

Méthode de caractérisation pédo-hydrigue des sols basée sur l'analyse de la courbe de retrait

Erik BRAUDEAU

Pédologue ORSTOM, Laboratoire d'Hydrophysique, 70-74, route d'Aulnay, 93143 Bondy Cédex

RÉSUMÉ

Un modèle très explicite de la variation structurale d'un volume de sol fonction de la teneur en eau, est établi dans le cas général d'échantillons de sols structurés, et peu gonflants. Il s'appuie sur la définition précise des volumes structuraux constitutifs de l'échantillon de sol : les deux volumes poreux micro et macro, ainsi que l'eau et l'air qui y sont contenus. On montre que, en parfait accord avec tous les résultats observés sur sols ferrallitiques, ce modèle est régi par une même équation paramétrique, qui permet de calculer très précisément, ces différents volumes structuraux en fonction de la teneur en eau. Les huit paramètres de l'équation sont facilement mesurables d'après la courbe de retrait, et constituent un ensemble exhaustif de caractéristique physique de l'échantillon, que l'on propose d'appeler « caractéristiques pédo-hydrigues du sol ».

MOTS-CLÉS : Courbe de retrait — Macroporosité — Microporosité — Structure — Comportement structural.

ABSTRACT

A SHRINKAGE CURVE BASED DETERMINATION METHOD OF « SOIL PEDO-HYDRIC CHARACTERISTICS »

A clear model of the structural variation of a soil volume related to the water content is determined in samples of poorly swelling structured soils. It is based on well defined structural volumes forming the soil sample, namely micropore and macropore spaces, as well as on their water and air constituents.

In conformity with all the results observed in ferrallitic soils, it is shown that this model is governed by one general parametric equation allowing an accurate evaluation of the different structural volumes related to the water content. The eight parameters of the equation can be easily measured on the shrinkage curve and represent the whole physical characteristics of the sample which can be called « soil pedo-hydric characteristics ».

KEY WORDS : Shrinkage curve — Macroporosity — Microporosity — Soil structure — Structural behaviour.

1. INTRODUCTION

La courbe de retrait d'un échantillon de sol, bien connue en pédologie, représente la variation du volume massique de l'échantillon en fonction de sa teneur en eau (ex. fig. 1). La mesure est longue et difficile à effectuer directement, en sorte que les points

expérimentaux ont toujours été jusqu'ici en nombre limité.

Or les courbes de retrait sont précieuses à obtenir, tant pour le calcul des processus hydrodynamiques dans le sol (SPOSITO 1975), que pour la caractérisation des propriétés structurales du sol (McGARRY et DANIELLS, 1987). En effet, le phénomène du retrait, aussi peu

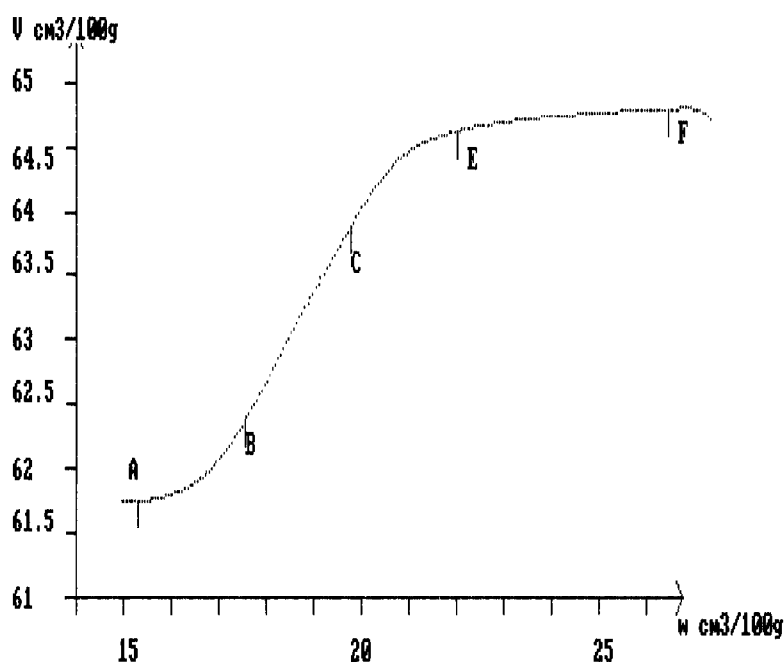


FIG. 1. — Courbe de retrait expérimentale d'un échantillon de sol non remanié (MSBA-BA)

perceptible qu'il puisse être dans certains cas, est le propre de tout sol « vivant », et reflète son fonctionnement structural d'ensemble, en relation avec les volumes d'eau et d'air qui l'occupent.

Afin d'exploiter quantitativement ces courbes de retrait, il y eut plusieurs tentatives de modélisation, dont les principales ont été rapportées récemment par McGARRY et MALAFANT (1987), mais qui restent peu satisfaisantes à cause surtout du manque de données aux environs des points de transition des phases de retrait, (points A, B, C, E, F fig.1) (SPOSITO et GIRALDEZ, 1976). En effet, dans les conditions expérimentales pratiquées jusqu'alors, ceux-ci ne pouvaient être parfaitement localisés, ni même, pour certains, convenablement identifiés.

