

# Mesure et prédiction des chemins de drainage-humidification. Application à l'argile d'un noyau de barrage

M. DERFOUF  
M.A. ALLAL  
N. ABOU-BEKR

Laboratoire  
Eau et Ouvrages  
dans leur Environnement  
Université A. Belkaid  
BP 230  
13000 Tlemcen, Algérie

S. TAÏBI

Laboratoire  
Ondes et Milieux complexes  
FRE CNRS 1302  
Université du Havre  
53, rue de Prony  
76600 Le Havre, France

## Résumé

Dans cet article, on présente les résultats d'essais de drainage humidification sous contrainte extérieure nulle, obtenus sur l'argile du noyau du barrage de Boughrara situé dans l'ouest algérien. L'argile remaniée est préparée initialement, soit sous forme de pâte à  $w_i = 1,5 w_L$ , soit est consolidée à 100 kPa. La méthode osmotique et la méthode de contrôle par phase vapeur ont été mises en œuvre pour imposer la succion dans le sol. Les résultats obtenus montrent que le matériau sous forme de pâte à  $w_i = 1,5 w_L$  et celui consolidé présente les mêmes caractéristiques en termes de teneur en eau et de succion de retrait, ainsi que de succion d'entrée d'air et de resaturation. Aussi, les résultats ont montré que la succion dans les sols non saturés joue le même rôle que la contrainte mécanique pour les sols saturés tant que la succion de désaturation n'est pas dépassée. La simulation des courbes de rétention par les relations empiriques de Van Genuchten (1980) et de Fredlund et Xing (1994), a montré l'aptitude des deux fonctions à reproduire qualitativement et quantitativement ces chemins, et ceci avec une différence de précision, selon le domaine de succion considérée.

**Mots-clés :** succion, normalement consolidé, surconsolidé, noyau de barrage, chemin de drainage humidification, fonction de Van Genuchten, fonction de Fredlund et Xing.

# Measure and prediction of drying wetting paths. Application to a dam core clay

## Abstract

The paper presents test results on drying wetting paths conducted on the clay of Boughrara dam, which is situated west of Algeria. The initial states of samples are: slurry with a water content equal to  $1.5 w_L$ , and slurry consolidated at 100 kPa. Osmotic technique and vapor equilibrium technique were used to impose suction. Results show that soil prepared with two initial different states present the same characteristics in terms of shrinkage limit, and suction corresponding to air entry value and resaturation. In addition, the logic of saturated soils remains applicable while suction doesn't exceed desaturation value. The simulation of water retention curves with two mathematical functions, that's are: Van Genuchten (1980) and Fredlund & Xing (1994) functions, has shown, that both functions are capable to reproduce qualitatively and quantitatively these curves, with different level of precision, depending on considered suction domain.

**Key words:** suction, normally consolidated, overconsolidated, dam core, drying wetting path, Van Genuchten function, Fredlund & Xing function.

## Introduction

En l'absence de contrainte mécanique, le volume du sol peut varier si l'on soumet l'eau contenue dans l'échantillon à un état de tension. Plus généralement, c'est la différence entre les pressions interstitielles de l'air et de l'eau nommée succion, qui est le paramètre déterminant des mouvements des fluides dans les milieux poreux :  $S = u_a - u_w$ .

À l'échelle d'un pore, cette différence de pression se traduit par l'existence d'un domaine non saturé entre l'air et l'eau. Elle est caractérisée par la tension superficielle de l'eau et la courbure de l'interface (loi de Laplace). Le rôle de la succion peut être mis en évidence directement sur chemin de drainage humidification, dans lequel l'échantillon n'est soumis à aucune contrainte extérieure.

Le rôle de la succion peut être mis en évidence directement sur chemin de drainage humidification, dans lequel l'échantillon n'est soumis à aucune contrainte extérieure. Ceci permet la détermination de la courbe caractéristique sol-eau (SWCC), qui définit la relation entre la teneur en eau et la succion. Cette dernière, est un paramètre-clé dans la résolution des problèmes liés aux transferts hydriques, variations de volume, résistance au cisaillement dans les sols non saturés (Fredlund et Rahardjo, 1993 ; Fredlund *et al.*, 1994 ; Vanapalli *et al.*, 1996 ; Assouline, 2001 ; Lachgueur *et al.*, 2010, etc.).

L'étude présentée dans cet article constitue une première approche dans la recherche de la modélisation du comportement hydromécanique des sols argileux soumis à des états de contraintes hydriques (succion). Celle-ci est abordée ici exclusivement sous l'aspect des variations de volume, à travers l'exemple du matériau du barrage de Boughrara préparé initialement sous forme de pâte saturée à  $w_i = 1,5w_L$ , ou consolidée à 100 kPa. Ces deux états ont été choisis pour mettre en évidence les différences de comportement liées à l'histoire du sol. Les deux sols seront soumis à un cycle de drainage-humidification, puis les courbes obtenues seront comparées entre elles, ainsi que les déformations mesurées à celles engendrées par un chargement ou un déchargement oedométrique ou isotrope classiques.

La simulation des courbes de rétention sera faite par deux relations empiriques, à savoir : la fonction de Van Genuchten, 1980 et celle de Fredlund et Xing, 1994. L'aptitude de ces deux fonctions à reproduire ces chemins sera examinée.

## Techniques expérimentales

Il existe plusieurs techniques permettant l'imposition de la succion, et chaque technique n'est applicable que dans une gamme de valeurs données et sous certaines conditions. Les techniques les plus utilisées sont : la technique de surpression d'air, la technique osmotique, et celle par phase vapeur. Le choix d'une méthode ou d'une autre dépend, d'une part, de ses avantages et inconvénients et, d'autre part, de la gamme de succion imposée qu'elle peut balayer. Les techniques osmotiques et de contrôle par phase vapeur ont été choisies pour leur simplicité d'utilisation et le large domaine de succion exploré, qui justifie leur utilisation en complémentarité.

## Technique osmotique

La méthode osmotique est une technique simple à mettre en œuvre pour imposer des succions comprises entre 50 kPa et 8 MPa. Son principe consiste à mettre l'échantillon de sol en contact avec une solution de macromolécules organiques de polyéthylène glycol PEG, par l'intermédiaire d'une membrane semi-perméable ne laissant passer que l'eau. Cette solution se trouve à une pression osmotique fixée par la concentration en PEG et à l'équilibre la pression interstitielle de l'eau dans l'échantillon correspondra à cette pression osmotique. La courbe d'étalonnage de PEG en fonction de la succion imposée a été établie par plusieurs auteurs. La figure 1 représente celle obtenue par Williams et Shaykewich, 1969, et complétée par Delage *et al.*, 1998. Cette relation est indépendante du type de PEG et elle peut être approchée par une équation parabolique, de forme :  $s = 11c^2$  où,  $s$  : est la succion (MPa) ;  $c$  : est la concentration en PEG exprimée en g de PEG par g d'eau.

Les solutions ont été préparées en utilisant du PEG 6000 avec une membrane en triacétate de cellulose de référence commerciale Spectra/Por® n° 3 avec un MWCO (*Molecular Weight Cut-Off*) de 3 500 Da.

La succion à imposer étant fixée, on calcule la masse de PEG à malaxer avec l'eau distillée en utilisant la courbe d'étalonnage de la figure 1. Il est nécessaire selon Cui, 1993 d'attendre deux jours entre la préparation et l'utilisation d'une solution, car ce délai permet la stabilisation de la densité de la solution.

La figure 2a représente un schéma du dispositif d'essai réalisé pour cette technique. Il consiste à fixer la membrane semi-perméable dans un bêcher contenant du PEG 6000 par l'intermédiaire d'une bague en PVC. La bague est ensuite glissée sur les parois du bêcher jusqu'à ce que le contact entre la solution et la membrane soit parfait (pas de bulles d'air emprisonnées sous la membrane). Les échantillons sont déposés sur la membrane puis un parafilm vient fermer le bêcher pour éviter toute évaporation.

Afin d'éviter la dégradation des membranes semi-perméables par les bactéries naturellement présentes dans le sol, on ajoute quelques gouttes de pénicilline ou d'acide benzoïque dans chaque solution élaborée. Ceci permet de réaliser des essais de drainage humidification d'une durée d'un mois ou un peu plus sans dégradation des membranes.

