

Une méthode d'analyse bidimensionnelle du retrait d'échantillons naturels de sol

Vincent HALLAIRE (*)

RÉSUMÉ

Une méthode est proposée pour étudier de façon distincte le retrait vertical et le retrait horizontal d'échantillons naturels de sols argileux, soumis à un dessèchement : les échantillons, orientés avec précision, sont filmés pendant leur dessèchement. A l'aide d'un système d'analyse d'images, on détermine leur contour. Des estimateurs de leur taille, les Diamètres de Féret, permettent de quantifier leur retrait d'une image à l'autre.

La méthode est testée pour deux types d'échantillons (agrégats et cylindres de sol). Les résultats expérimentaux montrent que les agrégats ont un retrait isotrope, alors que les cylindres ont un comportement anisotrope ; cette anisotropie évolue elle-même au cours d'une phase de dessèchement. En mettant en évidence cette anisotropie, la méthode permet de caractériser le fonctionnement structural du sol.

MOTS-CLÉS : argile - sol gonflant - courbe de retrait - porosité structurale - analyse d'image.

A TWO-DIMENSIONAL METHOD OF ANALYSIS OF SHRINKAGE OF NATURAL SOIL SAMPLES

This paper presents a method for analyzing shrinkage of a soil in two directions. The studied soil was a clayey soil, shrinkage curve of which had been determined by a volumetric method (Fig. 1) ; in order to measure independently vertical and horizontal shrinkage, a method using image analysis is proposed.

The principle of this method consists in observing oriented samples during their drying. The samples, placed on a balance, were filmed by a camera connected to an image analyzer, which digitalized images throughout the drying (Fig. 2). Although these images were strongly contrasted (Fig. 3), it was difficult to detect precisely the outlines of the shapes, because of the light changes around the samples (Fig. 4). With a convolution array, based upon the secondary derivative of the grey-level function, initial images could be transformed into outline images (Fig. 5).

This method was checked with two kinds of natural samples : aggregates (on a small and a large scale), and cylinder cores. With estimators of their size, "Feret diameters" (Fig. 6), it was possible to quantify their shrinkage from one image to another, and to relate this shrinkage to the moisture of the samples.

Experimental results were compared with the theoretical curve of an isotropic shrinkage. It was found that, whatever the scale of analysis, the aggregates had an isotropic shrinkage (Fig. 7 and 8). As for the cylinders, the results showed that vertical shrinkage was less than horizontal shrinkage (Fig. 9) ; this anisotropic shrinkage indicates changes of inter-aggregates porosity within the cores. Therefore this method appears to be useful to characterize the structural behavior of the soil.

KEY-WORDS : clay - swelling soil - shrinkage curve - structural porosity - image analysis.

(*) INRA, Laboratoire de Science du Sol, 65, rue de Saint-Brieuc, 35042 Rennes Cedex.

INTRODUCTION

L'étude de la porosité d'un sol argileux nécessite l'analyse des phénomènes de gonflement et de retrait, responsables d'une variation importante de l'espace poral au cours des cycles d'humectation et de dessiccation. On sait que ces phénomènes sont étroitement liés à la nature minéralogique de l'argile, à la charge du feuillet, mais également aux contraintes subies par le matériau au cours de son histoire hydrique et/ou mécanique (TESSIER, 1984 ; AZZAOU, 1988).

Une description précise des variations porales des sols en fonction de leur humidité s'avère nécessaire si l'on veut modéliser leurs états, tant sur le plan thermodynamique (SPOSITO & GIRALDEZ, 1976) que mécanique (FIES & STENGEL, 1981 ; BRAUDEAU, 1988).

La mesure de ces variations de porosité fait habituellement appel à deux types de méthodes :

- Les méthodes densimétriques estiment la masse volumique d'un échantillon par la mesure de son volume, le plus souvent en utilisant la poussée d'Archimède dans un liquide inerte (HAINES, 1923 ; MONNIER *et al.*, 1973). Les variations de masse volumique permettent d'effectuer des bilans de porosité et de décomposer ainsi la porosité en différentes classes (REEVE *et al.*, 1980 ; STENGEL, 1979). Mais, en se limitant à une mesure de volume, ces méthodes ne renseignent pas sur les variations de dimension du matériau dans l'une ou l'autre direction.