Grâce à une nouvelle méthode de mesure en continu des courbes de retrait (BRAUDEAU 1987), il nous a été possible de localiser avec précision ces points de transition, et de les prendre comme points caractéristiques du comportement structural du sol, pour tenter une nouvelle fois la modélisation du retrait à partir des travaux de SPOSITO et GIRALDEZ (1976). Un modèle du comportement structural du sol avec l'eau est donc présenté dans cet article, ainsi que ses implications en ce qui concerne la définition de la structure du sol et la caractérisation de ses propriétés de variation en fonction de la teneur en eau.

2. CADRE DE L'ÉTUDE

2.1. Position du problème

La figure 1 reproduit la courbe de retrait d'un échantillon de sol ferrallitique argileux du Congo (MSBA-BA, cf. tableau I), suivi en dessèchement de l'état saturé (point F), à l'état sec, c'est-à-dire au-delà de la limite de retrait (point A). Il s'agit d'une courbe expérimentale dont chaque point représenté constitue un point de mesure, en sorte qu'il est aisé d'en délimiter avec précision les différentes phases de retrait F-E, E-C, C-B, et B-A (BRAUDEAU 1987).

L'analyse des phases C-B et B-A des courbes de retrait a été effectuée par SPOSITO et GIRALDEZ (1976) qui, s'appuyant sur un modèle de courbe tel que celui présenté à la figure 2, en ont recherché l'équation. Ce faisant, ils voulaient vérifier leur hypothèse selon laquelle les points A (limite de retrait), et B (point d'entrée d'air) correspondent à deux états thermodynamiques, caractéristiques de la microorganisation du sol. Si tel est le cas, les deux fonctions d'état suivantes : le volume d'air entré dans l'échantillon de sol à partir du point B, et le volume d'eau sorti de l'échantillon à partir du même point, sont reliés par une équation paramétrique, obéissant à la loi des états correspondants : c'est-à-dire une équation dont la forme est la même pour tous les types de sol, et dont les paramètres ne dépendent que des points A et B.

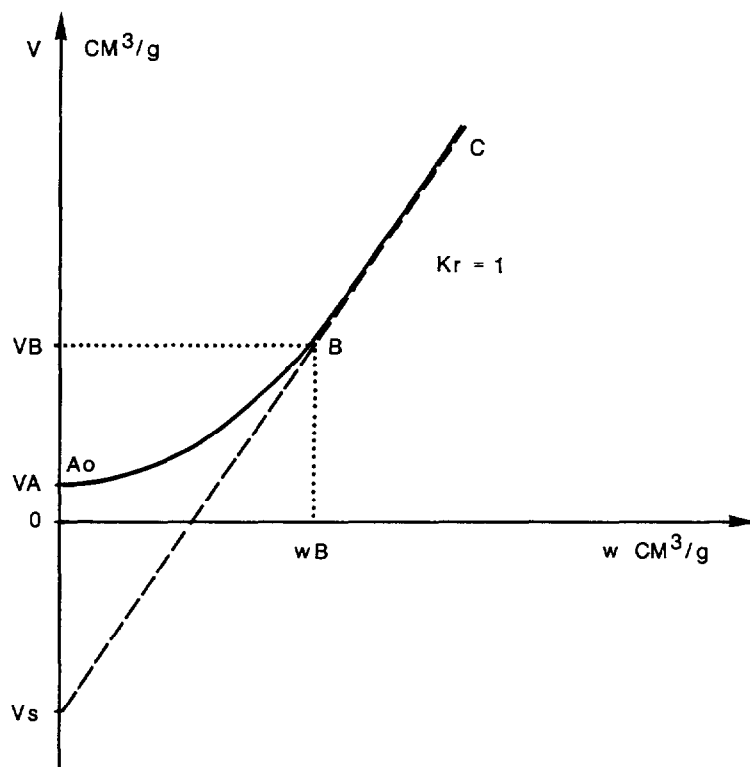


FIG. 2. — Modèle de courbe de retrait utilisé par SPOSITO et GIRALDEZ (1976)

Cette hypothèse des états correspondants a effectivement été vérifiée par les auteurs (1976, 1983), mais incomplètement, dans la mesure où les données disponibles dans la littérature étaient insuffisantes et où leur étude ne s'attachait qu'à un type particulier de courbe

(fig. 2) où n'apparaissent pas les phases de retrait F-E et E-C, commençant directement par la phase (C-B) avec une pente K_r , égale à 1. De telles courbes sont caractéristiques de volumes de sol sans macroporosité et qui se rétractent en restant saturés dans une large gamme

TABLEAU I
Analyse granulométrique et teneur en carbone de quatre sols ferrallitiques du Congo

ECHANTILLON	TEXTURE			CARBONE
	argile	limon	sable	%
LOH2-A	64.3	16.4	11.7	5.2
LOH2-AB	66.3	13.7	10.3	4.9
LOH2-BA	62.5	18.6	10.5	1.1
TNZI-A	46.7	31.8	13.2	3.8
TNZI-AB	57.5	29.5	8.1	1.4
MSBA-A	45.9	30.8	17.8	1.9
MSBA-AB	52.2	30.6	12.1	1.5
MSBA-BA	54.1	32.1	9.9	1.2
AGRI-A	17.0	24.4	57.3	1.7
AGRI-AB	11.2	38.2	47.3	0.9
AGRI-BA	22.7	20.8	53.1	0.79

de teneur en eau, jusqu'en B où commence à se produire l'entrée d'air.

