



Matériaux de construction alternatifs

EFFET DES VARIATIONS DE TENEUR EN EAU SUR LE RETRAIT ET LE GONFLEMENT DES SOLS

EFFECT OF VARIATIONS OF THE WATER CONTENT ON THE SHRINKAGE AND SWELLING OF SOILS

Ali OUGUEMAT¹, Ali BOUHERAOUA¹, Jean-Pierre MAGNAN²

¹ Université de Tizi ouzou- Algérie

² Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France

1. INTRODUCTION

Pour les ingénieurs du génie civil et particulièrement pour les géotechniciens, les interactions entre l'atmosphère et la terre ont, toujours, été importantes. Certaines peuvent être rapides et catastrophiques, amenant la ruine des structures comme les barrages et les ponts, causant des accidents mortels et des désastres écologiques de grande envergure. D'autres, par contre, peuvent être lentes et insidieuses mais à long terme toutes, aussi, destructives et coûteuses comme les effets que les argiles, qui gonflent et qui se rétractent, peuvent avoir sur les bâtiments et autres structures aux fondations peu profondes.

Le comportement des sols qui constituent la zone non saturée entre la surface du sol et la nappe phréatique dépend, dans une large mesure, du transfert de l'eau et de l'énergie entre l'atmosphère et le sol, à travers sa surface. De nombreux aspects de ce comportement des sols dans cette zone sont étroitement liés à l'équilibre aqueux entre l'atmosphère et la terre. Cet équilibre détermine la profondeur de la nappe phréatique et le profil de la teneur en eau moyenne, saisonnière et annuelle. Ainsi, les modifications

de l'équilibre d'un sol ne sont pas sans conséquences sur les structures qu'il supporte ; cela peut entraîner de nombreux sinistres sur des constructions aussi bien récentes que très anciennes. L'étude des propriétés de retrait/gonflement des sols s'est développée, alors, avec le souci principal de résoudre les problèmes posés par les sols argileux, notamment, aux structures à fondations peu profondes.

De nombreux auteurs ont proposé des formules empiriques permettant de déterminer le potentiel de retrait/gonflement. Néanmoins, le problème de l'identification des sols argileux vis-à-vis du phénomène de retrait/gonflement reste toujours posé car, la prévision de leur déformation ne peut être abordée avec ces formules et outils usuels (propriétés géotechniques, valeur du bleu de méthylène, limites d'Atterberg, etc.).

En effet, l'évaluation des risques géotechniques, agronomiques et environnementaux liés au retrait/gonflement des sols a, donc, nécessité la mise au point de méthodes de mesures permettant de quantifier cette propriété (retrait/gonflement). Les résultats de la méthode de teneur en eau appliquée aux sols naturels sont présentés dans cet article.



2. LES PHÉNOMÈNES DE RETRAIT ET DE GONFLEMENT

En dépit de nombreuses expériences malheureuses liées au gonflement des sols, l'étude quantitative du phénomène n'a débuté réellement qu'au début des années 1970 où les travaux de laboratoire se sont développés de manière plus rigoureuse. Cependant, suite aux problèmes constatés dans les périodes de sécheresse (par exemple en France en 1976), on a été amené à revoir certaines idées et à se préoccuper sérieusement du phénomène de retrait. On a alors observé, à juste titre, que les argiles ne gonflaient pas seulement, mais pouvaient aussi s'assécher sur plusieurs mètres de profondeur. En climat tempéré, les argiles sont en effet souvent proches de leur état de saturation de sorte que leur potentiel de gonflement est relativement limité. En revanche, elles sont souvent éloignées de leur limite de retrait, ce qui explique que les mouvements les plus importants soient souvent observés en période de sécheresse. Il faut noter, d'autre part, que la pression de gonflement n'est pas une caractéristique intrinsèque d'une argile car elle varie avec la teneur en eau. À saturation une argile ne gonfle pas mais elle a un fort potentiel de gonflement quand elle est presque sèche.

3. CARACTÉRISATION INDIRECTE DU RETRAIT/GONFLEMENT À PARTIR DE PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUES

L'identification des sols argileux peut s'effectuer à l'échelle microscopique. Plusieurs méthodes (diffractométrie par rayon X, thermométrie différentielle, microscope à balayage électronique) sont couramment employées, mais toutes sont très lourdes et très coûteuses et, tout compte fait, d'un faible intérêt, puisqu'il ne s'agit que d'une identification minéralogique qui ne dit rien sur le potentiel de retrait/gonflement, la pression de gonflement, la limite de retrait, la teneur en eau, la succion, etc.

Caractériser le phénomène de retrait/gonflement des sols à partir des propriétés géotechniques et des limites d'Atterberg est une approche plus séduisante, car ces mesures sont à la fois simples, fiables et peut-être plus représentatives, si l'on cherche à identifier avec certitude un problème sans vouloir le quantifier finement. De nombreuses formules empiriques, essais et corrélations ont été proposés par divers auteurs (Altmeyer, 1955 ; Holtz, 1959 ; Brackley, 1975 ; etc.) utilisant les limites d'Atterberg, la succion ou d'autres paramètres. L'expérience prouve que l'utilisation de ces méthodes pour l'identification du gonflement des sols argileux conduit souvent à des résultats différents, voire contradictoires, pour un même sol. Ces méthodes peuvent être utiles pour définir des ordres de grandeur préalables à une étude exhaustive sur un site donné, mais il faut garder à l'esprit que, dans la plupart des cas, elles ne sont appropriées qu'aux sols pour lesquels elles ont été établies. Il est donc toujours nécessaire de vérifier leur bien-fondé et de recaler leurs constantes sur le site étudié. Mais, surtout, le recours aux mesures directes dans des essais de laboratoire est inéluctable.

4. MÉTHODES DE PRÉVISION DU RETRAIT ET DU GONFLEMENT DES SOLS

4.1. Généralités

Toute méthode de prévision du retrait et du gonflement d'un massif de sol associé aux variations de sa teneur en eau doit tenir compte des éléments suivants :

- 1) la profondeur Z_{max} des fluctuations du paramètre principal (teneur en eau ou succion),
- 2) la variation de la teneur en eau Δw ou de la succion Δu en fonction de la profondeur et du temps jusqu'à Z_{max} ,
- 3) la loi reliant la succion ou la teneur en eau au changement de volume du sol.

Parmi ces méthodes, J.L. Briaud et al. (2003) citent :

- la méthode dite PVR ou Potential Vertical Rise (McDowell, 1956) ;
- la méthode Clod test (Miller et al., 1995) ;
- les méthodes de succion (McKeen, 1992 ; Lytton, 1994 ; PTI, 1996).

La méthode PVR ne prévoit pas Z_{max} , le Clod test ne prévoit ni Z_{max} , ni la variation de la teneur en eau ou de la succion en fonction de la profondeur. En revanche, les méthodes de succion permettent d'évaluer la profondeur Z_{max} à partir de mesures de profils de succion et de données climatiques ainsi que d'autres observations faites sur le site. Ces méthodes prévoient, typiquement, la variation de la succion en fonction de la profondeur.

La loi liant la variation relative de l'épaisseur d'une couche de sol $\Delta H/H$ au changement de la succion dans cette couche (McKeen, 1992) est la suivante :

$$\frac{\Delta H}{H} = \gamma_h \cdot f \cdot s \cdot \lg\left(\frac{u_f}{u_i}\right) \quad (1)$$

Avec, γ_h indice de compression en fonction de la succion, f - facteur latéral de contrainte, s - coefficient de l'effet de charge, u_i - valeur initiale de la succion et u_f - valeur finale de la succion.

L'indice γ_h de compression en fonction de la succion est déterminé à partir d'une corrélation avec les limites d'Atterberg et le pourcentage d'argile (PTI, 1996) ; Volflo, 1996) ou à partir des essais au laboratoire tel que le Clod test (Perko et al., 2000).

L'avantage des méthodes de calcul en fonction de la succion est que la succion est un paramètre fondamental dans l'équation différentielle régissant le mouvement du sol et que beaucoup de recherches récentes ont été effectuées sur ces méthodes. Sauf que la succion n'est pas un paramètre facile à obtenir contrairement à la teneur en eau.

Les données sur la succion disponibles dans les bureaux d'études géotechniques sont pour cette raison très limitées et l'équation (1) n'est appliquée que pour les valeurs limites de succion.

4.2. Méthode de la teneur en eau

Cette méthode (J.L. Briaud et al., 2003) a pour objectif d'estimer le mouvement du sol qui gonfle et se contracte en fonction des variations de la teneur en eau.

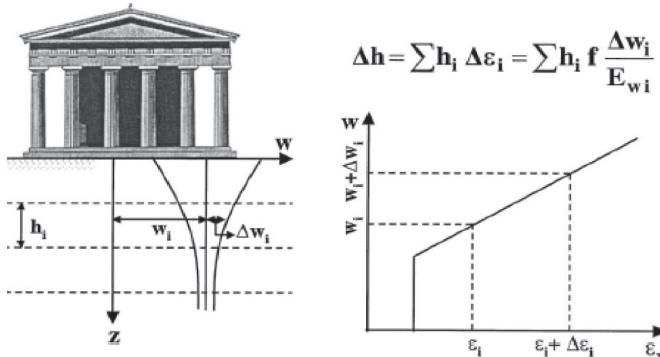


Figure 1. Méthode de teneur en eau - essai de retrait
(J.L. Briaud et al., 2003).