- Les méthodes de mesures linéaires permettent d'estimer les variations de taille de l'échantillon dans une direction donnée (FRANZMEIER & ROSS, 1968 ; BRAUDEAU, 1987) ; à une échelle plus grande, ce type de méthode est employé pour mesurer les variations d'épaisseur de couches de sol (YAALON & KALMAR, 1972 ; CABIDOUCHE *et al.*, 1986 ; HALLAIRE, 1987). Ces méthodes renseignent sur la part relative du retrait et du gonflement dans une direction, mais elles ne permettent pas d'établir directement des bilans de porosité, qui nécessitent la prise en compte des trois dimensions de l'échantillon.

Ces deux types de méthodes ne sont pas incompatibles et le retrait linéaire peut être calculé à partir du retrait volumique si ce retrait est isotrope : on démontre en effet (HALLAIRE, 1987) que lorsqu'un échantillon se rétracte de façon isotrope, le retrait dans l'une quelconque de ses dimensions peut être exprimé en fonction de la teneur en eau pondérale et de paramètres issus de la courbe de retrait volumique.

La méthode proposée ici a pour objectif de vérifier si cette hypothèse d'isotropie du retrait est fondée, en estimant le retrait d'échantillons selon deux directions. Dans ce but, l'image des échantillons est ici projetée sur un plan, ce qui permet une analyse en deux dimensions : la dimension verticale et une dimension horizontale, l'autre dimension horizontale étant supposée identique à la précédente. La taille des échantillons est mesurée séparément dans ces deux dimensions, ce qui nous permettra de chercher une relation entre ces retraits linéaires et le retrait volumique. Pour tester cette méthode, nous analyserons un matériau naturel à différentes échelles.

I. MATÉRIEL

Le matériel utilisé est constitué d'échantillons naturels extraits du sol de Courcival (Sarthe).

Ce sol a été décrit par SPECKLIN (1983) et a fait l'objet d'une étude hydrologique par ZIMMER (1989).

Développé sur des formations argileuses cénomaniennes, il présente une superposition d'horizons argileux et sablo-argileux ; les échantillons analysés ont été prélevés entre 40 et 50 cm, dans un horizon argileux lourd (44% d'argile, 45% de sables et 11% de limons), présentant de nets caractères vertiques.

Le retrait volumique de ce matériau a été caractérisé sur deux types d'échantillons : sur des agrégats soumis à différentes pressions hydriques, selon le protocole décrit par TESSIER & BERRIER (1979), et sur des cylindres de sol non perturbés, prélevés à différents états hydriques. La *figure 1* présente le volume massique $1/\gamma_d$ de ces échantillons en fonction de la teneur en eau pondérale w . Le matériau montre un retrait important pendant le dessèchement ; pour des humidités supérieures à 15%, la courbe de retrait peut être assimilée à une droite d'équation :

$$1/\gamma_d = 0,889 w + 0,399 \quad (1)$$

(régression établie sur 135 points ; $r = 0,952$).

Pour des humidités plus faibles, le matériau se rétracte moins rapidement : la limite de retrait est atteinte pour une teneur en eau pondérale voisine de 10%.

Les échantillons étudiés sont de deux types :

- des agrégats naturels, de taille centimétrique, obtenus par fragmentation à partir de mottes grossières ;
- des blocs de sol non remaniés, prélevés à l'aide de cylindres métalliques (diamètre 8 cm, hauteur 5 cm) en fin d'hiver, lorsque l'humidité du sol est maximale.

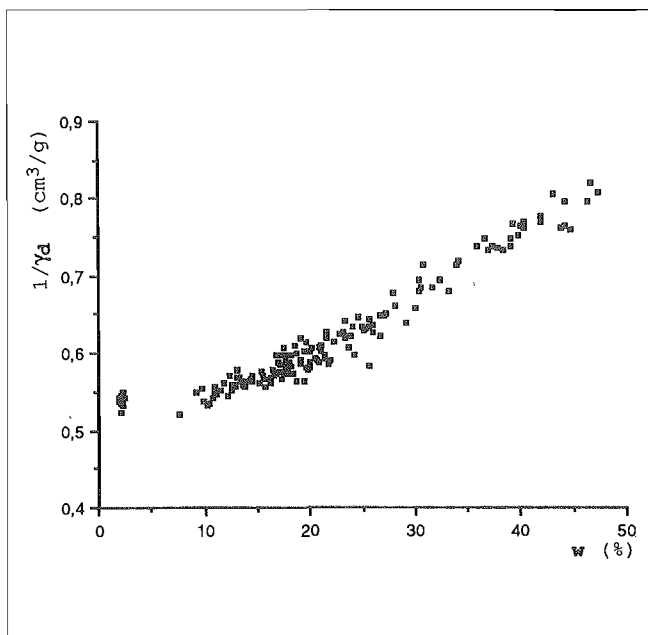


Figure 1 :

Evolution du volume massique de mottes naturelles avec l'humidité pondérale.