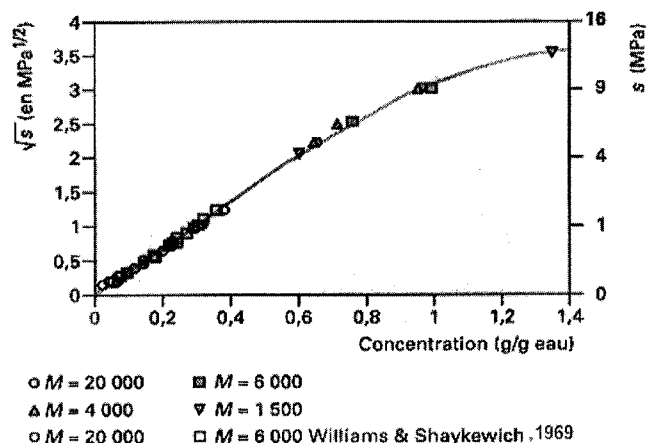


FIG. 1 Courbe d'étalonnage du PEG, Delage *et al.*, 1998.  
Calibration curve of PEG, Delage *et al.*, 1998.

## Technique de contrôle par phase vapeur

Cette technique est généralement utilisée pour l'imposition de succions allant de quelques MPa jusqu'à des centaines de MPa (10 MPa et 500 MPa dans les sels utilisés dans cette étude). Elle est basée sur la loi de Kelvin qui permet de relier la succion totale imposée à l'humidité relative. Cette technique consiste à placer un ou plusieurs échantillons dans une atmosphère confinée (dessiccateur ou bocal) où le taux d'humidité relative est contrôlé par des solutions salines. Les transferts d'eau s'effectuent sous phase vapeur jusqu'à l'équilibre, ce qui est assez long. La figure 2b représente le dispositif utilisé pour cette méthode.

## Matériau

Le matériau testé a été prélevé du gisement d'emprunt destiné à la réalisation du noyau du barrage de Boughrara, situé à l'extrême ouest de l'Algérie nord-occidentale. Il est situé sur le point de confluence entre l'oued Tafna et l'oued Mouillah à environ un kilomètre, en amont de la localité de hammam Boughrara, et à 60 km de la ville de Tlemcen. Il est destiné à satisfaire les besoins en eau, essentiellement, des villes d'Oran (33 millions m<sup>3</sup>) et de Maghnia (17 millions m<sup>3</sup>) et en eau d'irrigation de la moyenne Tafna (9 millions m<sup>3</sup>). Vu sa capacité totale qui est de l'ordre de 177 millions de m<sup>3</sup>, il est considéré comme le plus important de la wilaya de Tlemcen.

Du point de vue géologique, le site d'emprunt se situe dans les limites d'un massif intensément fracturé du Jurassique se développant dans toute l'emprise du barrage. Des marnes grises à verdâtres, du miocène reposent en discordance sur les dépôts jurassiques et les recouvrent d'un tapis de 60 m.

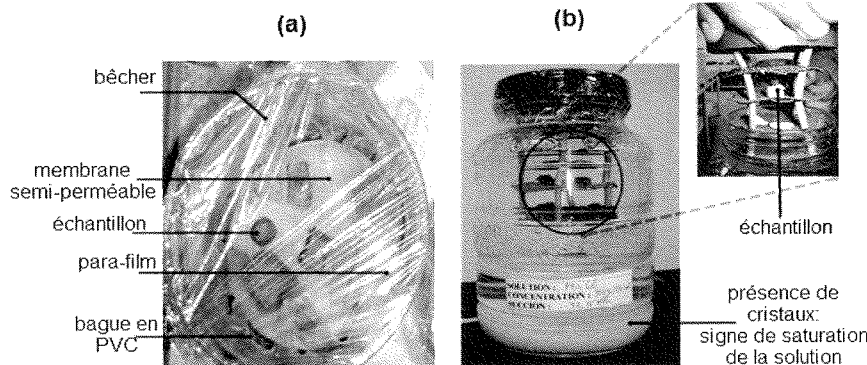


FIG. 2

(a) Dispositif d'essai pour la technique osmotique. (b) Dispositif d'essai pour la technique de contrôle par phase vapeur.

(a) Test device for the osmotic technique. (b) Test device for the vapor equilibrium technique.

TABLEAU I

### Paramètres physiques de l'argile de Boughrara.

Physical parameters of Boughrara clay.

Granulométrie NF P94-056 et 057			Plasticité NF P94-051			Densité des grains solides NF P94-054
< 80 µm	< 2 µm (2)	D60	w <sub>L</sub>	w <sub>p</sub>	I <sub>p</sub> (1)	γ <sub>s</sub> /γ <sub>w</sub>
97 %	52 %	3 µm	54 %	26 %	28 %	2,65

TABLEAU II

### Paramètres chimiques de l'argile de Boughrara.

Chemical parameters of Boughrara clay.

Teneur en CaCO <sub>3</sub> NF P94-048	Valeur de bleu NF P94-068	Surface Spécifique NF P94-068	Teneur en MO NF P94-047	Ac (1/2)
20 %	6,91	145 m <sup>2</sup> /g	7 %	0,54

Les résultats des essais d'identifications sont représentés dans les tableaux I et II. Ces résultats ont montré une prédominance de la fraction argileuse, de façon à ce que la valeur de bleu est de 6,91, et plus de 50 % des éléments sont inférieurs à 2 µm. Ce matériau est caractérisé par une forte plasticité, et un pourcentage de 7 % de matière organique, déterminée par la méthode de calcination. Cette argile paraît peu active, du fait que le coefficient d'activité est de l'ordre de 0,54. De la valeur de la teneur en carbonate de calcium et de la surface spécifique, on peut déduire que c'est une argile marneuse, conformément au constat géologique, composée essentiellement de Kaolinite et d'illite. D'après la classification USCS/LPC, ce sol est désigné : fO-At, argile très plastique faiblement organique.

## Programme expérimental et procédure d'essai

Le programme expérimental comporte des essais de drainage humidification à contrainte extérieure nulle, et de chargement déchargement oedométrique, ainsi qu'un essai de compression isotrope saturé. Les états initiaux des échantillons se présentent sous forme :

- de pâte à une teneur en eau initiale égale 1,5 w<sub>L</sub> (essai de drainage),
- d'échantillons obtenus à partir de pâte saturée, puis consolidés sous une contrainte statique de 100 kPa, (essai de drainage),
- de pâte et d'échantillons consolidés à 100 kPa, séchés à l'air libre puis dans une étuve à 50 °C (essai d'humidification).

L'essai de drainage humidification consiste à imposer aux échantillons une suite de succions croissantes jusqu'au séchage complet, puis à le réhumidifier en imposant une suite de succions décroissantes (Fig. 3).

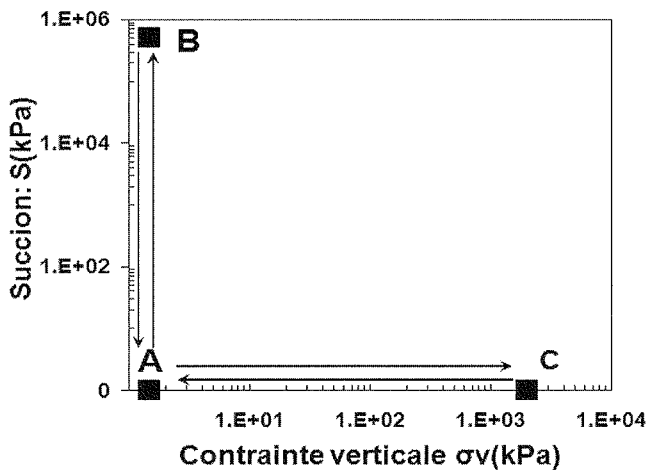


FIG. 3 Chemins de contraintes suivis dans le plan  $[\sigma_v, S]$ .  
Stress paths followed in  $[\sigma_v, S]$  plane.

Après équilibre avec une succion imposée, on mesure les caractéristiques finales des échantillons : teneur en eau et volume total par immersion dans le Kerdane, pour en déduire les paramètres d'état (Tessier, 1975 ; cité par Zerhouni, 1991). Il s'agit donc d'une méthode destructive, qui nécessite un nouvel échantillon pour chaque point de mesure. Pour cela la mesure est faite sur 2 à 4 échantillons pour chaque valeur de succion.

La série a été complétée par deux essais œdométriques classiques : un sur une pâte préparée à  $1,5 w_L$  (E1), et l'autre sur la pâte consolidée (E2), et un troisième essai de chargement isotrope (E3). La contrainte de consolidation, déterminée graphiquement à partir des essais E2 et E3, vaut  $\sigma'_{v0} \approx 130$  kPa, tout en considérant pour l'essai E3 la contrainte verticale  $\sigma'_v = 3P' / (1 + 2K_0)$ , avec  $P'$  la contrainte moyenne effective, et  $K_0$  le coefficient de poussée des terres au repos, estimé à partir de la corrélation de Massarsch, 1979 :

$$K_0 = 0,44 + 0,42 (Ip/100) \quad K_0 = 0,56 \quad (1)$$

L'ensemble des chemins suivis et leurs détails, sont résumés dans le tableau III et la figure 3. Pour des commodités de représentation graphique une succion de valeur égale à 1 kPa correspond réellement à une succion nulle.

