

# INFLUENCE DU SQUELETTE SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLS : HYDRATATION, GONFLEMENT ET AERATION

J. CHRETIEN<sup>1</sup> et D. TESSIER<sup>2</sup>

avec la collaboration technique d'O. MUNIER<sup>1</sup>

## RESUME

*Une séquence de sols développés sur les terrasses alluviales de la Saône présentant une gamme de variation granulométrique entre un pôle sableux et un pôle limoneux sert de cadre à une étude sur le comportement physique des matériaux naturels.*

*Les caractéristiques physiques globales, telles que volume poral, spectre poral, contenu en eau et en air sont successivement analysées, mettant en évidence le rôle primordial de la granulométrie du squelette et l'importance de la phase argileuse qui lui est associée. Il en ressort, en particulier, que les sables grossiers qui ne peuvent, en aucun cas, être considérés comme un matériau rigide, présentent un comportement tout à fait singulier avec une phase de retrait en début d'humectation. L'argile, quant à elle, associée aux différents éléments du squelette, joue un rôle direct sur la rétention de l'eau. Toutefois, pour ce qui est du gonflement et de l'aération, c'est la granulométrie du squelette qui constitue le facteur le plus important à prendre en compte dans les matériaux peu argileux.*

**MOTS-CLES : Granulométrie - Porosité - Comportement hydrique - Gonflement - Aération.**

## INTRODUCTION

Les phénomènes de gonflement-retrait et de structuration des sols ont surtout été analysés dans le cas des sols argileux (TESSIER, 1984 ; BRUAND, 1986 ; HALLAIRE, 1987 ; Mc GARRY et DANIELLS, 1987). S'agissant des sols limoneux et sableux, les études ont souvent été limitées à la caractérisation du seul comportement hydrique à partir de mesures au champ et au laboratoire (PETERSEN et al., 1968 ; RATLIFF et al., 1983), ou en utilisant des modèles statistiques prévisionnels (MENG et al., 1987). Bien qu'il y ait eu de nombreux travaux sur la porosité considérée comme caractéristique globale du système (FIES, 1978 et 1984 ; CHRETIEN, 1979 et 1986), la mise en évidence des changements intervenant au cours de l'humectation, aussi bien au niveau du spectre poral que du contenu en eau reste très limité (VAN OORT, 1984). Ces résultats ont le plus souvent été obtenus sur des mélanges sable-argile ou limon-argile au cours d'études expérimentales en première dessiccation destinées à caractériser le phénomène de fissuration (STENGEL, 1981), et non sur des échantillons de terrain non perturbés.

L'objet de ce travail est de montrer à partir de l'étude de matériaux naturels de granulométrie variée mais toujours fortement marqués par la présence d'un

(1) INRA - SESCOF. Station d'Agronomie, 17, rue Sully, 21034 Dijon Cédex.

(2) INRA. Station de Science du Sol, route de Saint-Cyr, 78000 Versailles.

squelette sableux ou limoneux, l'évolution des caractéristiques physiques globales, telles que volume poral, spectre poral, contenu en eau et en air en fonction de leurs caractéristiques granulométriques. Ceci devrait permettre de généraliser les résultats obtenus à l'ensemble des matériaux naturels d'origine détritique, et en particulier à ceux qui résultent d'une mise en place de nature hydraulique comme les alluvions (CHRETIEN, 1986).

## I. MATERIAUX ETUDIES

Les matériaux utilisés pour conduire cette étude sont issus de deux séquences de sols développés sur les terrasses alluviales de la Saône. L'une d'entre elles située à proximité de Seurre a fait l'objet d'une longue présentation dans deux publications récentes (CHRETIEN, 1986 ; CHRETIEN et PEDRO, 1987). Elle comporte 5 profils-types, appartenant à la classe des sols brunifiés et présente une gamme de variation granulométrique entre un pôle sableux et un pôle limoneux qui nous a semblé tout à fait intéressante pour conduire une recherche sur les relations granulométrie-comportement physique des matériaux naturels. Leurs caractéristiques granulométriques figurent au tableau 1.

**Tableau 1 : Caractéristiques granulométriques des sols de la séquence de SEURRE.**  
*Particle size characteristics from the soils of the SEURRE sequency.*

Type de sol	Matériau	Horizon	Echantillon	Prof. en cm	Granulométrie %					Texture
					SG	SF	LG	LF	A	
<b>SEURRE 1</b>										
Sol brun faiblement lessivé	Sable	Ap	S <sub>11</sub>	0-25	51,2	27,9	7,9	7,4	5,6	S
		A <sub>12</sub>	S <sub>12</sub>	25-50	54,9	28,5	6,6	6,1	3,9	SS
		A <sub>21</sub>	S <sub>13</sub>	50-70	62,2	26,3	3,6	3,4	4,5	SS
		A <sub>22</sub>	S <sub>14</sub>	70-90	62,2	30,2	3,5	2,3	1,8	SS
		B <sub>1</sub>	S <sub>15</sub>	90-120	40,5	25,6	7,9	13,4	12,6	Sa
<b>SEURRE 2</b>										
Sol brun lessivé	Sable limoneux	Ap	S <sub>21</sub>	0-30	27,7	34,6	18,1	11,2	8,4	S1
		A <sub>2</sub>	S <sub>22</sub>	30-50	29,2	38,5	12,2	11,7	8,4	S
		A <sub>3</sub>	S <sub>23</sub>	50-70	23,6	33,9	17,7	14,8	10,0	S1
		B <sub>1</sub>	S <sub>24</sub>	70-90	20,3	28,1	20,0	13,6	18,0	Sal
		B <sub>21</sub>	S <sub>25</sub>	90-100	16,2	29,1	18,9	14,8	21,0	Sal
<b>SEURRE 3</b>										
Sol lessivé	Limon sableux	Ap	S <sub>31</sub>	0-27	14,6	33,5	29,3	15,7	6,9	LS
		A <sub>2</sub>	S <sub>32</sub>	27-55	21,3	28,1	20,4	18,9	11,3	Lsa
		A <sub>2B<sub>0</sub></sub>	S <sub>33</sub>	55-75	19,9	25,2	19,7	19,3	15,9	Lsa
		B <sub>1<sub>0</sub></sub>	S <sub>34</sub>	75-90	18,0	24,6	19,3	16,9	21,2	Lsa
		B <sub>1<sub>0</sub></sub>	S <sub>35</sub>	90-110	18,0	25,1	18,8	17,0	21,1	Lsa
<b>SEURRE 4</b>										
Sol lessivé	Limon	Ap	S <sub>41</sub>	0-28	11,2	28,0	27,0	23,3	10,5	LS
		A <sub>2<sub>0</sub></sub>	S <sub>42</sub>	28-45	9,4	23,2	25,3	25,0	17,1	Lsa
		A <sub>2B<sub>0</sub></sub>	S <sub>43</sub>	45-70	9,9	20,0	24,1	28,2	17,8	Lsa
		B <sub>21<sub>0</sub></sub>	S <sub>44</sub>	70-90	6,2	8,2	14,8	42,8	28,0	Lsa
		B <sub>3<sub>0</sub></sub>	S <sub>45</sub>	90-110	10,1	14,9	26,7	25,4	22,9	Lsa
<b>SEURRE 5</b>										
Sol lessivé	Limon Argile	Ap	S <sub>51</sub>	0-25	6,2	23,3	23,4	31,5	15,6	Lsa
		A <sub>2<sub>0</sub></sub>	S <sub>52</sub>	25-40	8,5	18,6	19,4	33,6	19,9	Lsa
		IIB <sub>1<sub>0</sub></sub>	S <sub>53</sub>	40-50	1,8	14,5	20,1	24,6	39,0	Als
		IIB <sub>21<sub>0</sub></sub>	S <sub>54</sub>	50-95	3,2	10,0	17,9	25,8	43,1	A
		IIB <sub>3<sub>0</sub></sub>	S <sub>55</sub>	95-110	5,3	12,1	18,3	25,5	38,8	Als

