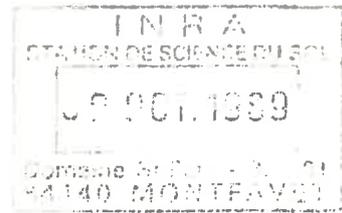


~~TH 1135~~

GB2



**CNEARC - MONTPELLIER**

**ANALYSE MECANIQUE DE LA  
FISSURATION D'UN MATERIAU  
ARGILEUX EN COURS D'HUMECTATION**

Mémoire de fin d'étude :  
Option Machinisme Agricole

**UMAR OLASENI**

Octobre 1989

## **AVANT - PROPOS**

J'aimerais exprimer mes sincères remerciements à :

- **Monsieur Pierre STENGEL**, Directeur de la Station de Science du Sol, qui a dirigé mon stage. Il m'a guidé et encouragé sans arrêt tout au long de ce stage.

- **Monsieur Michel BOURLET**, Assistant Ingénieur, qui m'a beaucoup aidé et bien orienté dans les techniques de laboratoire.

- **Monsieur Jean-Luc MESSE**, Responsable de la formation d'EITARC au CNEARC pour ses conseils tout au long de la formation.

- **Monsieur Jérôme GUERIF** et tous ceux du Laboratoire de la Station de Science du Sol pour leur aimable accueil pendant mon séjour à Avignon.

- Enfin, je remercie Madame Nadia LEITGOLD qui a assuré la frappe de ce rapport.

## MECHANISM OF SOIL STRUCTURE EVOLUTION BY WETTING.

### ABSTRACT

*The phenomenon of cracks development in compact clay soil during wetting with water at zero hydrostatique pressure had been established by previous works. The main aim of this study is to investigate the role of wetting conditions in the process of evolution of soil structure by wetting.*

*The laboratory experiments started with establishment of soil moisture characteristics curves such as swelling capacity and suction water content curves, as well as the test of tensile strength of aggregates and cylindrical compact soil samples. The laboratory manipulations were conducted by wetting remoulded samples initially homogeneous and continuous from the bottom. Four different thicknesses of the soil samples with same initial water content "Wi" were compared. (7; 10; 25 and 40mm). The cracks length per unit area "Lf" and the surface structural porosity "nS" were measured with the aid of an image analyser (Pericolor 2000).*

*Results indicate regression between cracks length per unit area "Lf" and thickness of soil samples. The division of compacted structural unit is more intense in low thickness soil samples. Longitudinal section of impregnated cracked samples shows vertical and horizontal cracks in the upper and lower layers respectively. Consequently, however, prismatic aggregates were formed in the upper layer and platy aggregates in the lower part of each cracked sample. The unpredictable variation of wetness "W" leaves doubts to when vertical cracks are formed in medium thickness samples of soil.*

*The wetting of spherical compact soil samples (clods) were realised by burying them in wet vermiculite.*

*The result shows susceptibility of clods cracking with very little variation of moisture content. The cross section of clods at just about 10% moisture content shows diametrical cracks, which makes interpretations of evolution of soil structure mechanism in spherical compact soil samples to be difficult.*

*The soil profile moisture content could be an important factor that determines the proportion of different types of aggregates during the evolution of clay soil structure. The quantitative assessment of its effects requires knowledge of the unsaturated soils samples hydraulic conductivity and diffusivity, and further laboratory experiments in order to be able to establish a qualitative model for field application.*

## RESUME

L'existence et les conditions d'apparition du phénomène de fissuration ont été établies par des travaux expérimentaux antérieurs. Ce travail avait pour objectif de valider un schéma mécanique élaboré à partir de l'interprétation de ces travaux.

L'expérimentation a été réalisée sur des échantillons remaniés, initialement secs à l'air, continus et homogènes. Un travail de caractérisation de leur état initial a permis de démontrer leur continuité mécanique. On a également étudié leurs propriétés de gonflement et de rétention d'eau (relation potentiel-teneur en eau) dans le sens de l'hydratation.

Des éprouvettes cylindriques de différentes épaisseurs, séchées à l'air, ont été placées au contact par leur face inférieure, avec une source d'eau à potentiel nul. Quatre épaisseurs différentes 7, 10, 25 et 40 mm ont été comparées. On a d'une part décrit l'évolution de la fissuration à la face supérieure du cylindre, d'autre part observé l'état interne des éprouvettes sur des sections réalisées après imprégnation par une résine polyester. Enfin, on a étudié la cinétique d'absorption d'eau par les éprouvettes et la distribution des teneurs en eau, au moment de l'apparition des premières fissures à la face supérieure.

Les résultats montrent l'influence de l'épaisseur de l'éprouvette sur les conditions d'apparition des premières fissures affectant la zone supérieure encore sèche. Celle-ci est divisée par des fissures verticales, attribuées au développement de contraintes de traction. Au contraire, la partie inférieure humide de l'éprouvette est fissurée préférentiellement dans la direction horizontale. Ces fissures ont été attribuées au développement de contraintes de cisaillement. L'hétérogénéité de distribution des teneurs en eau à l'intérieur des éprouvettes a empêché d'établir une relation quantitative claire entre l'épaisseur totale des cylindres et celle de chacune des deux zones.

La cinétique d'absorption d'eau par les cylindres a montré l'effet de la formation des premières fissures dans la partie encore sèche de l'échantillon : elle induit un accroissement du flux particulièrement important dans les échantillons d'épaisseur la plus faible.

A l'équilibre hydrique, la longueur surfacique de fissures visibles en surface décroît quand l'épaisseur des cylindres augmente. Elle atteignait pour les cylindres les moins épais des valeurs très élevées d'environ  $6 \text{ cm.cm}^{-2}$ .

Des travaux préliminaires identiques ont été réalisés sur des sphères, humectés par la totalité de leur surface. Des modalités de fissuration analogues à celles des cylindres ont été observées. La possibilité d'une intervention des transferts d'eau en phase vapeur et des contraintes de gonflement qu'ils peuvent induire, empêche cependant d'analyser la fissuration de la partie encore sèche à partir des hypothèses antérieurement formulées.

Les résultats acquis sur les cylindres sont qualitativement en accord avec les hypothèses initiales. Une vérification plus quantitative requiert une maîtrise expérimentale qu'il paraît difficile d'atteindre dans les conditions utilisées ici.