Massic volume of natural clods versus gravimetric water content.

II. METHODES

A) MESURE DU RETRAIT D'AGRÉGATS

1. Dispositif expérimental

Lors du prélèvement des agrégats, leur orientation *in situ* est repérée avec précision. Au laboratoire, ils sont disposés sur un support clair (papier filtre blanc), sur une de leurs faces latérales et selon l'orientation qu'ils avaient dans le sol, c'est-à-dire "de profil" par rapport à l'observateur. Les échantillons sont saturés en eau par capillarité, sous vide pendant 48 heures.

Les agrégats sont ensuite placés sur le plateau d'une balance, toujours dans la même disposition ; ils sont alors soumis à un dessèchement par évaporation. La pesée en continu permet à tout instant de connaître la quantité d'eau perdue par les agrégats.

Durant tout leur dessèchement, les agrégats sont filmés par une caméra située au-dessus de la balance et reliée à un analyseur d'images (système COLORIX, implanté sur mini-ordinateur Bull SPS7/75 ; l'analyse d'images proprement dite est effectuée au moyen du logiciel VISILOG de NOESIS).

32 images ont été acquises à intervalles réguliers au cours du dessèchement. Cette acquisition consiste à numériser l'image sous forme d'une matrice carrée de 512 x 512 points (ou pixels) ; on a pu vérifier l'isotropie de la trame utilisée : la distance entre deux pixels est donc identique selon l'axe horizontal et l'axe vertical. Chaque pixel est doté d'un "niveau de gris" compris entre 0 (pour le plus sombre) et 255 (pour le plus clair).

L'expérimentation a été menée à deux grossissements :

– sur des images comportant une population de 35 agrégats ; le champ de l'image couvre alors 18,5 cm x 18,5 cm, chaque pixel représentant environ 360 µm de côté. La *figure 2* montre une image acquise à cette échelle.

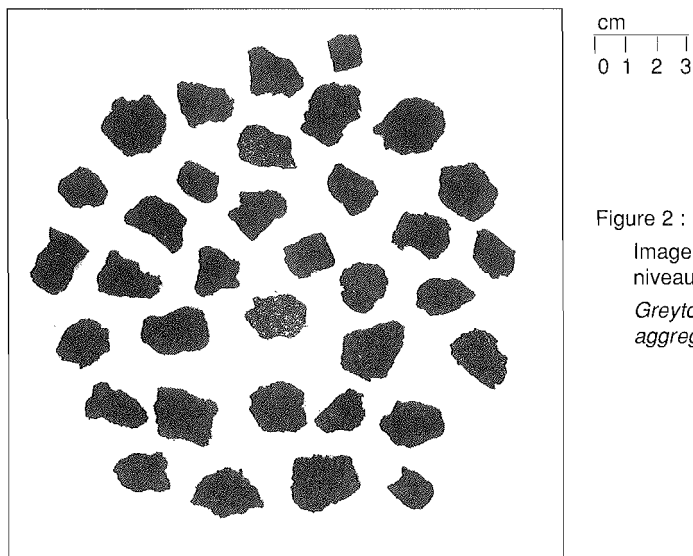


Figure 2 :

Image initiale des agrégats en niveaux de gris.

Greytones initial picture of the aggregates.

– à un plus fort grossissement, sur un agrégat seul ; le champ de l'image est alors de 3,6 cm x 3,6 cm, ce qui correspond à une taille de pixel d'environ 70 µm de côté.

2. Détermination de la taille des agrégats

Afin de calculer le retrait du matériau au cours du dessèchement, on cherche à déterminer le contour des agrégats sur chaque image, puis à étudier l'évolution de ce contour d'une image à l'autre.

La détection du contour est simplifiée par le fait que les images acquises sont fortement contrastées. Sur la *figure 3*, qui présente l'histogramme des niveaux de gris sur une image, on distingue nettement deux familles de pixels : les plus clairs appartenant au fond de l'image (pic de droite) et les plus sombres appartenant aux agrégats (pic de gauche).