Parmi l'ensemble des horizons de ces cinq sols à caractère lessivé, nous avons choisi d'étudier plus particulièrement, deux séries d'horizons-types dont les matériaux serviront de référence tout au long de cette étude :

- les horizons A<sub>2</sub> sous-culturaux (S<sub>12</sub>, S<sub>32</sub>, S<sub>42</sub>, S<sub>52</sub>) où, le taux d'argile étant toujours faible, de même que celui de matière organique, le squelette sableux et/ou limoneux joue un rôle prépondérant ;
- les horizons B<sub>t</sub> plus profonds (S<sub>15</sub>, S<sub>24</sub>, S<sub>34</sub>, S<sub>44</sub>, S<sub>55</sub>) dans lesquels le rôle du squelette s'estompe ou profite de celui du plasma argileux.

## II. METHODE UTILISEE

### A) Principe

Pour mener à bien cette approche expérimentale, une technique de laboratoire mise au point par l'un de nous (TESSIER et BERRIER, 1979) dans le cadre de ses recherches sur l'organisation microstructurale des matériaux argileux a été utilisée. Elle s'appuie sur un dispositif de filtration qui permet de soumettre des échantillons de sols à des contraintes hydriques matricielles connues (croissante ou décroissante) de 0,01 bar (pF1) jusqu'à 1 bar (pF 3). En conséquence, la gamme des pF supérieurs à 3 n'a pas été étudiée excepté pF 5,8 (séchage à l'air). Sur chacun de ces échantillons et pour un pF donné, nous avons pu mesurer la teneur en eau et le volume apparent après enrobage au vernis (MAERTENS, 1965).

Les résultats sont représentés par des courbes d'indice des vides et d'indice d'eau en fonction des variations de contraintes. Cette expression des résultats de porosité en indice des vides ( $e$ ) et de ceux d'humidité en indice d'eau ( $\theta$ ) offre un certain nombre d'avantages (TESSIER, 1984) ; elle permet en particulier de porter ces deux données sur un même graphique et de visualiser ainsi à tous les niveaux de contraintes hydriques, la part de la porosité occupée par l'eau et celle qui reste ouverte à l'air (Fig. 1).

Nous avons pu aussi définir un indice de gonflement des matériaux :

$$I_g = \frac{\Delta e}{1 + e}$$

où  $e$  est l'indice des vides à pF 5,8 et  $\Delta e$  la différence entre l'indice des vides à pF1 (après réhumectation) et à pF 5,8 (avant réhumectation).

### B) Conditions d'application

Les mesures ont été réalisées sur des mottes naturelles, non remaniées d'un volume proche de 4 à 5 cm<sup>3</sup>. Cette taille s'avère suffisante pour des mesures de porosité et l'établissement de courbes de rétention d'eau aux faibles pF (CHRETIEN, 1986). Les échantillons ont été préalablement séchés à l'air puis réhumectés progressivement jusqu'à l'équilibre correspondant au niveau de contrainte choisi. Chaque point sur les courbes a fait l'objet de 5 répétitions. La précision des mesures obtenues à partir de 750 échantillons (25 matériaux testés à 6 valeurs de pF) est de 1,5 point pour l'indice d'eau et de 2 points pour l'indice des vides. Les courbes qui vont être présentées dans ce travail sont donc des courbes de réhumectation et de gonflement obtenues après séchage à l'air. De même, l'étude du spectre poral a été réalisée sur des mottes séchées à l'air en utilisant un porosimètre à mercure Carlo Erba (CHRETIEN, 1986).

### III. COMPORTEMENT PHYSIQUE DES MATERIAUX

Les résultats d'indice d'eau et d'indice des vides relatifs à l'ensemble des matériaux de la séquence de Seurre figurent au tableau II, mais nous focaliserons notre attention sur ceux qui concernent plus particulièrement les deux séries d'horizons  $A_2$  et  $B_1$ . Les courbes représentant sur un même graphique l'évolution comparée de l'indice d'eau et de l'indice des vides au cours de la réhumectation sont présentées sur la figure 1. Un examen comparatif de ces 5 couples de graphiques nous amène à distinguer globalement 3 types de comportement correspondant à trois familles de sols (JAMAGNE, 1967).