La teneur en eau gouverne la déformation du sol et il est suggéré d'utiliser l'essai de retrait pour établir la relation entre la variation de la teneur en eau et la variation de volume induite. Il faut d'autre part déterminer la variation de la teneur en eau en fonction de la profondeur et la profondeur maximale de ces variations.

Cette méthode nécessite donc d'établir :

- la loi reliant la teneur en eau à la déformation du sol,
- un modèle de prévision des variations de la teneur en eau qui tient compte de la profondeur Z_{\max} des fluctuations de cette teneur en eau w et de la variation de la teneur en eau Δw en fonction de la profondeur et du temps dans Z_{\max} .

La méthode de la teneur en eau avec essai de retrait (figure 1) s'applique par étapes :

- 1) détermination de la profondeur Z_{\max} des fluctuations de la teneur en eau et subdivision de cette profondeur en un nombre approprié de n couches ; h_i est l'épaisseur de la couche i ;
- 2) prélever des échantillons du site jusqu'à la profondeur Z_{\max} ;
- 3) effectuer des essais de retrait sur ces échantillons et, pour chaque échantillon, déterminer le module de retrait/gonflement E_w (pente de la courbe de variation de la teneur en eau en fonction de la déformation volumique du sol) et le rapport de retrait f (rapport de la déformation verticale à la déformation volumique) ;
- 4) déterminer la variation de la teneur en eau Δw en fonction de la profondeur jusqu'à Z_{\max} ;
- 5) calculer le retrait ou le gonflement Δh_i de chaque couche i en employant la formule suivante :

$$\Delta h_i = h_i f_i \frac{\Delta w_i}{E_{w_i}} \quad (2)$$

- 6) calculer le retrait ou le gonflement à la surface du sol : $\Delta h = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta h_i$

4.3. Base théorique de la méthode

Dans la méthode de calcul fondée sur la succion, l'équation différentielle qui gouverne la variation de l'humidité dans le sol est définie par l'équation (ici unidimensionnelle) de Richards (J.L. Briaud et al., 2003) :

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[K(u) \frac{\partial u}{\partial z} \right] = \rho_d C(u) \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4)$$

où $K(u)$ est le coefficient de conductivité hydraulique du sol non saturé, qui est une fonction de la matrice de succion u , $C(u)$ est la capacité spécifique de l'eau ou pente de la courbe caractéristique $\frac{dw}{du}$ et ρ_d est la densité sèche du sol.

La succion et la teneur en eau sont liées par une relation de la forme : $u = g(w)$ (5)

Par substitution de l'équation (5) dans l'équation (4), on obtient l'équation différentielle de la variation de l'humidité en termes de teneur en eau :

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[K(w) g'(w) \frac{du}{\partial z} \right] + 1 = \rho_d \frac{dw}{dt} \quad (6)$$

$$\text{Avec } g'(w) = \frac{dw}{du}$$

Les équations (4) et (6) peuvent être considérées comme deux formes de l'équation de Richards. De la même manière, les conditions aux limites peuvent être exprimées en termes de teneur en eau.

La loi de déformation fondée sur la succion est généralement tirée de la variation de l'indice des vides en fonction de la succion : $e = h(u)$ (7)

En utilisant l'équation (5), on obtient :

$$e = h(u) = h[g(w)] = f(w) \quad (8)$$

Le module de retrait/gonflement E_w est déduit de la courbe définie par l'équation (8). En fait, la variation de l'indice des vides en fonction de la teneur en eau peut être déduite directement de l'essai de retrait.

La méthode fondée sur la succion et la méthode fondée sur la teneur en eau ont donc la même base théorique et peuvent être considérées comme interchangeables.

4.4. Variation de la teneur en eau en fonction du temps et de la profondeur

Il n'existe pas de méthode reconnue de prévision des variations réelles de la teneur en eau en fonction de la profondeur. Il n'existe pas assez de données sur la succion. Il est plus facile d'établir des bases de données de la teneur en eau, pour une formation géologique particulière et un site particulier, en fonction de la profondeur et des conditions climatiques. Les mesures effectuées doivent être enregistrées en notant la date de prélèvement, la profondeur de prélèvement, la teneur en eau et des informations additionnelles, parfois nécessaires, telles que les limites d'Atterberg et le poids volumique. Cela permet de représenter la variation de la teneur en eau en fonction du temps à une profondeur donnée pour chaque endroit (sol) étudié.



5. APPLICATION À QUELQUES SOLS NATURELS ALGÉRIENS

La méthode de teneur en eau a été appliquée à trois différents sols en effectuant l'essai de retrait sur des échantillons naturels et intacts. Les propriétés de ces sols sont présentées dans le tableau 1. Les échantillons ont été prélevés par le LCTP (Laboratoire Central des Travaux Publics) de Tizi Ouzou (Algérie), dans le cadre de ses activités, pour les besoins d'étude de sol de fondations d'ouvrages. Ils proviennent des sites de M'douha, Tizi-Rached et INTHT.

Une série d'essais a été effectuée pour examiner l'effet de la forme de l'échantillon et l'effet de la pression verticale sur le retrait. Les paramètres à déterminer sont la limite de retrait w_s , le module de retrait/gonflement E_w et le rapport de retrait f .

5.1. Essai de retrait

L'essai de retrait est réalisé conformément à la norme française NF P 94-060-2 (mesure de la variation volumique d'une éprouvette cylindrique au fur et à mesure de son séchage progressif).

La figure 1-a représente les paramètres de l'échantillon : à l'état initiale et après retrait.

- w_0 est la teneur en eau initiale de l'échantillon, w est sa teneur en eau après retrait ;
- H_0 est la hauteur initiale de l'échantillon, H est sa hauteur après retrait ;
- D_0 est le diamètre initial de l'échantillon, D est sa hauteur après retrait.

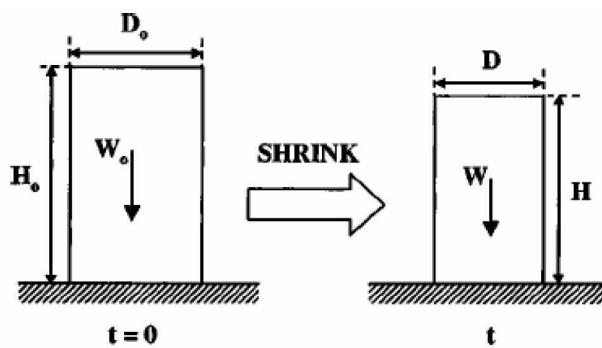


Figure 1a : Paramètres de l'essai de retrait
(J.L. Briaud et al., 2003).

L'objectif de cet essai est d'obtenir une loi de comportement du sol qui relie la teneur en eau aux déformations. On rappelle que :

$$E_w = \frac{\Delta W}{\Delta V} \quad (9)$$

$$V_0 = \frac{\Delta H}{\Delta V}$$

$$f = \frac{\frac{\Delta H}{\Delta V}}{V_0} \quad (10)$$

$\Delta w = (w - w_0)$, où w_0 est la teneur en eau initiale correspondant à l'origine des changements de volume et w est la teneur en eau correspondant à la déformation volumique mesurée.

5.2. Influence de la forme de l'échantillon

Nous avons examiné, d'abord, l'effet de la forme de l'éprouvette. Des échantillons de dimensions différentes du sol prélevé des sites de Tizi Rached (Echantillons : E_1 , E_{II} , E_{III} , E_3 , E^1) et de l'INTHT (Echantillons : E_2 , E_1 , E_{II} , E_{III} , E_1 , E_2 , E_3) ont été testés. Deux types de courbes ont été tracés :

1. des courbes montrant l'évolution de la teneur en eau w en fonction de la variation de volume ΔV , qui permettent de déterminer le module de retrait / gonflement E_w ;
2. des courbes présentant l'évolution de la hauteur H en fonction de la variation de volume ΔV , qui permettent de déterminer le rapport de retrait f .

Les résultats de l'essai sur l'argile de Tizi-Rached et une argile de l'INTHT sont présentés sur les figures 2 et 3.

Le tableau 2 rassemble tous les résultats des essais effectués. Il montre que les valeurs de f varient entre 0.29 et 0.40 pour les deux argiles, avec une moyenne est de 0.32 pour l'argile de Tizi Rached et de 0.34 pour l'argile de l'INTHT.

Le coefficient de variation du module de retrait/gonflement E_w est de 0.0121 pour l'argile de Tizi- Rached et 0.0319 pour l'argile de L'INTH. Le coefficient de variation du rapport de retrait f est de 0.0494 pour l'argile de Tizi Rached et de 0.1472 pour l'argile de l'INTHT.

