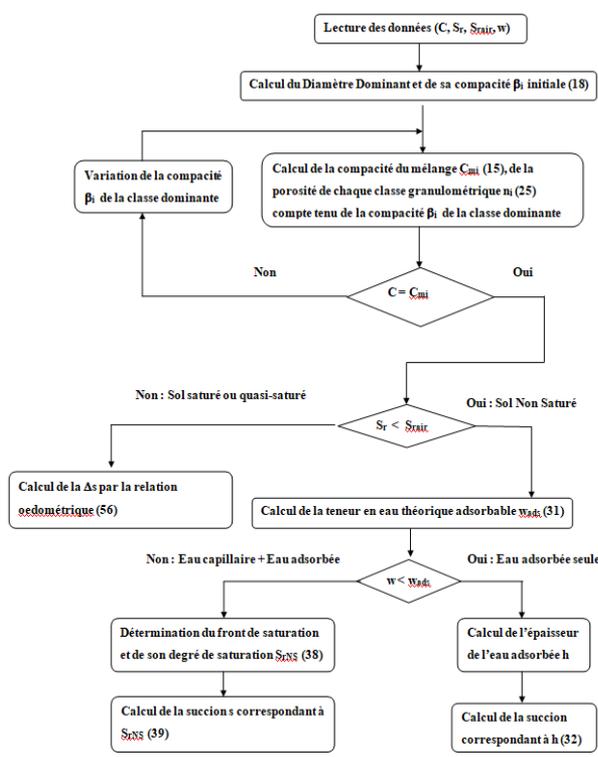
Il n'y a pas d'air à l'état gazeux dans le sol. Le sol est saturé. La limite entre D3 et D4 peut également être exprimée par la pression interstitielle qui permet la saturation du sol par dissolution de l'air dans l'eau.

Dans le cadre de cet article, nous nous intéressons aux domaines D1 et D2.

La démarche générale du calcul est indiquée, en humidification (Figure 1).

2.2. Déformation des particules sphériques et succion : Domaine D1

Sous l'action de l'eau au niveau du contact interparticulaire, il y a succion sur la section



transversale du ménisque et tension superficielle (Taïbi, 1994). Le modèle de sol est composé de particules sphériques uniformes de rayon R. Selon la loi de Laplace, la succion est donnée par le produit de la tension superficielle de l'eau T_c et de la somme de deux courbures principales du rayon r du ménisque et du rayon b du tore correspondant (4). Sous l'action d'une force normale F_N (5) au plan de contact, les deux billes se déforment élastiquement (Hertz, 1881). Les détails de ces calculs se trouvent dans (Monnet et al., 2019a).

Figure 1: L'organisation des calculs pour le chemin d'humidification

$$s = T_c \cdot [1/r - 1/b] \quad (4)$$

$$f_N = s \cdot \pi \cdot b^2 + 2 \cdot \pi \cdot b \cdot T_c \quad (5)$$

2.3. Déformation des particules sphériques et détermination du volume du ménisque : Domaine D1

Le contact entre les particules et l'eau se fait avec un angle de mouillage de θ_c qui varie en cas de drainage ou d'humidification (Gras, 2011). Le calcul du volume du ménisque pour divers indices des vides a été effectué (Monnet et al., 2019a).

2.4. Arrangement des particules du sol uniforme

Pour un sol composé de granulométrie uniforme, l'indice des vides peut varier en fonction de l'énergie de compactage. Monnet et al. (2019a) montrent que pour les quatre arrangements (tétraédrique - 4 sphères empilées, Cubique - 4 sphères en cube, Octaédrique - 9 sphères en cube, Dodécaédrique - 10 sphères compactes), l'indice des vides est indépendant du rayon des particules, mais ne dépend que de la disposition des particules. Le rayon des particules n'influence que la taille du REV (volume élémentaire représentatif). Les variables qui décrivent les différents phénomènes sur le trajet de séchage sont le rapport entre la bulle d'air et le rayon des particules.