**Tableau II : Valeurs de l'indice d'eau ( $\theta$ ) et de l'indice des vides ( $e$ ) pour l'ensemble des horizons.**

*Values of water ratio ( $\theta$ ) and void ratio ( $e$ ) from the horizons.*

pF	1		1,5		2		2,5		3		5,8	
	$\theta$	$e$	$\theta$	$e$	$\theta$	$e$	$\theta$	$e$	$\theta$	$e$	$\theta$	$e$
<b>SEURRE 1</b>												
S <sub>11</sub>	40,8	53,7	32,2	51,9	25,2	46,8	11,2	40,8	11,6	40,9	2,1	50,5
S <sub>12</sub>	31,5	54,8	23,5	50,5	13,3	43,9	11,5	43,2	12,3	44,2	1,6	51,7
S <sub>13</sub>	36,5	57,1	26,5	48,0	19,4	46,6	11,7	41,7	10,1	43,7	1,6	59,5
S <sub>14</sub>	44,7	64,1	22,4	48,3			12,1	42,2	6,7	43,6	1,7	59,7
S <sub>15</sub>	41,3	53,2	33,7	44,5	25,8	42,7	22,7	42,0	16,4	40,2	3,0	43,6
<b>SEURRE 2</b>												
S <sub>21</sub>	41,0	49,2	31,3	45,0	24,5	42,3	20,8	40,6	12,9	39,5	1,0	39,1
S <sub>22</sub>	43,6	50,5	30,5	47,2	29,5	45,6	21,4	38,8	12,7	38,9	2,1	38,4
S <sub>23</sub>	43,0	54,3	41,2	54,0	36,7	50,0	27,4	46,2	24,6	42,7	3,7	41,3
S <sub>24</sub>	44,5	56,3	41,6	51,2	33,1	48,7	30,6	45,4	27,8	41,7	4,8	39,6
<b>SEURRE 3</b>												
S <sub>31</sub>	48,5	55,7	35,8	55,4	33,1	51,6	26,8	51,2	15,6	45,0	3,0	43,1
S <sub>32</sub>	42,9	54,9	41,1	54,3	35,6	49,7	25,4	49,6	16,1	43,4	2,9	43,9
S <sub>33</sub>	47,8	57,0	41,7	53,7	41,5	53,7	29,7	50,7	21,7	48,8	3,3	47,4
S <sub>34</sub>	53,7	61,7	43,8	56,0	37,9	55,8	32,5	51,4	22,9	46,4	6,0	46,2
S <sub>35</sub>	52,1	54,8	42,6	51,1	35,8	49,3	34,4	45,0	21,9	42,9	6,7	42,3
<b>SEURRE 4</b>												
S <sub>41</sub>	49,9	51,7	44,8	48,1	43,7	47,5	28,7	46,2	17,5	45,7	3,2	44,7
S <sub>42</sub>	54,3	58,4	49,0	54,8	39,9	49,8	33,4	48,2	28,2	48,3	2,8	47,9
S <sub>43</sub>	45,8	55,0	42,2	51,2	35,6	50,6	33,7	49,6	30,2	49,5	4,1	48,0
S <sub>44</sub>	57,5	59,1	52,0	57,4	45,6	56,7	42,4	48,9	33,5	45,2	9,1	42,0
S <sub>45</sub>	54,0	56,0	47,0	51,6	45,7	50,9	44,1	48,8	30,5	45,7	7,9	41,3
<b>SEURRE 5</b>												
S <sub>51</sub>	58,4	64,9	57,4	64,1	56,6	63,6	31,5	56,7	20,5	55,2	2,1	55,5
S <sub>52</sub>	54,3	60,0	49,1	58,6	46,3	58,0	31,1	50,7	19,5	49,1	2,5	49,6
S <sub>53</sub>	60,1	66,9	55,3	64,1	51,7	62,7	38,9	54,6	35,3	52,6	6,1	48,0
S <sub>54</sub>	67,5	73,1	58,9	64,9	57,8	65,8	44,4	61,0	43,6	56,9	8,1	48,6
S <sub>55</sub>	63,7	65,8	55,7	60,7	50,6	55,3	48,4	55,8	32,2	42,4	7,8	35,8

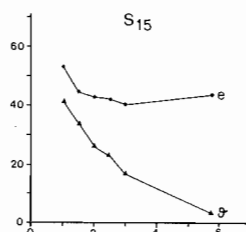
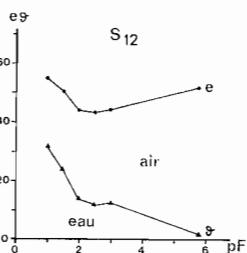
#### 1) Sols sableux : SEURRE 1

— Dans l'horizon  $A_2$  (S<sub>12</sub>), on observe trois phases : de pF 5,8 à pF 3 : l'humectation est assez faible, tandis que le matériau subit un net retrait ; puis de pF 3 à pF 2, c'est la stabilité, on ne constate pratiquement ni humectation, ni gonflement. Enfin de pF 2 à pF 1, l'humectation devient très importante et engendre également un net gonflement. Il apparaît donc que ce matériau gonfle très peu entre l'état sec (pF 5,8) et l'état le plus humide (pF 1). L'indice de gonflement  $I_g = \frac{\Delta e}{1 + e}$  est égal à 2 %. La porosité à l'air reste toujours très élevée, même à pF 1 où elle représente encore 42 % de la porosité totale.

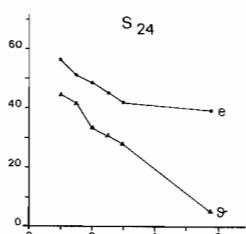
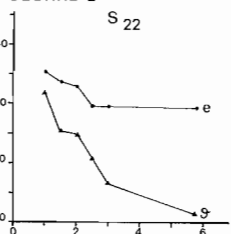
Horizons A<sub>2</sub>

Horizons B<sub>t</sub>

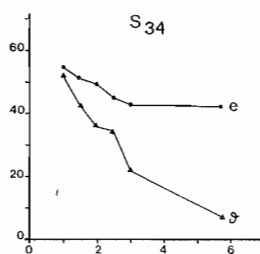
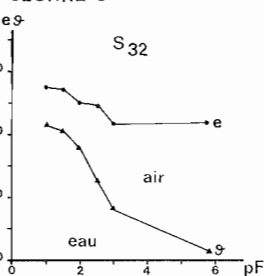
SEURRE 1



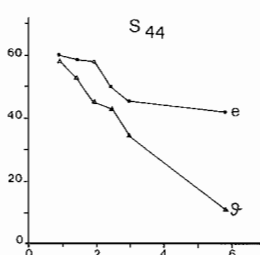
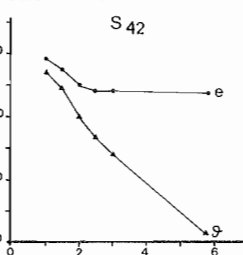
SEURRE 2



SEURRE 3



SEURRE 4



SEURRE 5

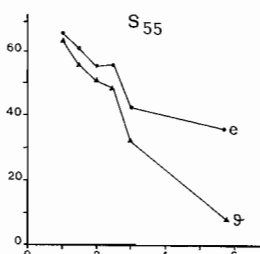
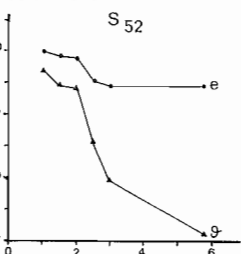


Figure 1 :

Evolution de l'indice d'eau ( $\theta$ ) et de l'indice des vides ( $e$ ) au cours de la réhumectation dans les horizons A<sub>2</sub> et B<sub>t</sub> des sols de la séquence de SEURRE.