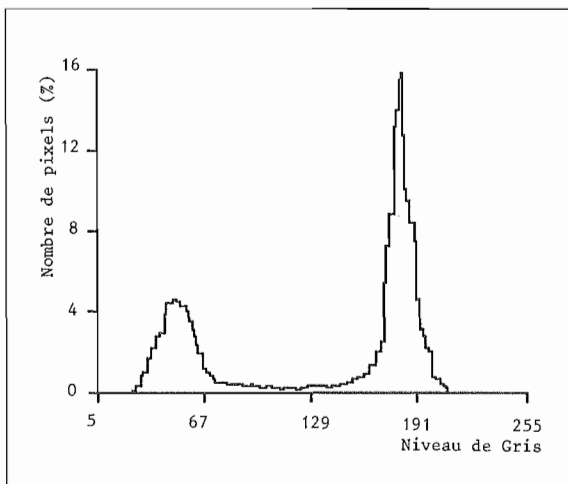


Figure 3 :

Histogramme des niveaux de gris de l'image initiale.

Histogram of the grey levels on initial picture.

Malgré ce bon contraste, le choix d'un seuil de niveau de gris entre ces deux pics reste délicat, car le contour de l'agrégat se situe précisément dans une plage de niveaux de gris intermédiaires entre le cœur des agrégats et le fond clair. Sur un profil de niveaux de gris traversant l'image (*figure 4*), on constate que le passage entre les niveaux de gris élevés et les niveaux de gris faibles se fait rarement sur un pixel, mais s'étale généralement sur 2 à 4 pixels : cela peut être dû à des variations d'éclairage dans ces zones (surbrillances sur le pourtour des agrégats, ombres autour d'eux). Une telle imprécision dans la détection du contour n'est pas compatible avec l'objectif poursuivi.

Pour rendre cette détection de contour plus aisée, on effectue sur l'image numérique un produit de convolution destiné à évaluer en chaque point la dérivée seconde de la fonction Niveau de Gris. La dérivée seconde s'annulant aux points d'inflexion, elle nous permettra de détecter les frontières. Le gradient proposé par PRATT (1978) pour obtenir ce "rehaussement de contour" est égal à la somme de la fonction d'entrée et du Laplacien, c'est-à-dire la matrice :

$$\begin{array}{ccc} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{array}$$

Ce produit de convolution permet de déterminer sans équivoque le seuil de niveau de gris qui sépare les agrégats du fond (*figure 5*) et grâce auquel on peut obtenir l'image binaire.

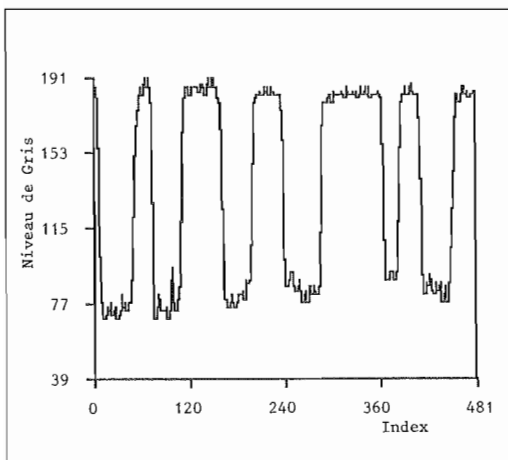


Figure 4 : Profil des niveaux de gris : coupe transversale de l'image

Grey levels profile through the picture.

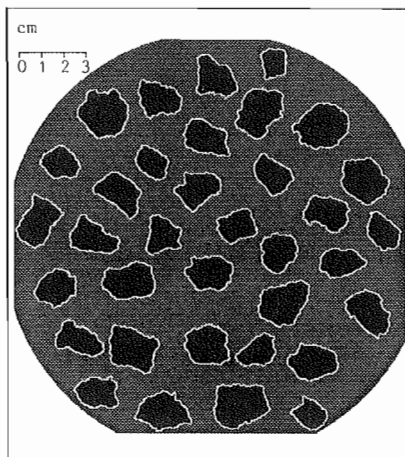


Figure 5 :

Détection du contour des agrégats.

Detection of the outlines of the aggregates.

Sur cette image binaire ne comportant plus que la silhouette des agrégats, il nous reste à choisir un estimateur de la taille. Rappelons que les agrégats sont orientés de la même façon que dans le sol : l'axe vertical correspond donc bien à la hauteur des échantillons. Compte tenu de cette disposition, les paramètres retenus pour mesurer la taille des agrégats sont les "diamètres de Férét", c'est-à-dire les dimensions minimales du rectangle dans lequel ils s'inscrivent (*figure 6a*). Le Férét vertical permet d'estimer la hauteur de l'agrégat, le Férét horizontal sa largeur. Ces deux paramètres, obtenus pour chaque agrégat de chaque image, permettront d'estimer indépendamment le retrait vertical et le retrait horizontal des échantillons.