- I. INTRODUCTION**
  
- II. PROTOCOLE EXPERIMENTAL**
  - II.1. Préparation des échantillons**
  - II.2. Dispositif de réhumectation**
    - II.2.1. Echantillons cylindriques**
    - II.2.2. Echantillons sphériques**
  - II.3. Technique d'imprégnation**
  - II.4. Mesures**
    - II.4.1. Absorption d'eau**
    - II.4.2. Observation de la fissuration**
    - II.4.3. Mesures d'humidité et de densité**
  - II.5. Relation potentiel-teneur en eau**
  - II.6. Propriétés mécaniques des éprouvettes**
  
- III. PROPRIETES DES ECHANTILLONS ETUDIES**
  - III.1. Constitution du matériau**
  - III.2. Relation potentiel-teneur en eau**
  - III.3. Gonflement**
  - III.4. Propriétés mécaniques**
  
- IV. RESULTATS**
  - IV.1. Rappel du cadre d'interprétation**
    - IV.1.1. Schéma général de rupture**
    - IV.1.2. Influence de la géométrie des échantillons**
  - IV.2. Influence de l'épaisseur des éprouvettes cylindriques sur la fissuration de la face supérieure**
    - IV.2.1. Variation en cours d'humectation**
    - IV.2.2. Etat final**
  - IV.3. Conditions d'apparition des fissures dans la zone sèche**
    - IV.3.1. Profils hydriques au moment de la fissuration**
    - IV.3.2. Observations des fissures sur des échantillons imprégnés**
  - IV.4. Fissuration des éprouvettes sphériques**
    - IV.4.1. Existence de la fissuration par humectation**
    - IV.4.2. Conditions de fissuration**
    - IV.4.3. Rôle des transferts en phase vapeur**
  - IV.5. Relation avec la cinétique d'humectation**
    - IV.5.1. Cinétiques d'humectation**
    - IV.5.2. Variations des flux**

## **V. DISCUSSION**

**V.1. Modalités de la fissuration à l'humectation**

**V.2. Protocole expérimental**

**V.2.1. Préparation des éprouvettes**

**V.2.2. Etude d'échantillons imprégnés**

## **VI. CONCLUSION**

## **BIBLIOGRAPHIE**

## **ANNEXES**

## I. INTRODUCTION

La structure des couches superficielles a pour l'ensemble des fonctions du sol, du double point de vue agronomique et environnemental, un rôle essentiel. Elle détermine en effet largement les propriétés mécaniques et les propriétés de transfert de ces couches, auxquelles leur situation d'interface avec l'atmosphère confère un rôle privilégié :

- dans le déterminisme des flux de masse et d'énergie,
- comme support de la végétation et de l'activité agricole.

Du fait également de cette situation d'interface, ces couches sont l'objet d'évolutions structurales de grande intensité et à pas de temps court. Il en résulte des variations spatiales et temporelles considérables de leurs propriétés physiques qui constitue une des principales difficultés pour l'analyse et la prévision de tout type de fonctionnement : transferts d'eau, de gaz et de solutés, croissance racinaire, effet des techniques de travail du sol.

Dans ces processus d'évolution structurale, les propriétés de retrait et de gonflement des particules argileuses jouent un rôle considérable. Elles associent en effet aux variations de teneur en eau des déformations de l'espace poral qui affectent tous les matériaux contenant des argiles gonflantes. A échelle macroscopique, elles sont à l'origine des phénomènes de fissuration, dont les manifestations sont particulièrement spectaculaires dans les sols argileux. Elles interviennent également dans le développement de la structure de tous les sols qui présentent une capacité de gonflement même très limitée : la fissuration résultant des alternances humectation-dessiccation est un mécanisme très général de division du volume du sol et de formation des éléments structuraux. Ses interactions avec les effets du travail du sol sont bien connues dans leurs effets pratiques et intégrées dans l'élaboration des itinéraires techniques comme facteur d'affinement de mottes grossières ou de réduction de leur résistance mécanique. Sous les climats tropicaux, le sol n'étant pas soumis au gel, elles constituent le seul processus physique permettant la formation ou la régénération d'une structure fragmentaire, en l'absence ou en complément du travail du sol.

Le présent travail se situe dans le cadre général de l'étude de la régénération de la structure du sol après compactage. Son objectif est de contribuer à la mise au point de moyens de prévision des possibilités de régénération de la structure en l'absence de travail du sol (STENGEL, 1983) et/ou après fragmentation mécanique. Il s'agit alors de prévoir la fissuration de mottes de type  $\Delta$  (MANICHON, 1982) formées lors de la division d'une couche compactée par un outil.

Des travaux antérieurs réalisés à la Station de Science du Sol d'Avignon ont permis de mieux discerner les rôles spécifiques de l'humectation et de la dessiccation dans le déterminisme de la fissuration. Le plus souvent celle-ci est considérée comme étant liée au retrait, donc à la dessiccation, et la majorité des travaux expérimentaux, ainsi que les tentatives de description et de modélisation, ont porté sur cette phase de variation de teneur en eau. Il a été montré qu'un apport d'eau à un volume de sol sec peut induire une fissuration plus fine que la dessiccation, et ceci dans des matériaux présentant des propriétés de gonflement très différentes (CARDON-DUBOIS, 1985 ; DE LEON, 1987). Les conditions de formation des fissures ont été déterminées expérimentalement en laboratoire et reliées à ces propriétés de gonflement.

L'existence et l'intensité du phénomène de fissuration par humectation, d'abord étudié sur des matériaux remaniés de façon à les rendre initialement continus, ont été vérifiées sur des échantillons naturels compacts (DINEL, 1988) et *in-situ*. On a ainsi mis en évidence dans l'effet d'un apport d'eau sur la fissuration les rôles respectifs de la phase d'humectation et de la redistribution qui la suit. L'interprétation de chacune des phases du processus est apparue possible à partir de l'élaboration d'un schéma mécanique reliant la distribution de teneurs en eau (profil hydrique) aux déformations qu'elle induit du fait de propriétés de gonflement et par là au champ de contraintes résultant (DINEL, 1988 ; STENGEL, 1988).

La validation de ce schéma est un préalable à l'élaboration des hypothèses d'un modèle mécanique qui serait nécessaire pour tenir compte de l'effet de la géométrie des éléments structuraux subissant l'apport d'eau et de leurs conditions d'humectation. Les travaux présentés avaient donc pour objectif :

- d'étudier expérimentalement l'influence de la forme des volumes compacts réhumectés et de la géométrie de l'apport d'eau,
- de valider les hypothèses mécaniques de rupture développées à partir des travaux précédents.

Cet objectif impliquait de travailler sur des volumes de matériaux homogènes, de forme imposée, et en maîtrisant précisément les modalités d'humectation. L'expérimentation a donc été conduite en laboratoire et sur échantillons remaniés.

## **II. PROTOCOLE EXPERIMENTAL**

Le protocole expérimental choisi avait pour but de valider les hypothèses mécaniques émises à la suite des travaux précédents et relatives aux modalités de fissuration d'un volume continu subissant une humectation. On a donc choisi de

Figure 1: PREPARATION DES ECHANTILLONS

-Calcul de 1.9 Humidité equivalent (HE)  
d'échantillons tamisé à 2mm.

