

## EFFET DU TRAVAIL DU SOL SUR LA DYNAMIQUE DE RETRAIT D'UN GLEYSOL ARGILEUX

H. DERDOUR<sup>1</sup>, D.A. ANGERS<sup>2</sup>, M.R. LAVERDIERE<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Département de science du sol, Institut National Agronomique El-Harrach (Alger) 16200 Algérie,

<sup>2</sup>Centre de recherche, Agriculture et Agro-alimentaire Canada, 2560 boul. Hochelaga, G1V 2J4, Québec.

<sup>3</sup>Département des sols, Faculté des Sciences et de l'Alimentation, Université Laval, G1K 7P4, Québec, Canada

**Résumé :** La dynamique structurale des sols argileux est fonction de leur état d'hydratation et du travail du sol. l'objectif de ce travail est de caractériser l'aptitude au retrait d'un sol gleysolique argileux de la série Kamouraska et de déterminer l'effet du travail du sol sur celui-ci. Des échantillons de taille centimétrique (mottes) ont été prélevés à trois profondeurs différentes (0-10, 10-20, 20-30 cm), dans des parcelles cultivées en orge (*Hordeum vulgare* L.). Ces parcelles ont été travaillées depuis quatre années selon trois types de travail de sol, soit un labour avec charrue à versoir, un pseudo-labour avec chisel et un semis direct. La courbe de retrait a été déterminée sur des échantillons conservés (mottes) prélevés dans chacune de ces parcelles. Les résultats obtenus montrent que la phase du retrait structural ne se manifeste que dans le cas des parcelles non travaillées (semis direct). Ceci est certainement le fait d'une stabilité structurale plus élevée, observée sous ce traitement. Cette bonne stabilité structurale est due à la présence de nombreux pores rigides d'origine biologique. Par ailleurs, la pente de retrait normal plus élevée dans les parcelles travaillées (labour et pseudo-labour) indique l'existence d'une structure moins stable. En fin de compte, l'analyse des courbes de retrait permet de mettre en évidence des comportements structuraux différents selon le type de travail du sol pratiqué et l'état hydrique du sol.

**Mots clés :** Gleysol argileux, retrait, travail du sol.

### Effects of tillage practices on shrinking behavior of a gleysolic clay soil

**Abstract :** Management practices and soil water status strongly influence the structural dynamics of clays soils. Our objective was to characterize the shrinkage properties of a gleysolic clay soil as influenced by tillage practices. Soil clods of a few centimeters in size were sampled from three soil layers (0-10, 10-20, 20-30 cm) in barley (*Hordeum vulgare* L.) plots which had been under three tillage systems during four years : moldboard plowing, chisel plowing and no-tillage. The shrinkage curve was determined on clods during the drying phase. The structural phase of the shrinkage curve was only observed in the no-till plots and in the surface soil layer (0-10 cm). This probably results from a more rigid pore space of biological origin which could also explain the greater structural stability observed in this treatment. Moreover, the greater slope of the shrinkage curve in the tilled soils (moldboard and chisel plowed) confirmed that the pore space is probably less stable under these systems than under no-till.

**Keys words :** gleysolic clay soil, shrinkage, practice systems

## INTRODUCTION

L'étude approfondie de la dynamique structurale des sols argileux nécessite une caractérisation préalable de leur potentiel de retrait-gonflement et la mise en évidence des facteurs qui le déterminent. Plusieurs travaux ont été consacrés à l'étude du phénomène de gonflement et de retrait des sols à différentes échelles de leur organisation structurale: particules d'argile (Tessier 1984), agglomérats structuraux de taille millimétrique (Grossman et al. 1968, Bruand 1986, Bronswijk et Evers-Vermeers 1990), mottes naturelles de taille centimétrique et décimétrique (Lauritzen 1948, Stirk 1954, Reeve et al. 1980, Bruand et Prost 1987, McGarry et Daniells 1987), mottes artificielles (Haines 1923), ou encore cases lysimétriques et parcelles expérimentales (Hallaire 1988, Bronswijk 1991, Mitchell et Van Genuchten 1992).