Water ratio ( $\theta$ ) and void ratio ( $e$ ) evolution during the rewetting in the A<sub>2</sub> and B<sub>t</sub> horizons from the soils of the SEURRE sequency.

Ce comportement caractéristique est confirmé par les données du tableau 2 relatives aux matériaux sableux très pauvres en argile ( $S_{11}$  à  $S_{14}$ ).

— Dans l'horizon  $B_t$  ( $S_{13}$ ), à partir de pF 5,8, l'humectation est assez régulière, mais elle s'accroît davantage au-delà de pF 3. Parallèlement, on assiste à un léger retrait de pF 5,8 à pF 3, puis à un faible gonflement jusqu'à pF 1,5 qui s'accroît nettement ensuite. Le gonflement global est un peu plus élevé que dans l'horizon  $S_{12}$  ( $I_g = 6,7 \%$ ) et la porosité à l'air décroît progressivement : encore très élevée à pF 3 (59 %), elle devient beaucoup plus faible à pF 1 (23 %).

## 2) Sols sablo-limoneux et limono-sableux : SEURRE 2 et 3

Les horizons  $A_2$  ont, dans ces 2 sols, un comportement assez proche, avec une faible humectation et l'absence de gonflement de pF 5,8 à pF 3, une forte humectation et un léger gonflement de pF 3 ou 2,5 à pF 1. La porosité à l'air encore forte à pF 3 (67,3 % pour  $S_{22}$  et 62,8 % pour  $S_{32}$ ) décroît régulièrement ensuite pour devenir assez faible à pF 1 ; davantage pour  $S_{22}$  (13,6 %) que pour  $S_{32}$  (21,8 %). Globalement, le gonflement est du même ordre de grandeur ( $I_g = 8,7$  et 7,6 %).

Dans les horizons  $B_t$ , les courbes d'humectation diffèrent un peu. L'accroissement de teneur en eau est plus régulier pour  $S_{24}$  que pour  $S_{34}$ . Par contre, les courbes de gonflement sont très semblables. A pF 3, la porosité à l'air est nettement plus faible à  $S_{24}$  (33,3 %) qu'à  $S_{34}$  (50 %), tandis qu'à pF 1 c'est le contraire ; celle-ci reste relativement élevée pour  $S_{24}$  (21,7 %), mais devient très faible à  $S_{34}$  (5 %).

## 3) Sols limoneux et limono-argileux : SEURRE 4 et 5

Les horizons  $A_2$  sont caractérisés par une forte humectation, très régulière pour  $S_{42}$ , plus accusée en-dessous de pF 3 pour  $S_{52}$  et au contraire un gonflement réduit ( $I_g = 7,1$  et 6,9 %) qui ne débute qu'à pF 2,5 ou 2). Il en résulte que la porosité à l'air devient faible dans les deux cas, dès pF 2 (19,8 % pour  $S_{42}$  ; 16,7 % pour  $S_{52}$ ) et très faible à pF 1 (7 % à  $S_{42}$  et 9,5 % à  $S_{52}$ ).

Dans les horizons  $B_t$ , ce phénomène est encore beaucoup plus accusé. La porosité à l'air déjà très réduite à pF 2,5 (13,3 % pour  $S_{44}$ , 13,3 % à  $S_{55}$ ) devient presque nulle à pF 1 (2,7 % à  $S_{44}$ , 3,2 % à  $S_{55}$ ). De même, le gonflement est plus important en particulier à Seurre 55 ( $I_g = 14,7 \%$ ).

# IV. ANALYSE ET SIGNIFICATION DU COMPORTEMENT

Comme nous l'avions précisé dans une précédente publication (CHRETIEN, 1986), le squelette des sols, qu'il soit sableux ou limoneux est constitué de particules rigides indéformables. Le principal intérêt de cette étude réside donc dans l'analyse du comportement de ces matériaux naturels en fonction, d'une part, des variations de la granulométrie du squelette et d'autre part de leur teneur en argile pour un cortège minéralogique donné. Nous ferons cette analyse à partir des courbes caractérisant les horizons  $A_2$  et  $B_t$  des sols de la séquence de Seurre (fig. 1) notamment pour ce qui concerne l'incidence des variations de granulométrie du squelette, mais également en utilisant les résultats relatifs à l'ensemble des matériaux étudiés par une approche statistique du rôle de l'argile.

Trois aspects seront successivement abordés :

- le comportement hydrique des matériaux
- le phénomène de gonflement
- les relations entre porosité et aération

## A) Comportement hydrique des matériaux

### 1) Rôle du squelette

Le comportement hydrique des matériaux dépend des relations existant entre l'occupation de leur espace poral par les phases liquides et gazeuses et la taille des pores. A ce sujet, il est possible de se référer à la loi de Laplace qui établit une relation entre le niveau énergétique de l'eau et la taille maximale des pores correspondants. Pour interpréter les courbes d'humectation relatives aux horizons  $A_2$  et  $B_t$  de ces sols (fig. 1), nous allons donc les comparer aux spectres de porosité de ces mêmes horizons (fig. 2).