-Addition d'eau dégazée

-Malaxage 4H

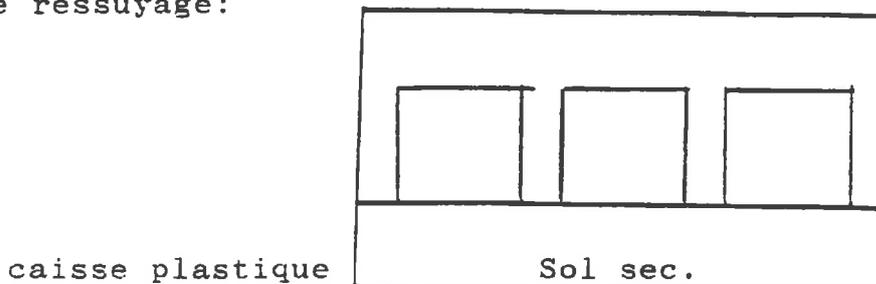
-Addition d'eau jusqu'a 1.9 HE

Malaxage mecanique obtention de la boue

-----  
-Repos de la boue à 5°C 12H

-Continuation de malaxage 2H  
-----

-Placement de la boue dans les cylindres metaliques  
(diametres 4, 8, et 12cm; Hauteurs 2, 4, 10cm) du system  
de réssuyage:



-----  
-Quelques massifs cylindrique sont moulés pour faire des  
en sphere avant qu'ils ne soient complètement secs.

-----  
-Periode de réssuyage des massifs 30 jours  
-----

-Enlevement des grandes massifs du systeme de réssuyage  
-----

-Coupure en deux des grands massifs

-Obtention des éprouvettes continues

-----  
-Désséchement à l'air au laboratoire.

travailler sur des échantillons remaniés et préparés de façon à obtenir un état initial continu. On s'est également placé dans les conditions où la fissuration en cours d'humectation se manifeste avec la plus grande intensité : échantillon initialement sec à l'air, réhumecté par mise en contact avec de l'eau à potentiel nul, choix d'un matériaux argileux gonflant. Dans ces conditions, il s'agissait :

- d'étudier les relations entre la morphologie fissurale et la géométrie des volumes de sol soumis à la réhumectation,
- d'observer la distribution des fissures à l'intérieur du volume de l'échantillon et en particulier leurs variations d'orientation, les travaux antérieurs n'ayant porté que sur la description des fissures observables en surface.

### **II.1. Préparation des échantillons**

Le protocole de préparation des échantillons est décrit par la figure 1. Son principe consiste à malaxer une quantité de matériau sec à l'air et tamisé en présence d'une quantité d'eau suffisante pour l'amener à une humidité proche de sa limite de liquidité. Ce malaxage aboutit à la formation d'une boue lisse et homogène. Le protocole de séchage postérieur a été choisi de façon à limiter le plus possible les risques de fissuration. Pour ce faire, il convient :

- de limiter les gradients de teneur en eau en évitant des flux trop élevés,
- d'assurer des flux unidimensionnels,
- d'éviter la préparation d'échantillon de trop grand volume.

La technique comporte une première phase de ressuyage de la boue sur une couche de même matériau, tamisé et sec à l'air. La seconde phase est réalisée par évaporation dans l'atmosphère du laboratoire.

C'est à la fin de la première phase qu'ont été découpés les cylindres de différentes hauteurs et/ou préparées les sphères de différents diamètres.

Après séchage à l'air jusqu'à équilibre, les échantillons ont été polis de façon

- à rendre leurs sections planes et parallèles dans le cas des cylindres,
- à améliorer leur sphéricité et éliminer une couche périphérique éventuellement perturbée par le façonnage des sphères dans le cas de ces dernières.



**Photo 1 :**     **Système d'humectation de massif cylindrique.**



**Photo 2a : Morphologie fissurale avant dessiccation.**



**Photo 2b : Morphologie fissurale après imprégnation.**

## **II.2. Dispositif de réhumectation**

### **II.2.1. Echantillons cylindriques**

Le dispositif de réhumectation utilisé est présenté à la photo 1. Il comporte une cellule cylindrique, fermée de façon à limiter l'évaporation, dans laquelle est placée l'échantillon. Celui-ci repose sur une couche de sable grossier dont la conductivité hydraulique est suffisamment élevée pour ne pas limiter la vitesse de réhumectation de l'éprouvette étudiée. Un vase de Mariotte permet de maintenir la valeur du potentiel hydrique à la base de l'échantillon. Dans le cadre de ces expériences, elle a été maintenue à potentiel nul. Ce vase de Mariotte est placé sur une balance qui permet d'enregistrer son débit, c'est-à-dire la quantité d'eau absorbée par l'éprouvette.

Dans la cellule l'échantillon est entouré d'une couche de billes de polystyrène expansé destinée à limiter les effets d'effondrement des bords fissurés, sans exercer de pression susceptible de s'opposer au gonflement. Le couvercle de la cellule, transparent, permet une observation continue de la surface supérieure de l'éprouvette étudiée. Toutefois, la prise de vue photographique imposait l'ouverture de la cellule, et induisait une évaporation incontrôlée et un biais, difficile à estimer, sur la mesure de la quantité d'eau absorbée.

### **II.2.2. Echantillons sphériques**

Dans le cas des échantillons sphériques, le dispositif de réhumectation a des caractéristiques très voisines. Pour permettre un gonflement libre des éprouvettes cylindriques, le sable a été remplacé par une couche épaisse de vermiculite très aisément déformable. Le volume des cellules a été accru de façon à éviter d'éventuels effets de la rigidité de la paroi et l'on a utilisé des dessiccateurs de laboratoire d'un diamètre de 30 cm. Après mise à l'équilibre hydrique de la couche de vermiculite, la sphère de matériau remanié sec était enfouie dans cette couche, sa partie inférieure étant placée au niveau de potentiel nul.

## **II.3. Technique d'imprégnation**

La technique d'imprégnation par une résine polyester a été décrite par **FIES et BOURLET (1981)**. Elle a été pratiquée dans tous les cas sur les échantillons séchés après la réhumectation dans une étuve ventilée à 40°C.