Par conséquent, aucune tendance claire de variation ne peut être trouvée pour les deux paramètres (E_w et f), ce qui prouve que la forme de l'échantillon n'affecte pas les résultats.

Par ailleurs, la valeur du rapport de retrait f , définie dans l'équation (10), peut être obtenue directement par l'essai de retrait, puisque des mesures de hauteur et de volume sont enregistrées.

Le tableau 2 rassemble les résultats des essais effectués. Il montre que les valeurs de f varient entre 0,29 et 0,40 pour

Site	w_0 (%)	g_s (t/m^3)	S_r	n	w_l (%)	w_p (%)	I_p (%)
Argile - M'douha	20.50	2.75	0.91	0.38	53.50	27.73	25.87
Argile - INTHT	25.00	2.75	0.93	0.42	71.00	27.60	43.40
Argile-Tizi - Rached	26.42	2.75	0.96	0.43	64.50	30.00	34.50

Tableau 1. Propriétés des sols naturels étudiés.

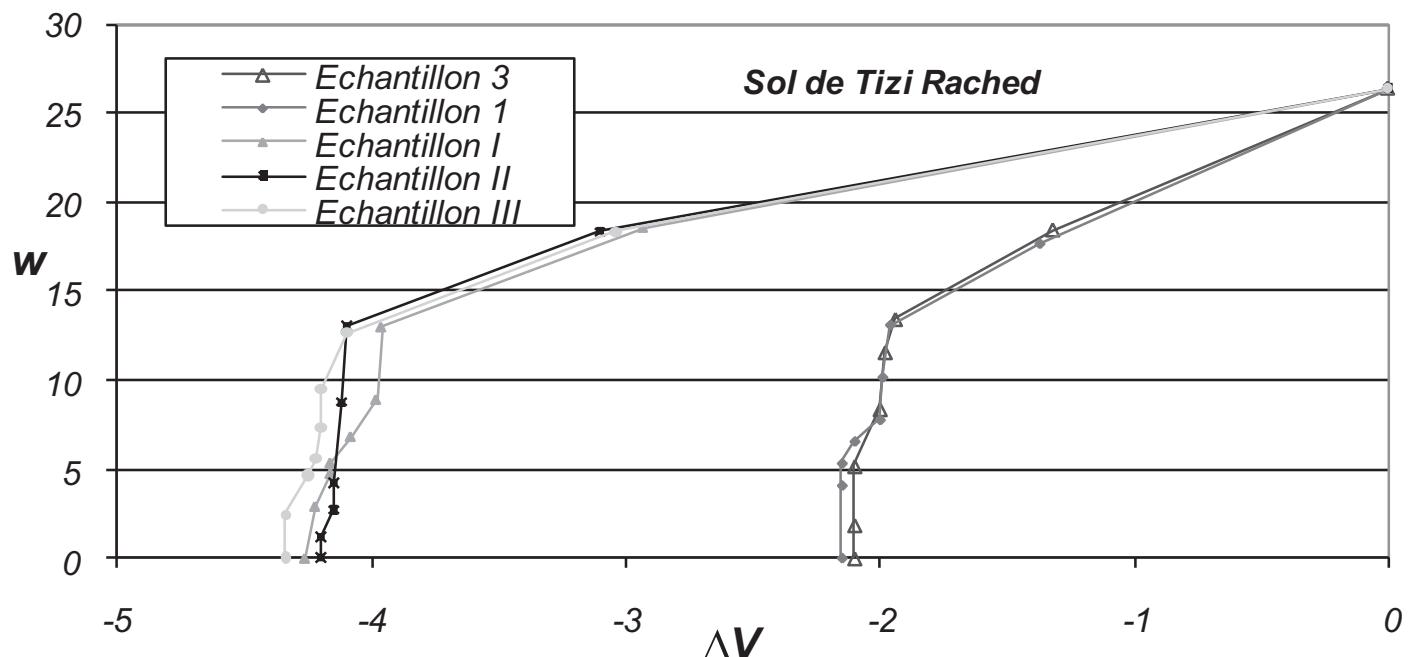


Figure 2. Variation de la teneur en eau en fonction de la variation de volume.
Comparaison de l'ensemble des résultats obtenus.

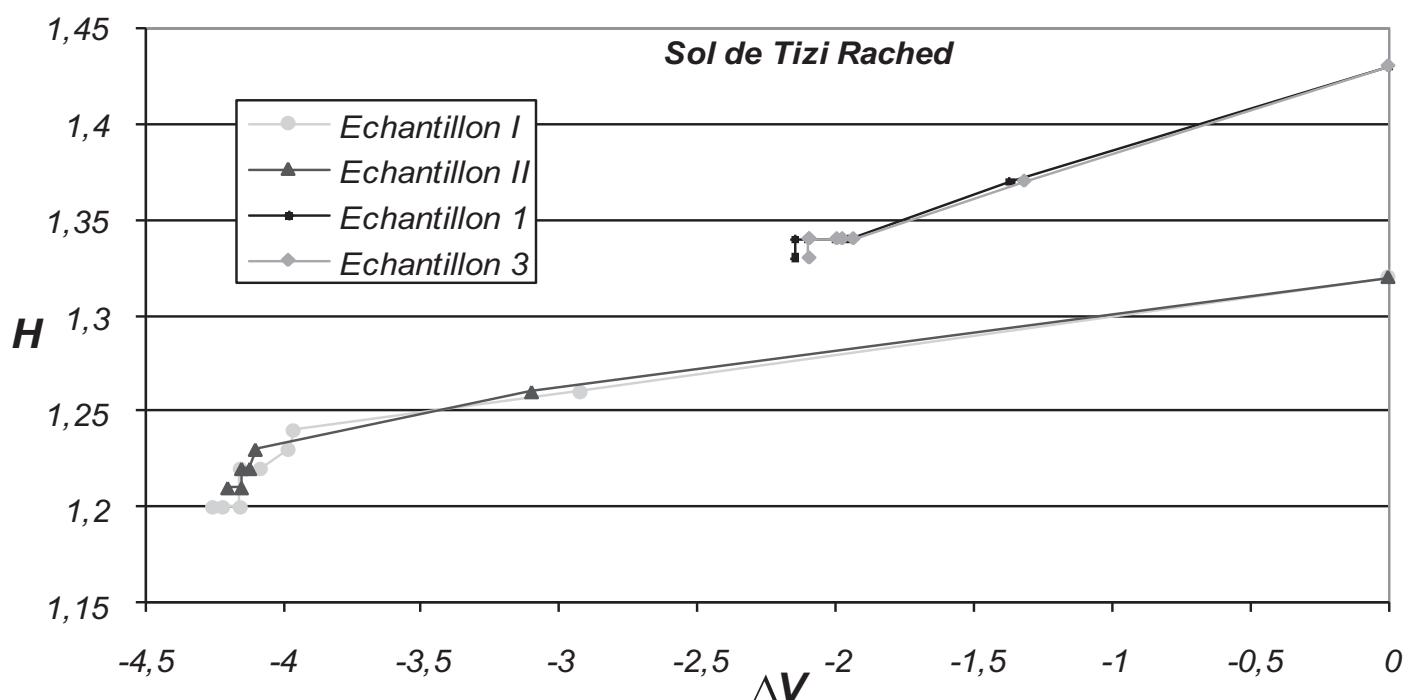


Figure 3. Influence de la forme de l'échantillon : variation de la hauteur H en fonction de la variation de volume V.
Comparaison des résultats obtenus.

les deux argiles, avec une moyenne est de 0,32 pour l'argile de Tizi Rached et de 0,34 pour l'argile de l'INTHT. Si le retrait est le même dans toutes les directions, c'est-à-dire que $\Delta V/V_0 = 2 (\Delta D/D_0) + (\Delta H/H_0) = 3 (\Delta H/H_0)$, la valeur du rapport de retrait f correspond à 0,33. On peut prendre, par défaut, une valeur de f égale à 0,33, voisine des valeurs trouvées sur les deux argiles testées.

La première partie de la courbe de la figure 1 est bien approchée par une ligne droite jusqu'à ce que la limite de retrait w_s soit atteinte et alors la courbe dévie de cette ligne droite. La teneur en eau où la déviation a lieu est la limite

de retrait w_s . Cette limite est différente de la limite de retrait d'Atterberg, déterminée à base d'échantillons remaniés. La pente de cette ligne droite représente le module de retrait/gonflement E_w utilisé dans l'équation 9. Il faut noter que E_w dépend de la teneur en eau initiale w_0 de l'échantillon, parce que le volume initial est impliqué dans la définition de E_w . Par conséquent, la valeur de E_w utilisée pour la prévision des déformations devrait être celle qui correspond à l'état initial du sol au moment de la construction de la fondation sur site.