## 5

## Résultats et discussion

Les résultats des essais de drainage humidification D-H1 et D-H2, sont représentés dans la figure 4 dans cinq plans :

- plan (A) :  $[e, w]$ , courbe de retrait usuelle ;
- plan (B) :  $[e, \log S]$ , courbe de compressibilité ;

- plan (C) :  $[w, Sr]$  ;
- plan (D) :  $[Sr, \log S]$  ;
- plan (E) :  $[w, \log S]$ .

Concernant l'essai de drainage humidification de l'argile initialement sous forme de pâte (essai D-H1) :

Sur le premier plan (A), l'indice des vides étant une mesure du volume global de l'échantillon, ce graphique présente en fait la courbe de retrait du sol. La saturation du sol se traduit par une droite passant par l'origine, d'équation :  $e = (\gamma_s/\gamma_w)w$ . Ensuite, lorsque la teneur en eau décroît, l'indice des vides tend vers une valeur constante,  $e_{SL} = 0,37$ . La limite de retrait  $w_{SL}$  est définie comme la teneur en eau du sol saturé correspondant à l'indice des vides final du sol après passage à l'étuve, elle correspond donc à l'abscisse du point situé à l'intersection de la droite de saturation et de l'asymptote horizontale de la courbe lorsque  $w$  tend vers 0. Sa valeur est de l'ordre de 16 %.

Sur le second plan (B), on peut distinguer deux domaines de variation d'indice des vides. Le premier est caractérisé par des variations importantes et le deuxième, où elles deviennent quasi nulles. La limite entre ces deux domaines correspond au point d'ordonnée  $e_{SL}$  et d'abscisse nommée succion de retrait  $S_{SL} = 4$  MPa.

Le plan (C) met en évidence le domaine de teneur en eau dans lequel le sol reste saturé. Lorsque la teneur en eau devient inférieure à celle du point d'entrée d'air, le degré de saturation diminue très rapidement, presque linéairement avec la teneur en eau. L'intersection de cette droite et de la ligne horizontale pour  $Sr = 1$  permet une détermination assez précise du point d'entrée d'air dans ce plan.

Sur le plan (D) on remarque que lorsqu'on augmente progressivement la succion, le sol reste quasi saturé jusqu'à une succion de l'ordre de 2,5 MPa, nommé succion de désaturation ou d'entrée d'air  $S_e$ , puis le degré de saturation décroît rapidement jusqu'à une valeur résiduelle de l'ordre de 25 %, pour une succion de 500 MPa. La courbe dans ce plan est complétée par des pointillés jusqu'à un degré de saturation égal à 0.

L'effet de la succion sur l'indice des vides apparaît donc étroitement lié à la saturation du matériau : la phase de compressibilité maximale de l'argile correspond au domaine où le sol est quasi saturé, tandis que l'indice des vides ne varie presque plus lorsque le degré de saturation descend au-dessous de 90 %.

Enfin, le plan (E) traduit globalement l'effet de la succion sur un paramètre mixte mais facile à mesurer, la teneur en eau, qui rend compte à la fois de la variation globale de volume du sol et du remplissage des pores. Il peut être aussi exprimé en fonction de la teneur en eau volumique  $\theta w = n.Sr$ , où  $n$  est la porosité, au lieu de la teneur en eau massique  $w$ .

TABLEAU III Détail des chemins de contraintes suivis.  
Detail of the stress paths followed.

Essai	Type d'essai	Chemin suivi	Suction S (MPa)	État initial
D-H1	Drainage humidification	A-B-A	0-500-0	Pâte à $1,5 w_L$
D-H2		A-B-A	0-500-0	Pâte consolidée à 100 kPa
E1	Chargement déchargement œdométrique saturé	A-C-A	0	Pâte à $1,5 w_L$
E2		A-C-A	0	Pâte consolidée à 100 kPa
E3	Chargement isotrope saturé	A-C		

La diminution rapide du degré de saturation  $S_r$  se traduit par une chute de la teneur en eau. Tant que la succion est plus faible que  $S_e$ , les variations de teneur en eau et du degré de saturation sont liées, alors que la teneur en eau varie avec le degré de saturation pour les succions plus élevées.

Si l'on considère à présent le chemin d'humidification de l'échantillon séché de la pâte, on constate qu'il existe une hystérésis des cycles. Ce phénomène a été étudié par plusieurs auteurs, il est dû essentiellement selon Prapaharan *et al.*, 1985 : i) à la géométrie non uniforme des pores individuels et de leur interconnexion, ii) à la différence de l'angle de raccordement en avance et en recul, iii) au gonflement lors d'une humidification ou le retrait lors d'un séchage, qui est la cause principale de ce phénomène dans le sol argileux, selon Cui, 1993.

Selon le domaine de succion considéré, on peut constater ce qui suit.

Pour des  $S \leq 500$  MPa à  $S_{SL}$ , le chemin d'humidification est confondu avec celui de drainage dans tous les plans sauf le plan D, où une hystérésis est observée. La variation du degré de saturation est de l'ordre 77 %, tandis que sur le chemin de drainage elle vaut 91 %.

De  $S_{SL}$  à  $S_{re}$  : succion de resaturation = 320 kPa, le matériau se resature, et présente cette fois-ci une forte irréversibilité dans les trois plans B, D, et E. Un gonflement est observé dans le plan B, où l'indice des vides varie de 0,16, accompagné d'une augmentation légère de la teneur en eau de l'ordre de 5 %.

Pour des  $S \leq S_{re}$  le sol est quasiment saturé, et l'hystérésis demeure dans les trois plans déjà cités. Le gonflement s'accroît ; avec une variation de l'indice des vides de 0,26, et de la teneur en eau de 11 %.

Le chemin de drainage humidification de la pâte consolidée est semblable à celui de la pâte préparée initialement à  $1,5 w_L$ , surtout dans les plans A, C et D, où les courbes se superposent. On note toutefois qu'il présente quelques différences.

Le chemin de drainage de la pâte consolidée, sur le plan B, commence par un indice des vides inférieurs à celui de la pâte ;  $e_i = 1,05$ . Il suit tout d'abord un chemin surconsolidé, pour ensuite rejoindre le chemin normalement consolidé de la pâte à une succion de l'ordre de 500 kPa. Ensuite, le chemin suivi par les deux matériaux est pratiquement le même, ce qui se traduit par les mêmes valeurs caractéristiques :  $w_{SL}$ ,  $S_{SL}$  et  $S_e$ .

Sur le chemin d'humidification : pour des succions inférieures à la succion  $S_{SL}$ , les courbes des deux matériaux se séparent. Entre la succion  $S_{SL}$  et  $S_{re}$ , le gonflement pour la pâte consolidée est moins marqué que celui de la pâte, en effet l'indice des vides varie de 0,16 pour l'essai D-H1 et de 0,03 pour l'essai D-H2. Selon Fleureau, 1992, ceci peut être dû à la présence ou la formation de microfissures au cours de l'humidification, qui bloqueront en partie le gonflement.

Pour des succions inférieures à la succion de resaturation  $S_{re}$ , le gonflement se poursuit et les deux chemins restent sensiblement parallèles. L'indice des vides de la pâte consolidée varie de 0,18 et celui de la pâte consolidée de 0,26.

Fleureau, 1992, ajoute que la similitude de comportement observée sur le chemin d'humidification des deux essais, peut être expliquée par le fait que la pâte consolidée puis séchée par étuvage, aura finalement une contrainte de consolidation bien supérieure

à 100 kPa, et qui sera la même contrainte de consolidation que celle de la pâte étuvée. On parle dans ce cas d'une contrainte de consolidation due à la succion.

Dans les tableaux IV et V, on reporte pour le chemin de drainage humidification des essais D-H1 et D-H2, la variation des différents paramètres : indice des vides, degré de saturation, teneur en eau, en fonction du domaine de succion. On peut remarquer que quel que soit le domaine de succion considéré, ou le chemin suivi, la variation des paramètres,  $e$  et  $w$ , pour la pâte est nettement plus grande que celle de la pâte consolidée.