L'observation de la fissuration obtenue dans un échantillon imprégné après réhumectation supposait qu'on soit capable de réaliser une imprégnation sans perturbation à l'état humide. Dans les faits, cet idéal reste jusqu'à présent inaccessible

Tableau 1: Comparaison de la morphologie fissurale d'une éprouvette humide et impregnée

Surface d'échantillon découpé	Humide Lf cm.cm-2	Impregné Lf cm.cm-2
a0	5.20	5.50
b0	6.00	6.10
c0	5.90	5.60
d0	-	5.40

tout particulièrement dans le cas d'échantillons à teneurs en eau hétérogène, par exemple en cours de réhumectation. Le protocole d'échange eau-liquide organique extrêmement long (plusieurs semaines) n'empêche pas en effet une redistribution de l'eau entre zones à potentiels hydriques différents et une évolution de la fissuration. Nous avons donc retenu une technique d'évaporation rapide limitant cette redistribution. On peut s'attendre à ce que dans ce matériau cette phase de séchage conduise plutôt à une fermeture de fissures fines et à une ouverture de fissures plus grossières (HALLAIRE, 1987). L'observation de la surface des échantillons (photos 2a et b) montrait qu'on observait surtout l'élargissement d'une partie des fissures préexistantes sans autre modification perceptible visuellement. Après comparaison quantitative des morphologies fissurales de surface (tableau 1), nous avons conservé l'hypothèse d'une modification limitée de la morphologie fissurale au cours des processus de séchage-imprégnation.

Après imprégnation et polymérisation de la résine, on a préparé des sections polies. L'inclusion d'un azurant optique, fluorescent par illumination avec une source de rayonnement ultra-violet, permet de visualiser aisément les fissures, avec un contraste extrêmement favorable pour l'analyse d'image.

## **II.4. Mesures**

### **II.4.1. Absorption d'eau**

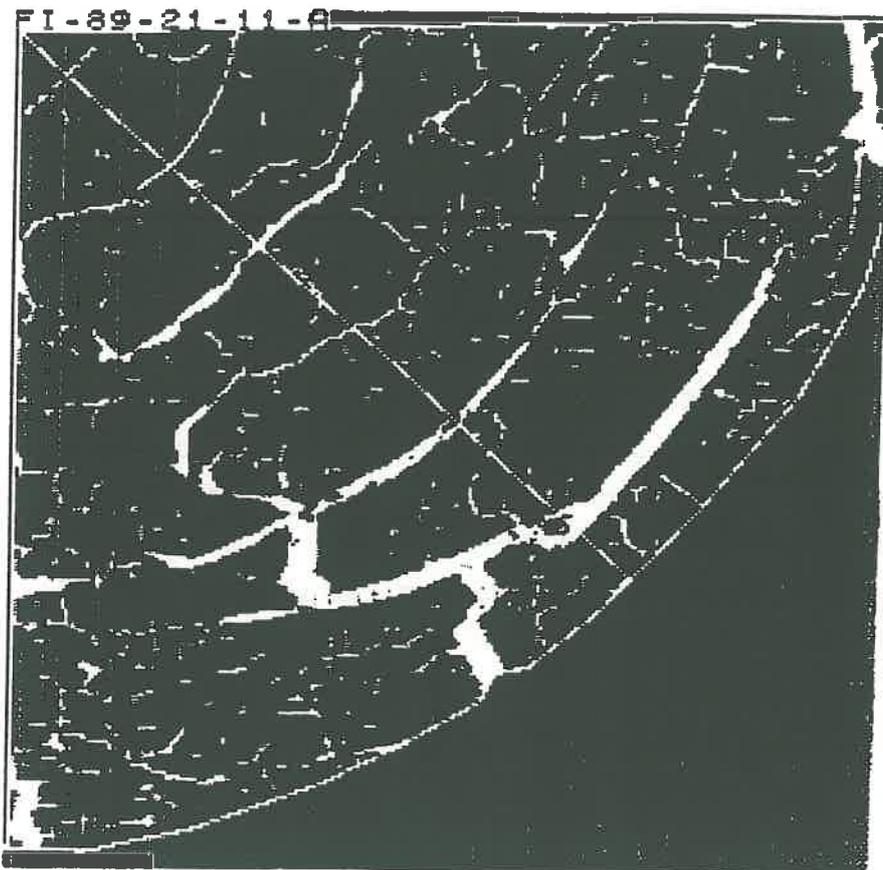
La quantité d'eau absorbée par le massif est enregistrée directement par l'acquisition de données, couplée à la balance. Compte tenu de la durée des réhumectations, inférieures à 24h, et du flux réduit d'évaporation dû aux défauts d'étanchéité de la cellule ( $< 1 \text{ cm}^3/24\text{h}$ ), il n'a pas été tenu compte des pertes évaporatives.

### **II.4.2. Observation de la fissuration**

Chaque éprouvette a été observée périodiquement et durant toute sa phase de formation des fissures, sa face supérieure a été photographiée lorsque des modifications de la morphologie fissurale étaient perceptibles. Les négatifs photographiques étaient ensuite placés sous la caméra vidéo et le signal vidéo numérisé de façon à constituer une image numérique mise en mémoire dans l'analyseur d'image. L'image de chaque surface de cylindre étaient numérisée par fraction de 1/4 successives de façon à pouvoir inclure une des fractions, compte tenu du rapport d'agrandissement, dans le champ de  $512 \times 512$  pixels. Chaque surface de cylindre a ainsi été numérisée en 700 000 à 800 000 pixels. Le pixel correspondait à un carré de  $100 \mu\text{m}$  de côté.



**Photo 3a :** Image photographique d'un massif fissuré.



**Photo 3b :** Image numérique transformée du massif fissuré.

Les variables mesurées pour caractériser la fissuration ont été les suivantes :

- Longueur totale des fissures par unité de surface,
- Granulométrie des fissures en longueur : distribution de la longueur des fissures en fonction de leur épaisseur,
- Porosité des fissures,
- Granulométrie des fissures en porosité : distribution de la porosité fissurale suivant leur épaisseur.

La principale difficulté de l'analyse d'image consiste à transformer une image en niveau de gris, où chaque pixel a un niveau compris entre 0 et 255, en une image binaire, dans laquelle seront séparées deux phases :

- l'ensemble des fissures d'une part,
- le fond considéré comme une phase solide d'autre part.

La méthode retenue pour aboutir à un résultat satisfaisant, c'est-à-dire comportant la proportion la plus élevée possible des fissures visibles et le minimum de bruit est présentée dans les détails à l'annexe 1. Elle comprend deux grandes étapes :

- l'extraction des fissures par la mise en oeuvre d'algorithmes de seuillage permettant d'extraire successivement les fissures les plus larges et les plus fines,
- l'élimination des bruits non séparés des fissures par la première étape.

Les photographies 3a et b illustrent ses performances. On constate que la transformation de l'image photographique en image binaire, contenant seulement et toutes les fissures visibles, apparaît globalement satisfaisante. Il persiste cependant certains biais dont il est visuellement difficile d'apprécier l'importance quantitative. Il s'agit :

- de la disparition d'une partie des fissures les plus fines,
- de la présence de bruit, résultant de l'impossibilité d'éliminer certains traits de l'image initiale, indiscernables des fissures,
- de la déformation liée aux transformations subies par l'image pendant les processus d'extraction des fissures.