	Echantillon (E)	V_0 (cm ³)	D_0 (cm)	H_0 (cm)	w_0 (%)	w_s (%)	f	E_w
Argile - Tizi Rached	E_I	20.60	4.44	1.32	26.42	13.01	0.31	0.69
	E_{II}	20.60	4.44	1.32	26.42	13.06	0.34	0.67
	E_{III}	20.34	4.42	1.30	26.42	12.68	0.30	0.68
	E_3	10.16	3.00	1.43	26.42	13.43	0.33	0.68
	E_1	10.16	3.00	1.43	26.42	13.11	0.32	0.69
Argile - INTHT	E_2	10.16	3.00	1.43	26.42	13.43	0.33	0.68
	E_I	20.60	4.44	1.32	25	11.34	0.40	0.59
	E_{II}	20.34	4.42	1.30	25	10.76	0.38	0.61
	E_{III}	20.34	4.42	1.30	25	12.19	0.39	0.56
	E_1	9.70	3.00	1.49	25	12.15	0.29	0.57
	E_2	10.16	3.00	1.43	25	10.88	0.29	0.60
	E_3	9.69	3.00	1.35	25	11.88	0.32	0.58

Tableau 2. Résultats des essais sur les Argiles de Tizi Rached et de L'INTHT.
Influence de la forme de l'échantillon.

5.3. Influence de la pression verticale

En réalité, sur site, le sol se rétracte et gonfle sous sollicitations extérieures (au moins sous la pression des terrains qui le recouvrent). Pour étudier l'effet de cette charge sur le retrait, une série d'essais a été effectuée. On a testé, à chaque fois, des échantillons identiquement préparés, prélevés du site de M'douha. Quatre essais (Echantillons E_I , E_{II} , E_{III} , E_{IV}) ont été effectués avec une charge verticale et trois autres (Echantillons : E_V , E_{VI} , E_{VII}) sans charge verticale.

La charge est égale à 25% de la résistance à la compression R_c du sol qui est égale à 269 kPa.

Les courbes présentées sur les figures 4 à 12 montrent l'évolution de la teneur en eau w en fonction de la variation de volume ΔV , de la hauteur H en fonction de la variation de ΔV , de la teneur en eau w en fonction de la hauteur H et de la teneur en eau w en fonction du diamètre D .

Les courbes présentées sur les figures 4 à 6 montrent que les pentes E_w sont sensiblement identiques. Il en est de même pour les pentes f des courbes des figures 9 et 10. Cela démontre que la pression verticale n'affecte pas E_w et f .

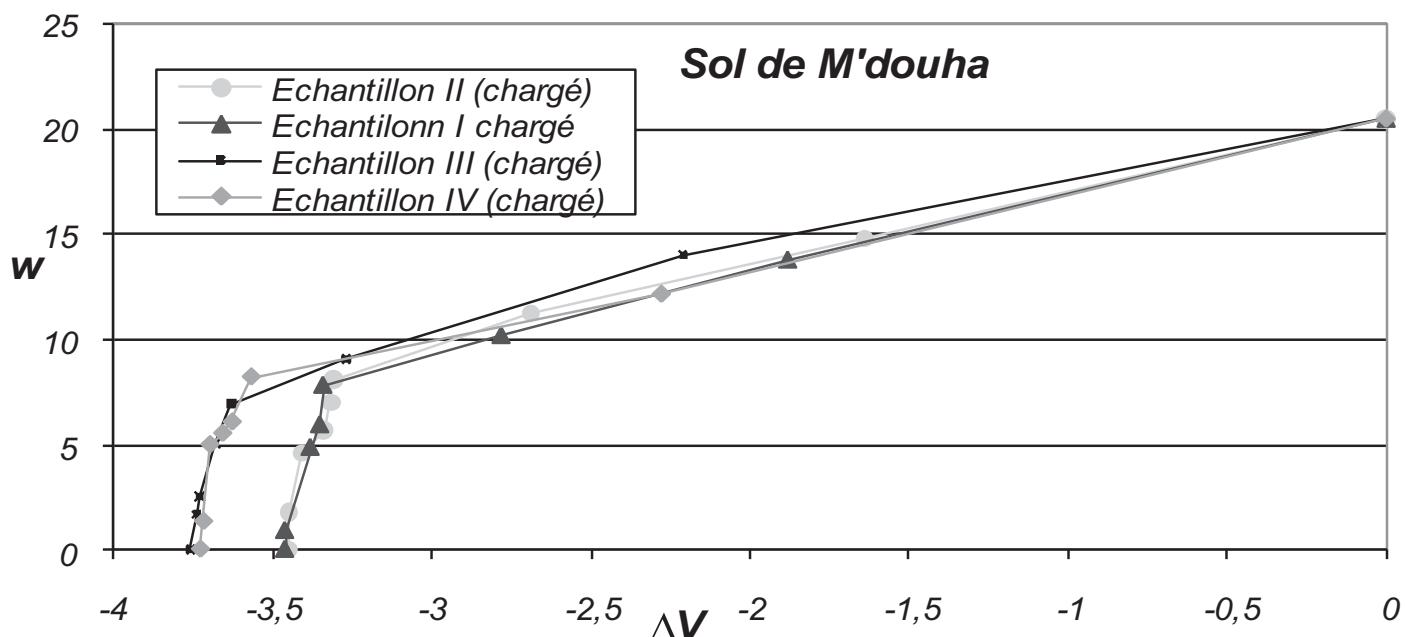


Figure 4. Influence de la charge verticale sur les résultats de l'essai de retrait. Évolution de la teneur w en fonction de la variation de volume V . Échantillons I, II, III et IV.

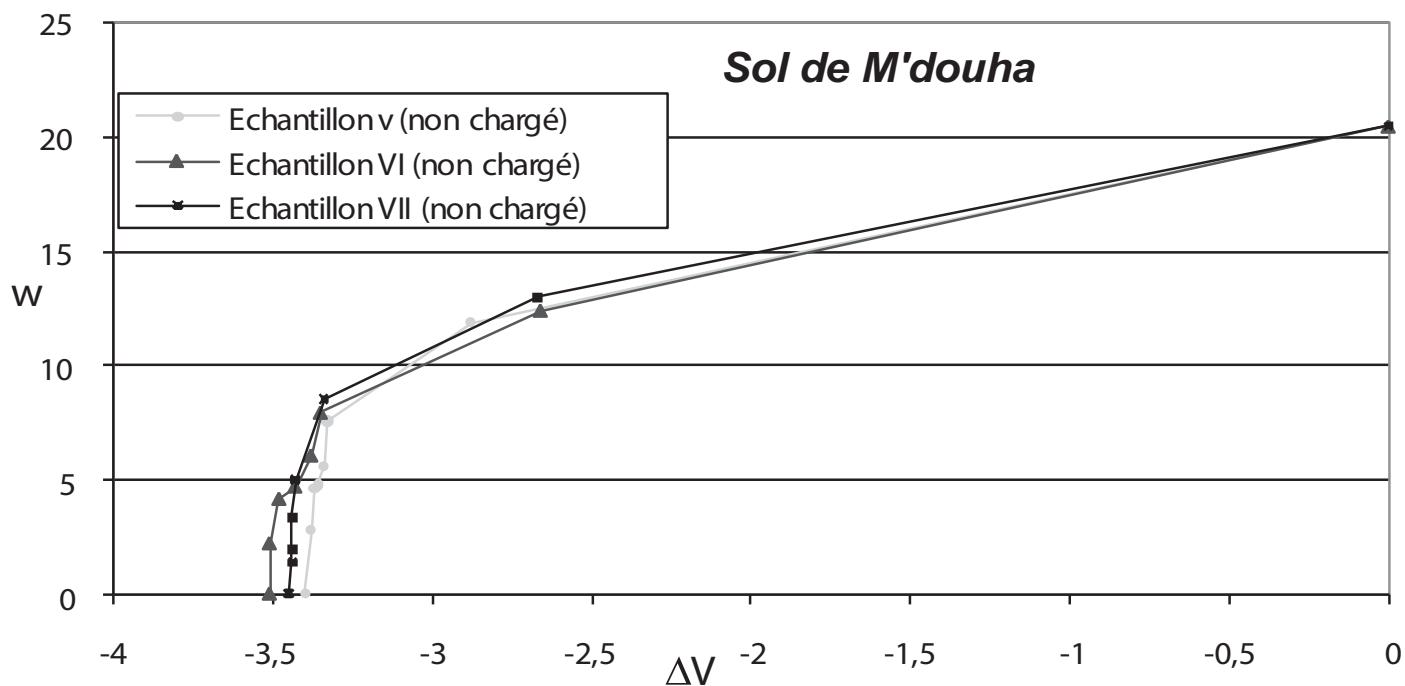


Figure 5. Influence de la charge verticale sur les résultats de l'essai de retrait. Évolution de la teneur w en fonction de la variation de volume V . Échantillons V, VI et VII.