Sur le plan (B) nous avons superposé aux chemins de drainage-humidification, les chemins œdométriques E1, E2 et isotrope E3, ainsi que la corrélation de Biarez et Favre, 1975, du chemin isotrope donnée par les relations suivantes :

$$w = w_L, \text{ ou } e = (\gamma_s/\gamma_w) \cdot w_L, \text{ pour } P' = 7 \text{ kPa} \quad (2)$$

$$w = w_p, \text{ ou } e = (\gamma_s/\gamma_w) \cdot w_p, \text{ pour } P' = 1000 \text{ kPa} \quad (3)$$

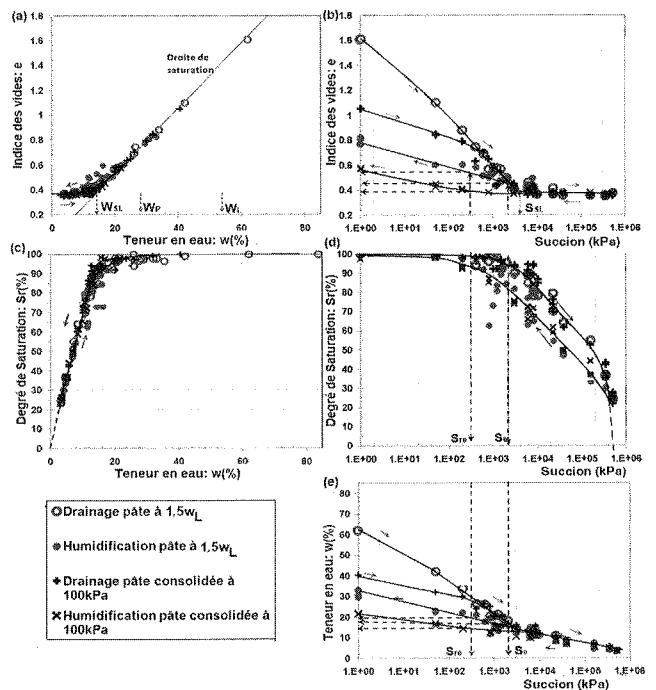


FIG. 4 Chemins de drainage humidification de l'argile de Boughrara initialement sous forme de pâte à  $w_i = 1,5 w_L$ , et pâte consolidée à 100 kPa.

Drying wetting paths on saturated slurry Boughrara clay at  $w_i = 1,5 w_L$  and consolidated slurry at 100 kPa.

TABLEAU IV Variation des paramètres d'état en fonction du domaine de succion sur chemin de drainage.

Variation of state parameters according to suction domain on drying path.

Type d'essai	Intervalle de succion	$\Delta e$	$\Delta e / (1 + e_i)$	$\Delta S_r$ (%)	$\Delta w$ (%)
D-H1	$S \leq S_e$	1,15		6	45
	$S_e \leq S \leq S_{SL}$	0,09	0,475	3	3
	$S \geq S_{SL}$	0		91	14
D-H2	$S \leq S_e$	0,59		6	23
	$S_e \leq S \leq S_{SL}$	0,06	0,332	3	3
	$S \geq S_{SL}$	0		91	14

TABLEAU V

**Variation des paramètres d'état en fonction du domaine de succion sur chemin d'humidification.**

Variation of state parameters according to suction domain on wetting path.

Type d'essai	Intervalle de succion	$\Delta e$	$\Delta Sr$ (%)	$\Delta w$ (%)
D-H1	$S \leq S_{re}$	0,26	7	11
	$S_{re} \leq S \leq S_{SL}$	0,16	16	5
	$S \geq S_{SL}$	0	77	14
D-H2	$S \leq S_{re}$	0,18	7	7
	$S_{re} \leq S \leq S_{SL}$	0,03	16	1
	$S \geq S_{SL}$	0	77	14

On constate que, tant que les échantillons restent saturés, le chemin de drainage est parallèle à la droite de compression œdométrique et isotrope. La comparaison entre les coefficients de compressibilité  $\lambda$  et  $\kappa$ , d'une part, et, d'autre part, les indices de drainage ( $\lambda_d$ ) et d'humidification ( $\kappa_h$ ) (définis selon Biarez *et al.*, 1988, comme étant respectivement la pente des chemins de drainage et d'humidification dans le domaine saturé), montre que le coefficient de compressibilité  $\lambda$  et l'indice de drainage  $\lambda_d$  sont pratiquement égaux, de même pour le coefficient de compressibilité élastique  $\kappa$  et l'indice d'humidification  $\kappa_h$ . Il s'en suit que les corrélations de Biarez et Favre, 1975 établies pour  $\lambda$  et  $\kappa$  restent applicables pour  $\lambda_d$  et  $\kappa_h$  :  $2,3\lambda_d = C_d = 0,009 (w_L - 13)$ , et  $\lambda_d/\kappa_h \approx 4$  (tableau VI).

On peut conclure de ces observations que des incréments identiques de succion ou de contrainte mécanique produisent la même variation d'indice des vides tant que le matériau reste saturé, ce qui rejoint les résultats de nombreux auteurs (Biarez *et al.*, 1988 ; Zerhouni, 1991 ; Fleureau *et al.*, 1993 ; Taïbi, 1994, etc.). Par conséquent, il est possible d'établir une équivalence entre une contrainte mécanique externe et la succion, ou encore que, dans un sol saturé, l'expression de la contrainte effective de Terzaghi, reste valable pour des valeurs de succion inférieures à la succion d'entrée d'air.

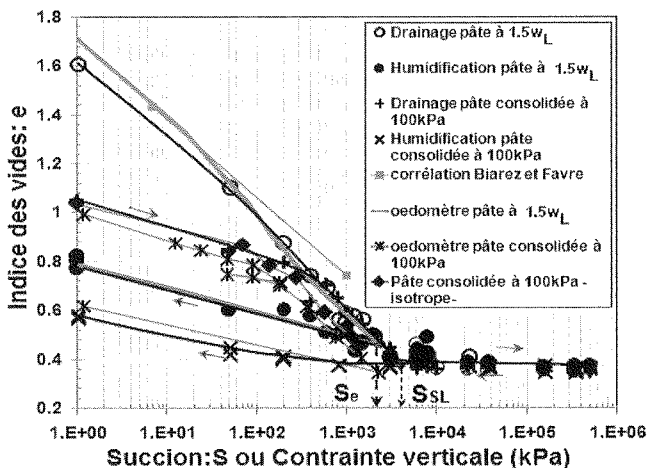


FIG. 5

**Comparaison entre chemins de drainage humidification avec chemins œdométriques et isotrope de l'argile de Boughrara sous forme de pâte à  $w_i = 1,5 w_L$  et pâte consolidée à 100 kPa.**

 Comparison between drying wetting paths with oedometric and isotropic paths on saturated slurry Boughrara clay at  $w_i = 1,5 w_L$  and consolidated slurry at 100 kPa.

TABLEAU VI

**Comparaison des paramètres de compressibilité des essais de drainage humidification et des essais œdométriques et isotrope.**

Comparison between compressibility parameters of drying wetting and oedometric or isotropic paths.

Essai	$\lambda$ , ou $\lambda_d$	$\kappa$ , ou $\kappa_h$	$\lambda/\kappa$ , ou $\lambda_d/\kappa_h$
Corrélation	0,160	0,040	4
E1	0,152	0,045	3,38
E2	0,147	0,036	4,08
E3	0,120		
D-H1	0,153	0,041	3,73
D-H2	0,153	0,035	4,37

Taïbi, 1994, interprète le comportement observé sur chemin de drainage comme suit : si on fait l'hypothèse que le sol peut être modélisé par un milieu granulaire, à l'échelle des grains, le séchage provoque la formation de ménisques d'eau uniquement sur le contour d'un arrangement aléatoire. L'eau est continue à l'intérieur de l'échantillon et remplit tout l'espace poral. L'effet de la succion dans ce cas est identique à celui d'une contrainte isotrope sur le contour de l'échantillon. Cet effet se traduit à l'échelle des grains par des forces de contact intergranulaires  $F$  inclinées d'un angle  $\beta = \varphi$  (angle de frottement des grains), ce qui provoque des variations de volume plastique (compression  $\lambda_d$ ). Par conséquent, dans ce domaine ( $S \leq S_e$ ), le chemin de drainage est identique au chemin œdométrique et isotrope du même sol, mais à pression interstitielle positive ou nulle.

En revanche, dans le second domaine ( $S > S_e$ ), l'eau n'est plus continue dans l'échantillon, mais se trouve localisée aux points de contact entre les grains. Dans ce cas, les ménisques capillaires induisent des forces  $F$  qui sont orthogonales aux plans de contact, et ne provoquent plus de réarrangement des grains, donc les variations volumétriques plastiques ne sont plus possibles (limite de retrait).

En général, la succion de désaturation est plus faible que la succion correspondant à la limite de retrait. Donc on peut parler d'un domaine intermédiaire « quasi saturé » où le matériau se désature faiblement. Dans ce cas, l'air dans le sol se trouve sous forme de bulles isolées dans les interstices, et ne joue aucun rôle dans la résistance du matériau. En revanche il joue un rôle primordial dans la compressibilité du fluide interstitiel, par conséquent la compressibilité du matériau sur le chemin  $\lambda$  est continue dans ce domaine.