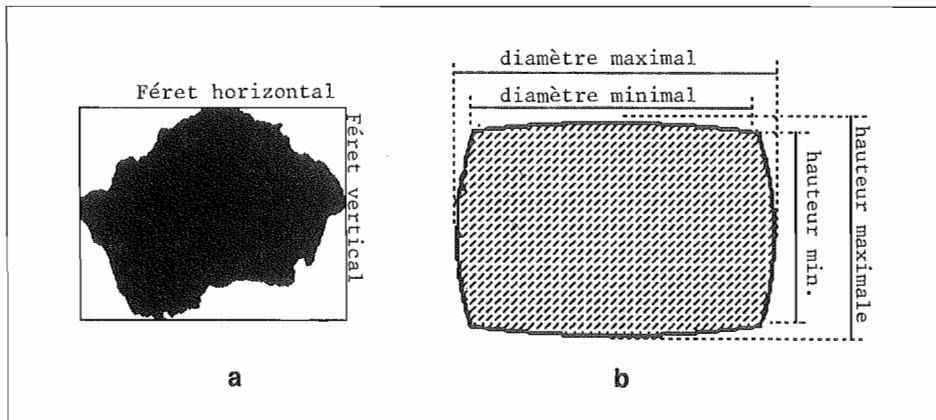


Figure 6 : Estimateurs de la taille des échantillons : agrégat (a) - "cylindre" (b).

Estimators of the size of samples ; aggregate(a) - "cylinder" core (b).

A chaque stade i de dessèchement pour lequel on dispose d'une image, le retrait sera exprimé comme étant la variation du diamètre de Féret entre le stade 0 (stade initial, humidité maximale) et le stade i :

$$(2) \quad \text{Retrait (i)} = \frac{\text{Féret (0)} - \text{Féret (i)}}{\text{Féret (0)}}$$

3. Mesure de l'humidité des agrégats

Afin de pouvoir exprimer le retrait en fonction de l'humidité, il est nécessaire de connaître la teneur en eau des échantillons à chaque stade.

En fin de dessèchement, la limite de retrait étant atteinte, les agrégats sont recueillis individuellement. La mesure de leur teneur en eau à ce stade ultime et la connaissance de la masse des échantillons lors de chaque acquisition d'image permettent *a posteriori* de calculer la teneur en eau moyenne des agrégats pour chaque image.

B) MESURE DU RETRAIT DE CYLINDRES DE SOL

Le prélèvement des blocs de sol non remaniés est effectué verticalement, de façon à ce que la hauteur du cylindre corresponde à la dimension verticale du sol en place.

Extrait de son anneau métallique, chaque bloc de sol est disposé latéralement sur la balance, selon le même dispositif expérimental que pour les agrégats : le cylindre se présente de côté par rapport à la caméra, ce qui permet de suivre en continu l'évolution de sa hauteur (Féret vertical) et de son diamètre (Féret horizontal). Afin de mettre en évidence d'éventuelles déformations du bloc, chacun de ces deux paramètres sera ici mesuré en deux endroits : diamètre maximal et diamètre minimal, hauteur maximale et hauteur minimale (*figure 6b*).

Un cylindre occupant toute la largeur d'une image, le champ observé est de 8 cm x 8 cm, ce qui correspond à une échelle approximative de 150 μm par pixel.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

A) RETRAIT DES AGRÉGATS

1. Le retrait d'une population d'agrégats

La *figure 7* montre l'évolution au cours du dessèchement des retraits horizontal et vertical des 35 agrégats analysés. Pour chaque image, les résultats sont représentés par la moyenne des valeurs des 35 individus et par l'écart-type de leur distribution.

De ce graphe, on peut tirer deux constatations :

- sur toute la gamme de teneur en eau, le retrait horizontal des agrégats est, en moyenne, identique à leur retrait vertical : le retrait apparaît donc comme isotrope. On retrouve nettement la limite de retrait pour $w = 10\%$;

- la dispersion des résultats, visualisée par les barres verticales, est loin d'être négligeable dès les premiers stades. Elle atteint un maximum au milieu du dessèchement (teneur en eau pondérale comprise entre 25 et 20%), pour diminuer vers la fin du dessèchement. Cette dispersion est toutefois identique dans les deux directions analysées.