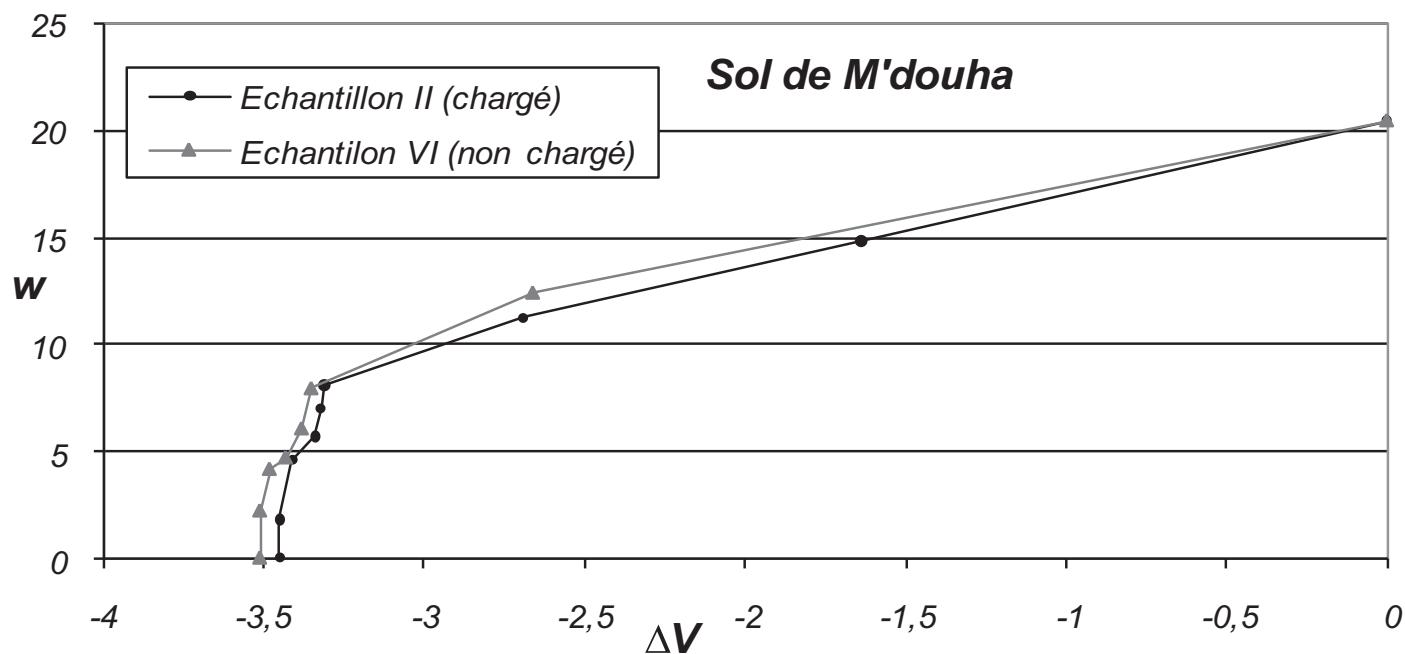


Figure 6. Influence de la charge verticale sur les résultats de l'essai de retrait. Évolution de la teneur en w en fonction de la variation de volume V . Comparaison des résultats obtenus.

Par ailleurs, l'examen des courbes des figures 7 à 12 conduit à l'observation suivante : même si la pression extérieure n'affecte pas les paramètres E_w et f , donc la charge n'influe pas sur le comportement du sol vis-à-vis du retrait, l'échantillon non chargé évolue normalement, alors que l'échantillon chargé diminue plus en hauteur et diminue moins en diamètre.

La raison est double :

- la majeure partie de la variation de volume se produit quand le sol est saturé ou presque ;
- la variation de volume, dans ce cas, est simplement, due à la perte ou au gain d'eau qui ne dépend pas de la pression créée par la charge, en considérant le sol et l'eau incompressibles.

En fait, si le sol est saturé, en employant les rapports de phases du sol, on aboutit à l'équation suivante :

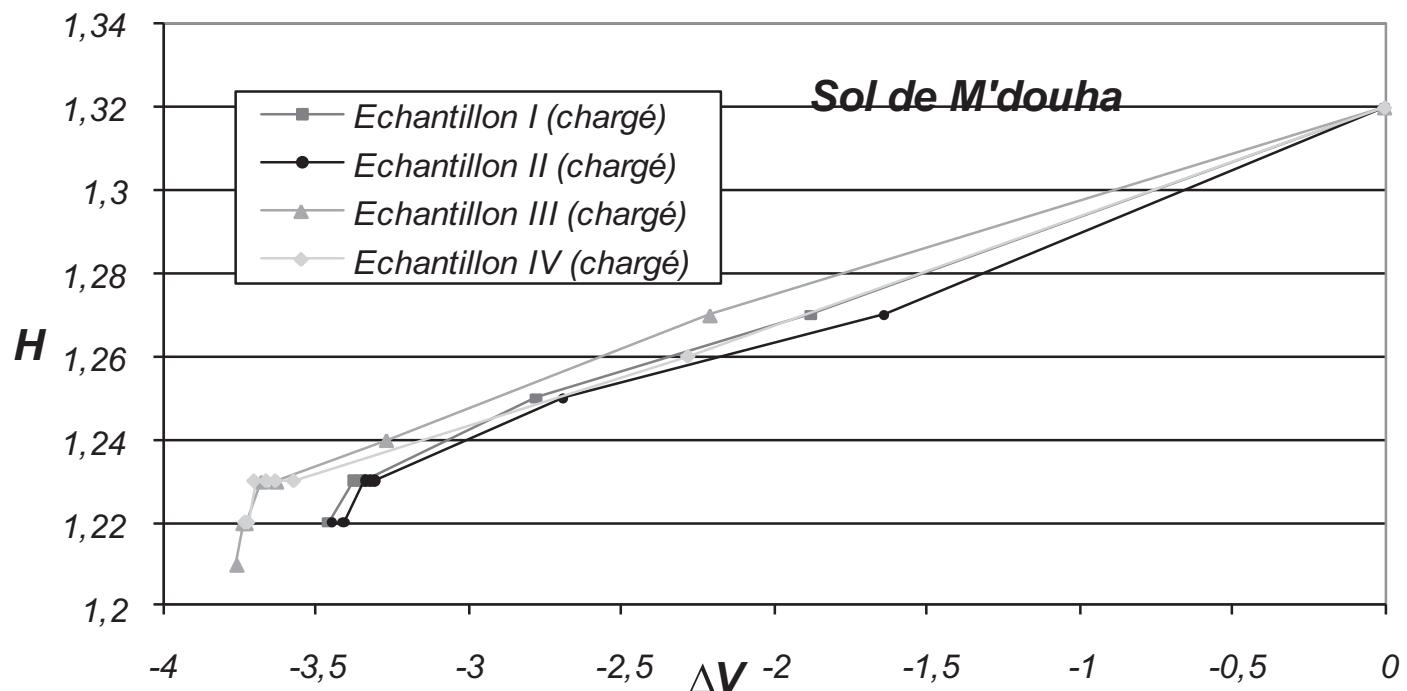


Figure 7. Influence de la charge verticale sur les résultats de l'essai de retrait. Variation de la hauteur H en fonction de la variation de volume V . Échantillons I, II, III et IV.

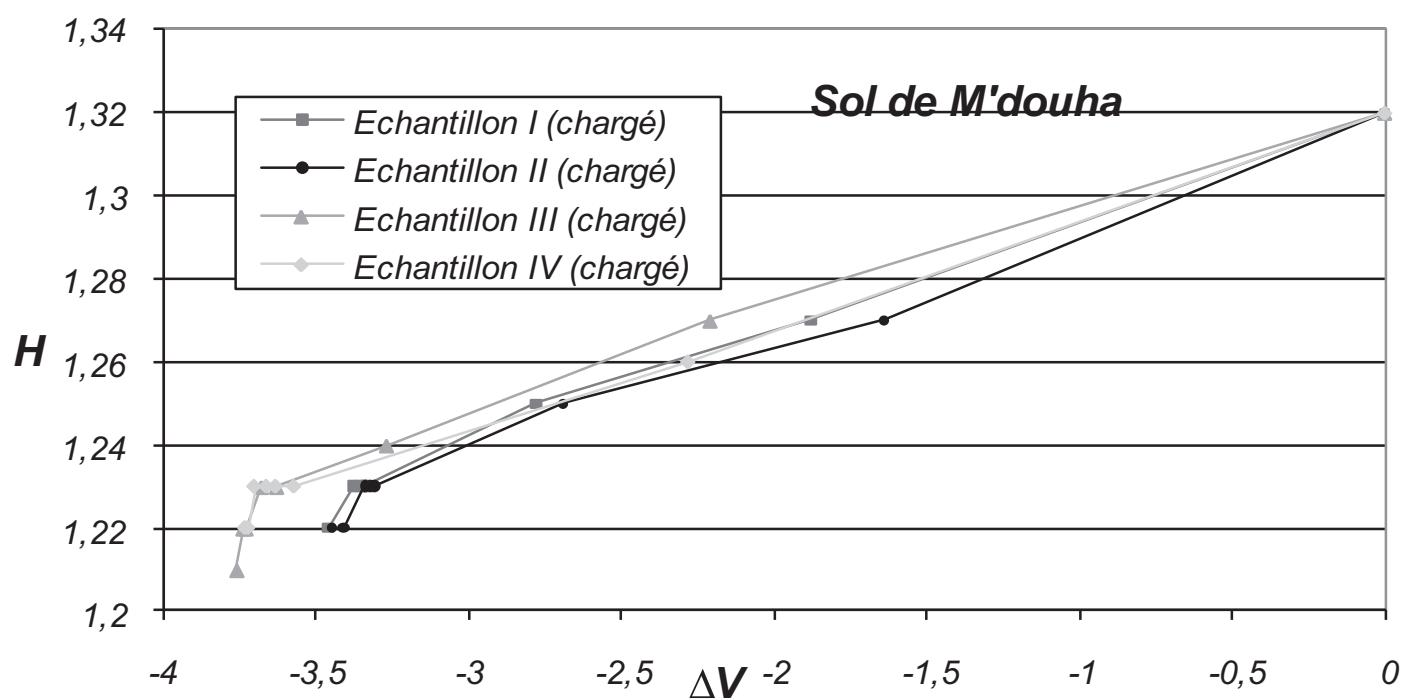


Figure 8. Influence de la charge verticale sur les résultats de l'essai de retrait. Variation de la hauteur H en fonction de la variation de volume V . Échantillons V, VI et VII.