En réexploitant les résultats de Yong *et al.* (1971), Alonso *et al.* (1987) présentent des courbes donnant les variations de l'indice des vides en fonction d'un cycle de succion (drainage humidification), sous contrainte extérieure nulle, obtenue sur deux argiles initialement sous forme de boue (Kaolin, et l'argile de Sainte-Rosalie,  $w_L = 48\%$ ). Ces résultats ont montré l'existence d'un seuil en succion sur chemin de drainage, limitant les déformations élastiques et plastiques, de la même façon que sur un chemin œdométrique ou isotrope. Selon ces auteurs, ce seuil correspond à la succion maximale connue par le sol dans son histoire. Toujours selon Alonso *et al.* (1987), Yong *et al.* (1971), on estime que ces deux sols se désaturent rapidement et ceci entre une succion de 1 à 10 kPa. Ces constatations ont été à l'origine de la proposition d'une surface de charge, en terme de succion, nommé (SI), dans le modèle à variables indépendantes d'Alonso *et al.* (1990).

Dans notre cas, ce seuil n'apparaît pas dans le cas de l'essai D-H1. Ceci est dû à ce que la succion minimale imposée est de 50 kPa, et la courbe de drainage est tracée directement entre ce point et le point initial. Par contre, dans le cas de l'essai D-H2, sa valeur est l'ordre de 350 kPa. Cette valeur ne peut être en aucun cas interprétée comme étant la succion maximale connue par le sol, puisque ce dernier a été initialement complètement saturé, puis consolidé à 100 kPa. Elle est sûrement due à un effet conjugué de la contrainte de consolidation initialement appliquée au matériau, qui représente le paramètre le plus influençant, et à la succion maximale. Ceci montre que la position de la courbe (SI) ne dépend pas seul de l'histoire hydrique du matériau, mais aussi de son histoire mécanique. En première approximation, et sur la base des constatations sur la validité du principe de la contrainte effective de Terzaghi, pour des suctions inférieures à la succion d'entrée d'aire, on peut supposer que sur chemin de drainage sous contraintes extérieures nulles, la valeur de ce seuil est égale à la pression de préconsolidation à l'état saturé, obtenue sur un essai œdométrique ou isotrope.

6

## Simulation des courbes de rétention

Plusieurs chercheurs ont tenté de donner des descriptions mathématiques de la courbe de rétention. On peut citer par exemple celle de Gardner, 1956 ; Brooks et Corey, 1964 ; Mualem, 1976 ; Van Genuchten, 1980 ; McKee et Bumb, 1987 ; Fredlund et Xing, 1994, etc. Leurs formes sont généralement de type puissance, exponentielle ou logarithmique, et le nombre de paramètres à utiliser varie de trois à quatre. Certaines de ces fonctions sont plus adaptées à des types de sols que d'autres. Par exemple, pour les sols grenus, où la limite entre le domaine saturé et non saturé n'apparaît pas franchement (Se proche de zéro), la désaturation se fait subitement ; l'équation de Brooks et Corey, 1964 ou Mualem, 1976, donne de bons résultats, du fait que ces équations n'ont pas une forme sigmoïdale. Cependant, dans le cas contraire (cas des sols fins), où la désaturation se fait d'une manière progressive, il paraît que les équations de Gardner, 1956 ; Van Genuchten, 1980 ; McKee et Bumb, 1984 ; Fredlund et Xing, 1994 ; de part leur forme sigmoïdale, sont plus adaptées à ce type de sols, et peuvent donner des résultats satisfaisants, mais avec différents degrés de précision.

Dans ce contexte, et afin de simuler nos résultats des essais de drainage humidification, DH1 et DH2, les fonctions de Van Genuchten, 1980 (noté VG), ainsi que de Fredlund et Xing, 1994 (noté FX), ont été choisies.

L'équation de Van Genuchten, 1980 est donnée par l'équation 4, et celle de Fredlund et Xing, 1994, par les équations 5 et 6.

$$w = w_r + (w_s - w_r) \left[ \frac{1}{1 + (a_{vg} S)^{n_{vg}}} \right]^{m_{vg}} \quad (4)$$

$$w = C(S) \cdot \frac{w_s}{\left[ \ln \left[ \exp(1) + \left( \frac{S}{a_{fx}} \right)^{n_{fx}} \right] \right]^{m_{fx}}} \quad (5)$$

$$\text{avec } C(S) = \left[ 1 - \frac{\ln(1 + \frac{S}{S_{re}})}{\ln(1 + \frac{10^6}{S_{re}})} \right] \quad (6)$$

$w_s$  est la teneur en eau à saturation,  $w_r$  est la teneur en eau résiduelle,  $S$  est la succion,  $S_{re}$  est la succion résiduelle.

$a_{fx}$ ,  $a_{vg}$ ,  $n_{fx}$ ,  $n_{vg}$ ,  $m_{fx}$  et  $m_{vg}$  : sont des paramètres des deux fonctions.

La figure 6 représente l'effet de variation des paramètres « a », « n » et « m » sur la forme de la courbe de rétention, tout en considérant à chaque cas deux paramètres fixes et le troisième variable. Les trois cadrans de gauche représentent les courbes obtenues par la fonction de VG, et ceux de droite représentent celles obtenues par la fonction de FX.

Nous avons choisi les valeurs  $n$  et  $m = 0,5, 1, 2, 3$  et  $a = a_{fx} = 1/a_{vg} = 1, 10, 100, 1\ 000$  et  $10\ 000$ , comme dans Leong et Rahardjo, 1997, tout en considérant,  $w_s = 60\%$ ,  $w_r = 0\%$ ,  $S_{re} = 500$  MPa. La gamme de succion choisie est la même que celle des courbes de drainage humidification DH1 et DH2.

La première remarque est que les deux fonctions proposées par les auteurs ont une forme sigmoïdale. La deuxième remarque est que la variation des paramètres « a », « m » et « n » affecte de la même façon la forme de la courbe de rétention des deux fonctions. Il apparaît que la valeur de « a » influe directement sur l'ampleur du domaine où le sol reste saturé, de façon à ce que le choix de valeurs croissantes (fonction de FX), ou décroissantes (fonction de VG), aboutit à un domaine saturé plus large.

En ce qui concerne le paramètre « m », il permet de positionner le plateau de la courbe de rétention ; tandis que le paramètre « n » joue sur la pente de ce

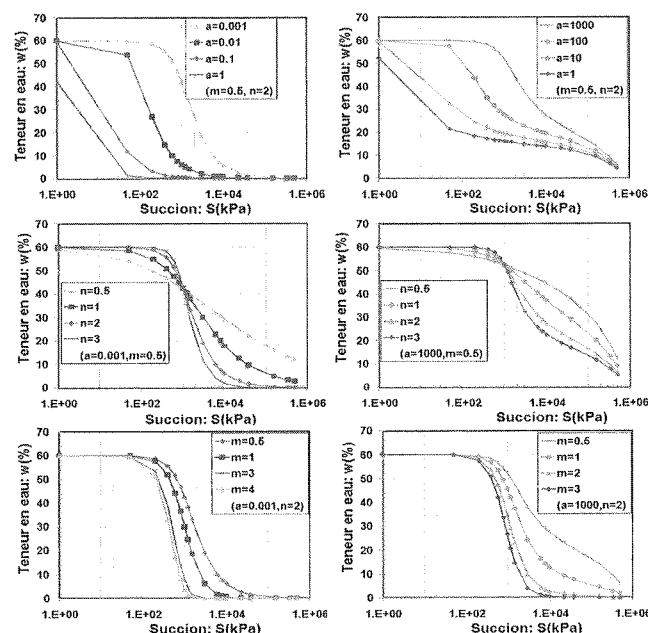


FIG. 6 Influence des paramètres a, n et m sur la forme de la courbe de rétention calculée par la fonction de VG et FX.

Effect of a, n and m parameters on the shape of the retention curve calculated by VG and FX functions.

dernier, tout en pivotant sur un point fixe. L'évolution de la position de ce point en fonction de différentes valeurs de « a » et « m », pour les deux fonctions, est représentée sur la figure 7.

On remarque que pour des valeurs croissantes de « m », ce pivot se déplace sur des chemins descendants linéaires, et sensiblement parallèles, jusqu'à atteindre théoriquement l'ordonnée 0. Pour le paramètre « a », des valeurs croissantes (fonction de FX), ou décroissantes (fonction de VG), déplacent le pivot vers la gauche sur des chemins quasi horizontaux et parallèles. La comparaison de la position des pivots des deux fonctions montre que l'abscisse des pivots en terme de succion est pratiquement la même, par contre l'ordonnée en terme de teneur en eau se trouve à des valeurs supérieures dans le cas de la fonction de FX, par rapport à la fonction de VG.