L'évolution de l'espace poral en fonction de l'état hydrique du sol peut être caractérisée par l'étude de la variation de son volume apparent en fonction de sa teneur en eau. La variation du volume apparent d'un matériau en cours de dessèchement se fait en trois phases : (i) une phase de retrait structural qui est généralement observée dans le cas de structures conservées (Stirk 1954). Cette phase correspond à une vidange des macropores, initialement saturés, sans perte significative de volume. (ii) une phase dite de retrait normal, pendant laquelle la variation du volume de l'échantillon (DV) est égale à la variation du volume d'eau (Dq) et au cours de laquelle les agrégats restent quasi-saturés;

(iii) une phase dite de retrait résiduel pendant laquelle le volume continue à diminuer mais la perte de volume reste inférieure à la quantité d'eau évaporée ( $DV < Dq$ ), cette phase est caractérisée par l'entrée d'air dans les pores drainés (Stengel 1983). Pendant cette dernière phase, les particules de sol atteignent leur arrangement le plus serré possible et le matériau devient indéformable (limite de retrait) (Faure 1981).

La présence ou l'absence de l'une ou l'autre de ces phases dépend en grande partie de la taille des échantillons utilisés. Lorsque les échantillons sont de dimensions millimétriques (agrégats) ou centimétriques mais préparés artificiellement, la phase de retrait structural n'apparaît pas, le point d'entrée d'air est très net et la phase du retrait normal est représentée par une droite de pente égale à l'unité (McGarry et Malenfant 1987). De plus, le passage du retrait normal au retrait résiduel se fait d'une manière brutale.

Dans le cas des échantillons conservés et de couches de sol en place, la phase du retrait structural est plus nettement représentée sur la courbe de retrait et démarre généralement à des teneurs en eau proches de la saturation pour se terminer aux environs de la capacité au champ (Bruand et Prost 1987). L'occurrence de cette phase de retrait dépend de la taille des échantillons (agrégat, motte ou parcelle) et surtout du degré de structuration des éléments qui les composent (Stirk 1954 ; Reeve et Hall 1978).

Plusieurs travaux de recherche ont été consacrés à l'étude de l'influence des facteurs naturels (climat, caractéristiques du sol) sur le retrait des sols tels que la teneur et la nature minéralogique de l'argile (Stengel 1983, Tessier 1984, Bronswijk et Evers-Vermeer 1990) ainsi que le taux de matière organique (Reeve et al. 1980). Par contre peu de travaux de recherche ont été consacrés à l'étude de l'influence des facteurs anthropiques, tels que le travail du sol, sur la dynamique du retrait. Signalons néanmoins, que McGarry et Daniells (1987), McGarry (1988) et McGarry et Smith (1988) ont étudié l'effet direct du travail du sol sur le retrait de sols à fort potentiel de retrait-gonflement (Vertisols). Ainsi, McGarry et Daniells (1987) ont montré que le volume minimal ( $V_{min}$ ), obtenu après séchage des mottes à l'air, était le paramètre le plus sensible aux effets du travail du sol et à la profondeur de prélèvement. De leur côté, McGarry (1988) et McGarry et Smith (1988) ont relevé des différences significatives, au niveau de plusieurs paramètres de la courbe de retrait, entre des parcelles non travaillées (semis-direct) et des parcelles travaillées depuis 19 ans. En particulier, les valeurs de la pente du segment de droite correspondant au retrait normal et celles du volume minimal (limite de retrait) étaient plus élevées dans le cas des mottes à structure agrégée provenant du sol travaillé que chez les mottes à structure massive issues des parcelles sous semis-direct.