$E_w = \frac{\gamma_w}{\gamma_d}$; où γ_w représente le poids volumique de l'eau et γ_d le poids volumique du sol sec. Comme γ_d ne change pas de manière significative d'un sol à l'autre, le module E_w de retrait/gonflement ne change pas, non plus. Le tableau 3 résume l'ensemble des résultats représentés sur les figures précédentes.

5.4. Influence de la texture du sol sur la limite de retrait w_s

La texture d'un sol définit sa succion et sa teneur en eau ; elle conditionne donc l'acquisition d'eau dans un sol. Outre les phénomènes mécaniques, la succion est intimement liée à la texture du sol par l'intermédiaire de son réseau poreux (de façon analogue d'un tube capillaire cylindrique où la succion est déterminée par la loi de Jurin).

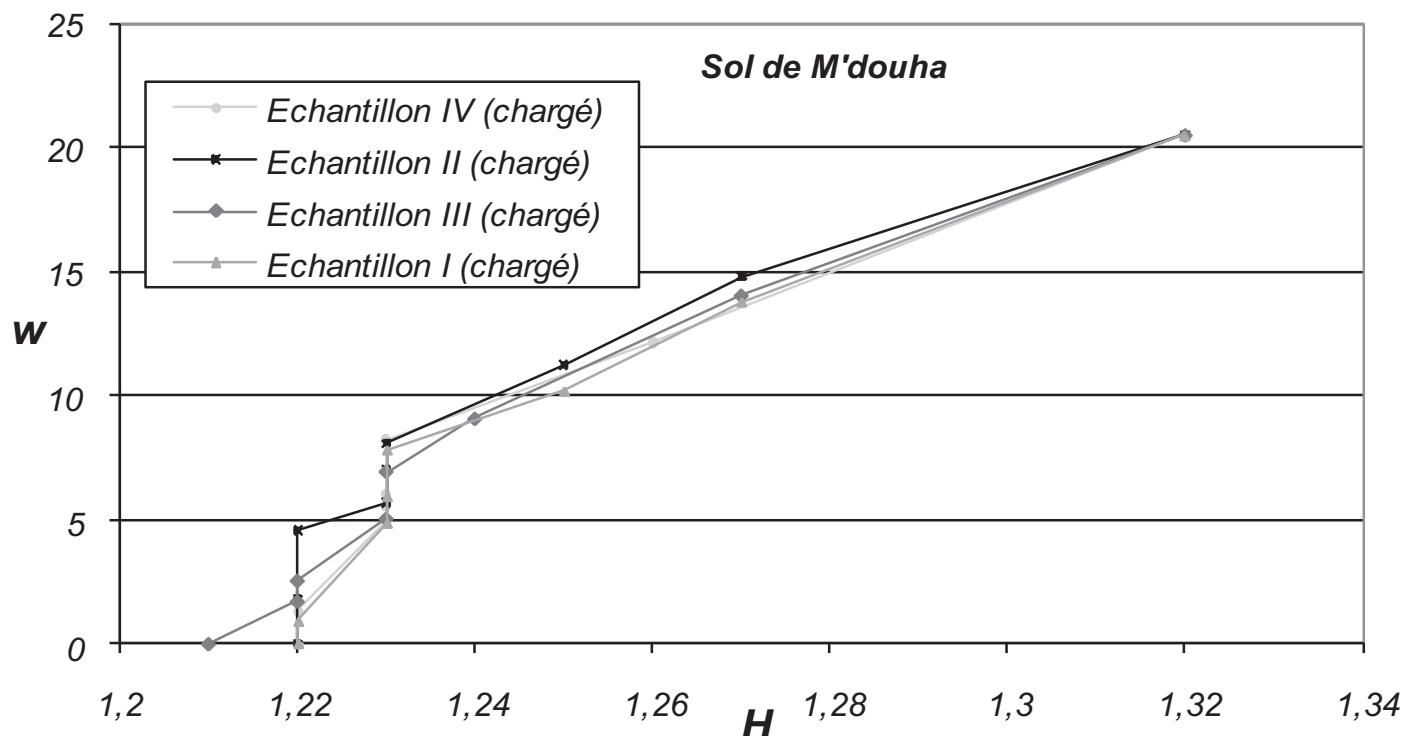


Figure 9. Influence de la charge verticale sur les résultats de l'essai de retrait.
Variation de la teneur en eau w en fonction de la hauteur H. Échantillon I, II, III et IV.

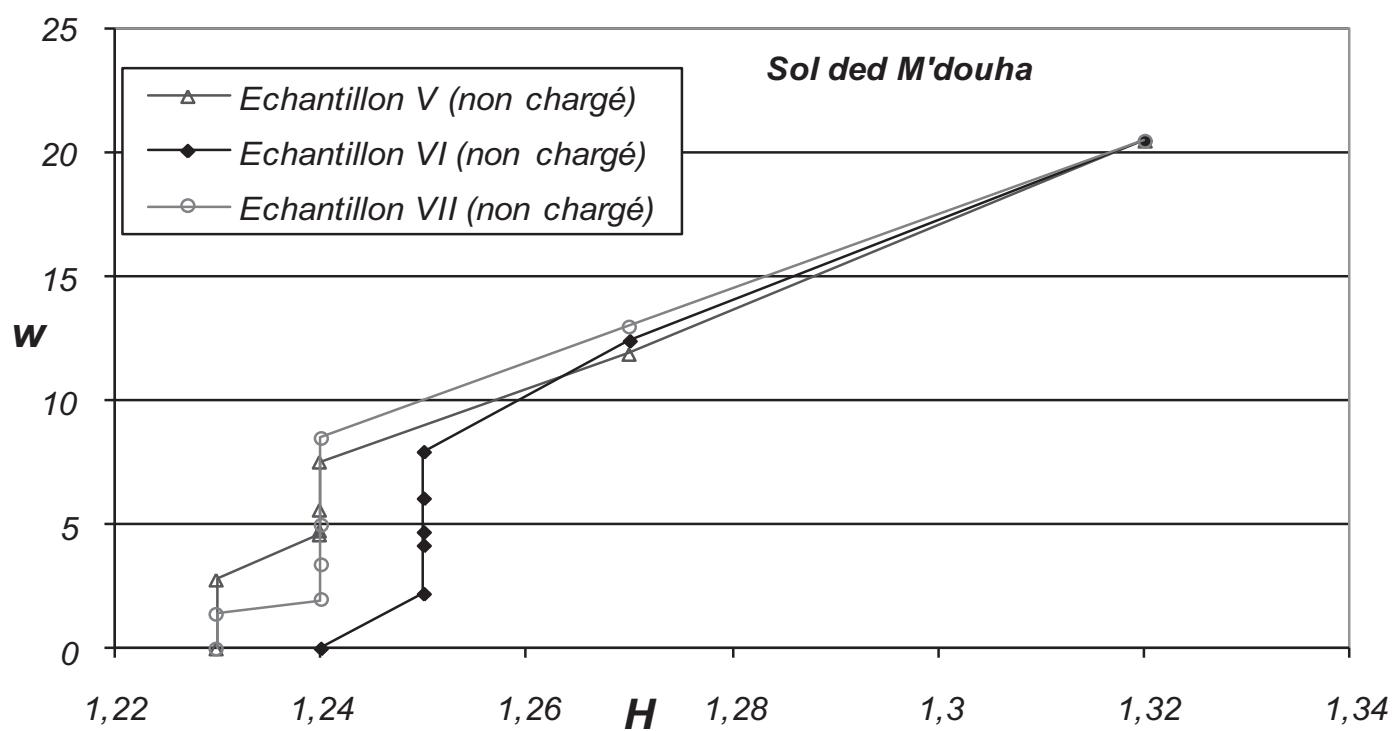


Figure 10. Influence de la charge verticale sur les résultats de l'essai de retrait.
Variation de la teneur en eau w en fonction de la hauteur H. Échantillons V, VI et VII.

C'est à ce titre, que nous avons effectué un essai de retrait, en marge des essais réalisés précédemment dans le cadre de l'application de la méthode de teneur en eau sur les sols naturels, pour examiner l'influence de la texture du sol sur la limite de retrait w_s .