Le modèle Solidworks permet de déterminer dans le REV: le nombre et l'angle de contact pour chaque particule ; le nombre total de ménisques par arrangement.

Pour le chemin de séchage, le modèle trouve: le rayon de la bulle apparaissant lors de la nucléation ; le nombre de bulles pouvant apparaître dans le REV; le degré de saturation à la nucléation ; la succion à la nucléation ; le rayon et la succion de la bulle percolante.

Pour le chemin d'humidification, le modèle trouve: le rayon de la bulle qui percole ; la succion à la percolation. Le calcul théorique du ménisque ne peut être effectué que lorsque les ménisques sont indépendants. Lorsque la coalescence se produit, le modèle suppose que la succion reste inchangée (Monnet et al., 2019a).

2.5. Relation degré de saturation succion pour le sol uniforme: Domaine D1

Pour un sol uniforme avec les quatre arrangements possibles, la connaissance de l'indice des vides permet de connaître le type d'arrangement et la disposition des particules de sol. La connaissance de la teneur en eau ou de la saturation permet de calculer le volume total d'eau dans le REV (6). La connaissance du nombre de contacts dans le REV et du nombre de ménisques permet de calculer le volume (8) d'un seul ménisque (Monnet et al., 2019a). Le volume du ménisque dépend du rayon du ménisque, du rayon de la particule et de la succion (4). La relation est corrigée pour la teneur en eau afin de prendre en compte la partie de l'eau adsorbée (7).

Cela permet de calculer le volume du ménisque (8) et la succion associée (4) pour un indice des vides et une teneur en eau déterminée.

$$V_w = S_r \cdot e \cdot \text{REV} / (1+e) \quad (6)$$

$$W_{\text{cap}} = W_{\text{NS}} - W_{\text{ads}} \quad (7)$$

$$V_{\text{men}} = W_{\text{cap}} \cdot S_r \cdot e \cdot \text{REV} / [W_{\text{NS}} \cdot (1+e) \cdot \text{Nb}_{\text{meniscus}}] \quad (8)$$

2.6. Compacité et homogénéité d'un mélange de grains non uniforme

La théorie des mélanges granulaires (De Larrard, 1999) est utilisée ici pour le sol naturel dont les particules du sol sont sphériques. Le modèle théorique est organisé du plus grand au plus petit des n diamètres différents pour les particules de squelette du sol (9). Le symbole C est la compacité qui est égale au volume solide de l'échantillon de sol (10). La compacité relative par rapport à l'échantillon total de classe i est notée Φ_i (11). Il en résulte que la compacité totale C de l'échantillon de sol est donnée par la somme de toute la compacité (12). En théorie, R_i correspond au refus de volume sur le tamis de

diamètre D_i , basé sur le volume total des grains de l'échantillon (13).

$$D_1 > \dots > D_i \dots > D_n \quad (9)$$

$$C = V_s / V_t = 1 - n \quad (10)$$

$$\Phi_i = V_{s_i} / V_t \quad (11)$$

$$C = \sum_{j=1}^n \Phi_j \quad (12)$$

$$R_i = \Phi_i / (\sum_{j=1}^n \Phi_j) = \Phi_i / C = M_{dii} / (\sum_{j=1}^n M_{dj}) \quad (13)$$

En supposant une densité unique pour tous les agrégats, ce terme est également le refus de masse du tamis basé sur la masse totale de l'échantillon

2.6.1. Compacité du mélange polydispersé

La théorie (De Larrard, 1999) est adaptée au sol naturel par (Monnet et al., 2019b) qui permet de déterminer la compacité du mélange de sol C_{mi} lorsque la classe i de particules est dominante c'est-à-dire lorsque la classe de diamètre i fixe la compacité du mélange.