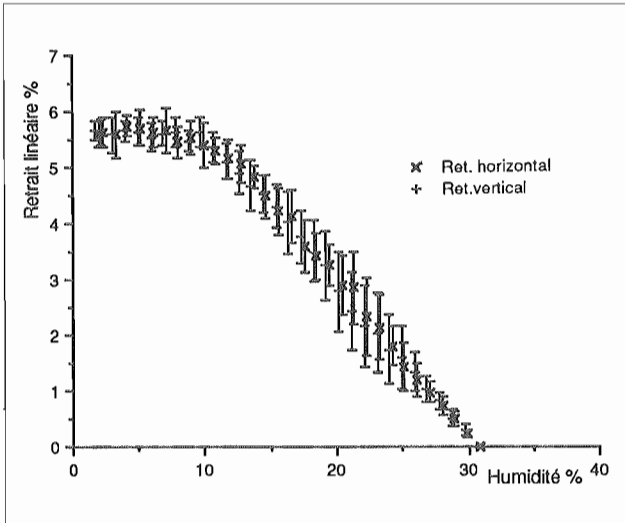


Figure 7 :

Evolution des retraits vertical et horizontal avec la teneur en eau pondérale : moyenne et écart-type de 35 agrégats.

Variations of the horizontal and vertical shrinkages with gravimetric water content : mean and standard deviation of 35 aggregates.

Ces premiers résultats montrent ainsi les apports de la méthode utilisée : statistiquement, elle nous permet de caractériser le retrait du matériau selon deux directions et de vérifier que ce retrait est isotrope. Mais, au-delà de ce résultat statistique, la dispersion parfois élevée des valeurs mesurées nous montre les limites de la méthode ; cette dispersion peut trouver deux explications.

– Travaillant sur des images digitalisées, la méthode opère de façon discrète. Bien que le retrait s'effectue en continu dans la réalité, on ne peut le mettre en évidence que s'il représente au moins 1 pixel. Au grossissement choisi (370 μm par pixel), les diamètres de Féret initiaux des agrégats sont de l'ordre de 80 pixels. Le retrait total étant d'environ 6%, les agrégats perdront en moyenne 5 pixels pendant tout le dessèchement. De ce fait, il est normal qu'entre deux images successives, les individus ne répondent pas tous de manière identique. La précision de la mesure est donc ici le facteur limitant, ce qui oblige à analyser un grand nombre d'individus.

– La teneur en eau correspondant à chaque stade est une teneur en eau moyenne des agrégats au moment de l'acquisition de l'image. Elle ne rend pas compte d'une éventuelle hétérogénéité hydrique de la population, qui peut elle-même varier au cours du temps si les vitesses de dessèchement ne sont pas identiques pour tous les individus : l'hypothèse la plus vraisemblable pour expliquer la forte dispersion des résultats entre 25 et 20% d'humidité est que, dans cette gamme de teneur en eau, les agrégats présentent l'hétérogénéité hydrique la plus élevée. Le dessèchement se poursuivant, les teneurs en eau s'équilibreront.

2. Le retrait d'un agrégat seul

La figure 8 représente l'évolution des diamètres de Féret horizontal et vertical d'un agrégat isolé en fonction de sa teneur en eau. On constate là encore une étroite correspondance entre ces deux séries de données.

La signification statistique de ce résultat est évidemment moins grande que lorsque l'expérimentation était menée sur une population d'agrégats. Par contre, la précision des mesures est plus élevée dans le cas présent, tant en ce qui concerne la teneur en eau que le retrait :

- la valeur de teneur en eau est celle de l'agrégat et de lui seul ;
- les valeurs de retrait sont établies sur un agrégat qui occupe tout le champ de l'image et dont les diamètres de Feret initiaux avoisinent 500 pixels ; la valeur du pixel étant de 60 μm , le retrait peut être mis en évidence image par image.

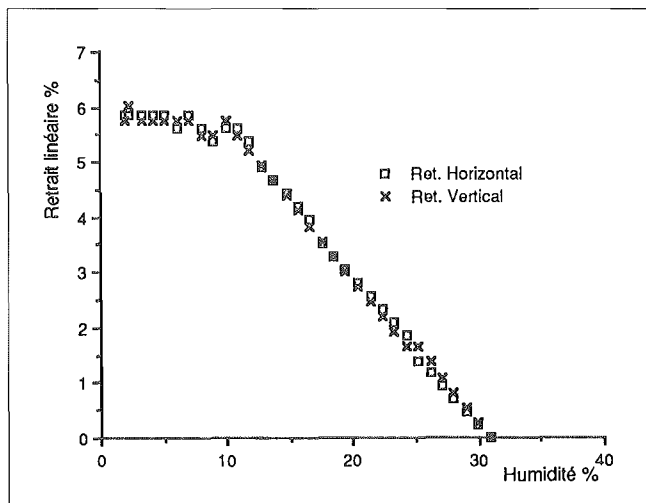


Figure 8 :

Evolution des retraits horizontal et vertical avec la teneur en eau pondérale pour un agrégat.