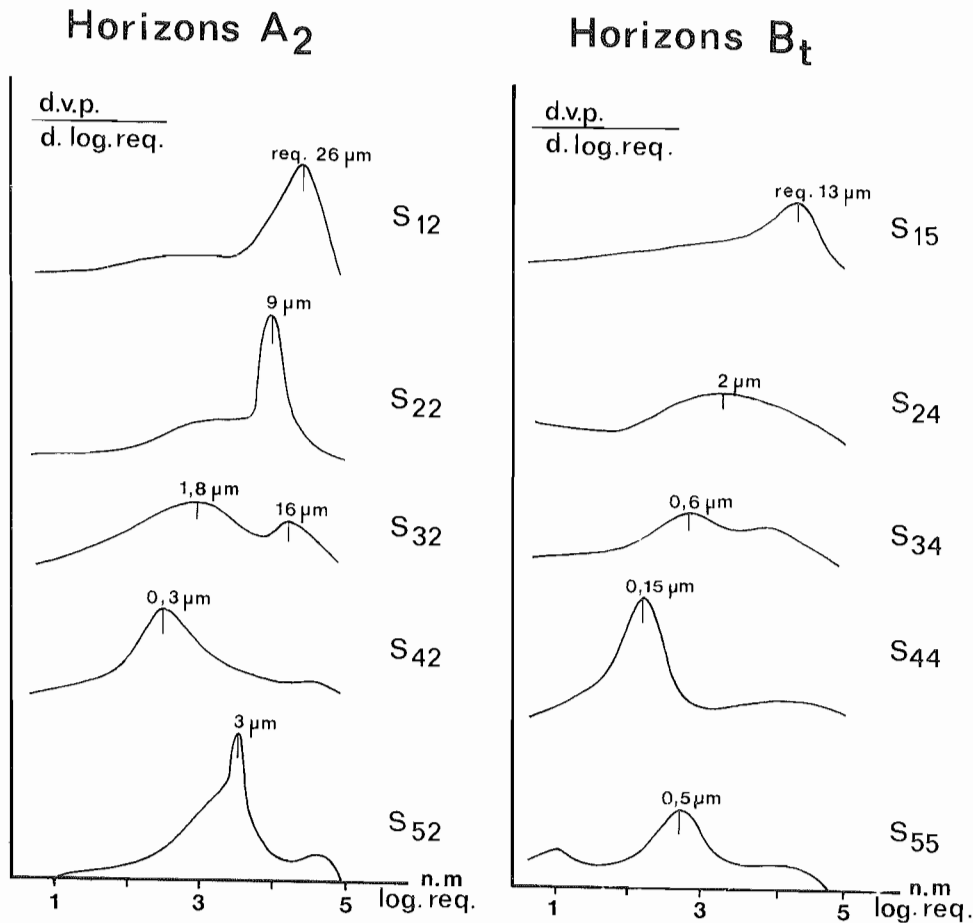


Figure 2 : Spectres de porosimétrie au mercure des horizons  $A_2$  et  $B_t$ .

*Spectra of mercury porosimetry from the  $A_2$  and  $B_t$  horizons.*

— Pour un *sable grossier* pauvre en argile comme  $S_{12}$ , l'humectation est relativement faible jusqu'à pF 2 puis augmente brusquement ensuite. Ce changement d'évolution correspond donc, selon la loi de Laplace au remplissage des pores de rayon supérieur à 15 μm. C'est bien le cas ici, où le matériau présente sur son spectre de porosité un pic bien marqué caractérisant une famille de pores largement

dominante centrée autour d'un rayon de constriction de 26  $\mu\text{m}$ , soit du même ordre de grandeur. Dans  $S_{15}$ , en revanche, l'enrichissement en argile du matériau se traduit par la présence d'un spectre de porosité beaucoup plus étalé donc par une courbe d'humectation plus régulière.

— Pour les sables limoneux ( $S_{22}$ ), la courbe d'humectation est marquée par une forte augmentation de l'indice d'eau entre pF 3 et pF 2, soit pour des pores compris entre 1,5 et 15  $\mu\text{m}$ . Le spectre poral présente un pic très net à 9  $\mu\text{m}$  de rayon correspondant à une famille de pores qui devraient se remplir au-delà de pF 2 ; il y a donc une parfaite concordance. Pour  $S_{24}$ , le pic précédent disparaît totalement et la courbe d'humectation très régulière reflète bien le large étalement du spectre de porosité. C'est ce qu'on observe également dans les limons sableux, à  $S_{32}$  et  $S_{34}$ , en présence de matériaux à granulométrie étalée.

Un cas intéressant est également constitué par la comparaison des comportements respectifs des deux matériaux limoneux  $S_{42}$  et  $S_{52}$ , très proches des leur teneur en argile. A  $S_{42}$ , pour une granulométrie équilibrée, la courbe d'humectation est très régulière, presque rectiligne et correspond à un spectre de porosité possédant un maximum bien exprimé à 0,3  $\mu\text{m}$  mais largement étalé de part et d'autre. Il semble, d'ailleurs, que la présence d'une importante fraction de pores voisins de 1  $\mu\text{m}$  se traduise ici, comme également à  $S_{24}$  par une humectation relativement élevée à pF 3 éliminant ainsi la rupture de pente fréquente à ce niveau de contraintes pour la plupart des courbes. Pour les limons fins comme  $S_{52}$ , on observe, parallèlement à une très forte humectation entre pF 3 et pF 2 (pores compris entre 1,5 et 15  $\mu\text{m}$ ), un pic particulièrement net du spectre de porosité à 3  $\mu\text{m}$  de rayon de constriction. De plus, la phase de faible humectation qui lui fait suite entre pF 2 et pF 1,5 peut être logiquement attribuée à l'absence de pores de 30 à 50  $\mu\text{m}$ . En revanche, on observe un léger maximum à pF 1 pour des pores proches de 80  $\mu\text{m}$  de rayon.

En définitive, ces convergences observées entre des systèmes poraux caractérisés à différentes humidités par la loi de Laplace d'une part, et à l'état sec par la porosimétrie au mercure d'autre part, conduisent à penser qu'il y aurait quasi-conservation de la granulométrie de l'espace poral dans une certaine gamme de pF (5,8 à 2).

## 2) Rôle de l'argile

Afin de mettre plus particulièrement en évidence le rôle spécifique de l'argile dans le phénomène d'humectation, nous avons choisi de représenter, à titre d'exemple, pour pF 2,5 les valeurs d'humidité ( $\theta$ ) en fonction des teneurs en argile (A) pour l'ensemble des 45 matériaux étudiés. Les résultats présentés sur la figure 3 font également ressortir pour chacun de ceux-ci la nature du squelette associé à l'argile :

- SG : sables grossiers ( $S_1$ )
- SF : sables fins ( $S_2$ )
- LS : limon sableux ( $S_3$ )
- LA : limon et limon argileux ( $S_4$  et  $S_5$ )

On observe un nuage de points relativement homogène hormis pour les 4 échantillons de sables grossiers très pauvres en argiles ( $S_1$ ). Il n'y a rien d'étonnant à cela puisque nous avons déjà constaté précédemment (fig. 1) que les sables grossiers avaient un comportement tout à fait spécifique. La droite de régression d'équation :

$$\theta = 0,847 A + 13,82$$

avec un coefficient de corrélation  $CR = 0,78$  indique donc qu'il y a une très nette relation entre l'humidité des échantillons à pF 2,5 et le taux d'argile quel que soit le type de squelette associé. Il apparaît aussi sur ce graphique que les sables grossiers et fins se situent en grande majorité sous la droite de régression alors que les limons sableux et limons sont au-dessus. Nous en concluons que, dans ces matériaux à dominante sableuse ou limoneuse, l'argile n'intervient pas à elle seule dans le comportement hydrique du matériau. C'est-à-dire qu'à teneur en argile équivalente,



les matériaux sableux ont une humidité inférieure à celle des matériaux limoneux, mais elle régit néanmoins l'essentiel des propriétés de rétention en eau. Ainsi, dans un contexte minéralogique donné, c'est-à-dire pour des matériaux contenant le même type d'argile, les matériaux naturels de granulométrie variée présentent-ils un taux d'humidité directement corrélé à leur teneur en argile.