2.6.2. Compacité de chaque classe du mélange polydispersé

La compacité de la classe dominante C_i est supposée proportionnelle à β_i (la compacité de chaque classe de particules) et la compacité du mélange C_{mi} lorsque la classe i est dominante. La compacité des autres classes C_j est calculée en appliquant la relation (14) entre la compacité de classe et la compacité du mélange avec un R_j connu. Par la suite, un calcul itératif applique une correction à C_{mi} (Fig.1) pour trouver une compacité du mélange (10) identique à celle de l'expérience.

2.6.3. Porosité de chaque classe du mélange polydispersé

Pour un mélange de 3 classes (Fig. 2) dont la classe 2 est dominante, le volume laissé par la classe 1 est le volume total disponible pour la classe 2; il est donné par (15). Le volume de vide laissé libre par les classes 1 et 2 est donné par (16) qui permet de calculer la porosité de la classe 2 (17). Cette relation est généralisée pour la classe i (18).

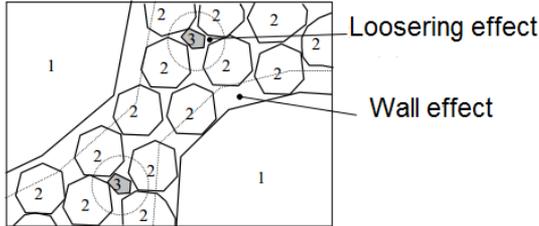


Figure 2: La classe 2 dominante éloigne les gros 1 et sépare les petits 3

$$C_j = R_j \cdot C_{mi} / R_i \quad (14)$$

$$V_{v1} / V_t = 1 - V_{s1} / V_t = 1 - \Phi_1 = V_{t2} / V_t \quad (15)$$

$$V_{v2} / V_t = 1 - V_{s1} / V_t - V_{s2} / V_t = 1 - \Phi_1 - \Phi_2 \quad (16)$$

$$n_2 = V_{v2} / V_{t2} = (1 - \Phi_1 - \Phi_2) / (1 - \Phi_1) \quad (17)$$

$$n_i = (1 - \sum_{j=1}^i \Phi_j) / (1 - \sum_{j=1}^{i-1} \Phi_j) \quad (18)$$

$$n = (V_v / V_s) \cdot (V_s / V_t) = e \cdot C \quad (19)$$

$$V_{vi} / V_t = (V_{vi} / V_{si}) \cdot (V_{si} / V_t) = e_i \cdot \Phi_i \quad (20)$$

$$\sum V_{vi} / V_t = V_{v2} / V_{t2} = n = \sum e_i \cdot \Phi_i \quad (21)$$

$$e_i = e \quad (22)$$

$$W = W_{cap} + W_{ads} \quad (23)$$

Compte tenu de la porosité par classe de particules, la relation générale sur l'ensemble de l'échantillon peut s'écrire (19) en fonction de la compacité C . On suppose la proportionnalité de la valeur e entre les volumes des vides de classe i et la compacité de la classe i , ce qui donne (20). On peut vérifier que la somme de tous les volumes de vide (21) correspond à l'équation théorique générale (19), ce qui implique l'égalité de l'indice des vides de classe i avec l'indice des vides de l'échantillon (22).

2.6.4. Distribution de l'eau : eau capillaire et eau adsorbée

Dans le sol, l'eau est répartie entre une eau capillaire circulant entre les grains de sol et une eau adsorbée liée à la surface des grains sans déplacement (23). L'eau adsorbée est répartie sur toutes les particules du sol et assure la continuité avec les zones capillaires. Nous avons supposé : les plus petites particules saturent avant les plus grosses ; il existe un front de saturation qui sépare les petites particules saturées des grosses particules insaturées; tous les petits diamètres situés sous le front de saturation sont saturés avec un degré de saturation constant proche de 1, égal à S_{rair} ; toutes les particules plus grosses situées au-dessus du front de mouillage participent au comportement insaturé ($S_r \approx 0$) sans succion capillaire avec un degré de saturation proche de 0; l'eau adsorbée couvre toutes les classes de grains (insaturés et saturés); le succion est liée à la teneur en eau du front de saturation dans le cas d'une eau capillaire ou à l'épaisseur de la couche d'eau adsorbée en cas d'absence d'eau capillaire.