La figure 13 ci-dessous présente les résultats de l'essai de retrait effectué sur deux échantillons intacts (E_3, E_4) et deux autres remaniés (E_1, E_2). Ces échantillons sont prélevés du site INTHT.

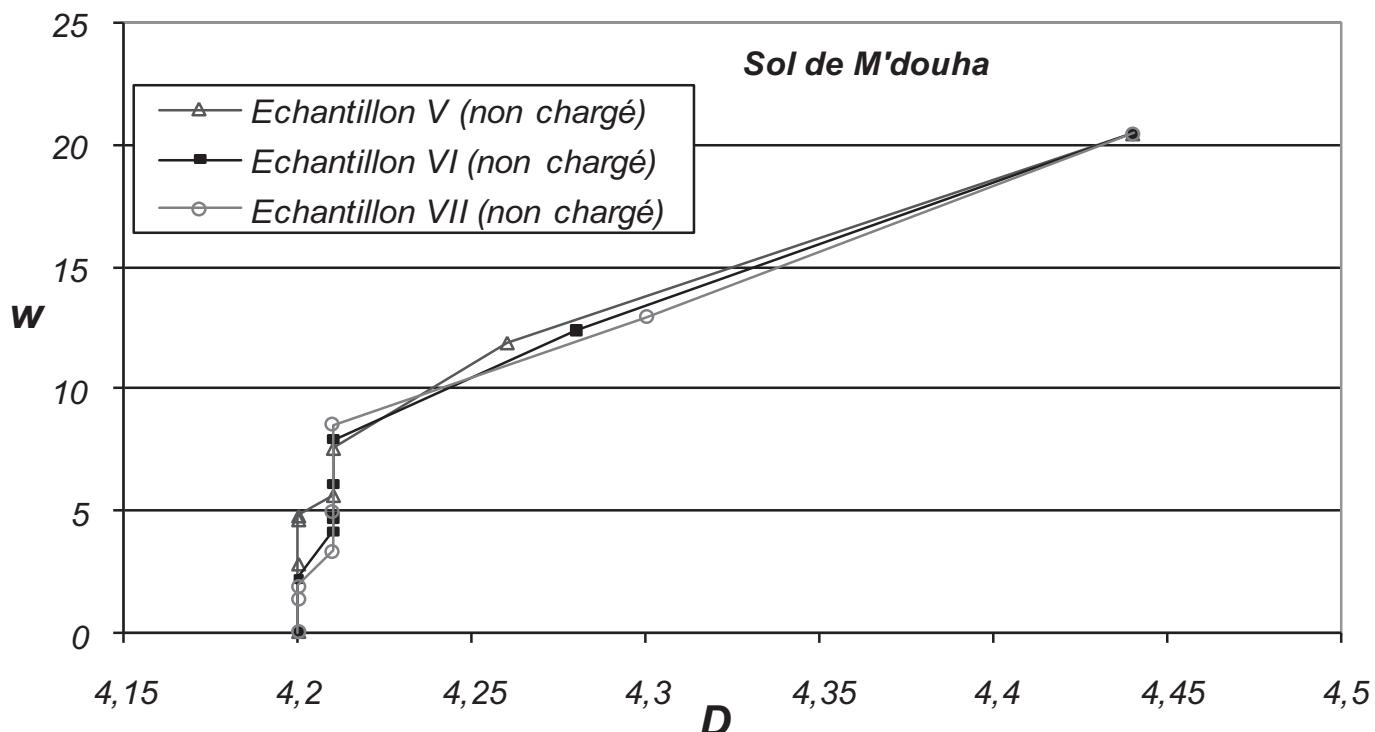


Figure 11. Influence de la charge verticale : variation de la teneur en eau w en fonction du diamètre D .
Échantillons V, VI et VII.

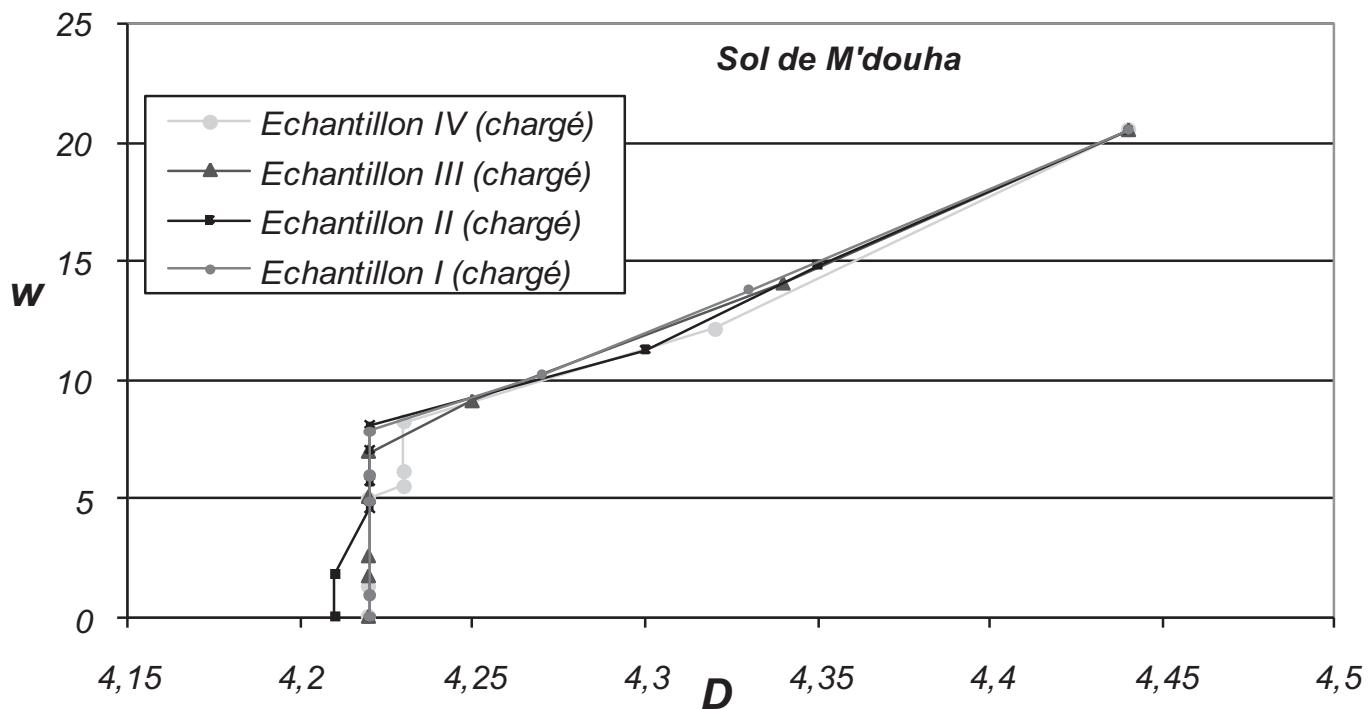


Figure 12. Influence de la charge verticale : variation de la teneur en eau w en fonction du diamètre D .

Sur le tableau 4 résumant les résultats, on constate que la limite de retrait de l'argile remaniée (limite d'Atterberg) est très différente de celle de l'argile intacte. Et cela est dû au fait que la texture d'un sol change de forme une fois que

celui-ci est remanié ; la structure naturelle de sa texture est détruite, d'où la différence entre les limites de retrait d'un sol intact et d'un sol remanié (Parcevaux P., 1980).



Argile de M'douha							
Échantillon (E)	V_0 (cm ³)	H_0 (cm)	D_0 (cm)	w_0 (%)	w_s (%)	f	E_w
E_I (chargé)	20.6	1.32	4.44	20.5	7.82	0.41	0.78
E_{II} (chargé)	20.6	1.32	4.44	20.5	8.09	0.42	0.77
E_{III} (chargé)	20.6	1.32	4.44	20.5	6.95	0.38	0.76
E_{IV} (chargé)	20.6	1.32	4.44	20.5	8.21	0.39	0.71
E_V (chargé)	20.6	1.32	4.44	20.5	7.54	0.37	0.80
E_{VI} (chargé)	20.6	1.32	4.44	20.5	7.94	0.33	0.77
E_{VII} (chargé)	20.6	1.32	4.44	20.5	8.51	0.36	0.74

Tableau 3. Influence de la charge verticale. Résultats des essais sur l'argile de M'douha.