Faute de méthode de référence, il est impossible de quantifier ces biais. On peut seulement affirmer que la longueur, des fissures fine est systématiquement sous évaluée. Ceci est particulièrement important dans le cas des éprouvettes d'épaisseur la plus faible, où, à l'état d'humidité maximale, les fissures les plus fines cessaient pour partie

Tableau 2: Variabilité du rapport de la longueur de fissures et de la porosité à la surface d'un même échantillons

Echantillon	Lf/MSS cm/cm2	Porosité %
C42-8-A		
a0	6.50	12.30
b0	7.38	13.71
c0	6.92	12.23
d0	6.35	11.58
C42-8-B		
a0	6.82	12.98
b0	6.82	13.75
c0	6.79	13.01
d0	5.75	11.12
C42-8-C		
a0	5.92	11.62
b0	6.22	13.08
c0	5.82	11.28
d0	5.95	10.86
C42-8-D		
a0	5.99	11.32
b0	6.09	11.12
c0	6.16	12.08
d0	6.24	13.51
Moyenne	6.36	12.22
Ecartype	0.47	1.00
Coefficient de variation	0.07	0.08

d'être directement visibles. Elles restaient cependant décelables visuellement, soit du fait de l'aptitude de l'oeil à rétablir une continuité entre des lignes voisines, soit du fait du microrelief.

La finesse de la fissuration et les capacités de traitement limitées de l'analyseur d'image ont imposé, pour les éprouvettes les plus fissurées, de réaliser les calculs sur une partie seulement des champs correspondant à 1/4 d'image. L'aire élémentaire de mesure correspondait approximativement à 1/16 de l'aire totale du cylindre. Pour limiter le temps de calcul, on a réalisé la mesure que sur une aire élémentaire pour chaque 1/4 d'image. Pour évaluer la validité de cet échantillonnage, on a étudié sur un cylindre la variabilité des longueurs de fissures mesurées dans les différentes aires élémentaires. Les résultats sont présentés au tableau 2. Bien qu'il soit très risqué de les extrapoler à l'ensemble des éprouvettes traitées de cette manière, on constate qu'on aboutit à un intervalle de confiance sur la longueur estimée relativement étroit par rapport aux risques d'erreur absolue sur la mesure.

#### II.4.3. Mesures d'humidité et de densité

Les teneurs en eau ont toutes été déterminées par la méthode gravimétrique avec séchage à l'étuve à 105°C pendant 24h.

\* Les méthodes de mesures de la densité utilisées ont été :

- la méthode au pétrole pour les agrégats jusqu'à un volume unitaire de l'ordre du cm<sup>3</sup> (MONNIER et al., 1973),
- la mesure directe du diamètre et/ou de l'épaisseur pour les éprouvettes cylindriques et sphériques, au moyen de pied à coulisse ayant une précision de 1/20 de mm.

\* La distribution de la teneur en eau dans les éprouvettes en cours de réhumectation a été décrite au temps d'apparition des premières fissures visibles. L'intensité des gradients, les faibles épaisseurs concernées et la dureté des zones encore sèches rend alors extrêmement difficile le prélèvement de couches fines d'épaisseur contrôlée, qui serait nécessaire pour établir des profils hydriques avec une précision satisfaisante.

On a donc séparé des zones par prélèvement en fonction de leur résistance mécanique et de leur couleur :

- une zone de consistance très molle correspondant à la couche proche de la saturation,
- une zone plus résistante correspondant à la partie à fort gradient du front d'humectation,
- la zone la plus sèche, dont la couleur était restée identique à celle de l'échantillon sec à l'air.

Les masses prélevées ont été pesées et leur volume estimé à partir de la relation volume massique-teneur en eau (courbe de gonflement) déterminée par ailleurs. L'épaisseur de chaque couche a ensuite été décrite en tenant compte de la section des cylindres.

### **II.5. Relation potentiel-teneur en eau**

Les données permettant d'établir la relation potentiel-teneur en eau ont été obtenues sur des échantillons préparés de façon strictement identiques aux éprouvettes utilisées pour étudier la fissuration. Les mesures en désorption n'appellent pas de commentaire particulier. Elles ont été établies par mise à l'équilibre d'échantillons de la boue obtenue après malaxage, en utilisant les matériels adaptés à chaque domaine de succion : tables à dépression, presses de Richards.

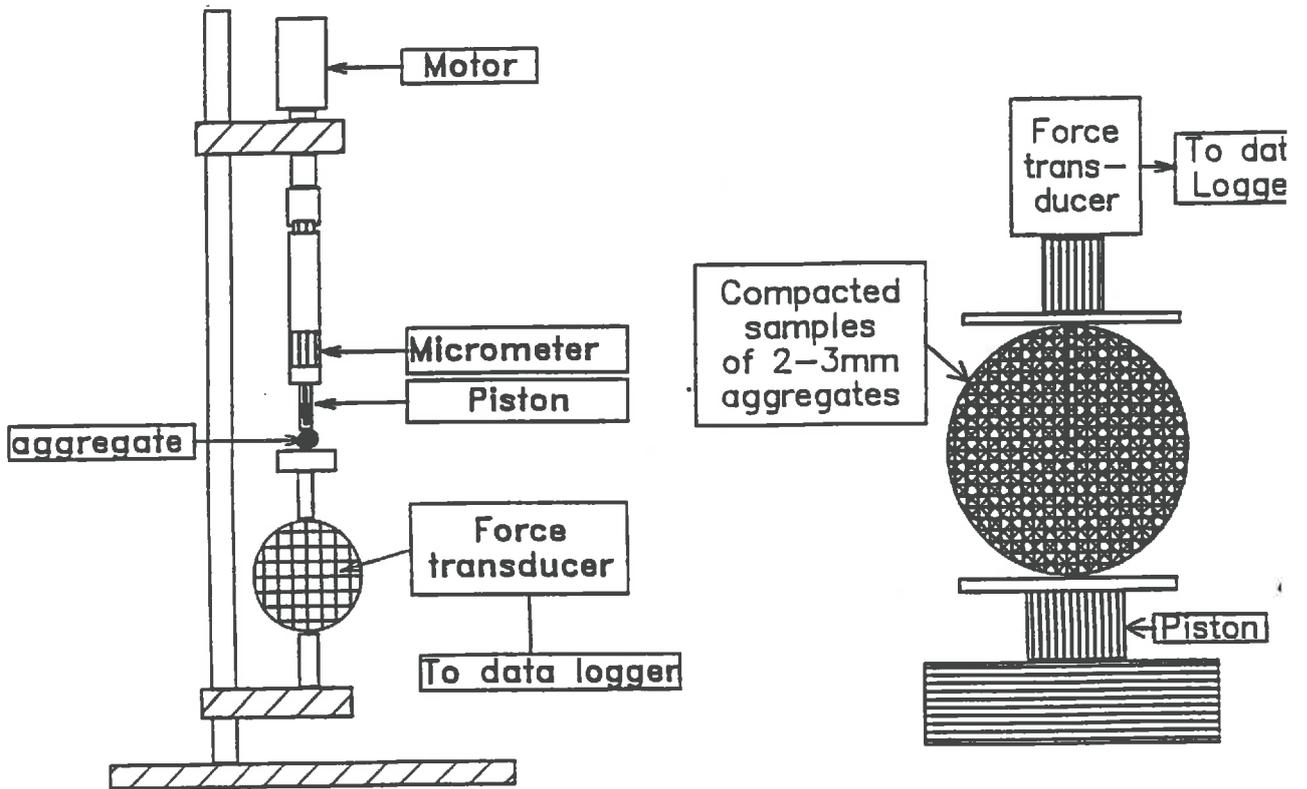
Les mesures en réhumectation ont été réalisées sur des volumes cubiques de 1 à 2 cm<sup>3</sup>, initialement séchés à l'air. Pour les potentiels les plus élevés (> -10 hPa), la réhumectation a eu lieu sous vide. Pour les valeurs plus faibles du potentiel, la réhumectation a été effectuée à la pression atmosphérique sur des tables à dépression. Les précautions prises, dimension réduite des échantillons et humectation sous vide, ont permis d'éviter l'apparition des fissures visibles.