Reprenant l'hypothèse « thermodynamique » des états correspondants, l'étude présentée ici est basée sur nos courbes expérimentales, qui représentent un modèle plus large des courbes de retrait du sol, dans lequel est considéré le cas général d'échantillons de sol structurés et peu gonflants, c'est-à-dire dont la macroporosité n'est pas négligeable, et qui peuvent être aussi bien argileux que peu argileux. Ces sols ont une constante de retrait différente de 1, et sont en partie désaturés au point B.

2.2. Les sols étudiés

Les quatre sols pris en exemple sont des sols ferrallitiques du Congo, dont les principales caractéristiques sont reproduites dans le tableau I, un prélèvement au cylindre a été effectué dans les horizons supérieurs A, AB, BA, en trois répétitions, et analysés au rétractomètre (BRAUDEAU, 1987). Cet appareil, schématisé à

la figure 3, mesure le diamètre de l'échantillon cylindrique en même temps que son poids, au cours du séchage à l'air, en enceinte régulée (28°, Hr 40 %).

3. PRÉSENTATION ET DÉFINITION DU MODÈLE

Trois hypothèses sont nécessaires pour définir le modèle de la variation structurale d'un échantillon de sol en cours de séchage. Elles ont pour but de délimiter et quantifier les différents volumes structuraux et fonctionnels qui entrent en jeu dans ce modèle, et que nous présentons ci-après, en nous référant à la représentation schématique qui en est donnée figure 4.

3.1. Représentation et notations des éléments du modèle

La figure 4 représente deux niveaux d'organisation hiérarchisés, micro- et macroscopique, où sont figurés les volumes structuraux qui les composent. Ces différents volumes sont tous rapportés à la masse de toute

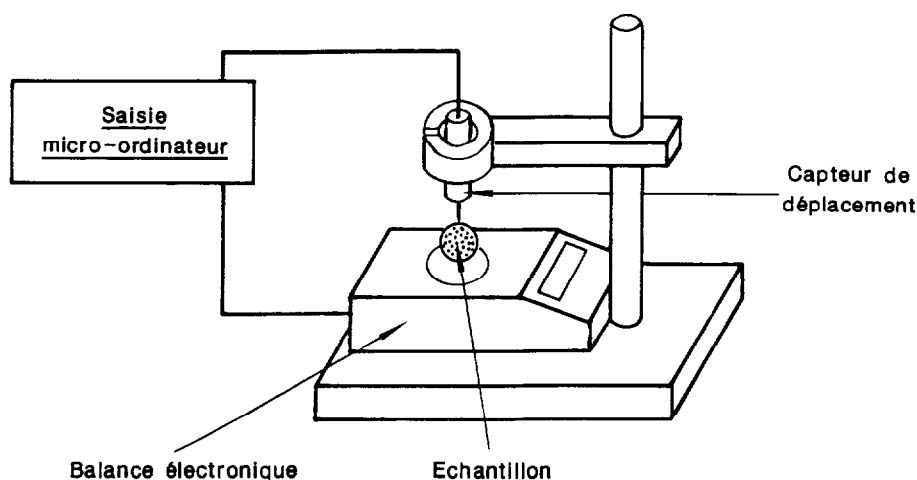


FIG. 3. — Appareillage utilisé pour mesurer la rétraction d'échantillons de sol non remaniés en fonction de la teneur en eau

la phase solide de l'échantillon, et sont exprimés en cm^3/g ; ce sont par conséquent des variables intensives, caractéristiques de chacun des niveaux :

a) Au niveau microscopique, on a :

— V_{mi} , qui représente le volume des pores du système micro, et est appelé *volume poral micro*.

— w_i , le volume d'eau occupant la microporosité, ou *teneur en eau micro* ;

b) Au niveau macroscopique :

— (V_{mi}) représente le volume occupé par le système microscopique dans le système macro.

— V_{ma} , le volume des vides extérieurs au système micro, ou *volume poral macro*.

— w_a , le volume dans la macroporosité, ou *teneur en eau macro*.

La phase solide, de volume massique V_s , se situe en partie au niveau micro (plasma argileux), et en partie au niveau macro (limons sables).

3.2. Enoncé des hypothèses de départ et implications

1° Il existe un *système poral microscopique*, appelé (V_{mi}) , constituant l'un des volumes fonctionnels

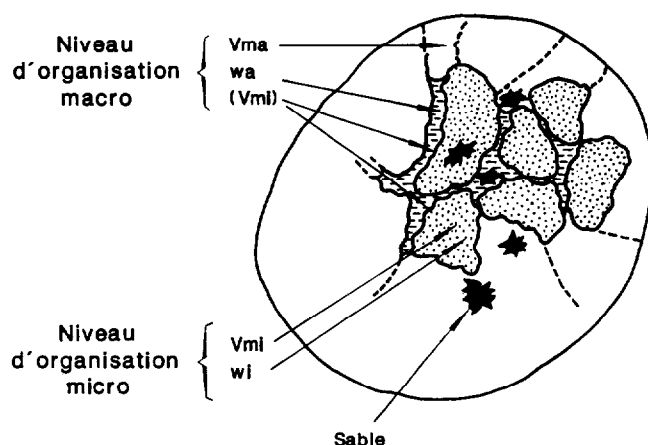


FIG. 4. — Représentation schématique de la structure du sol et de ses volumes structuraux

responsables du retrait global de l'échantillon, et dont le point d'entrée d'air est en B sur la courbe de retrait, point de transition entre les deux phases de retrait normal et résiduel.