Variations of the horizontal and vertical shrinkages with gravimetric water content for one aggregate.

B) RETRAIT DE CYLINDRES DE SOL

La figure 9 présente l'ensemble des résultats obtenus sur un cylindre de sol : diamètres maximal et minimal, et hauteur maximale de l'échantillon. Pour ne pas surcharger le graphe, on n'a pas représenté la hauteur minimale, qui n'était pas significativement différente de la hauteur maximale (jamais plus d'un pixel d'écart).

La comparaison de ces trois courbes met en évidence plusieurs types de déformations de l'échantillon.

- Horizontalement, les deux diamètres montrent un écart significatif sur une importante gamme d'humidité (de 30 à 20% environ), ce qui est caractéristique d'un bombement de l'échantillon. En-deçà de 20%, les deux retraits diamétraux sont quasiment confondus : l'échantillon reprend une forme cylindrique.

- Verticalement, même s'il n'y a pas de bombement, le retrait montre une évolution très différente du retrait horizontal : le dessèchement provoque dans un premier temps un très faible retrait vertical (jusqu'à une humidité de 23% environ) ; pour des humidités plus faibles, le retrait vertical s'accélère jusqu'à une humidité de 15% environ. Contrairement à la courbe de retrait volumique, qui apparaissait continue et monotone dans la gamme d'humidité 50% - 15% (figure 1 et équation 1), ces courbes de retrait linéaire montrent nettement deux phases dans cette même gamme d'humidité, avec un

comportement anisotrope du matériau et une inversion de cette anisotropie pour $w = 23\%$: pour des humidités supérieures, l'anisotropie se traduit par un retrait vertical moins important que le retrait diamétral ; pour des humidités inférieures, elle se traduit par un retrait vertical plus important que le retrait diamétral.

Sur le plan expérimental, la méthode apporte d'importants renseignements, en montrant des déformations de l'échantillon analysé et en faisant apparaître que son retrait est anisotrope, cette anisotropie s'inversant au cours d'une phase de dessèchement. La mise en évidence de ce phénomène montre le risque de vouloir caractériser le retrait d'un échantillon dans une seule direction.

Sur le plan structural, ces courbes, associées à celles obtenues sur agrégats, permettent de mieux comprendre l'organisation du matériau. BRUAND (1985) avait déjà noté d'importantes différences entre les courbes de retrait selon la taille de l'échantillon analysé ; ici, le comportement isotrope à l'échelle de l'agrégat et anisotrope à l'échelle d'un ensemble d'agrégats suppose une évolution des espaces inter-agrégats, qu'il devient maintenant possible de décomposer selon les différentes directions.

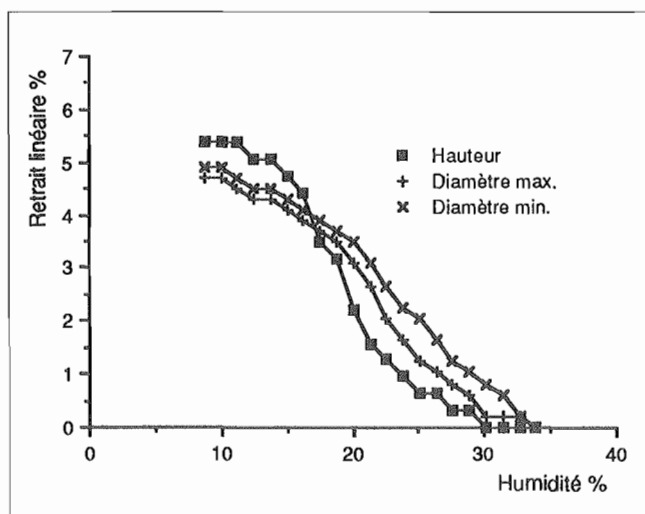


Figure 9 :

Evolution des retraits vertical et diamétraux d'un cylindre de sol avec la teneur en eau pondérale.

Variations of the vertical and diametral shrinkages of a core sample with gravimetric water content.