Par rapport aux éprouvettes fissurées, les teneurs en eau peuvent donc être considérées comme celles de volumes continus. Des teneurs en eau plus élevées, mesurées sur des éprouvettes fissurées, résultent donc de la présence d'eau retenue dans les fissures.

### **II.6. Propriétés mécaniques des éprouvettes**

L'essai mécanique utilisé pour évaluer la résistance mécanique des éprouvettes avant réhumectation est un essai de compression simple. La force d'écrasement mesurée sur des échantillons cylindriques ou sphériques peut sous certaines hypothèses être assimilée à une résistance en traction (GUERIF, 1988). Elle constitue donc un indicateur sensible de l'existence éventuelle de fissures formées au cours de la préparation des échantillons.

Figure 2: Dispositif de mesure de la résistance à l'écrasement.



Les dispositifs de mesures utilisés sont présentés à la figure 2. Ils comportent :

- un piston mobile se déplaçant verticalement à vitesse constante,
- un plateau fixe solidaire d'un capteur de force, relié à un enregistreur graphique.

La force maximale appliquée à l'échantillon par le mouvement du piston est mesurée à l'instant de la rupture.

En supposant le matériau élastique et les champs appliqués en deux points (sphère) ou deux génératrices (cylindre) diamétralement opposées, la résistance en traction est reliée à la force d'écrasement par une équation de la forme :

$$T = k \frac{F}{s}$$

où : T est la résistance en traction du matériau (Pa)

F la force de rupture (N)

s la section de rupture, supposée se produire suivant le plan diamétral passant par les points d'application de la charge (m<sup>2</sup>).

s est estimée par mesure du diamètre des échantillons à l'aide d'un pied à coulisse.

La valeur du coefficient k a fait l'objet d'une analyse par (HIRAMATSU et OKA, 1966), confirmée expérimentalement par DEXTER (1975). Les formules proposées par ces auteurs sont les suivantes :

$$F = 0,576 \frac{F}{d^2} \quad \text{pour la sphère où } d \text{ est le diamètre de la sphère}$$

$$F = \frac{2}{\pi} \frac{F}{de} \quad \text{pour le cylindre, où } d \text{ est le diamètre et } e \text{ l'épaisseur du cylindre.}$$

TABLEAU 3

CONSTITUTION DU MATERIAU ETUDIE

Origine		Les Vignères
Classe texturale		Argileux
Composition granulométrique %	< 2 $\mu$	52.9
	2-20 $\mu$	34.0
	20-50 $\mu$	6.1
	50-200 $\mu$	5.6
	200-200 $\mu$	1.4
Carbone Organique %		1.24
Calcaire Total %		2.64
C.E.C. meq/100g		22.6
pH		8.2

La géométrie des échantillons soumis au test a été maîtrisée par :

- tournage des éprouvettes cylindriques obtenues par le protocole décrit précédemment pour les cylindres,
- abrasion de cubes d'environ 1 cm d'arête, découpés dans des éprouvettes cylindriques sèches, pour les sphères (GUERIF, 1988).

### **III. PROPRIETES DES ECHANTILLONS ETUDIES**

L'analyse des conditions de fissuration en cours d'humectation suppose que l'on connaisse un ensemble de propriétés qui déterminent la distribution des contraintes et des déformations et dont certaines sont difficilement accessibles, compte tenu des méthodes disponibles. Ce sont :

- les propriétés hydrodynamiques : relation potentiel-teneur en eau et conductivité hydraulique teneur en eau. Elles déterminent la distribution des teneurs en eau et par l'intermédiaire des propriétés de gonflement les déformations et les contraintes,
- les propriétés de gonflement : amplitude et pression de gonflement fonction du potentiel ou de la teneur en eau,
- les propriétés mécaniques déterminant la rupture et leur liaison avec l'état d'hydratation.

Une partie seulement de cet ensemble est couramment accessible. En particulier, l'évaluation des relations conductivité hydraulique-teneur en eau et résistance à la rupture teneur en eau sont extrêmement difficiles dans la gamme très large de teneurs en eau réalisée en cours d'humectation. Les obstacles sont de nature théorique et technique et nous n'avons pas tenté de les aborder dans le cadre de cette étude. Les caractéristiques étudiées sont présentées ci-après.

#### **III.1. Constitution du matériau**

Les données analytiques concernant la couche de sol où a été prélevé le matériau utilisé sont présentées au tableau 3. Outre sa teneur en argile élevée et son squelette principalement limoneux, il convient de souligner son caractère de matériau calcaire, dans la mesure où certains auteurs ont rattaché l'aptitude de certains matériaux limoneux à acquérir spontanément une structure fine en surface à la présence de carbonate.