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

3° Le volume global de l'échantillon est fonction linéaire des volumes fonctionnels responsables du retrait au niveau macroscopique ; en l'occurrence : (V_{mi}) et w_a .

La 1^{re} hypothèse définit qualitativement un volume fonctionnel homogène (V_{mi}). On peut l'identifier au système microorganisé des argiles, M.O., et autres éléments très fins, constituant ce que certains auteurs appellent le *plasma argileux* (PEDRO 1987). Celui-ci répond en fait au modèle de SPOSITO et GIRALDEZ (fig.2), puisqu'il reste saturé jusqu'en B, avec une constante de retrait $d(V_{mi})/dwi = dV_{mi}/dwi = 1$.

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 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 , qui correspond au volume d'eau extérieur à (V_{mi}). Sachant que $d(V_{mi}) = dV_{mi}$, cette relation peut être mise sous la forme :

$$dV/dw = K1.dV_{mi}/dw + K2.dw_a/dw$$

4. CONFRONTATION DU MODÈLE AVEC LES DONNÉES OBSERVÉES

On considère successivement les deux portions : C-A et F-C de la courbe de retrait (fig. 1).

4.1 Equation de la partie C-A de la courbe de retrait

DÉFINITION DE LA CONSTANTE DE RETRAIT K_r

On peut observer sur toutes les courbes étudiées, une partie rectiligne C-B correspondant à la phase de retrait maximum, et dont la pente, appelée *constante de retrait*, est notée K_r . Cela se traduit par la relation (hypothèses 1 et 3) :

$$dV/dw = K_r = K1.dV_{mi}/dw + K2.dw_a/dw = K1.dwi/dw + K2.dw_a/dw$$

Or par définition, $dw = dw_i + dw_a$, ce qui entraîne que dw_a/dw et dwi/dw sont également constants au cours de cette phase, et respectivement égaux à 0 et 1, valeurs obtenues en B d'après l'hypothèse 2. Cela veut dire que la macroporosité V_{ma} , est entièrement vide d'eau dans toute cette partie (C-B) de la courbe, et donc que $dw_a = 0$ et $dw = dw_i = dV_{mi}$. C'est pourquoi, on peut écrire, en accord avec la troisième hypothèse :

$$dV/dw = K_r = K1.dV_{mi}/dw = K1$$

K_r est donc identifié à la dérivée partielle de V par rapport à (V_{mi}) ; et on a, dans cette partie C-A de la courbe où $dw_a = 0$ la relation suivante entre V et (V_{mi}) :

$$dV = K_r.d(V_{mi}) = K_r.dV_{mi} \quad (1)$$

RECHERCHE DE L'ÉQUATION $V = f(w)$ ENTRE LES POINTS B ET A

Posons $x.dw$, la fraction de l'eau sortant de l'échantillon, responsable du retrait du système microorganisé (V_{mi}) :

$dV_{mi} = x.dw$, et l'équation (1) s'écrit :

$dV = K_r.x.dw$ (2), où x est une fonction paramétrique qui ne dépendrait, d'après l'hypothèse de SPOSITO et GIRALDEZ, que des points A et B. On trouve effectivement un très bon ajustement de cette partie de la courbe, en prenant :

$x = 1$, entre les points C et B ; et

$x = (\exp(w_n) - 1) / (e - 1)$ (3), dans l'intervalle B-A, où w_n est la teneur en eau normalisée :

$w_n = (w - w_A) / (w_B - w_A)$ (4).

Cela donne, après intégration de (2), l'équation paramétrique suivante de V fonction de w_n concernant la phase de retrait B-A :

$V - V_B = K_r.(w_B - w_A).(\exp(w_n) - w_n - e + 1) / (e - 1)$ (5), et la forme normalisée de V :

$V_n = (V - V_A) / (V_B - V_A) = (\exp(w_n) - w_n - 1) / (e - 2)$ (6).

Par ailleurs, en faisant $w_n = 0$ dans l'équation (5), on obtient une relation générale entre K_r et les coordonnées des points A et B :

$K_r = (V_B - V_A) / (w_B - w_A) \times (e - 1) / (e - 2)$ (7).

Un exemple d'ajustement de V_n (équ. 6) est donné à la figure 5.

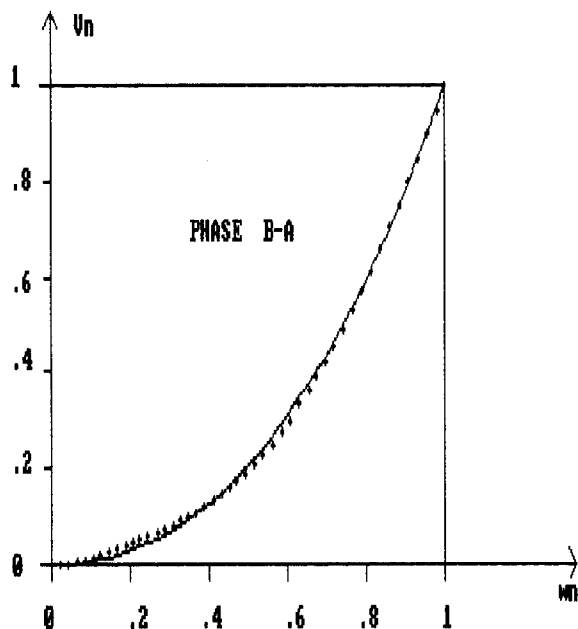


FIG. 5. — Courbes $V_n = f(w_n)$ calculée (trait plein) et observée (croix) concernant la phase de retrait B-A ; (MSBA-BA)

4.2. Partie F-C de la courbe de retrait

DÉFINITION DE K_0 , CONSTANTE DE RETRAIT MACRO

On observe également dans la partie F-C de toutes

les courbes étudiées, une première phase de rétraction faible ou nulle F-E, dont la pente est constante et notée K_0 :

$K_0 = (V_E - V_F) / (w_E - w_F)$.