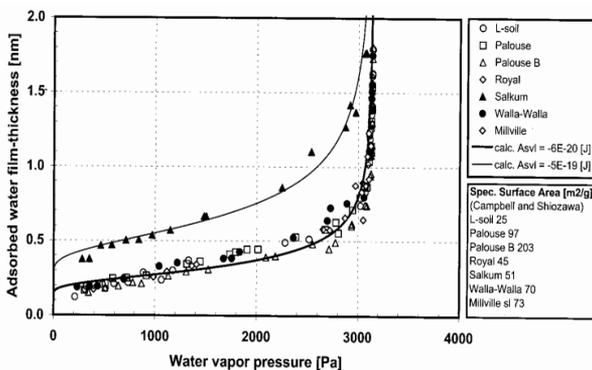


Figure 3: Epaisseur maximale de l'eau adsorbée (Santamarina et al., 2002)

$$W_{ads} = S_a \cdot h_a \cdot \rho_w \quad (24)$$

$$s = (10^{-11} / \pi) \cdot (S_a / W_{ads})^3 \quad (25)$$

$$S_{airD} = (16 \cdot T_c) / D_{perco} \quad (26)$$

$$\delta = \text{Log}(S_{rair}) / \text{Log}(s_{ads} / S_{air}) \quad (27)$$

$$\text{Log}(s / S_{air}) = -\text{Log}(S_r) / \delta \quad (28)$$

2.6.5. Influence de l'eau adsorbée

L'épaisseur maximale de l'eau adsorbée (Figure 3) est fonction de la pression de vapeur d'eau de saturation selon l'expression expérimentale (Santamarina et al., 2002). Elle varie entre 0,2 nm

1nm et dépend de la nature du sol et de la température. La numérisation des deux courbes (Figure 3) permet de transformer l'épaisseur maximale h_a de l'eau adsorbée en une variable interne dépendant uniquement de la nature du sol et de la température de l'eau θ . La teneur en eau correspondante est alors (24) avec la surface spécifique du sol S_a en m^2/kg . La teneur en eau est fixe et régule la teneur en eau capillaire, suivant (Frydman and Baker, 2009) l'épaisseur de l'eau adsorbée varie sous l'influence des forces de Van Der Waals et de la teneur en eau qui permettent de calculer la succion par (25).

2.6.5. Succion d'entrée d'air au séchage

Le modèle suppose que l'air commence à percoler à travers le sol lorsque la bulle d'air peut traverser la plus petite porosité (Figure 4) correspondant à la classe dominante pour la succion d'entrée d'air s_{air} et le degré de saturation S_{rair} . Habituellement, les grains de la même classe ne sont pas joints. Les grains de classe i sont considérés comme posés sur un plan des plus gros grains formant une paroi, et la bulle d'air doit traverser le vide entre deux grains de classe i avec un

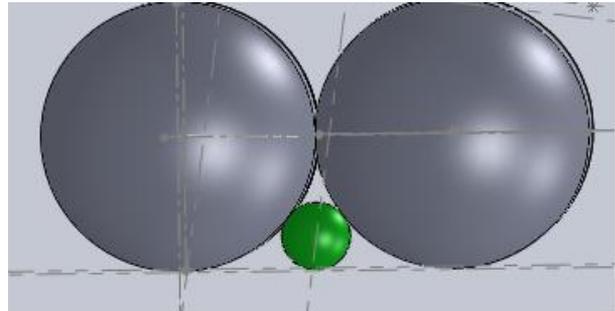


Figure 4: Bulle d'air en percolation pour deux particules de sol sphériques

rapport entre les rayons de la bulle d'air par rapport aux grains i de 0,25 . La succion d'entrée d'air sur un chemin de séchage est (26) dans le cas général où les grains ne se sont pas joints. A noter que le diamètre D_{perco} de la relation (26) correspond à la porosité minimale du sol qui peut être différente du diamètre dominant. Pour une teneur en eau inférieure à l'entrée d'air, la linéarité (28) entre la succion et le degré de saturation est supposée avec la pente δ (27) qui devient un paramètre interne du modèle.