Fig 3: Relation Potentiel\_hydrique teneur en eau des échantillons remaniés

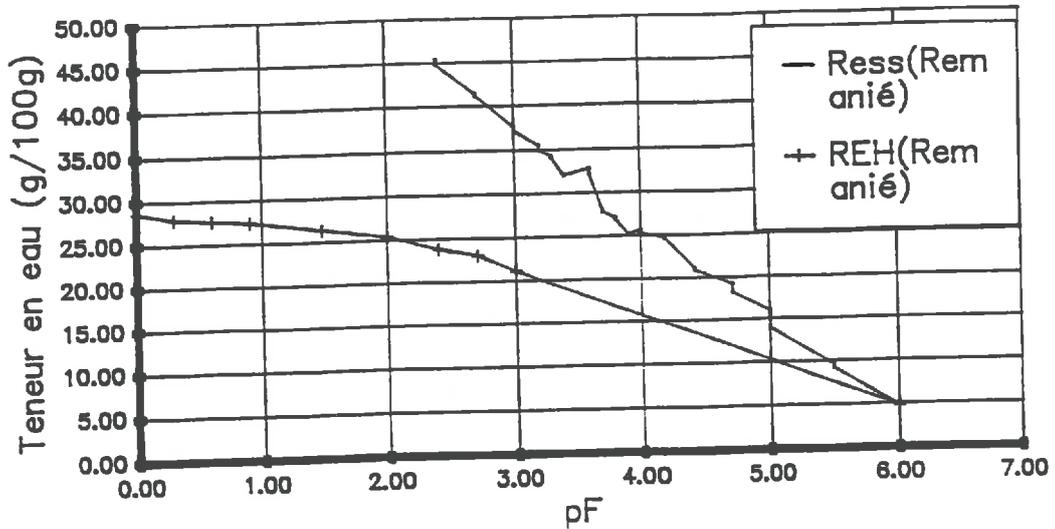
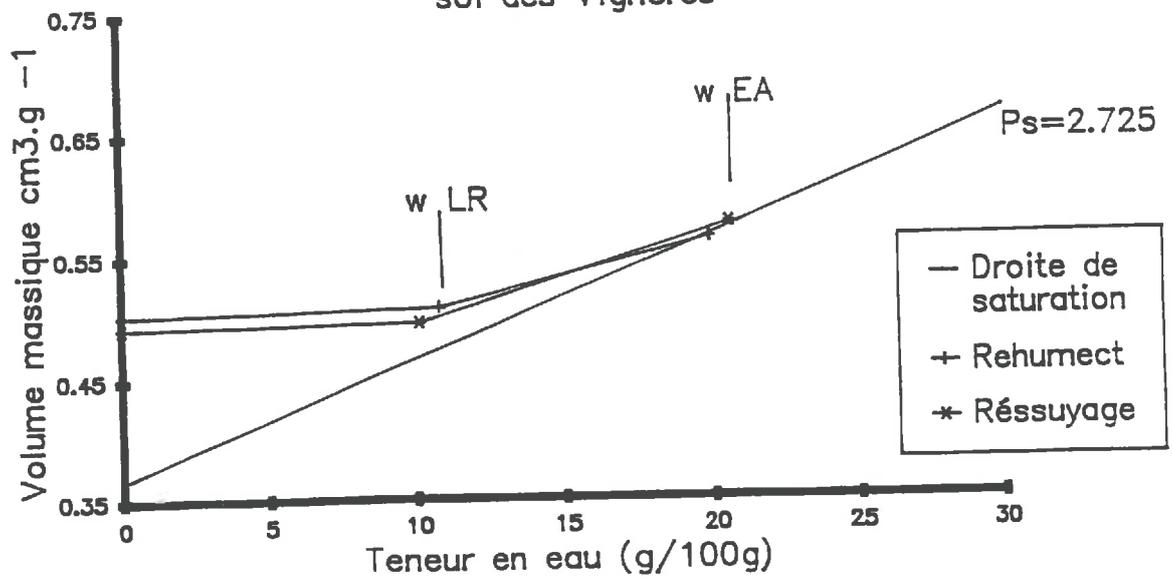


Fig. 4: Courbe de retrait et de gonflement du sol des Vignères



### **III.2. Relation potentiel-teneur en eau**

A la figure 3 sont présentées les courbes de potentiel (relation potentiel-teneur en eau) en désorption sur la boue malaxée ayant servi à préparer les éprouvettes et en humectation sur des échantillons initialement séchés à l'air. Le caractère irréversible des modifications de l'organisation texturale induites par le séchage apparaît de façon manifeste. Le retrait dans le mélange sol-eau remanié est largement irréversible, ce qui impose d'établir la relation potentiel-teneur en eau et d'étudier les propriétés de gonflement dans le sens de l'hydratation. Des résultats complémentaires non présentés ici montrent par ailleurs que les valeurs obtenus en réhumectation sont dépendantes de l'état de dessiccation initial.

L'expérimentation sur échantillons remaniés, nécessaire pour maîtriser leur homogénéité initiale et leur continuité mécanique apparaît de ce point de vue particulièrement complexe. La stabilité de la relation potentiel-teneur en eau dont dépend la possibilité d'estimer la valeur du potentiel matriciel dans l'échantillon, constitue une hypothèse peu réaliste, suivant les variations des conditions hydriques imposées. On peut en revanche supposer qu'on obtient, sur des échantillons naturels, des variations réversibles de la teneur en eau en fonction du potentiel même si elles sont affectées par l'hystérésis.

### **III.3. Gonflement**

Les courbes de retrait et gonflement du matériau remanié sont présentés figure 4. Contrairement à la relation potentiel-teneur en eau, on constate que, dans ces conditions opératoires, il n'apparaît pas d'effet significatif du sens de variation de l'humidité et/ou de l'histoire hydrique antérieure des échantillons. Pour l'analyse du processus de fissuration, les liaisons entre déformations et teneur en eau apparaissent donc plus faciles que les liaisons entre contraintes et teneur en eau.

### **III.4. Propriétés mécaniques**

Les tests mécaniques réalisés avaient pour objectif essentiel de vérifier les hypothèses de continuité et d'homogénéité des éprouvettes, à l'état sec à l'air, avant qu'elles soient soumises à la réhumectation. Il s'agit évidemment d'une hypothèse à la fois forte et indispensable à une tentative de modélisation mécanique. C'est aussi un élément décisif à la démonstration de l'existence même du processus de fissuration par l'humectation, dont on peut toujours supposer qu'il est une visualisation morphologique de discontinuités mécaniques engendrées lors du dessèchement.