Par ailleurs, Derdour et al. (1993) ont montré que le travail du sol influence la porosité structurale en modifiant particulièrement ses composantes interpédique et de retrait. Si l'effet du travail du sol sur la porosité interpédique semble être admis, il n'en est pas de même de son effet sur la porosité fissurale de retrait pour laquelle il est

très difficile de dissocier l'effet propre du travail du sol de celui des autres facteurs tels que le climat et l'activité biologique. En raison du peu de résultats trouvés dans la littérature concernant l'impact du travail du sol sur le retrait, il nous est apparu utile de compléter l'analyse du système de porosité du sol de Kamouraska (Derdour et al. 1993) par une étude en laboratoire de sa dynamique porale en phase de dessèchement.

## MATERIEL ET METHODES

Des mottes de dimensions centimétriques (5 à 8 cm<sup>3</sup>) ont été prélevées dans des parcelles disposées selon un dispositif expérimental en troirs avec mesures répétées, mises en place en 1987 sur un sol argileux (Gleysol orthique humique), situé à la ferme expérimentale d'Agriculture Canada à La Pocatière (Québec). Les caractéristiques du sol ont été présentées par Derdour et al. (1993). Rappelons qu'il s'agit d'un sol argileux (58 % d'argile et 30 % de limon) à minéralogie variée avec 2.6 % de C organique. Le sol a été travaillé selon trois techniques de travail du sol (labour avec charrue à versoir, pseudo-labour au chisel et semis direct) et cultivé en orge (*Hordeum vulgare* L.).

En octobre 1990, avant les travaux primaires du sol, des mottes ont été prélevées dans des couches situées à 0-10, 10-20 et 20-30 cm de profondeur. Les teneurs en C organique ont été déterminées par oxydation par voie humide (Walkley et Black 1934). Les mottes ont été ramenées à des états hydriques désirés en les soumettant à différents potentiels hydriques à l'aide du dispositif de Tessier et Berrier (1979) pour des potentiels allant de zéro (saturation) à -0,1 MPa; avec l'appareil de Richards (1941) pour les potentiels compris entre -0,1 et -3 MPa et en équilibrant leur humidité avec l'humidité relative saturante de solutions salines (loi de Kelvin) pour les potentiels supérieurs à -3 MPa (Derdour et al. 1993). La dessiccation finale (-100 MPa) est obtenue par un dessèchement des mottes à l'air libre. Pour chaque stade de dessiccation six mottes ont été analysées. Le temps d'équilibre nécessaire a été fixé à une semaine pour les potentiels allant de -0,001 à -3 MPa et de 15 à 21 jours pour les potentiels supérieurs à -3 MPa (solutions salines), dans ce dernier cas l'état d'équilibre est vérifié par pesée quotidienne des mottes jusqu'à masse constante. Le volume des mottes humides et sèches a été déterminé par mesure de la poussée hydrostatique dans du pétrole (Monnier et al. 1973)). Le volume massique ( $V$ ) (inverse de la masse volumique apparente  $r_d$ ) a été déterminé par calcul à partir de la relation  $V = \text{volume de la motte à un teneur en eau donnée} / \text{masse sèche de la motte}$ .

Une analyse statistique de l'effet du travail du sol et de la profondeur d'échantillonnage sur les paramètres ( $V_{\min}$ ,  $V_{\max}$ ,  $q_{\max}$ ,  $a$ ) décrivant les courbes de retrait a été effectuée selon un dispositif expérimental en tiroirs avec mesures répétées (les mêmes types de mesures ont été répétées dans le temps représenté ici

par les périodes d'échantillonnage) où le travail du sol représente le traitement principal et la profondeur d'échantillonnage le traitement secondaire (SAS Institute Inc. 1985). L'analyse de régression a aussi été effectuée à l'aide du logiciel SAS.