3. Application au Limon de Livet-Gavet compacté à 85coups de dame Proctor

Le sol a été prélevé sur le site de l'usine EDF de Livet-Gavet (Hoang, 2017). La courbe granulométrique du sol naturel a un D_{max} de 80 mm et un D_{min} de $1\mu m$. La partie inférieure de la courbe, inférieure à 0,2 mm, a été analysée par sédimentométrie. Expérimentalement le sol est écrêté par tamisage à 2mm, et pour le calcul les éléments supérieurs à 2mm sont supprimés. Un tamis à $80\mu m$ de 31% et un VBS de 0,18 sont mesurés. Ce sol est classé A1 comme limon peu plastique avec une épaisseur d'eau adsorbée maximale de 0,44 nm à 20° . Les mesures de succion sont effectuées sous pression atmosphérique sans translation d'axe, de sorte que les propriétés de vapeur saturante de l'eau et la dissolution de l'air dans l'eau ne sont pas modifiées.

La surface spécifique théorique des grains du mélange, calculée par la relation (30) donne une surface spécifique de $690m^2/kg$ pour un indice des vides de 0,7, alors que la relation (30) pour l'indice VBS de $0,18cm^3/100g$ conduit à une surface spécifique de $4405m^2/kg$. Le coefficient de forme ϕ_a est alors de 0,156. L'indice des vides e et la limite de retrait w_r (Tableau 1) sont déduits de l'expérience. Dans (Tableau 1) le poids spécifique γ_s , le module G_p et le coefficient de Poisson ν_p des grains sont déduit de la bibliographie ; la tension superficielle T_c et l'angle de mouillage θ_c moyen sont déduits (Gras, 2011) ; la température θ , l'indice VBS, les coefficients de compression C_c et de gonflement C_s sont mesurés. Le degré de saturation à l'entrée d'air S_{rair} est déduit de (Boutonnier, 2007).

L'échantillon a été séché dans le four pendant 24 heures, puis ré-humidifié pour être

compacté à différents taux d'humidité jusqu'à ce que la teneur en eau de l'optimum Proctor soit atteinte. Le limon est compacté sous 85 coups par couche de dame Proctor, avec une teneur en eau de 10,9% et un indice des vides de 0,42. Cette méthode de compactage a été choisie pour mettre en évidence l'effet du compactage sur la structure du sol et la courbe de rétention. Les différents graphiques présentés montrent l'indice des vides et la teneur en eau (Figure 5), l'indice des vides et la succion (Figure 6), le degré de saturation et la teneur en eau (Figure 7), le degré de saturation à la succion (Figure 8).

Pour le séchage, une bonne correspondance est trouvée entre les résultats du modèle et l'expérience du chemin d'humidification, une bonne estimation de la succion de l'entrée d'air et une légère sous-estimation de la succion. Pour l'humidification, le comportement est bien retrouvé notamment en phase d'eau adsorbée seule pour des succions supérieures à 4000 kPa avec une réponse réversible au drainage et à l'humidification. La densité atteinte de la classe dominante est inférieure à celle de l'arrangement tétraédrique ; les grains dominants sont non jointifs.