L'évolution du paramètre C(S) de l'équation 5, qui est un facteur de correction, en fonction de la succion résiduelle  $S_{re}$  est représentée sur la figure 8. Il paraît d'abord que C(S) est une fonction décroissante, qui varie de 1 à 0 quand la succion varie de 0 à  $10^6$  kPa. Des valeurs croissantes de  $S_{re}$  conduisent à des courbes C(S) superposées en ordre aussi croissant ; ce qui amène par conséquent dans l'équation 4 à des valeurs de teneur en eau aussi croissantes.

Les auteurs des deux fonctions proposent des méthodes graphiques pour la détermination des paramètres a, m et n. L'utilisation de la méthode des moindres carrés s'avère plus intéressante et permet d'avoir la meilleure estimation de ces derniers. L'idée est de déterminer les paramètres a, m et n de façon à minimiser l'écart entre les valeurs expérimentales et celles calculées par la fonction, selon l'équation 7 :

$$w(a, m, n) = \sum_{i=1}^k [w_i - w(S_i, a, m, n)]^2 \quad (7)$$

où  $w(a, m, n)$  sont les valeurs de teneur en eau calculées par la fonction ;

k est le nombre de mesures ou points expérimentaux, et  $w_i$  et  $S_i$  sont les valeurs expérimentales de la teneur en eau et de la succion.

Les résultats des simulations des chemins de drainage humidification des matériaux initialement sous forme de pâte à  $1,5w_l$  (essai D-H1), et la pâte consolidée à 100 kPa (D-H2), par la fonction de VG, et FX sont représentés sur les figures 9 et 10. Les tableaux VII et VIII regroupent l'ensemble des paramètres calés (a, m et n) par la méthode des moindres carrés ainsi que les coefficients de régression obtenus. Les paramètres  $w_r$  (teneur en eau résiduelle), et  $w_s$  (teneur en eau de saturation) ainsi que la succion résiduelle  $S_{re}$  ont été déterminés graphiquement des courbes expérimentales (Fig. 4).

D'après les courbes de simulation ainsi que les coefficients de régression obtenus, on peut dire que les deux fonctions sont capables de reproduire qualitativement et quantitativement les courbes expérimentales. Un coefficient de régression compris entre 0,97 et 0,99 est obtenu pour le chemin de drainage, et entre 0,94 et 0,96 pour le chemin d'humidification.

Afin d'estimer la précision de chaque fonction, nous avons tracé la variabilité par rapport à la teneur en eau de saturation exprimée par la relation 8 :

$$\text{var} (\%) = \left[ \frac{(w_{\text{exp}} - w_c)}{w_s} \right] \times 100\% \quad (8)$$

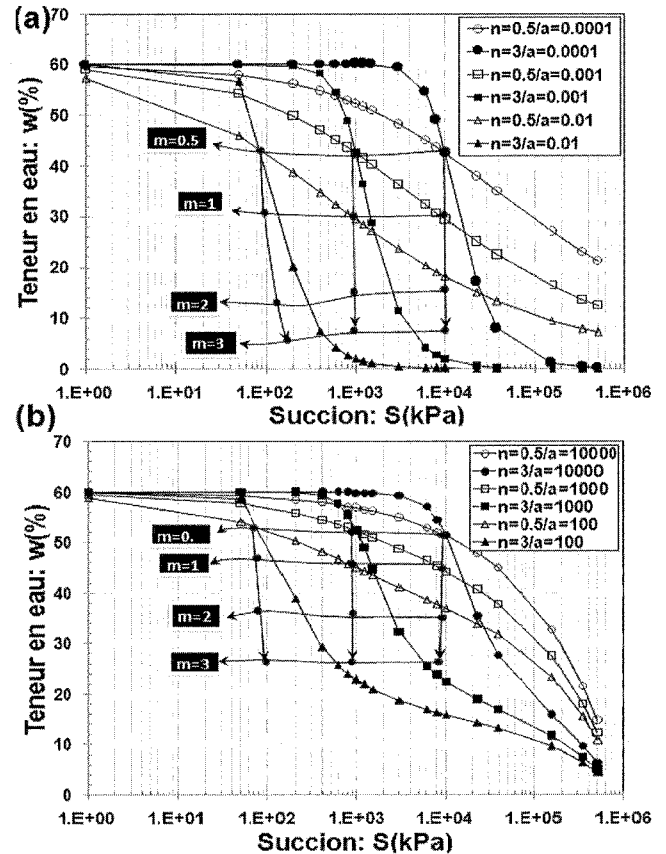


FIG. 7 Variation de la position du pivot en fonction de la valeur de a, n et m, (a) fonction de VG, (b) fonction de FX.

Variation of the pivot position according to a, n and m values, (a) VG function, (b) FX function.

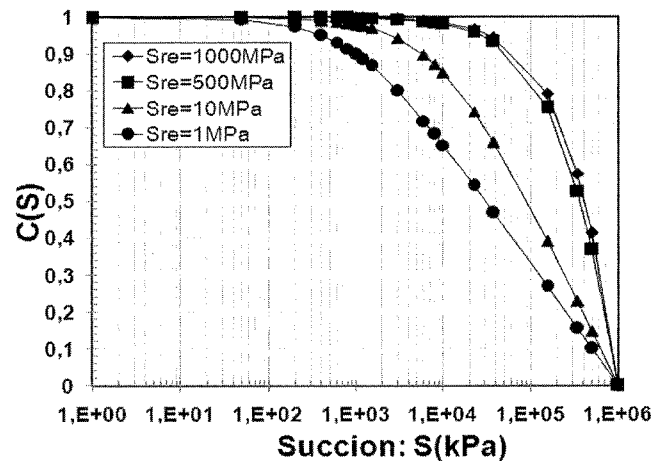


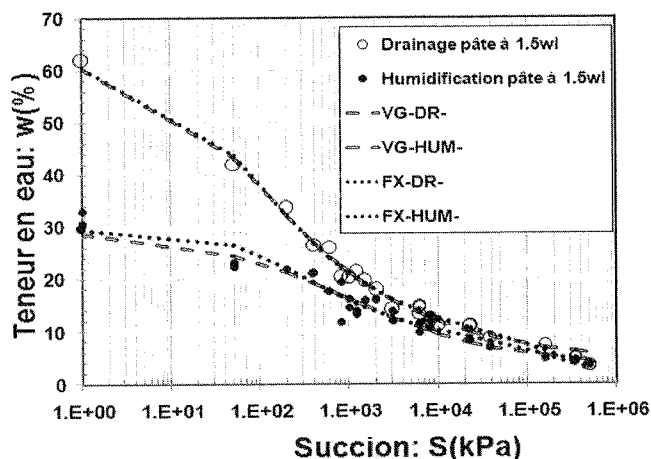
FIG. 8 Influence de la valeur de la succion résiduelle  $S_{re}$  sur la forme du coefficient correcteur C(S) de la fonction de FX.

Influence of residual suction value on the shape of correction factor C(S) for FX function.

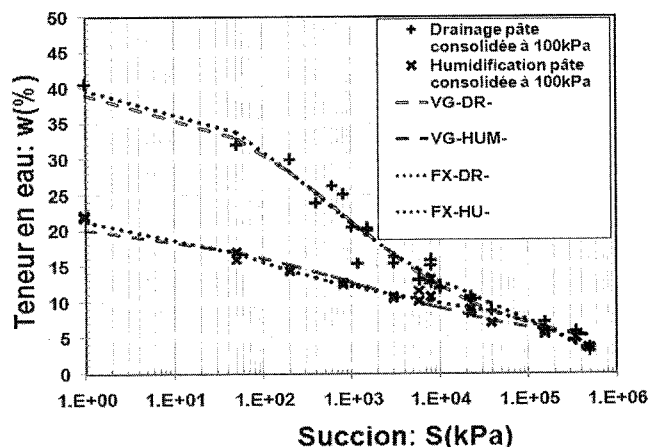
$w_{\text{exp}}$  correspond à la moyenne des valeurs expérimentales de la teneur en eau obtenue pour une succion donnée.

$w_{\text{mod}}$  est la teneur en eau calculée par la fonction considérée.

$w_s$  est la teneur en eau de saturation.



**FIG. 9** Simulation du chemin de drainage (DR) et humidification (HUM) du matériau initialement sous forme de pâte à  $w_i = 1,5 w_L$ , par la fonction de VG et FX. Simulation of drying (DR) and wetting (HUM) paths for saturated slurry at  $w_i = 1,5 w_L$  with VG and FX functions.



**FIG. 10** Simulation de l'essai de drainage (DR) et humidification (HUM) du matériau initialement consolidé, par la fonction de VG et FX. Simulation of drying (DR) and wetting (HUM) paths for consolidated slurry with VG and FX functions.