## RESULTATS ET DISCUSSION

Les variations des volumes massiques des mottes en fonction de la teneur en eau sont présentées à la figure 1. Cette présentation permet de mettre en évidence les différentes phases de retrait des mottes. Les parcelles travaillées (labour et pseudo-labour) (Figures 1a et 1b) présentent deux phases distinctes de retrait : une phase de retrait normal et une phase de retrait résiduel; alors que la phase de retrait structural n'apparaît pas ici. La phase de retrait normal s'étale sur une gamme de teneurs en eau comprise entre les teneurs en eau 0,35 et 0,15 g g<sup>-1</sup>. La phase de retrait résiduel démarre à partir de la teneur en eau 0,15 g g<sup>-1</sup>. Dans les parcelles non travaillées (semis-direct), la phase de retrait normal présente une pente plutôt raide relativement à la pente de la phase de retrait normal observée chez les parcelles travaillées où elle est beaucoup plus forte. De plus une phase de retrait structural semble se distinguer aux grandes teneurs en eau, du moins dans la couche 0-10 cm (Figure 1c). On note également dans la plupart des situations, une absence de valeurs dans la gamme des teneurs en eau allant de 0,05 à 0,15 g g<sup>-1</sup>. Rappelons que la dessiccation des mottes a été effectuée à l'aide de succions où l'on note une chute brutale des teneurs en eau entre les potentiels -1,5 MPa et l'état sec.

Le volume massique à la saturation qui correspond au volume maximal des mottes ( $V_{max}$ ) diminue avec la profondeur et présente des valeurs plus faibles (Tableaux 1 et 2) sous semis direct que dans les parcelles travaillées et cela quelle que soit la profondeur considérée. Ce résultat est en accord avec les résultats de Derdour et al. (1993) où l'on a trouvé des porosités plus faibles sous semis direct que dans les parcelles travaillées. La teneur en eau maximale ( $q_{max}$ ) n'était pas influencé par le travail du sol mais a diminué avec la profondeur.

Tel que mentionné précédemment, la phase de retrait structural ne semble apparaître que dans le cas des échantillons sous semis direct et uniquement dans la couche de surface (0-10 cm)(Figure 1c). La phase de retrait structural correspond à une vidange des macropores intramottes qui se fait sans déformation importante des pores, c'est à dire sans retrait significatif (Bruant et Prost 1987). Ces derniers auteurs ont montré que, pour un sol de granulométrie et de constitution minéralogique comparables à celles du sol étudié, la phase de retrait structural se situait dans l'intervalle des teneurs en eau comprises entre les potentiels -0,001MPa et 0.1MPa et que cet intervalle correspondait aux pores à géométrie fixe ( pores rigides)

tels que les pores tubulaires d'origine biologique. Ainsi donc, l'origine des pores et leurs dimensions semblent avoir un effet sur l'apparition ou non d'une phase de retrait structural lors du retrait de mottes. Ainsi, la présence au sein de mottes de macropores stables, d'origine biologique, a tendance à favoriser le développement d'une phase de retrait structural, alors que des pores peu stables tels que les fissures d'origine mécanique favoriseraient la prise en masse et la formation de pores de dimensions inférieures (Newman et Thomasson 1979). Ces hypothèses sont en accord avec les résultats de Angers et al. (1993) obtenus sur le même sol et qui montrent une plus grande stabilité structurale sous semis-direct comparativement aux parcelles travaillées. La forte stabilité structurale observée pourrait être en partie expliquée par une plus grande rigidité des macropores sous semis.

La seconde phase de retrait ou retrait normal est essentiellement caractérisée par la pente du segment de droite délimité par la fin du retrait structural et le point d'entrée d'air. L'intervalle hydrique qui la caractérise serait, d'après certains auteurs (Stik, 1954, Bruand et Prost 1987 et Bronswijk 1991), délimité par la limite supérieure de gonflement et le point d'entrée d'air. Le retrait normal se développe donc sur une large gamme de teneurs en eau allant de 0,35 à 0,15  $gg^{-1}$ ; les mottes restent alors quasi-saturées (nous avons calculé un taux de saturation des pores de 80 %). La phase de retrait normal qui représente ici l'essentiel du retrait et la réorganisation de l'espace poral qui s'en suit se ferait donc à l'état quasi-saturé. Le déroulement du retrait normal en l'état de saturation des mottes est caractéristique des sols très argileux sous climat humide (Bronswijk et Evers-Vermeer 1990). Le calcul par régression de la pente (a) du segment de droite représentant la phase de retrait normal a été effectué pour la gamme des teneurs en eau allant de 0,15 à 0,35  $g g^{-1}$ . La pente est plus forte sous les parcelles travaillées que sous semis-direct (Tableau 2). L'analyse de la variance indique que l'effet du travail du sol sur a est significatif au seuil 0,07 de probabilité. D'après McGarry et Smith (1988), les mottes à structure lâche avec de nombreux macropores intramottes que l'on peut rencontrer souvent dans les sols travaillés présentent une pente de retrait normal plus que celles mesurées pour les mottes denses rencontrées dans des parcelles non travaillées. Les résultats obtenus semblent donc confirmer ceux de ces auteurs.