Tableau 1 : Les paramètres de calcul utilisés

	e	w _r	γ _s kN/m ³	E _p GPa	v _p	θ _c Deg.	T _c kN/m ²	θ Deg.	VBS cm ³ /100g	S _{rair}	C _c	C _s
Séch.	0.424	0.17d	27.2	107	0.2	0	7.28	20	0.18	0.954	0.1	0.015
Humid	0.375	0.13w	27.2	107	0.2	5	7.28	20	0.18	0.954	0.1	0.015

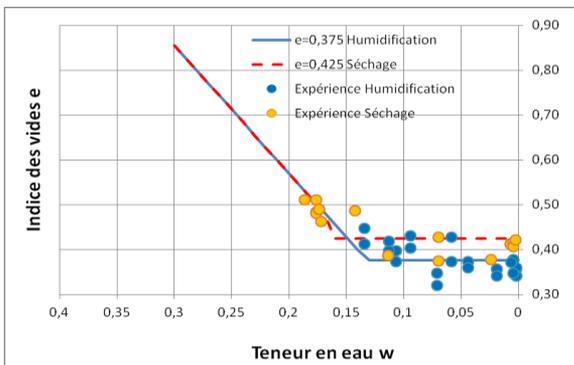


Figure 5: Variation de l'indice des vides en fonction de la teneur en eau

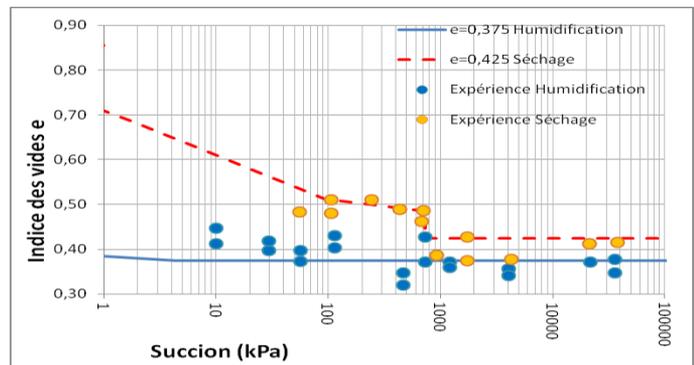


Figure 6: Variation de l'indice des vides en fonction de la succion

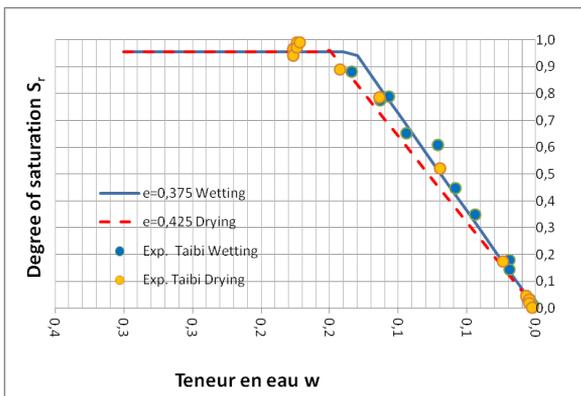


Figure 7: Degré de saturation en fonction de la teneur en eau

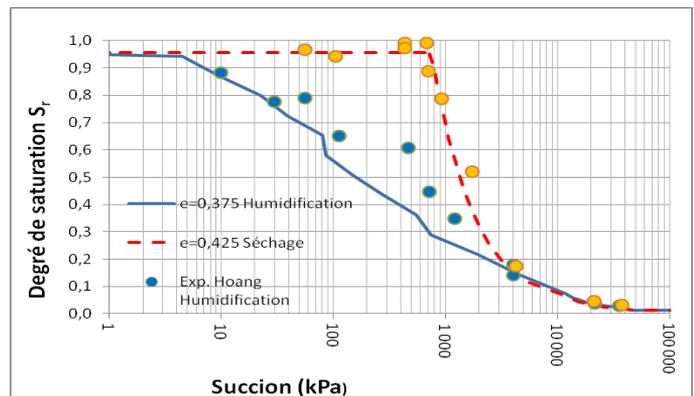


Figure 8: Relation degré de saturation - succion

4. Conclusion

Un modèle a été développé pour représenter le comportement du sol non-saturé dans sa phase de rétention d'eau sur un chemin de séchage, mais aussi sur un chemin