Les résultats sont représentés sur la figure 11, où chaque figure représente l'évolution de la variabilité calculée, en fonction de la succion sur le chemin de drainage et d'humidification considéré séparément.

Une première constatation, est que, à l'exception de quelques pics observés sur la valeur de la variabilité, cette dernière n'excède pas 3,85 % pour le chemin de drainage et 9,6 % pour le chemin d'humidification du matériau initialement sous forme de pâte, tandis que pour la pâte initialement consolidée, elle ne dépasse

pas 4 % pour le chemin de drainage, à l'exception d'un pic de 12,4 %, et varie entre 8,6 et 10,7 % pour le chemin d'humidification.

Ce taux de variabilité montre que les deux fonctions reproduisent avec plus de précision le chemin de drainage que celui d'humidification. Ceci est peut-être dû à ce que les courbes d'humidification simulées sont pratiquement sous forme de droite, et non pas la forme classique des courbes de rétention qui est généralement pour les argiles de forme sigmoïdale.

**TABEAU VII** Paramètres de la fonction de VG et coefficients de corrélation  $R^2$ . VG function parameters and coefficients of regression  $R^2$  values.

Paramètres	Pâte à $1,5 w_L$		Pâte consolidée	
	Drainage	Humidification	Drainage	Humidification
A (MPa <sup>-1</sup> )	0,03	0,001	0,0012	0,0001
m	0,444	1,046	0,998	1,687
n	0,769	0,499	0,482	0,3042
$w_s$ (%)	62	29,5	40	22
$w_{re}$ (%)	3,6	3,6	3,6	3,6
$S_{re}$ (MPa)	500	500	500	500
$R^2$	0,99	0,94	0,97	0,95

**TABEAU VIII** Paramètres de la fonction de FX et coefficients de corrélation  $R^2$ . FX function parameters and coefficients of regression  $R^2$  values.

Paramètres	Pâte à $1,5 w_L$		Pâte consolidée	
	Drainage	Humidification	Drainage	Humidification
A (MPa)	37,78	113,6	119,1	11,95
m	1,104	0,736	0,631	0,693
n	0,746	0,925	1,035	0,508
$w_s$ (%)	62	29,5	40	22
$w_{re}$ (%)	3,6	3,6	3,6	3,6
$S_{re}$ (MPa)	500	500	500	500
$R^2$	0,99	0,94	0,97	0,96

Une deuxième constatation est que le chemin de l'évolution de la variabilité est monotone dans la plupart du temps. L'écart maximal entre les valeurs obtenues par les deux fonctions est généralement observé dans le domaine des succions inférieures à 600 kPa ce qui peut être expliqué par le manque de points expérimentaux, et dans le domaine de succion très élevé (supérieure à 20 MPa). Dans la majorité des cas, il semble que la fonction de VG est plus performante que la fonction de FX, dans ce domaine, contrairement au cas de faibles succions, où la fonction de FX est plus performante. Toutefois, les deux fonctions restent équivalentes dans le domaine intermédiaire de succion considéré.

D'après les résultats expérimentaux (Fig. 4), nous avons remarqué que tend le sol reste saturé, le chemin de drainage du matériau initialement sous forme de pâte et celui de la pâte consolidée, se rejoignent et forment pratiquement une même courbe, et que les chemins d'humidification, étaient sensiblement parallèles. De cela, il paraît logique que le choix de valeurs identiques des paramètres « m » ou « n » des deux équations, pour la simulation du chemin de drainage ou humidification des essais DH1 et DH2, ou pour ces

deux chemins en même temps, peut donner de bons résultats. Dans ce cas, le seul paramètre qui reste à déterminer est le paramètre « a ». Cette hypothèse est examinée, en prenant deux cas :

- cas 1 : pour chaque fonction, on simule le même chemin (drainage ou humidification) de l'essai DH1 et DH2, par les paramètres m et n obtenus de la régression la plus élevée du chemin considéré ;
- cas 2 : pour chaque fonction, on simule tous les chemins (drainage et humidification) de l'essai DH1 et DH2, avec les paramètres m et n de la régression la plus élevée.

Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau IX. D'après ce tableau, les coefficients de régression obtenus pour le cas 1 et 2 sont proches de ceux obtenus dans les tableaux VII et VIII, sauf dans le cas 1 de la simulation du chemin d'humidification de la pâte avec la fonction de FX, où le coefficient de régression est de l'ordre de 0,89 au lieu de 0,94, et dans le cas 2 de la simulation du chemin d'humidification de la pâte consolidée, où la fonction de VG donne un coefficient de régression de 0,88 au lieu de 0,95, et la fonction de FX donne un coefficient de régression de l'ordre de 0,73 au lieu de 0,96.

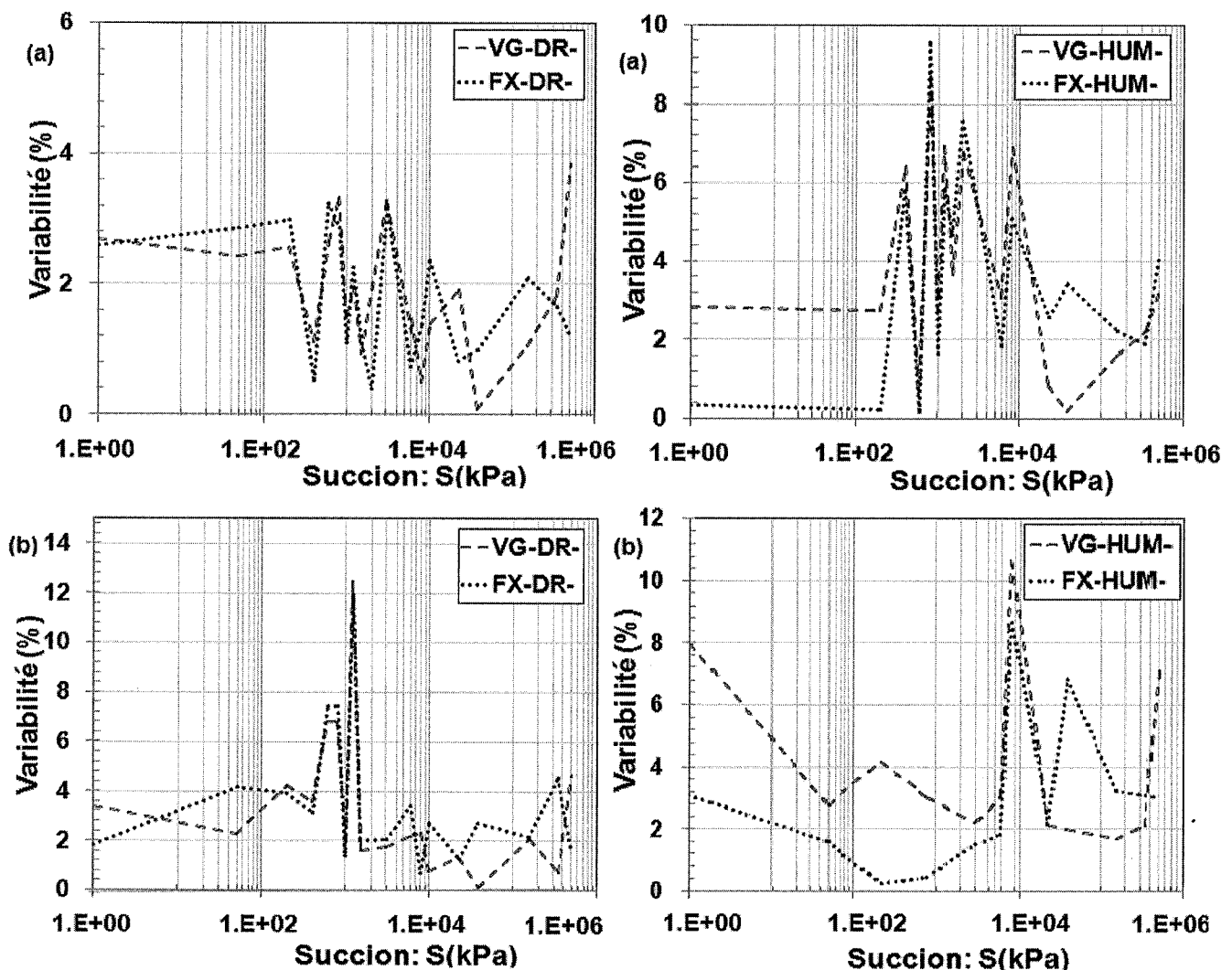


FIG. 11 Évolution de la variabilité de la fonction de VG et FX, sur chemin de drainage (DR) et d'humidification (HUM), (a) essai D-H1, (b) essai D-H2.