Le volume massique au potentiel  $10^{-2}$  MPa correspond au volume minimal des mottes ( $V_{min}$ ). Ce paramètre a été influencé par le travail du sol (Tableau 1); on enregistre des valeurs plus élevées sous pseudo-labour (Tableau 2). McGarry et Daniells (1987) ont trouvé que le volume minimal était le paramètre le plus sensible aux pratiques culturales et que les sols travaillés sous conditions humides présentaient le volume minimal le plus faible, ce que les auteurs expliquaient par un réarrangement plus serré des particules argileuses sous ce traitement. Les valeurs de volume minimal plus élevées sous pseudo-labour pourraient s'expliquer en partie par les valeurs plus élevées en C organique sous ce traitement du moins dans les deux couches de sol inférieures (Tableau 3) qui auraient pour effet de conférer à ce sol un arrangement moins serré des particules primaires au niveau textural (Stengel 1979).

Les résultats (Tableau 1, figure 1) indiquent que tous les paramètres du retrait sauf la pente et ceux reliés au volume minimal ont diminué avec la profondeur d'échantillonnage. McGarry et Daniells (1987) ont noté une tendance similaire dans l'évolution de ces paramètres. La diminution de l'amplitude du retrait normal et structural avec la profondeur pourrait être expliquée par une légère baisse de la teneur en carbone organique des échantillons (Tableau 3), l'effet de la pression pédostatique subie par les échantillons alors qu'ils étaient en place (Van Oort 1984) et la diminution de l'effet du climat.

Au niveau méthodologique, deux points sont à souligner. D'abord, la technique de dessiccation des mottes utilisées, i.e. sur la base de potentiels hydriques fixes, n'a pas permis d'obtenir une distribution uniforme et complète des teneurs en eau. Tel que noté précédemment, on observe une absence de points entre 0,05 et 0,15 g g<sup>-1</sup> qui correspondent respectivement aux potentiels état sec et -1500 KPa. Une distribution complète et plus uniforme est obtenue par l'utilisation d'un dessèchement progressif des mottes à l'air libre (McGarry et Daniels 1987). Cette absence de données près du point d'entrée d'air nous a conduit à restreindre l'estimation des paramètres de la courbe à ceux mesurables avec confiance et à ne pas tenter d'estimer les paramètres (coordonnées) du point d'entrée d'air ou la pente de la phase de retrait résiduel. L'essentiel des effets du travail du sol est de toutes façons observé aux fortes teneurs en eau et dans les phases structurales et normales du retrait.

Le deuxième point méthodologique concerne la taille des mottes utilisées. Celle-ci était restreinte à quelques cm<sup>3</sup> étant donné la taille des cellules utilisées pour obtenir des états hydriques. L'interprétation est donc restreinte au niveau d'organisation de la porosité et exclu la porosité structurale ou intermotte.

Tableau 1. Résultats de l'analyse de la variance (seuil de probabilité,  $P > F$ ).  
Effets du travail du sol et de la profondeur d'échantillonnage sur les paramètres de la courbe de retrait des mottes.

	$q_{\max}$	$V_{\max}$	$q_{\min}$	$V_{\min}$	$\alpha$
TS	0,38	0,01	0,38	0,01	0,07
P	< 0,01	< 0,01	0,05	0,09	0,61
TSxP	0,11	0,07	0,56	0,93	0,13

TS : travail du sol

P : profondeur d'échantillonnage

TSxP : interaction

$V_{\max}$  = volume de gonflement maximal

$V_{\min}$  = volume minimal

$q_{\max}$  = teneur en eau correspondant au volume maximal

$q_{\min}$  : teneur en eau à la limite de retrait (volume minimal)

$\alpha$  = pente.