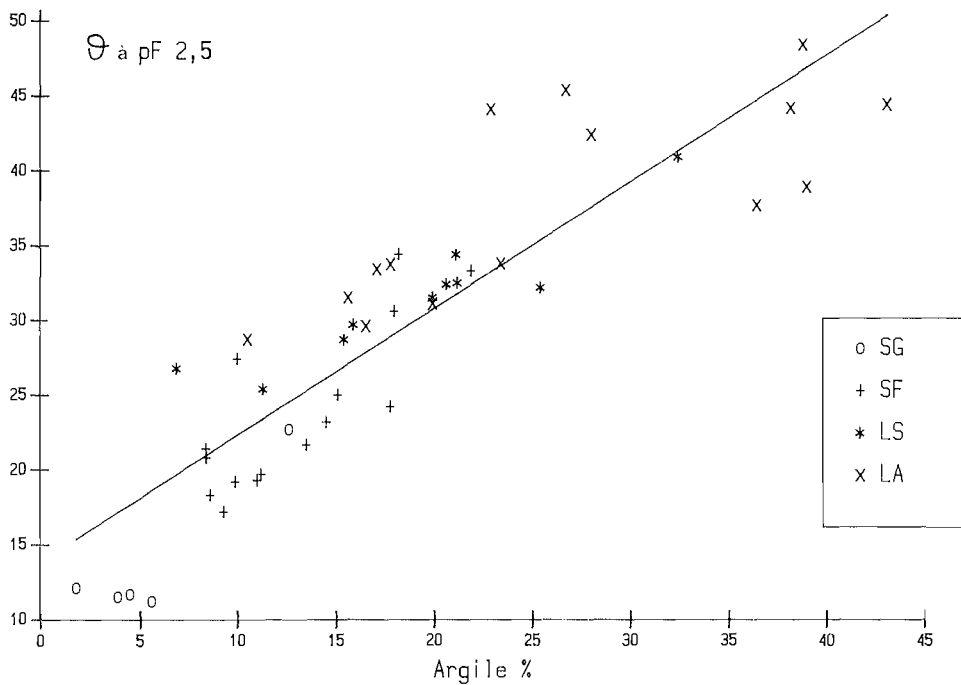


Figure 3 : Relations entre les valeurs d'indice d'eau ( $\theta$ ) et les teneurs en argile (A) des matériaux à pF 2,5.

*Relationships between water ratio ( $\theta$ ) and clay contents (A) of soil samples at pF 2,5.*

## B) Phénomène de gonflement

### 1) Incidence de la granulométrie

A l'observation des courbes d'indice de vide des différents graphiques présentés sur la figure 1, nous avons pu distinguer en relation avec les caractéristiques granulométriques des matériaux, trois types de comportement vis-à-vis du phénomène de gonflement (chapitre III).

Insistons cependant sur le comportement tout à fait exceptionnel des matériaux sableux grossiers qui se traduit par un retrait important, puis un gonflement, mais globalement le gonflement reste très faible. S<sub>12</sub> en est le plus caractéristique car il est très pauvre en argile (3,9 %). En revanche, dès que le taux d'argile atteint 12 % comme à S<sub>15</sub>, le retrait existe encore mais il est très limité, alors que le gonflement est important. Ainsi, ce comportement spécifique est d'autant mieux exprimé que les matériaux sableux sont plus pauvres en argile.

Dans les matériaux à squelette plus fin ou moins bien trié, sables fins, sables limoneux, limons sableux et limons, c'est-à-dire essentiellement dans les horizons A<sub>2</sub> où le taux d'argile se situe entre 8 et 20 % (S<sub>22</sub>, S<sub>32</sub>, S<sub>42</sub> et S<sub>52</sub>), le retrait n'existe plus et l'on observe, aux bas pF, une phase de gonflement mais celui-ci reste globalement peu important.

## 2) Rôle de l'argile

Sur la figure 4 sont représentées les variations de l'indice de gonflement  $I_g = \Delta e/1 + e$  entre pF 5,8 et pF 1 en fonction des teneurs en argile. On observe un nuage de points assez dispersé au sein duquel s'individualisent encore nettement les 4 matériaux sableux grossiers les plus pauvres en argile. La droite de régression correspondante qui a pour équation :

$$I_g = 0,202 A + 4,13$$

nous indique que l'indice de gonflement croît assez faiblement en même temps que le taux d'argile augmente, mais cette relation n'est pas aussi étroite (CR = 0,37) que celle obtenue pour l'humectation. Cette constatation prend toute son importance alors que l'on considère généralement que le gonflement est très lié au taux d'argile. Elle met, en effet, en évidence, le rôle de la granulométrie du squelette qui reste toutefois complexe car les valeurs d'indice de gonflement des matériaux sont très dispersées de part et d'autre de la droite de régression.

