

Équation généralisée des courbes de retrait d'échantillons de sol structures

Érik BRAUDEAU

Résumé — Un modèle du « fonctionnement structural d'un échantillon de sol avec la variation de la teneur en eau », a été établi pour être confronté aux courbes de retrait expérimentales mesurées en continu par une méthode récente [4]. Il est basé sur trois hypothèses qui définissent les deux systèmes de porosité micro-et macroscopiques du sol, et permet la quantification des volumes d'eau, d'air et de pores répartis dans ces deux systèmes en fonction de la teneur en eau de l'échantillon.

General shrinkage curve equation for undisturbed soil samples

Abstract — A model for the structural behaviour of a soil sample with varying moisture content was constructed and compared with the experimental shrinkage curves that were measured automatically according to a recent method [4]. It is based on three hypotheses that define the two functional micro- and macroscopic systems of soil porosity. It is then shown that this model, which provides very good fits for the overall shrinkage curve, is governed by the same parametric equation regardless of the texture (clay or sandy-clay) of the ferrallitic soil samples studied. Major properties of the structural behaviour of these soil samples are derived that allow quantification of the water, air and pore volumes of both porosity systems according to moisture content.

INTRODUCTION. — Bien que la courbe de retrait soit de plus en plus utilisée pour l'analyse et le suivi des propriétés physiques du sol [1], sa formulation mathématique n'est établie que partiellement et avec une précision trop insuffisante aux environs des points de transition de phase de retrait, pour décider d'un modèle continu ou discontinu du retrait ([2], [3]).

Disposant de données très précises et mesurées en continu de la rétraction d'échantillons de sol structurés [4], nous nous proposons dans cette Note, de reprendre l'approche de Sposito et Giraldez ([3], [5]), qui supposent l'existence d'une équation paramétrique universelle des courbes de retrait, et de rechercher la forme de cette équation.

HYPOTHÈSES ET DÉFINITIONS. — *Courbes de retrait.* — La figure 1 reproduit la courbe de retrait d'un échantillon de sol ferrallitique argileux du Congo (MSBA-BA), suivi en dessèchement depuis l'état saturé (point F), jusqu'à l'état sec, c'est-à-dire en deçà de la limite de retrait (point A). Il s'agit d'une courbe expérimentale obtenue point par point, en sorte qu'il est aisé d'en délimiter avec précision les différentes phases de retrait séparées par les points A, B, C, E, F [4].

Hypothèses de départ. — Pour considérer le cas général des sols structurés, qui sont en partie désaturés au point B, et dont la constante de retrait (pente dV/dw de la phase C-B) est en général différente de 1, nous avons modifié le modèle de Sposito et Giraldez [3], en posant les trois hypothèses de base suivantes :

1° Il existe un *système poral microscopique*, qui constitue l'un des volumes fonctionnels responsables du retrait global de l'échantillon. Son point d'entrée d'air est le point de transition entre les deux phases de retrait « normal » et « résiduel » (point B sur la courbe de retrait).

2° La *microporosité totale* de l'échantillon correspond exactement à la porosité de ce système, si bien que le volume poral de celui-ci, appelé V_{miB} , est égal à la teneur en eau w , de l'échantillon au point d'entrée d'air B : $V_{miB} = w_B$.

Note présentée par Georges PEDRO.

3° Le volume global de l'échantillon est fonction linéaire des volumes fonctionnels responsables du retrait composant l'échantillon.

Définitions, notations. — Tous les volumes constitutifs de l'échantillon considérés ici (eau, air, vides, solide, unités fonctionnelles), sont rapportés à la masse de la phase solide M_s de celui-ci.

La première hypothèse définit qualitativement un volume fonctionnel homogène (V_{mi}), dont le volume poral est noté V_{mi}^p et la teneur en eau, w_i . L'entrée d'air dans ce volume se faisant seulement à partir du point B, on a la relation $dV_{mi}/dw_i = 1$ jusqu'en B.

La deuxième hypothèse définit *quantitativement* la microporosité de l'échantillon, et par conséquent aussi sa macroporosité qui est la macroporosité complémentaire, dont le volume poral est noté V_{ma} et la teneur en eau w_a : d'après cette hypothèse, $V_{mi} = w_i = w$ au point B, ce qui entraîne $w_a = w - w_i = 0$ en B.

Enfin la troisième hypothèse exprime la relation entre le volume global de l'échantillon V , et ses volumes fonctionnels constitutifs causant le retrait, c'est-à-dire (V_{mi}), et w_a , l'eau extérieure à (V_{mi}). Cette relation peut être mise sous la forme :

$$dV/dw = K_1 \cdot dV_{mi}/dw + K_2 \cdot dw_a/dw,$$

étant entendu que la variation du volume de (V_{mi}) correspond à celle de son volume poral V_{mi}^p puisque le volume de sa phase solide associée est constant.