Répétant le raisonnement précédent tenu à propos de K_r , l'hypothèse 3 s'exprime par la relation :

$dV = K_r.dV_{mi} = K_0.dw_a$ (8),

où l'on a substitué K_0 à K_2 , K_2 étant déterminé au cours de la phase rectiligne F-E de pente K_0 , où dV/dw et dW/dw sont constants, égaux respectivement à 0 et 1 (valeurs connues en F). K_0 se présente donc comme la dérivée partielle de V par rapport à w_a .

RECHERCHE DE L'EQUATION $V = f(w)$ ENTRE LES POINTS E ET C

En posant comme précédemment $x.dw$, la fraction de l'eau sortant de l'échantillon, responsable du retrait de (V_{mi}), on a :

$dW_i = x.dw = dV_{mi}$, $dW_a = (1 - x) dw$; et l'équation 8 devient :

$dV = K_r.x.dw + K_0(1 - x) dw$ (9),

avec $x = 0$ entre les points F et E, puisque $dV_{mi}/dw = dW_i/dw = 0$ dans cette phase.

En prenant pour x , dans la phase E-C, la même équation que celle utilisée précédemment dans la phase B-A :

$x = (\exp(w_n) - 1) / (e - 1)$, avec $w_n = (w - w_E) / (w_C - w_E)$, on obtient dans ce cas également, pour la phase E-C, un très bon ajustement de V_n (ex. fig.6), qui s'obtient par intégration de (9) :

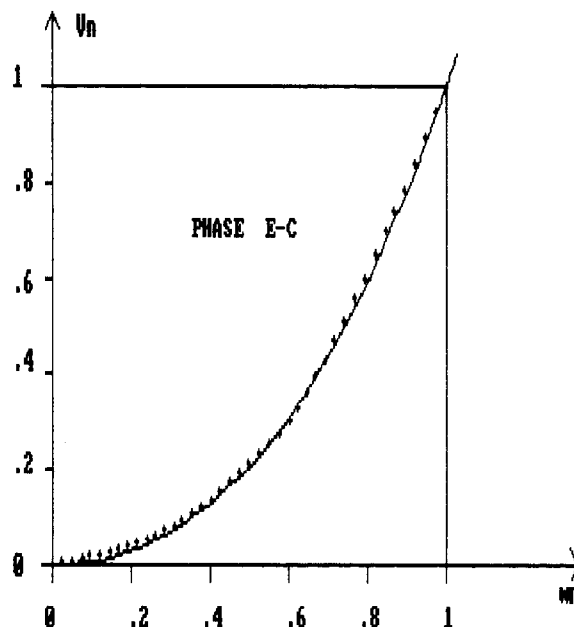


FIG. 6. — Courbes $V_n = f(w_n)$ calculée (trait plein) et observée (croix) concernant la phase de retrait E-C ; (MSBA-BA)

$$V_n = (V-VE) / (VC-VE) \\ = (Kr (\exp(w_n) - w_n - 1) + Ko (e \cdot w_n - \exp(w_n) + 1) / (Kr \cdot (e-2) + Ko) \quad (10)$$

Et les constantes de retrait Ko et Kr sont reliées aux points E et C par la relation :

$$Kr - Ko / (e-2) = (VE-VC) / (wE-wC) \times (e-1) / (e-2) \quad (11)$$

5. VALIDITÉ ET PROPRIÉTÉS DU MODÈLE

Le tableau II résume la démarche qui a été suivie pour obtenir la formulation complète de la courbe de

retrait. Celle-ci peut être donnée sous forme de l'équation différentielle (8) :

$$dV = Kr \cdot dV_{mi} + Ko \cdot dwa \quad (8), \\ \text{avec } dV_{mi} = x \cdot dw, \quad x \text{ étant la fonction paramétrique continue explicitée dans le tableau III.}$$

Les conditions aux limites sont toutes représentées sur la figure 7, et correspondent aux caractéristiques des différentes phases de retrait.

Validité du modèle

Elle est attestée, dans le cas de nos échantillons de texture et structure différentes, par les très bons

TABLEAU II
Schéma de la démarche utilisée pour l'élaboration du modèle et sa formulation mathématique

HYPOTHESES	+ FAITS OBSERVES	==>	MODELE
1° B est le point d'entrée d'air dans (V_{mi})	C-B rectiligne	==>	$wa = 0$ à partir de C $Kr = \frac{dV}{dV_{mi}}$
2° $V_{mi} = w$ au point B	F-E rectiligne	==>	$dwi = 0$ de F à E $Ko = \frac{dV}{dwa}$
3° V est fonction linéaire de (V_{mi}) et wa	E-C courbe expon.	==>	$x = \frac{dV_{mi}}{dw} = \frac{(e^{wn} - 1)}{(e - 1)}$
	B-A courbe expon.	==>	$x = \frac{dV_{mi}}{dw} = \frac{(e^{wn} - 1)}{(e - 1)}$