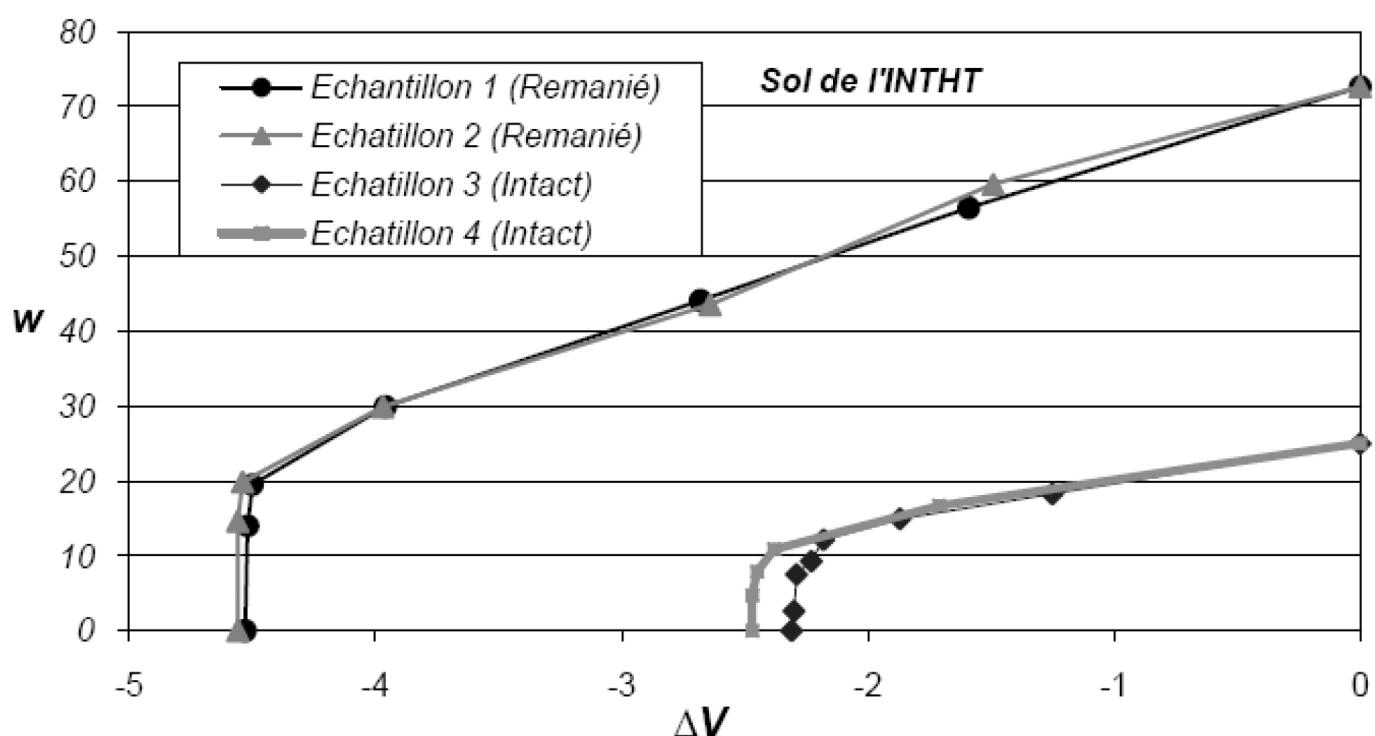


Figure 13. Influence de la texture du sol sur la limite de retrait.

Argile-INTHT						
Échantillon E	V_0 (cm ³)	H_0 (cm)	w_0 (%)	w_s (%)	f	E_w
E_4 (Intact)	9.70	1.49	25	12.15	0.29	0.57
E_3 (Intact)	10.16	1.43	25	10.88	0.29	0.60
E_1 (Remanié)	10.16	1.43	72.63	19.51	0.55	1.02
E_2 (Remanié)	9.70	1.49	72.63	19.90	0.58	0.84

Tableau 4. Influence de la texture du sol sur la limite de retrait.



6. CONCLUSION

La mesure directe de la déformation de retrait ou gonflement des sols en laboratoire est la façon la plus précise pour évaluer les risques associés au comportement des sols argileux sensibles sous les constructions. La méthode de la teneur en eau pour les prévisions de retrait et gonflement des sols, présentée par J.L. Briaud et X. Zhang (2003), est très commode. Elle utilise la teneur en eau comme paramètre principal de la loi de comportement du sol et l'essai de retrait pour obtenir cette loi.

L'essai de retrait produit une courbe de variation de la teneur en eau en fonction de la variation de volume qui est bien approchée par une ligne droite, dont la pente est le module de retrait/gonflement E_w .

Les résultats des essais que nous avons effectués indiquent que ce module est indépendant de la forme de l'échantillon et de la pression (charge) verticale imposée à cet échantillon. Par conséquent, la forme (dimensions) du sol et la charge qui le sollicite verticalement n'ont aucun effet sur son comportement vis-à-vis du retrait. Les résultats obtenus montrent que les déformations du sol sont seulement le fait de la variation de la teneur en eau.

Toutefois, bien que les résultats auxquels nous avons abouti, par l'application de cette méthode aux sols naturels, soient satisfaisants, ils restent des prévisions et il serait souhaitable de les valider par des essais sur site. Ce travail pourrait donc être approfondi et complété par des essais *in situ*, ou sur sites, dans lesquels des socles en béton seraient construits sur un sol argileux où des échantillons seraient prélevés à différentes profondeurs. Le mouvement vertical de ces socles serait mesuré et enregistré périodiquement et comparé aux prévisions de la méthode de la teneur en eau.

7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Altmeier, W.T. Discussion of engineering properties of expansive clays. *Journal of the soil mechanics and foundation division, American society of testing and materials*, Vol. 81, N° SM2, p. 17-10, 1955.
- Brackly, I.J.A. *Swell pressure and free swell in compacted soil*. Proceeding of the 3rd international conference on expansive soils, Haifa, p. 169-176, 1975.
- Blight, G.E. *Interaction between the atmosphere and the earth*, volume 47, N°4. p. 715-767, 1997.
- Briaud, J.-L., Zhang, X. 2003, *Water content method for movement prediction of swell - shrink soils*. *Proceedings, International symposium of shallow Foundations*. FOUNSUP 2003, vol. 2. Magnan(ed). Presse de L'ENPC et LCPC, Paris. p. 353-372, 2004.
- Bultel, F., *Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels*. Thèse, École nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2001.

- Ferreira, N.H., *Influence of clay content on the plasticity of soils*. 4th regional conference for Africa soil mechanics and foundation engineering, Cape Town, South Africa. p. 261-266, 1967.
- Heidema, P. B., *The Bar - Linear Shrinkage Test and the Practical Importance of Bar - Linear as an Identifier of Soils*. International conference on soil mechanics, London. p. 44-49, 1957.
- Holtz, R.D., et Kovacs, W.D., *Introduction à la géotechnique*. Edition de l'école polytechnique de Montréal, 1991.
- Holtz, W.G. (1959). *Expansive clay – Properties and problems*. *Colorado School of Mines Quarterly*, Vol. 54, N° 4, p. 89-125.
- Khemissa, M., et Mekki, L., *Détermination des paramètres de gonflement des argiles expansives*. 2^e journée d'étude sur les sols gonflants, JESG02. Université Aboubakr Belkaïd, Algérie, Tlemcen, 2002.
- Lyttton, R.L., *Prediction of movement in expansive clays*. *Proceedings, Settlement 94*, Conference held at Texas A&M University, ASCE. Reston, Virginia. USA. Geotechnical Special Publication N°40, Volume 2. p. 1827-1845, 1994.
- McDowell, C., *Interrelationships of loads, volume change and layer thickness of soils to the behavior of engineering structures*. Highway research Board (Transportation Research Board) Washington, DC. Proceedings, 35th Annual Meeting, Publications N° 426. p. 754-772, 1956.
- McKeen, G.R., *A model for predicting expansive soil behavior*. *Proceedings, 7th international Conference on Expansive soils*, Published by Texas Tech University, Lubbock, Texas, USA, Volume 1. p. 1-6, 1992.
- Miller, D.J., Durkee, E.B., Chao, K.C., Nelson, J.D., *Simplified prediction for expansive soils*. *Proceedings, First International Conference on Unsaturated Soils*. Paris, A.A. Belkema Publishers, Rotterdam, The Netherlands. p. 891-897, 1995.
- Mouroux, P., Margon P., et Pinte, J.P., *La construction économique sur sols gonflants*. Bureau de recherches géologiques et minières, *Manuels et méthodes* n°14. p. 6-41, 1988.
- Parcevaux, P., *Étude microscopique et macroscopique du gonflement de sols argileux*. Thèse, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 1980.
- Perko, H.A., Thomson, R.W., Nelson, J.D., *Suction compression index based on clod test results*. *Proceedings of Sessions of Geo-Denver 2000*, Geotechnical Special Publication N°99, ASCE, Reston, Virginia, USA. p. 393-408, 2000.
- Philliponat, G., *Retrait/gonflement des argiles, proposition de méthodologie*. *Revue Française de géotechnique*, 57 : 5-22, 1991.
- PTI., *Design and construction of post-tensioned slabs-on-ground*, Second Edition. Post Tensioning Institute, Phoenix, Arizona, 1996.
- Ranganatham, B. V., et Satyanarayana, B., *A rational Method of predicting swelling Potential for Compacted Expansive Clays*. International conference on Soil Mechanics, Montréal. Volume 1. p. 92-96, 1965.
- Volflo Manual., *Manual for a computer program for volume change and flow calculations in expansive soils*. Geotechnical Took Kit, inc. Austin, Texas, 1996.