FORMULATION DU RETRAIT. — En confrontant le modèle défini par les hypothèses précédentes, aux données expérimentales des courbes de retrait, on établit l'équation suivante :

$$(1) \quad dV = K_r \cdot dV_{mi} + K_0 \cdot dw_a,$$

où : V_{mi} et w_a sont déterminés au cours de la phase de retrait maximal C-B durant laquelle on montre que $V_{mi} = w$ et $w_a = 0$;

K_r et K_0 sont les constantes de retrait des phases C-B et F-E :

$$K_r = (V_C - V_B)/(w_C - w_B) \quad \text{et} \quad K_0 = (V_F - V_E)/(w_F - w_E);$$

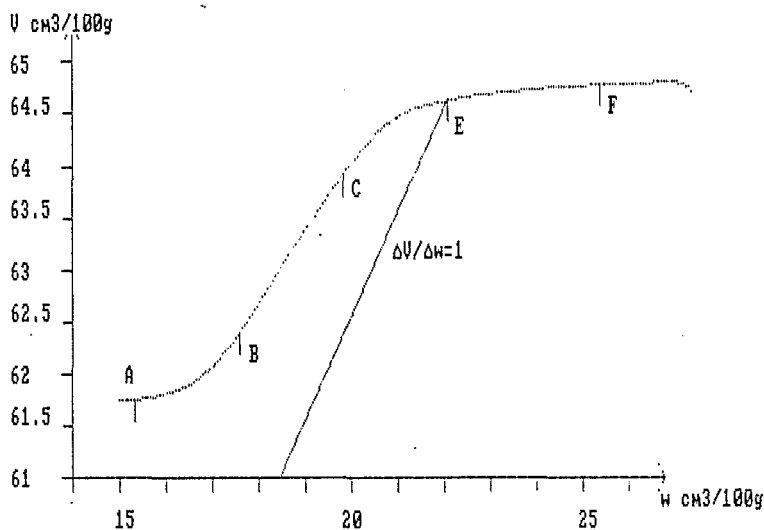


Fig. 1. — Courbe de retrait expérimentale d'un échantillon de sol non remanié (MSBA-BA).

Fig. 1. — Experimental shrinkage curve of an undisturbed soil sample (MSBA-BA).

$dV_{mi} = x \cdot dw$, x étant la fraction de l'eau s'évaporant de l'échantillon, *provoquant* le retrait de (V_{mi}).

La validité du modèle est attestée, dans le cas de nos échantillons de texture et structure différentes, par les très bons ajustements obtenus à partir de l'équation [1], de l'ensemble de la courbe de retrait. Ces ajustements ont été effectués, pour tous les échantillons étudiés, en prenant pour x la même fonction paramétrique continue décrite dans le tableau suivant.

TABLEAU
Valeurs de x et w_n dans chaque phase de retrait.
x and w_n expressions in each shrinkage phase.

Phases :	F-E	E-C	C-B	B-A	A-A ₀
$x =$	0	$\frac{e^{w_n} - 1}{e - 1}$	1	$\frac{e^{w_n} - 1}{e - 1}$	0
$w_n =$		$\frac{w - w_E}{w_C - w_E}$		$\frac{w - w_A}{w_B - w_A}$	

Un exemple de l'ajustement des parties E-C et B-A de la courbe de retrait est donné à la figure 2, où V_n et w_n sont les valeurs normalisées du volume massique et de la teneur en eau dans les intervalles considérés. V_n est calculé selon les équations suivantes, obtenues à partir de (1), pour B-A et E-C respectivement :

$$(2) \quad V_n = (V - V_A) / (V_B - V_A) = (\exp(w_n) - w_n - 1) / (e - 2);$$

et

$$(3) \quad V_n = (V - V_E) / (V_C - V_E) \\ = (K_r \cdot (\exp(w_n) - w_n - 1) + K_0 \cdot (e \cdot w_n - \exp(w_n) + 1)) / (K_r \cdot (e - 2) + K_0).$$

Les ajustements sont évalués par la somme des carrés des écarts, qui est inférieure à $4 \cdot 10^{-4}$ dans tous les cas étudiés de sols ferrallitiques argileux et sablo-argileux.