d'humidification. Le modèle utilise une distribution granulométrique non uniforme et prend en compte le degré de compactage des différentes classes de taille de grain. Le modèle explique le comportement de rétention en humidification par le développement de ménisques entre les particules et pour le séchage par la percolation de bulles d'air à travers la plus petite porosité du sol. Les deux chemins fusionnent quand il n'y a plus d'eau capillaire et qu'il ne reste que l'eau adsorbée. Le modèle utilise uniquement des paramètres géotechniques accessibles par des expériences de routine en laboratoire et sera développé pour d'autres types de sols. Il a permis de retrouver les principaux comportements du sol, que ce soit l'évolution de l'indice des vides, la teneur en eau, le degré de saturation en fonction de la succion, mais aussi la succion d'entrée d'air pour un limon compacté au-delà de l'OPN (85 coups / couche). Il a permis de montrer l'importance de l'eau adsorbée dans le phénomène de rétention. Les auteurs remercient le projet ANR Terre Durable pour son soutien financier.

5. Bibliographie

- Boutonnier, L., 2007. Comportement hydromécanique des sols fins proches de la saturation cas des ouvrages en terre, Thèse, INPG, Grenoble.
- Boutonnier, L., Bufalo, M., Dubreucq, T., Fry, J.-J., Lejeune, J.-M., Mahmutovic, D., 2019. Conception et construction des ouvrages en sols fins - Enseignements du projet ANR Terredurable et retour d'expérience, Presses des Ponts, Paris.
- Brooks, R.H., Corey, A.T., 1966. Properties of porous media affecting fluid flow. ASCE, Journal of the Irrigation and drainage division IR, 61–88.
- De Larrard, F., 1999. Structures granulaires et formulation des bétons, Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées. Lab. Cent. Ponts Ch.
- Frydman, S., Baker, R., 2009. Theoretical Soil-Water Characteristic Curves Based on Adsorption, Cavitation, and a Double Porosity Model, Int. J. of Geo. 250–257.
- Gallipoli, D., Wheeler, S.J., Karstunen, M., 2003. Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil. Géotechnique 53, 105–112.
- Gras, J.-P., 2011. Approche micromécanique de la capillarité dans les milieux granulaires : rétention d'eau et comportement mécanique. Thèse, Univ. Montpellier
- Hertz, H., 1881. Über die Berührung fester elastischer Körper. Journal für die reine und angewandte Mathematik 92, 156–171.
- Hoang, N.L., 2017. Etudes des propriétés hydromécaniques d'un sable limoneux : de la saturation partielle à la saturation complète. Thèse ENTP, Vaulx en Velin
- Monnet, J., Mahmutovic, D., Boutonnier, L., Taïbi, S., 2019a. A theoretical retention model for unsaturated uniform soils. Eur. J. of Env. and Civil Eng. 23, 345–367.
- Monnet, J., Mahmutovic, D., Boutonnier, L., Taïbi, S., Andrianatrehina, R., Branque, D., Hoang, N.L., 2019b. Theo. soil water ch. curves for large grad. soil. Eur.J.Env. Civil Eng. 23, 831–865.
- Or, D., Tuller, M., 1999. Liquid retention and interfacial area in variably saturated porous media: Upscaling single-pore to sample-scale mod. Wat.Res.Res. 35, 3591–3605.
- Salager, S., 2007. Etude de la rétention d'eau et de la consolidation des sols dans un cadre thermo-hydro-mécanique. Thèse, Université Montpellier 2, Montpellier.
- Santamarina, J.C., Klein, K.A., Wang, Y.H., Prencke, E., 2002. Specific surface : determination and relevance. Canadian Geotechnical Journal 39, 233–241.
- Taïbi, S., 1994. Comportement mécanique et hydraulique des sols soumis à une pression interstitielle négative - Etude expérimentale et modélisation. Thèse, Ec. Cent. Paris.
- van Genuchten, Th.V., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society 44, 892–898.