TABLEAU III
Valeurs de x et wn dans chaque phase de retrait

PHASES DE RETRAIT:	F-E	E-C	C-B	B-A	A-->
x =	0	$\frac{e^{wn} - 1}{e - 1}$	1	$\frac{e^{wn} - 1}{e - 1}$	0
$wn =$		$\frac{w - wE}{wC - wE}$		$\frac{w - wA}{wB - wA}$	

ajustements des parties E-C et B-A de la courbe de retrait, obtenus avec les équations (6) et (10) donnant V_n fonction de w_n . Ces ajustements sont évalués par la moyenne des carrés des écarts, que l'on peut observer inférieure à 4.10^{-4} dans tous les cas

de sol argileux et sablo-argileux étudiés (tabl. IV).

Propriétés du modèle

D'après ce qui précède, la courbe de retrait est entièrement déterminée par la position des cinq points

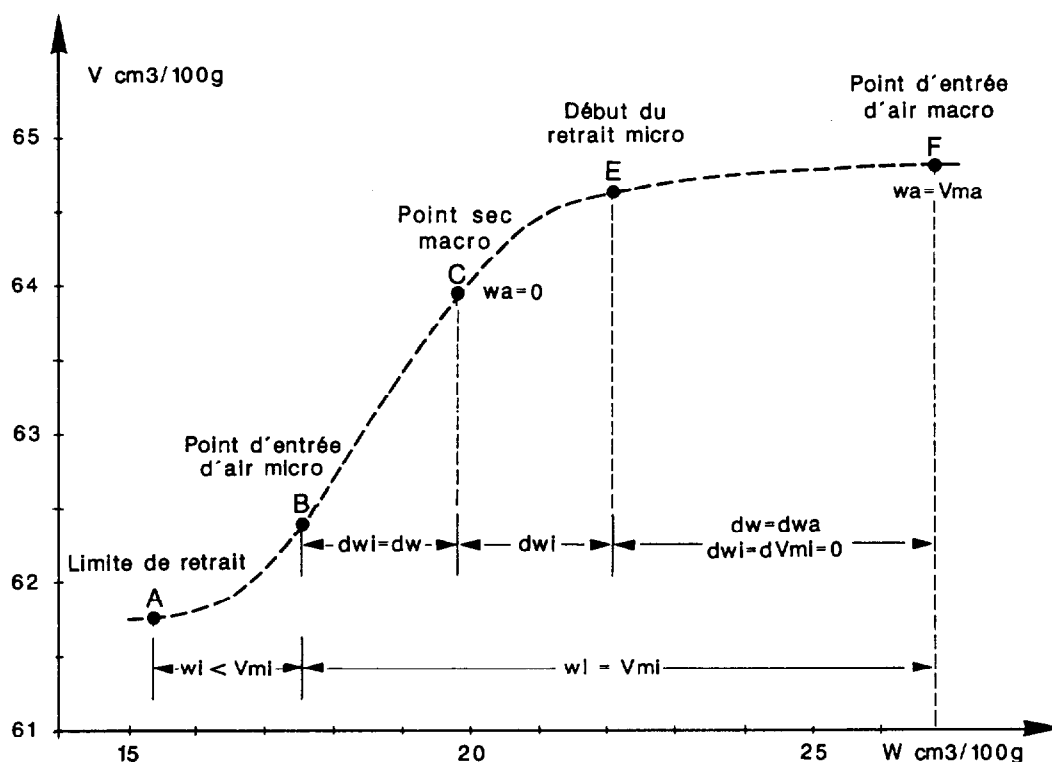


FIG. 7. — Représentation des caractéristiques des différentes phases de retrait

TABLEAU IV
Moyennes des carrés d'écart entre les valeurs calculées et observées de V_n ,
au cours des phases E-C et B-A

ECHAN- TILLONS	PHASE E-C		PHASE B-A	
	M.C.E. $\times 10^{-4}$	nbre de points	M.C.E. $\times 10^{-4}$	nbre de points
LOH2 A	2.00	153	2.57	58
" AB	3.32	39	3.27	33
" BA	1.06	37	1.47	26
TNZI A	1.63	124	2.12	53
" AB	0.81	34	1.24	35
MSBA A	1.79	42	4.28	38
" AB	1.08	27	1.24	48
" BA	0.78	41	1.06	46
AGRI A	3.42	87	2.21	69
" AB	0.86	84	3.09	55
" BA	0.62	75	2.05	39

particuliers : A, B, C, E, F, et donc par les dix coordonnées de ces points. Mais comme il existe deux équations, ((7) et (11)), liant ces coordonnées, le nombre de paramètres nécessaires et suffisants au tracé de la

courbe de retrait est ramené à huit. Par conséquent, une série de huit variables indépendantes, prises parmi les coordonnées des cinq points précédents, permet de calculer, pour chaque teneur en eau, tous les volumes

structuraux de l'échantillon tels qu'ils ont été définis au départ (V , V_{mi} , V_{ma} , V_s , (V_{mi}) , w_i ...). Les équations de ces différentes variables sont don-

nées dans le tableau V ; et un exemple de leur représentation graphique est présenté aux figures 8 et 9.