Variability evolution of VG and FX functions on drying (DR) and wetting (HUM) paths, (a) D-H1 test, (b) D-H2 test.

**TABEAU IX** Résultats des simulations avec la fonction de VG et de FX des cas 1 et 2.  
Simulation results for cases 1 and 2 with VG and FX functions.

Chemin suivi	Fonction, m et n	a	R <sup>2</sup>	N° cas
Humidification pâte	VG m = 1,687, n = 0,304	0,00016 MPa <sup>-1</sup>	0,91	1
	FX m = 0,693, n = 0,508	12,27 MPa	0,89	
Drainage, pâte consolidée	VG m = 0,444, n = 0,769	0,00714 MPa <sup>-1</sup>	0,96	1 et 2
	FX m = 1,104, n = 0,746	205 MPa	0,95	
Humidification, pâte	VG m = 0,444, n = 0,769	0,0068 MPa <sup>-1</sup>	0,94	2
	FX m = 1,104, n = 0,746	244,6 MPa	0,92	
Humidification pâte consolidé	VG m = 0,444, n = 0,769	0,0059 MPa <sup>-1</sup>	0,88	
	FX m = 1,104, n = 0,746	498,4 MPa	0,73	

8

## Conclusion

A travers cet article nous avons présenté les résultats des chemins de drainage humidification obtenus sur l'argile du noyau du barrage de Boughrara, préparée initialement sous forme de pâte à  $w_i = 1,5 w_L$  et consolidée à 100 kPa, ainsi que les résultats de simulation des courbes de rétention par deux fonctions très connues à savoir la fonction de Van Genuchten, 1980, et de Fredlund et Xing, 1994. Les conclusions suivantes peuvent être émises :

Du point de vue expérimental, les essais montrent l'intérêt d'une représentation globale de l'état du matériau au cours d'un cycle de drainage-humidification. Cette représentation permet notamment de suivre l'évolution de la saturation du sol, de relier les caractéristiques de retrait aux caractéristiques de drainage et d'humidification.

Les chemins de drainage humidification montrent l'existence d'un domaine de succion de l'ordre de 2 500 kPa sur chemin de drainage et 320 kPa sur chemin d'humidification où le sol reste saturé. Dans ce domaine, la notion de contrainte effective de Terzaghi reste valable.

En revanche, lorsque le sol se désature nettement, il n'y a plus équivalence entre la succion et la contrainte isotrope (ou verticale), puisque les contraintes exercées sur les grains par les ménisques d'eau isolés se traduisent par des forces normales aux plans de contact qui ne peuvent entraîner de glissement des particules les unes par rapport aux autres.

Les corrélations des droites de compression isotrope avec la limite de liquidité s'appliquent d'une manière satisfaisante aux chemins de drainage des

échantillons, ainsi les corrélations des indices de compression et décompression œdométrique s'appliquent pour les indices de drainage et d'humidification.

Concernant la simulation, les résultats ont montré aussi la performance des deux fonctions à reproduire les chemins de drainage avec un coefficient de régression compris entre 0,97 et 0,99, et du chemin d'humidification avec un coefficient de régression compris entre 0,94 et 0,96.

Le tracé de l'évolution de la variabilité a permis d'apprécier la précision de chaque fonction sur chacun des chemins. Il semble que la fonction de Van Genuchten est plus performante dans le domaine des fortes succions (supérieure à 20 MPa). Au contraire la fonction de Fredlund et Xing semble plus performante dans le domaine des faibles succions (inférieures à 600 kPa), cependant dans le domaine de succion intermédiaire les deux fonctions sont équivalentes.

L'utilisation de paramètres m et n identiques pour la simulation des chemins de drainage ou d'humidification (cas 1) ou les deux chemins (cas 2), des deux essais du matériau initialement sous forme de pâte et consolidé, donne des résultats satisfaisants. Les coefficients de régression obtenus dans le cas 1 restent compris entre 0,89 et 96, et dans le cas 2 entre 0,73 et 0,96.

On note aussi que les coefficients de régression obtenus sur chemin de drainage sont toujours supérieurs à ceux obtenus sur chemin d'humidification, du fait que ces derniers se présentent pratiquement sous forme de droite et pas sous forme sigmoïdale.

A travers tous les simulations faites, il paraît que la valeur de  $a = a_{fx} = 1/a_{vg}$  ne correspond pas à la succion d'entrée d'air ou de résaturation, telle que suggéré par Fredlund et Xing, 1994, et que les paramètres m et n ne peuvent pas être considérés comme des paramètres physiques du sol.

## Bibliographie

- Alonso E., Gens A., Josa A., – A constitutive model for partially saturated soil. *Géotechnique*, n° 40 (3), 1990, p. 405-430.
- Alonso E., Gens A., Hight D.W. – Special problem soils. General report. *Proc. 9th European conf. Soil Mech. Fdn Engng*, Dublin, 3, 1987, p. 1087-1146.
- Assouline S. – A model for soil relative hydraulic conductivity based on the water retention characteristic curve. *Water Resources Research*, n° 37, 2001, p. 265-271.
- Biares J., Favre J.-L. – *Table de corrélations des paramètres en mécanique des sols*. École centrale de Paris, 1975.
- Biares J., Fleureau J.-M., Zerhouni M.I., Soepandji B.D. – Variations de volume des sols argileux lors de cycles de drainage-humidification. *Revue française de géotechnique*, n° 41, 1988, p. 63-71.
- Brooks R.H., Corey A.T. – Hydraulic properties of porous medium. *Hydrology paper*, n° 03, Civil engineering department, Colorado State University (Fort Collins), 1964.
- Fredlund D.G., Rahardjo H. – *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons, New York, 1993, 560 p.
- Fredlund D.G., Xing A. – Equation for the soil-water characteristic curve. *Canadian geotechnical journal*, n° 31, 1994, p. 521-532.
- Cui Y.J. – *Étude du comportement d'un limon compacté non saturé et de sa modélisation dans un cadre élastoplastique*. Thèse de doctorat, École nationale des ponts et chaussées, France, 1993.
- Delage P., Howat M.D., Cui Y.J. – The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay. *Engineering Geology*, n° 50, 1998, p. 31-48.
- Fleureau J.-M., Kheirbek-Saoud S., Soemetro R., Taïbi S. – Behavior of clayey soils on drying wetting paths. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 30, n° 2, 1993, p. 287-296.
- Fleureau J.-M. – *Contribution à l'étude et la modélisation du comportement des matériaux granulaires polyphasiques*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, université Pierre et Marie Curie, Paris 6, France, 1992.
- Fredlund D.G., Xing A., Huang S.Y. – Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 31, n° 4, 1994, p. 533-546.
- Gardner W.R. – Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil science*, n° 85, 1956, p. 228-232.
- Lachgueur K., Saïd T., Abou-Bekr N. – Comportement hydrique d'une argile non saturée. Application au noyau de barrage de Boughrara. *Revue européenne de génie civil*, vol. 14/3, 2010, p. 329-360.
- Leong E.C., Rahardjo H. – Review of soil water characteristic curve equations. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, n° 123, 1997, p. 1106-1117.
- McKee C.R., Bumb A.C. – The importance of unsaturated flow parameters in designing a monitoring system for hazardous wastes and environmental emergencies. *Proc Haz Mat. Control Res. Inst. Nat. Conf.*, 1984, p. 50-58.
- Massarsch K.R. – Lateral Earth Pressure in Normally Consolidated Clay. *7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brighton, Proceedings*, vol. 2, 1979, p. 245-249.
- Mualem Y. – A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, n° 12, 1976, p. 513-522.
- Prapharan S., Altschaeffl A.G., Dempsey B.J. – Moisture curve of compacted clay : Mercury intrusion method. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 111, n° 09, 1985, p. 1139-1143.
- Taïbi S. – *Comportement mécanique et hydraulique des sols soumis à une pression interstitielle négative, étude expérimentale et modélisation*. Thèse de doctorat, 1994, École centrale de Paris, France.
- Tessier D. – *Recherches expérimentales sur l'organisation des particules dans les argiles*. Thèse d'ingénieur CNAM, présentée au conservatoire national des arts et métiers, juin 1975, France.
- Vanapalli S.K., Fredlund D.G., Pufahl D.E., Clifton A.W. – Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian geotechnical journal*, n° 33, 1996, p. 379-392.
- Van Genuchten M.T. – A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, n° 44, 1980, p. 892-898.
- Williams J., Shaykewich C.F. – An evaluation of polyethylene glycol PEG 6000 and PEG 20000 in the osmotic control of soil water matrix potential. *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 102, n° 6, 1969, p. 394-398.
- Zerhouni M.I. – *Rôle de la pression interstitielle négative dans le comportement des sols – Application aux routes*. Thèse de doctorat, École centrale de Paris, France, 1991.