Tableau 2. Valeurs des paramètres de la courbe de retrait selon le type de travail du sol et la profondeur d'échantillonnage

Travail du sol	$q_{\max}$	$V_{\max}$	$q_{\min}$	$V_{\min}$	$\alpha$
	$g\ g^{-1}$	$cm^3\ g^{-1}$	$g\ g^{-1}$	$cm^3\ g^{-1}$	
----- 0-10 cm -----					
Labour	0,303	0,747	0,026	0,617	0,87
Pseudo-Labour	0,333	0,784	0,043	0,647	1,06
Semis-Direct	0,321	0,715	0,028	0,632	0,56
----- 0-20 cm -----					
Labour	0,306	0,745	0,022	0,6614	0,89
Pseudo-Labour	0,300	0,737	0,028	0,635	0,99
Semis-Direct	0,304	0,696	0,025	0,631	0,70
----- 20-30 cm -----					
Labour	0,284	0,742	0,023	0,600	1,00
Pseudo-Labour	0,308	0,757	0,028	0,633	0,92
Semis-Direct	0,290	0,681	0,039	0,619	0,56

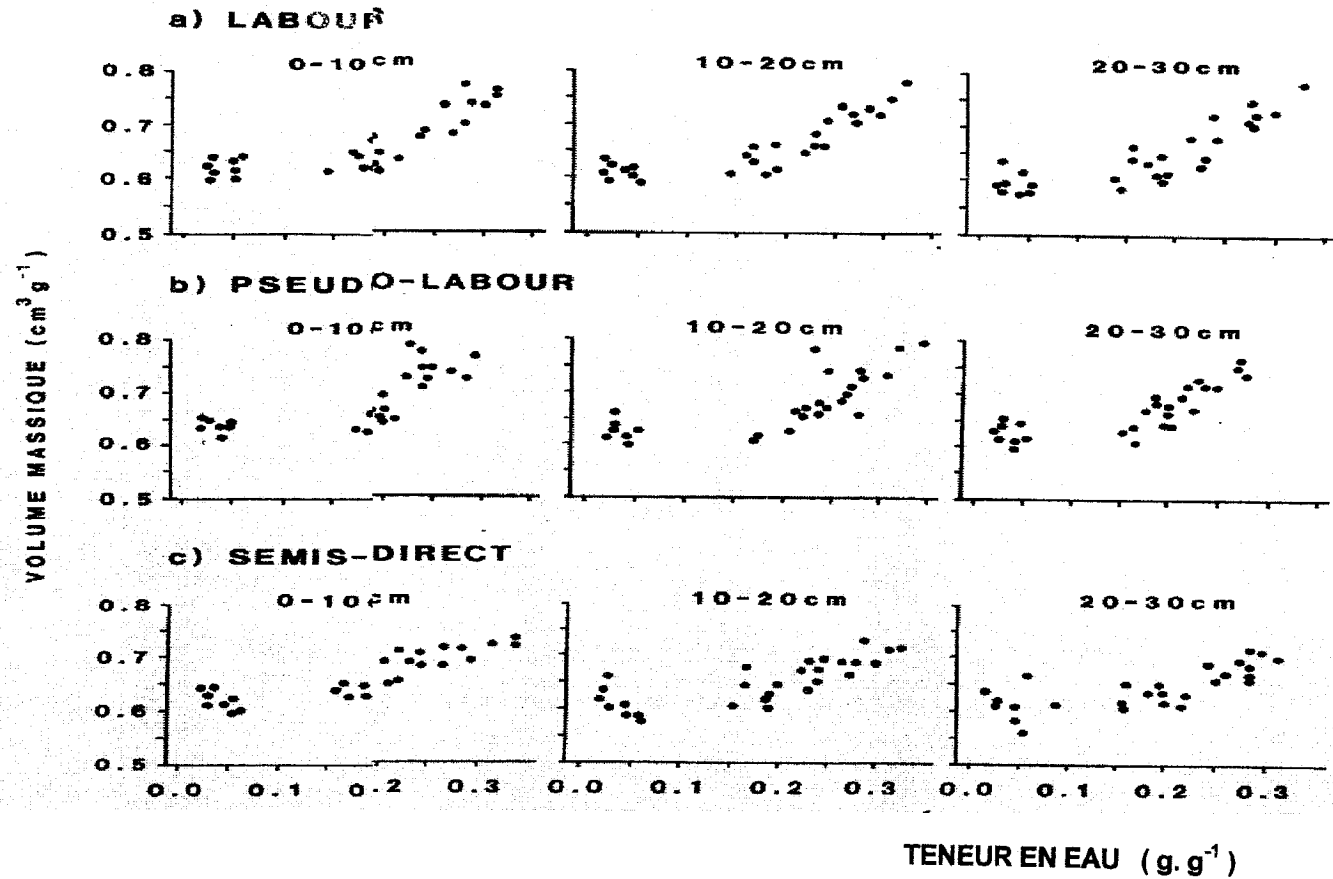


Figure 1. Variation du volume massique des mottes en fonction de la teneur en eau sous trois techniques de travail du sol (labour, Pseudo-labour, Semis-direct) et pour trois profondeurs d'échantillonnage ( a = 0 -10 cm , b = 10 - 20 cm , c = 20 -30 cm )

Tableau 3. Teneur en C organique en fonction des techniques de travail du sol et de la profondeur d'échantillonnage et seuil de probabilité ( $P>F$ ).

travail du sol	Profondeur		
	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
	Teneur en C organique (g C kg <sup>-1</sup> )		
Labour	23	24	20
pseudo-Labour	28	26	26
Semis-Direct	27	21	19
Valeur de P	0,11	0,38	0,29

## CONCLUSION

Le retrait structural n'est apparu que dans les parcelles sous semis directe dans la couche superficielle du sol. Ceci suggère la présence dans ces sols, de pores intramottes rigides probablement d'origine biologique, qui peuvent en partie expliquer la bonne stabilité structurale observée dans ces sols. Les effets du travail du sol sur la phase du retrait normal des mottes sont traduits par la pente du segment de droite représentant cette phase de retrait. La pente la plus forte a été observée dans les sols travaillés ce qui indique la présence d'une structure plus agrégée et probablement moins stable.

Cette étude confirme donc la pertinence de cette approche qui s'applique à un sol à potentiel de retrait relativement faible. Les résultats ont montré également que les effets du travail du sol sur le retrait peuvent être observés même à court terme (4 années).