TABLEAU V
Equations des volumes poreux et teneurs en eau micro et macro, dans les différentes phases de retrait ; avec $y = \frac{e^{wn} - wn - e - i}{e - 1}$

PHASES DE RETRAIT	F-E	E-C	C-B	B-A	A-->
$w_i =$	$\frac{wE(e-2) + wC}{e-1}$	$y(wC - wE) + wc$	w	w	w
$V_{mi} =$	$\frac{wE(e-2) + wC}{e-1}$	w_i	w	$y(wB - wA) + wB$	$\frac{wA(e-2) + wB}{(e-1)}$
$w_a =$	$w - w_i$	$w - w_i$		$w - w_i$	$w - w_i$
$V_{ma} =$	$V - V_{mi}$	$V - V_{mi}$		$V - V_{mi}$	$V - V_{mi}$

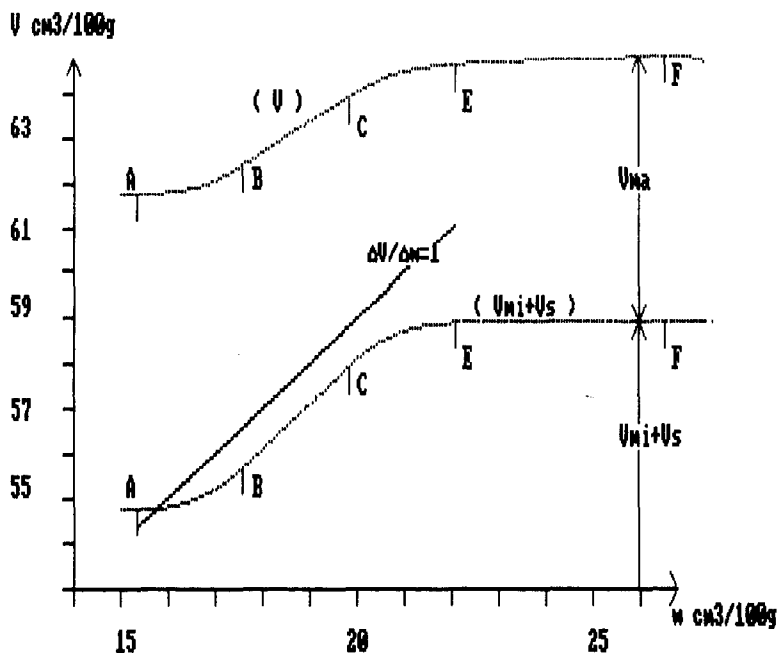


FIG. 8. — Volume massique V , et volume poral micro V_{mi} d'un échantillon de sol en fonction de la teneur en eau. (MSBA-BA)

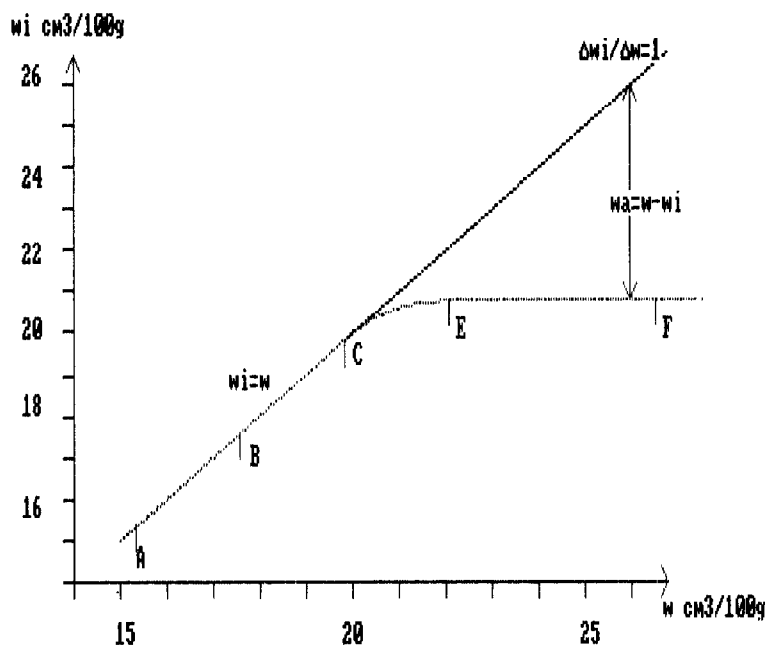


FIG. 9. — Teneurs en eau (w_i et w_a) dans la micro et la macroporosité, en fonction de la teneur en eau de l'échantillon. (MSBA-BA)

6. UNE CONSÉQUENCE FONDAMENTALE DE CE TYPE D'APPROCHE : LA DESCRIPTION PÉDO-HYDRIQUE D'UN VOLUME DE SOL

Dans la mesure où un volume de sol satisfait au modèle présenté ici, et par conséquent où l'ensemble de son comportement structural avec l'eau est entièrement décrit par 8 paramètres indépendants, on peut le représenter par un point dans un espace de dimension 8, dont les vecteurs propres sont choisis parmi les coordonnées des points de transition de phase dont il a été question plus haut. Cela implique que toute variable utilisée pour décrire et caractériser quantitativement la structure fonctionnelle du sol, doit nécessairement être une combinaison linéaire de ces paramètres, pour avoir une signification conceptuelle cohérente et claire, d'un aspect ou un autre de cette structure. Ce qui veut dire que le formalisme pédologique, qui sera élaboré pour décrire, classer, et quantifier correctement le fonctionnement structural d'un volume de sol, devra obligatoirement être défini dans cet espace d'observation de dimension 8. Un exemple de ce nouveau formalisme a été proposé dans un article précédent, (BRAUDEAU, 1988), où la terminologie employée habituellement en physique des sols a pu être avantageusement redéfinie d'après ce principe, sans contradiction de sens, pour

correspondre à des données quantifiables. On peut citer en exemple la redéfinition des termes de réserves en eau :

$RE = (w_E - w_B)$; $RFU = (w_E - w_C) / (e-1)$; $REU = w_E - w_B - (w_E - w_C) / (e-1)$, de teneur en eau à la capacité de rétention : w_E ; d'agrégats fonctionnels (V_{mi})...