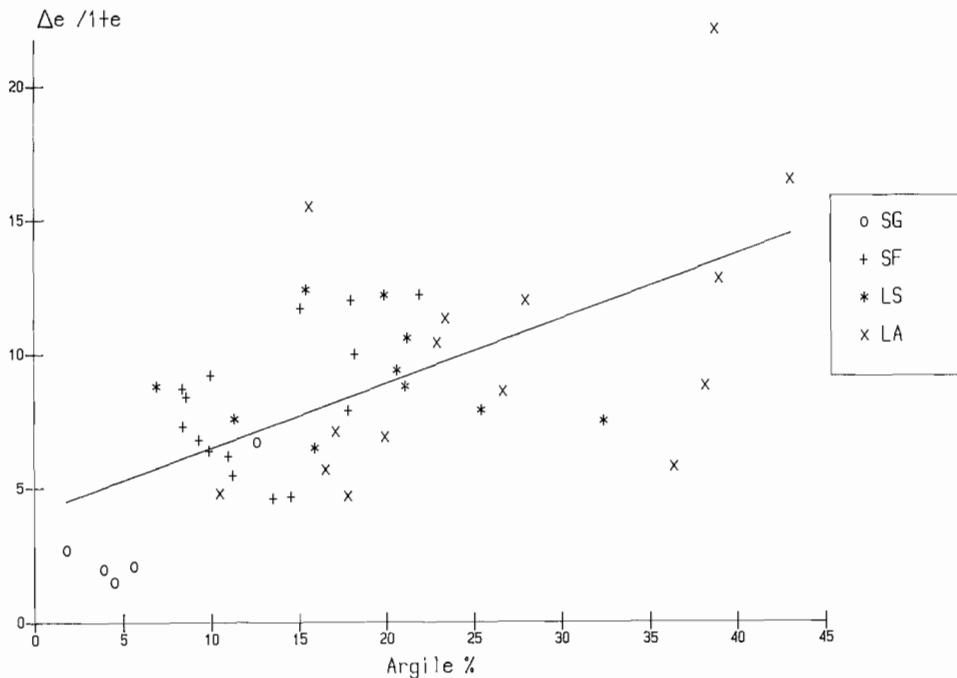


Figure 4 : Variations de l'indice de gonflement ( $\Delta e/1 + e$ ) en fonction des teneurs en argile (A).

Variations of swelling ratio ( $\Delta e/1 + e$ ) according to clay contents (A).

## C) Porosité et aération

### 1) Incidence de la granulométrie

L'occupation de l'espace poral par les phases liquides et gazeuses aux différents niveaux de contrainte hydrique résulte des différences de comportement des matériaux vis-à-vis des phénomènes d'humectation et de gonflement. L'étude de la fraction de la porosité restant occupée par l'air au cours de la phase d'humectation bien matérialisée sur les graphiques de la figure 1 nous permet d'aborder l'évolution du phénomène d'aération.

Dans tous les matériaux étudiés, y compris les sables grossiers, la fraction libre à l'air diminue au cours de la phase d'humectation. Dans les horizons  $A_2$ , cependant, cette fraction évolue de façon très différente selon la taille du squelette mais également avec la teneur en argile, ces deux facteurs étant le plus souvent liés dans la plupart des matériaux naturels et notamment ceux de la séquence de Seurre.

A partir des trois grands types de comportement que nous avons distingués précédemment (chapitre III) nous pouvons analyser les modalités d'évolution de l'aération :

1. Dans les matériaux où la porosité libre à l'air reste toujours élevée y compris à l'état humide (plus de 40 % à pF 1), c'est-à-dire les sables grossiers ( $S_{12}$ ), l'eau remplit essentiellement le système poral (30 à 150  $\mu\text{m}$ ) résultant de l'empilement des particules sableuses mais il reste toujours une fraction importante de macropores non remplis.

2. Dans les matériaux pour lesquels la fraction libre à l'air est élevée à pF 3 (plus de 60 %) mais devient plus faible à l'état humide (15 à 20 %), le système poral comprend une importante fraction de mésopores (5 à 30  $\mu\text{m}$ ) qui sont remplis à pF 1. C'est le cas des sables fins ( $S_{22}$ ) et des limons sableux ( $S_{32}$ ).

3. Enfin, dans les matériaux où la porosité libre à l'air est encore assez élevée à pF 3 (plus de 40 %) mais devient très faible à l'état humide (7 à 9 %), le système poral est surtout constitué de méso et micropores saturés d'eau à pF 1. C'est le cas des matériaux limoneux ( $S_{42}$  et  $S_{52}$ ). Le phénomène s'amplifie encore dans les matériaux limono-argileux et argilo-limoneux pour lesquels l'essentiel du système poral relève de la microporosité.

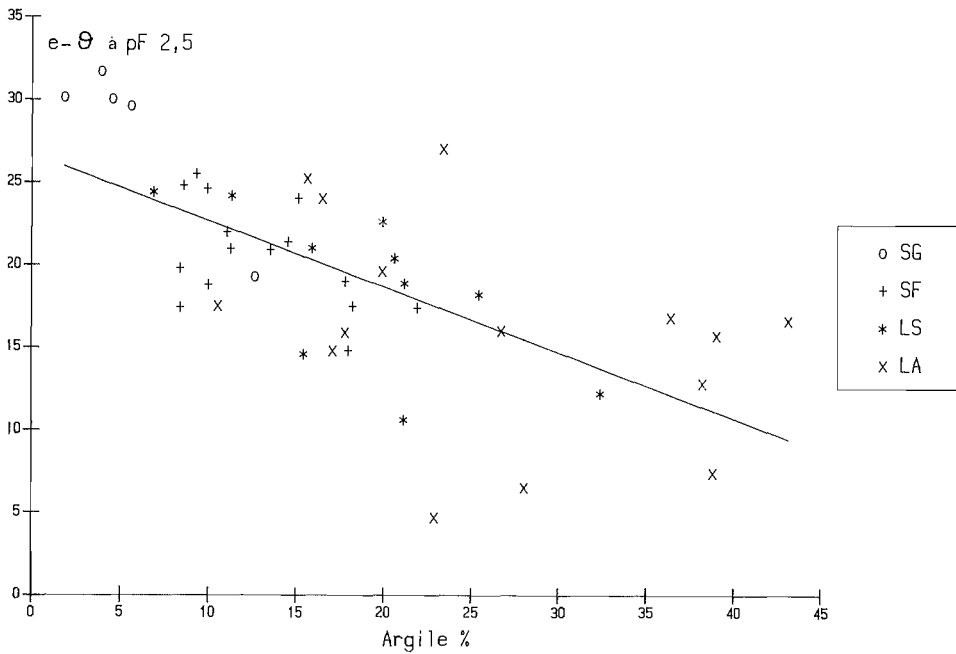
Il est donc important de noter que cette décroissance de l'aération entre  $S_1$  et  $S_5$  liée à la diminution des caractéristiques dimensionnelles du réseau poral dans les horizons  $A_2$  correspond également à un accroissement régulier du taux d'argile de 3,9 à 19,9 %. On l'observe aussi dans chacun des sols, entre les horizons  $A_2$  et  $B_1$ , consécutivement à l'enrichissement en argile dû au phénomène de lessivage pour aboutir au terme extrême, c'est-à-dire les horizons  $S_{44}$  et surtout  $S_{55}$ .

### 2) Rôle de l'argile

Comme dans le cas du phénomène d'humectation, nous avons représenté sur la figure 5 l'évolution de la porosité libre à l'air  $e - \theta$  en fonction du taux d'argile des matériaux à pF 2,5 pour l'ensemble des échantillons étudiés. On observe un nuage de points assez dispersés où les sables grossiers sont isolés vers les fortes valeurs, conformément au comportement n° 1 défini précédemment. La droite de régression a pour équation :

$$e - \theta = 0,399 A + 26,66$$

Elle possède donc, contrairement à celle des graphiques précédents, une pente négative assez forte, indiquant ainsi que la porosité libre à l'air diminue nettement lorsque le taux d'argile augmente. Mais cette relation est peu étroite puisque le coefficient de corrélation est de 0,44.