**Remerciements** : Les auteurs remercient Dr. Anne Légère pour leurs avoir permis l'accès aux parcelles expérimentales et l'échantillonnage.

## Références

- Angers, D.A., Samson, N. et Légère, A. 1994. Early changes in water-stables aggregation induced by rotation and tillage in a soil under barley production. *Can. J. Soil Sci.* 73: 51-59.
- Bronswijk, J.J.B. 1991. Drying, cracking, and subsidence of a clay soil in a lysimeter. *Soil Sci.* 152: 92-99.
- Bronswijk, J.J.B. et Evers-Vermeer, J.J. 1990. Shrinkage of Dutch clay soil aggregates. *Neth. J. Agric. Sci.* 38: 175-194.
- 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* 24:351-362
- Bruand, A. et Prost, R. 1987. Effect of water content of the fabric of a soil material: an experimental approach. *J. Soil Sci.* 38: 461-472.
- Dérdour, H., Angers, D.A. et Laverdière, M.R. 1993. Caractérisation de l'espace poral d'un sol argileux: effets de ses constituants et du travail du sol. *Can. J. Soil Sci.* 73: 299-307.
- Faure, A. 1981. A new conception of the plastic and liquid limits of clay. *Soil Tillage Res.* 1: 97-105.
- Franzmeier, D.P. et Ross, S.J. 1968. Soil swelling: laboratory measurements and relation to other soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 32: 573-577
- Giraldez, J.V, Sposito, G. et Delgado, C. 1983. A general soil volume change equation: I. The two parameter model. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 47: 418-422.
- Grossman, R.B., Brasher, B.R., Franzmeier, D.P. et Walker, J.R. 1968. Linear extensibility as calculated from natural-clod bulk density measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 32: 570-573.
- Haines, W.B. 1923. The volume changes associated with variations of water content in soil. *J. Agric. Sci.* 13: 296-311.
- Hallaire, V. 1988. La fissuration d'un sol argileux au cours du dessèchement. I. Description *in situ*. *Agronomie* 8: 139-145.
- Lauritzen, C.W. 1948. Apparent specific volume and shrinkage characteristics of soil materials. *Soil Sci.* 65: 155-179.