PROPRIÉTÉS DU MODÈLE. — D'après le tableau précédant, la courbe de retrait est entièrement déterminée par la position des cinq points particuliers : A, B, C, E, F. Or, en intégrant (1) dans chacune des phases de retrait, on obtient quatre relations liant les coordonnées de ces points à K_r et K_0 :

$$(4) \quad K_r = (V_C - V_B) / (w_B - w_C) = (V_B - V_A) / (w_B - w_A) * (e - 1) / (e - 2),$$

et

$$(5) \quad K_0 = (V_F - V_E) / (w_F - w_E) = (V_C - V_E) / (w_C - w_E) * (e - 1) - K_r \cdot (e - 2),$$

ce qui ramène à huit le nombre de paramètres nécessaires au tracé de la courbe de retrait. Par conséquent, avec huit paramètres indépendants, comme par exemple les suivants : V_A , w_A , w_B , w_C , w_E , K_r , K_0 et V_s (volume massique de la phase solide) qui sont facilement mesurés, on est en mesure de calculer, pour toute teneur en eau w , tous les volumes structuraux (V , V_{mi} , V_{ma}) de l'échantillon, ainsi que la répartition de l'eau (w_b , w_a), et de l'air ($V_{mi} - w_b$, $V_{ma} - w_a$), dans celui-ci.

CONCLUSION. — A partir d'un modèle de comportement structural du sol, mettant en jeu deux volumes fonctionnels emboîtés (V_{mi}) et w_a , on a pu établir l'équation paramétrique qui décrit entièrement le retrait d'échantillons de sol structurés. Le très bon accord

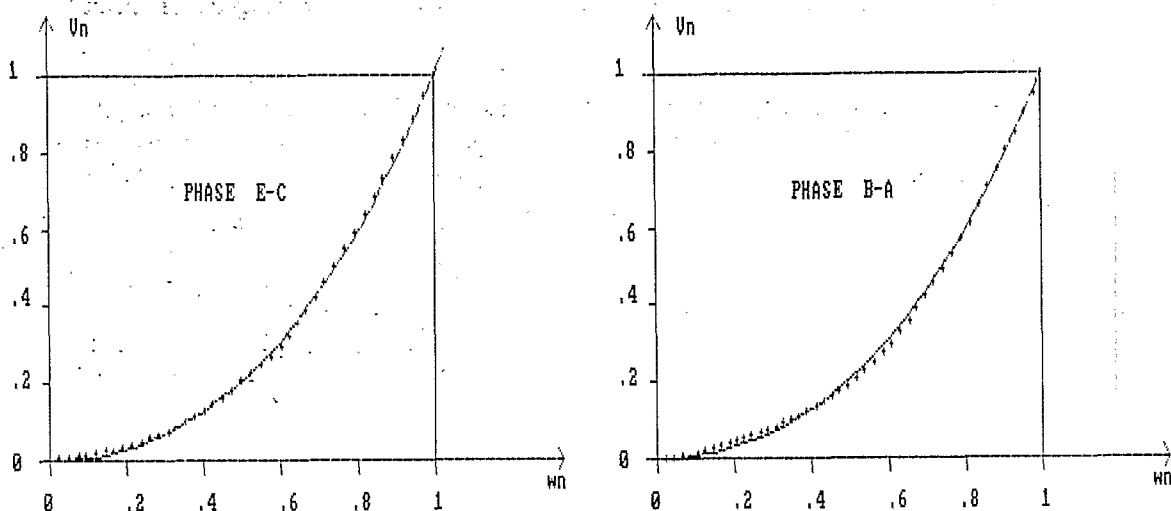


Fig. 2. — Comparaison entre les courbes théoriques (en trait plein), et observées (croix) de $V_n = f(w_n)$ (échant. MSBA-BA).

Fig. 2. — A comparison between predicted (solid lines) and observed curves (cross) of $V_n = f(w_n)$.

obtenu, pour tous les échantillons de sols ferrallitiques étudiés, entre les points observés et calculés des courbes de retrait, atteste la validité du modèle, et de l'équation paramétrique qui le régit. Ceci a pour conséquence importante :

- la définition précise des volumes fonctionnels ((V_{mi}) et w_a), et structuraux (V , V_{mi} , V_{ma} , w_i , w_a) du sol;
- l'existence de huit paramètres caractéristiques du sol, qui permettent de déterminer quantitativement l'ensemble de son comportement structural fonction de la teneur en eau.

Note reçue le 12 juillet 1988, accepté le 3 octobre 1988.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] D. MCGARRY et I. G. DANIELS, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51, 1987, p. 1575-1580.
- [2] D. MCGARRY et K. W. J. MALAFANT, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51, 1987, p. 290-297.
- [3] G. SPOSITO et J. V. GIRALDEZ, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40, 1987, p. 352-358.
- [4] E. BRAUDEAU, *Sci. du Sol*, 25, n° 2, 1987, p. 85-93.
- [5] J. V. GIRALDEZ, G. SPOSITO et C. DELGADO, *Soil Sci. Am. J.*, 47, 1983, p. 419-422.

O.R.S.T.O.M., Laboratoire d'Hydrophysique, 70-74, route d'Aulnay, 93450 Bondy.