**Figure 5 : Relations entre la porosité libre à l'air ( $e - \theta$ ) et les teneurs en argile (A) des matériaux à pF 2,5.**  
*Relationships between the air opened porosity ( $e - \theta$ ) and clay contents (A) of soil samples at pF 2,5.*

## CONCLUSION

Nos résultats montrent qu'aucun matériau naturel, aussi pauvre en argile soit-il, n'est parfaitement rigide dans une gamme de potentiel de l'eau très large en particulier celle compatible avec l'activité biologique (pF inférieur à 4,2). Toutefois dans le cas extrême qui est celui des matériaux sableux grossiers de terrasses alluviales, on observe à l'humectation un comportement tout à fait original caractérisé par une phase de retrait précédant le gonflement. Il est intéressant de noter que ce comportement particulier disparaît en présence d'un squelette plus fin ou moins bien trié de type sable limoneux ou limon sableux. Dans ce cas le gonflement s'effectue en plusieurs étapes ou devient continu.

Il ressort aussi de cette analyse que l'argile associée aux différents éléments du squelette dans les sols joue un rôle direct sur la rétention de l'eau. En revanche, pour ce qui est du gonflement et de l'aération, nos données ont nettement montré que la granulométrie du squelette est le facteur le plus important à prendre en compte dans les matériaux peu argileux.

Ces différents comportements liés à la granulométrie des matériaux que l'étude de la séquence pédologique et texturale de Seurre nous a permis de mettre en évidence ont des répercussions multiples au niveau des propriétés des sols, aussi bien sur le plan de la structuration (présence d'une porosité fissurale) que de la reconstitution des réserves en eau ou encore des phénomènes d'aération et d'engorgement temporaires ou permanents.

reçu pour publication : Août 1988  
 accepté pour publication : Décembre 1988

INFLUENCE OF SKELETON ON SOIL PHYSICAL PROPERTIES :  
HYDRATATION SWELLING AND AERATION

Soils collected from a sequence on the alluvial terraces of Saône river in which the texture ranges from sandy to silty, have been employed to study the physical behaviour of naturally occurring samples (Table 1).

Water content and apparent volume determinations were conducted on non disturbed samples at different water potentials. The specific role played by the skeleton and the clay on water retention has been demonstrated. At a water potential of  $-0.32$  bar, the quantity of retained water is correlated to the clay content (Fig. 3). Wetting of the air dried samples leads to increase in volume without any exception. Contrary to the clay rich samples, shrinkage preceded swelling in the sandy samples, the former occurring towards  $-0.32$  bar (Fig. 1 and 2).

We noticed that in all cases, during the humectation cycle, the clay percentage influences the macroscopic swelling (Fig. 4). The extent to which air occupies the pore space ( $e -$ ) is also a function of the water potential and the clay content remains an important factor in determining the aeration of the samples (Fig. 5).

It is concluded that such a data is of great use for the prediction of water reserves, the aptitude to structure and water movement in soils.

Bibliographie

- BRUAND A., 1986. — Contribution à l'étude de la dynamique de l'espace poral. Utilisation des courbes de retrait et des courbes de rétention d'eau. *Sci. Sol*, 24, pp. 351-362.
- CHRETIEN J., 1979. — Etude expérimentale de la porosité de mélanges sables-argile. Aspects micromorphologiques. *Sci. Sol*. n° 4, pp. 333-353.
- CHRETIEN J., 1986. — Rôle du squelette dans l'organisation des sols. Conséquences sur les caractéristiques de l'espace poral des sols sur arènes et sur terrasses fluviales. Thèse Univ. Dijon. Publ. INRA - 412 p.
- CHRETIEN J. et PEDRO G., 1987. — Granulométrie, porosité et spectre poral de sols développés sur formations détritiques. Cas des terrasses alluviales de la Saône. *Cah. ORSTOM, sér. Pédologie*, vol. XXIII, n° 1, pp. 43-54.
- FIES J.-C., 1978. — Porosité du sol : étude de son origine texturale. Thèse Univ. Louis Pasteur, Strasbourg - 139 p.
- FIES J.-C., 1934. — Analyse de la répartition du volume des pores dans les assemblages argile-squelette : comparaison entre modèle d'espace poral textural et les données fournies par la porosimétrie au mercure. *Agronomie*, 4 (9), p. 891-899.
- HALLAIRE V., 1987. — Retrait d'un sol argileux au cours du dessèchement. Mesures de l'affaissement et conséquences structurales. *Agronomie* 7, (8), p. 631-637.
- JAMAGNE M. et coll., 1967. — Bases et techniques d'une cartographie des sols. *Ann. Agron.*, n° hors série, 18, 143 p.
- MAERTENS C., 1965. — Deux méthodes de détermination de la densité du sol en place. Leur possibilité d'utilisation. *Bull. AFES*, 8, p. 283-293.
- Mc GARRY 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, pp. 1575-1580.
- MENG T.P., TAYLOR H.M., FRYREAR D.W. et GOMEZ J.F., 1987. — Models to predict water retention in semiarid sandy soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51, pp. 1563-1565.
- PETERSEN G.W., CUNNINGHAM R.L. et MATELSKI R.P., 1968. — Moisture characteristics of Pennsylvania Soils : I. Moisture retention as related to texture. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32, pp. 271-275.

- RATLIFF L.F., RITCHIE J.T. et CASSEL D.K., 1983. — Field-measured limits of soil water availability as related to laboratory-measured properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47, pp. 770-775.
- STENGEL P., 1981. — Relations entre le retrait et le potentiel de l'eau dans des mélanges smectites-limons. *C.R. Acad. Sc. Paris*, tome 293, série II, pp. 465-468.
- TESSIER D. et BERRIER J., 1979. — Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude des sols. Observation de sols humides soumis à différents pF. *Sci. Sol*, (1), pp. 67-82.
- TESSIER D., 1984. — Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Thèse Univ. Paris VII. Publ. INRA, 360 p.
- VAN OORT F., 1984. — Géométrie de l'espace poral, comportement hydrique et pédogénèse. Application à des sols sous prairie des Alpes du Nord (BEAUFORTAIN). Thèse Doc. Ing. Géologie Appliquée. INA P.G., 275 p.