McGarry, D. 1988. Quantification of the effects of zero and mechanical tillage on a Vertisol by using shrinkage curve indices. *Aust. J. Soil Res.* 26: 537-542.

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 Malanfant, K.W.J. 1987. The analysis of volume change in unconfined units of soil. *Soil Sci. Am. Soc. J.* 51: 290-297.

McGarry, D. et Smith, K.J. 1988. Indices of residual shrinkage to quantify the comparative effects of zero and mechanical tillage on a Vertisol. *Aust. J. Soil Res.* 26: 543-548.

Mitchell, A.R. et Van Genuchten, M. Th. 1992. Shrinkage of bare and cultivated soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1036-1042.

Monnier, G., Stengel, P. et Fiès, J.C. 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Ann. Agron.* 24: 533-545.

Nelder, J.A. 1961. The fitting of generalization of the logistic curve. *Biometrics* 17: 89-110.

Newman, A.C.D. et Thomasson, A.J. 1979. Rothamsted studies of soil structure. III. Pore size distributions and shrinkage processes. *J. Soil Sci.* 30: 415-439.

Reeve, M.J., Hall, D.M.G. et Bullock, P. 1980. The effect of composition and environmental factors on the shrinkage of some clayey British soils. *J. Soil Sci.* 31: 429-442.

Reeve, M.J. et Hall, D.M.G. 1978. Shrinkage in clay subsoils of contrasting structure. *J. Soil Sci.* 29: 315-323.

Richards, L.A. 1941. A pressure membrane extraction apparatus for soil solution. *Soil Sci.* 51: 377-386.

SAS Institute Inc. 1985. SAS user's guide: Statistics (5th ed.). SAS Institute, Inc., Cary, NC.

Schafer, W.M. et Singer, M.J. 1976. Influence of physical and mineralogical properties on swelling of soil in Yolo County, California. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 40: 557-562.

Soil Survey Staff 1975. Soil taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Agricultural Handbook n° 436. US Department of Agriculture. Washington, D.C. 754 p.

Stengel, P. 1983. Fragmentation par fissuration. Note interne. Dépt. de Science du Sol. INRA. Montfavet (Avignon): 20 p.

Stirk, G.B. 1954. Some aspects of soil shrinkage and the effect of cracking upon water entry into the soil. Aust. J. Agric. Res. 5: 279-290.

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 de Doctorat ès Science, Paris VII, 361 p.

Tessier, D. et Berrier, J. 1979. Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude des sols. Observations de sols humides soumis à différents pF. Sci. Sol 1: 67-82.

Tri, B.H. et Monnier, G. 1973. Etude quantitative de la granulation des sols sous prairies de graminées. Ann. Agron. 24: 651-677

Van Oort, F. 1984. Géométrie de l'espace poral, comportement hydrique et pédogénèse. Application à des sols de prairies et alpage, issus de l'altération des calcschistes sédimentaires en moyenne et haute montagne, Alpes du nord (Beaufortain). Thèse de Docteur Ingénieur, INA, Paris-Grignon, 281p.