Comme il s'agit d'un espace descriptif du fonctionnement structural du sol avec l'eau, nous proposons d'appeler cet espace, *espace de description pédo-hydrrique du sol*.

En pratique, les points particuliers A, B, C, E, F, sont tout d'abord localisés graphiquement sur la courbe expérimentale, puis déterminés avec précision par optimisation de l'ajustement entre la courbe calculée et les points observés ; cela permet d'obtenir des valeurs très précises des huit paramètres du retrait (coordonnées des points de transition), et donc de toutes les variables qui en résultent, sans avoir à tenir compte du « coup de main » de l'opérateur. Ensuite, il est possible de choisir, par rapport au problème posé, une série de variables indépendantes, définies dans l'espace de description pédo-hydrrique du sol. Le tableau VI donne en exemple, pour quatre types de sol, la valeur de huit variables pédo-hydrriques indépendantes, dont la

TABLEAU VI
Valeurs de huit paramètres pédo-hydrauliques indépendants du sol, déduits des paramètres caractéristiques de la courbe de retrait

ECHAN- TILLONS	VA cm ³ /g	WA cm ³ /g	WB cm ³ /g	WC cm ³ /g	WE cm ³ /g	WF cm ³ /g	Kr	Ko
LOH2 A	0.746	20.49	24.62	25.15	36.03	51.05	0.73	0.069
" AB	0.713	23.03	25.24	27.34	30.08	37.32	1.06	0.018
" BA	0.728	23.83	25.63	27.45	30.46	38.40	1.08	0.021
TNZI A	0.749	16.83	20.24	21.81	30.61	39.71	0.51	0.013
" AB	0.665	19.22	21.44	23.29	25.95	31.29	0.80	0.
MSBA A	0.589	13.80	16.09	18.71	21.31	24.33	0.67	0.18
" AB	0.585	14.86	16.96	20.05	21.42	23.28	0.64	0.14
" BA	0.617	15.34	17.59	19.83	22.06	26.69	0.69	0.046
AGRI A	0.613	5.42	8.64	9.90	14.90	24.95	0.37	0.018
" AB	0.611	8.01	11.08	12.71	17.48	25.09	0.47	0.
" BA	0.616	8.46	10.39	12.15	16.13	24.60	0.42	0.

signification simple a déjà été précisée dans le modèle (fig. 7). Dans ce cas particulier, leur suivi au cours du temps permettra une évaluation précise et significative de la dégradation ou au contraire de l'amélioration de la structure du sol dans différents systèmes de culture.

CONCLUSION

En fin de compte, les courbes de retrait obtenues sur des sols ferrallitiques de texture diverses, caractérisent globalement et complètement la structure fonctionnelle d'un volume pédologique, homogène à l'échelle de l'observateur. On a montré en effet que les courbes de

retrait sont entièrement expliquées lorsque l'on conçoit cette structure fonctionnelle comme étant constituée de deux systèmes d'organisation (Vmi) et (V), inclus l'un dans l'autre en deux niveaux d'observation hiérarchisés micro- et macroscopique ; le premier système (Vmi), étant élément fonctionnel du deuxième.

Un volume de sol peut alors être décrit et caractérisé de façon cohérente et quantitative dans un espace descriptif de dimension 8, appelé espace de description pédo-hydraulique du sol.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 10 mai 1989

BIBLIOGRAPHIE

- BRAUDEAU (E.), 1987. — Mesure automatique de la rétraction d'échantillons de sol non remaniés. *Sci. du Sol*, 25/2 : 85-93.
- BRAUDEAU (E.), 1988. — Essai de caractérisation quantitative de l'état structural d'un sol basé sur l'étude de la courbe de retrait. *Cr. Ac. Sci. Paris*, t.307, SII : 1933-1936.
- GIRALDEZ (J.V.), SPOSITO (G.), DELGADO (C.), 1983. — A general volume change equation : I. The two parameter model ; II. Effect of load pressure. *Sci. Am. J.*, 47 : 419-422 ; 422-425.
- McGARRY (D.) et DANIELLS (I.G.), 1987. — Shrinkage curve indices to quantify cultivation effects on soil structure of a vertisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51 : 1575-1580.
- McGARRY (D.) et MALAFANT (K.W.J.), 1987. — The analysis of volume change in unconfined units of soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51 : 290-297.
- PEDRO (G.), 1987. — Géochimie, minéralogie et organisation des sols. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, Vol. XXIII, n° 3 : 169-186.
- SPOSITO (G.), 1975. — Steady vertical flows in swelling soils. *Wat. Resour. Res.* 11 : 461-464.
- SPOSITO (G.) et GIRALDEZ (J.V.), 1976. — Thermodynamic stability and the law of corresponding states in swelling soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40 : 352-358.