CONCLUSION

Les différents niveaux d'organisation et les différentes échelles analysées nous ont montré les limites de la méthode proposée ; la précision s'est ici révélée suffisante, compte tenu du fort pouvoir de retrait du sol analysé. Mais, le principe de la méthode étant de mesurer des retraits relatifs de façon discrète, la précision des résultats est limitée par le fait que l'échantillon mesure au maximum 512 pixels et que seules des variations d'au moins 1 pixel seront enregistrées. De ce point de vue, cette méthode est moins précise que celle utilisant des capteurs linéaires de déplacement, où l'on mesure des variations absolues de la taille des échantillons ; la méthode présentée ici risque d'être insuffisamment précise pour mesurer le retrait de sols faiblement gonflants.

Malgré cet inconvénient, cette méthode non destructive, capable de suivre un échantillon en continu, présente l'avantage de pouvoir analyser le retrait selon plusieurs directions. Elle nous a permis de mettre en évidence des déformations et une anisotropie du retrait à une échelle donnée ; la prise en compte de cette anisotropie est indispensable, aussi bien pour l'établissement des bilans de porosité (TOWNER, 1986) que pour la description de l'état structural du matériau, c'est-à-dire l'agencement des différentes fractions porales et leur évolution. Il est nécessaire de tenir compte de cet aspect bidimensionnel si l'on veut associer une analyse morphologique à une analyse physique du retrait.

Reçu pour publication : Juillet 1990

Accepté pour publication : Février 1991

BIBLIOGRAPHIE

- AZZAOUI M.M., 1988. – *Comportement hydrique et organisation des matériaux argileux soumis à des contraintes hydriques et mécaniques. Rôle des différents types de forces d'hydratation.* Thèse Doct. Univ. Paris VI, 225 p.
- BRAUDEAU E., 1987. – Mesure automatique de la rétraction d'échantillons de sol non remaniés. *Science du Sol*, **25**, 85-93.
- BRAUDEAU E., 1988. – Equation généralisée des courbes de retrait d'échantillons de sol structurés. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **307**, série II, 1731-1734.
- BRUAND A., 1985. – *Contribution à l'étude de la dynamique de l'organisation de matériaux gonflants.* Thèse Univ. Paris VII, 225 p.
- CABIDOCHÉ Y.M., JAILLARD B., NEY B., 1986. – Dynamique de l'eau dans les vertisols sur calcaires récifaux. In : *Sol et Eau, Actes du Séminaire de La Havane*, 8-20 avril 1985. ORSTOM, Paris, 449-478.
- FIÈS J.C., STENGEL P., 1981. – Densité texturale de sols naturels. II. Eléments d'interprétation. *Agronomie*, **1**, 659-666.
- FRANZMEIER D.P., ROSS S.J., 1968. – Soil swelling : laboratory measurement and relation to other soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **32**, 573-577.
- HAINES W.B., 1923. – The volume changes associated with variations of water content in soil. *J. Agric. Sci.*, **13**, 293-310.
- HALLAIRE V., 1987. – Retrait vertical d'un sol argileux. Mesures de l'affaissement et conséquences structurales. *Agronomie*, **7**, 631-637.
- MONNIER G., STENGEL P., 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.
- PRATT W.K., 1978. – *Digital Image Processing.* John Wiley, New York, 750 p.
- REEVE M.J., HALL D.G.M., BULLOCK P., 1980. – The effect of soil composition and environmental factors on the shrinkage of some clayey British soils. *J. Soil Sci.*, **31**, 429-442.
- SPECKLIN G., 1983. – *Etudes préliminaires en vue du drainage de terres agricoles du département de la Sarthe. Secteur de référence de l'Orne saosnoise.* ONIC, INRA, CEMAGREF, 127 p.

- SPOSITO G., GIRALDEZ J. V., 1976. – Thermodynamic stability and the law of corresponding states in swelling soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **40**, 352-358.
- STENGEL P., 1979. – Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol *in situ*. *Ann. Agron.*, **30**, 27-51.
- 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 Doct. ès Sci. Paris VII, INRA, 361 p.
- TESSIER D., BERRIER J., 1979. – Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude des sols. Observation de sols humides à différents pF. *Science du Sol*, 67-82.
- TOWNER G.D., 1986. – Anisotropic shrinkage of clay cores, and the interpretation of field observations of vertical soil movement. *J. Soil Sci.*, **37**, 363-371.
- YAALON D.H., KALMAR D., 1972. – Vertical movement in undisturbed soil : continuous measurement of swelling and shrinkage with a sensitive apparatus. *Geoderma*, **8**, 231-240.
- ZIMMER D., 1989. – *Transferts hydriques en sols drainés par tuyaux enterrés. Compréhension des débits de pointe et essai de typologie des schémas d'écoulement*. Thèse Univ. Paris VI, CEMAGREF (Etudes Hydrauliques Agricoles n° 5), 327 p.