Fig 5: Histogramme des résistances en traction de 72 agrégats extrait d'une éprouvette cylindrique

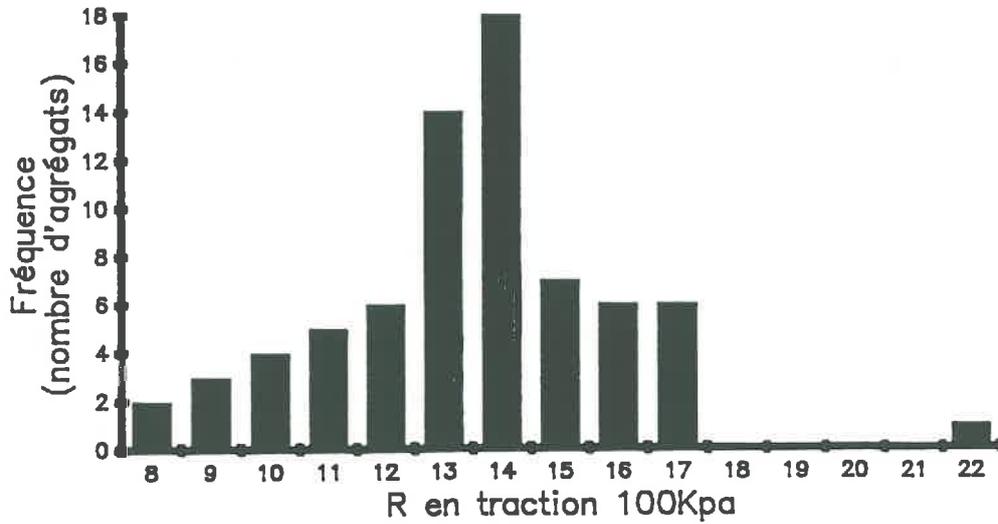


Tableau 4: Données sur la force à la rupture des massifs

Z mm	D mm	S m2	F(Kg)	F(N)	T 100Kpa	W%
2.9	9.03	0.0026	775	7602.8	18.5	
2.3	8.88	0.0020	532	5218.9	16.3	5.0
0.96	9.35	0.0009	175	1716.8	12.2	5.5
2.99	9.36	0.0028	787	7720.5	17.6	5.3
4.49	9.06	0.0041	875	8583.8	13.4	
1.03	9.66	0.0010	205	2011.1	12.9	
				Moyenne	15.1	5.3

Les résultats du test de rupture réalisés sur les éprouvettes cylindriques de dimensions identiques à celle qui ont été soumises à réhumectation, sont présentés sur la photo n° 4 et le tableau 4.

La photo 4 montre le résultat de la rupture d'une éprouvette d'épaisseur 2,90 cm. On constate que la rupture se produit bien dans un plan diamétral. De part et d'autre de ce plan diamétral et symétriquement apparaissent des surfaces de rupture courbes dont la forme est très semblable à celle des surfaces d'iso contrainte telle qu'elles apparaissent en photoélasticité (HIRAMASU et OKA, 1966). L'allure lisse et homogène du plan de rupture ne révèle aucun indice de préfissuration décelable à l'échelle macroscopique. Les valeurs de la résistance en traction du tableau 4 sont élevées et n'indiquent pas non plus l'existence de discontinuité mécanique. Les valeurs obtenues par GUERIF (1988) sur des agrégats de 3 à 5 mm de diamètre du même matériau, sont légèrement supérieures ( $\approx 20.10^5$  Pa) pour la même teneur en eau.

Afin de comparer les résultats obtenus sur de petits volumes, et sur les cylindres entiers, un cylindre sec a été découpé en petits cubes, abrasé ensuite de façon à les rendre quasi sphériques, le diamètre obtenu étant d'environ 8 mm. Les résultats de la figure 5 obtenus sur 72 agrégats ainsi préparés montrent que les valeurs de résistance en traction des cylindres sont très proches de la valeur modale sur cette population d'agrégats. Ceci constitue une indication de l'absence de fissures à échelle macroscopique dans le volume des cylindres. Si ces dernières étaient affectés par des discontinuités mécaniques de grandes dimensions, on pourrait s'attendre à rencontrer des valeurs plus faibles à l'échelle de l'éprouvette que sur les fragments qui en sont extraits.

## **IV. RESULTATS**

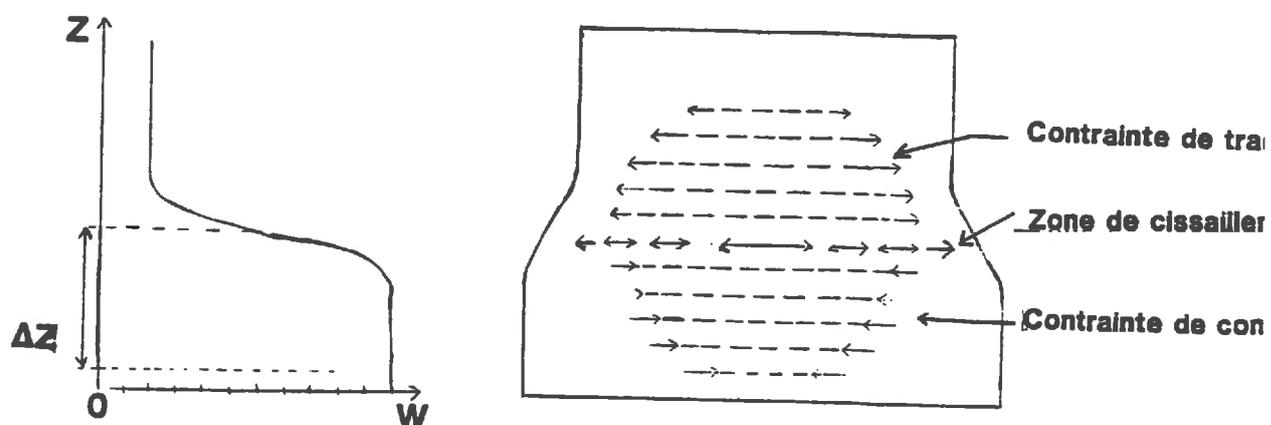
### **IV.1. Rappel du cadre d'interprétation**

#### **IV.1.1. Schéma général de rupture**

Les travaux antérieurs sur la fissuration en cours de dessèchement (STENGEL, 1988) et en cours d'humectation (DINEL, 1988) ont conduit à formuler un ensemble d'hypothèse sur les modalités de rupture qui expliquent :

- les conditions de fissuration dans l'un et l'autre cas
- les variations de l'intensité de la fissuration quantifiée par la longueur surfacique de fissures, ou, si l'on admet que les fissures forment un réseau, la dimension des éléments structuraux qu'elles délimitent.

Figure 6 : Hypotheses sur la distribution des teneurs en eau et des contraintes dans les cylindres en cours d'humectation.



Ce schéma explicatif appliqué aux conditions aux limites particulières des expériences présentées ici est fondé sur les hypothèses suivantes (figure 6) :

- la distribution uniforme de l'eau dans un plan horizontal, c'est-à-dire le caractère unidimensionnel des flux,
- la distinction de trois zones de teneur en eau différentes : une zone saturée à potentiel proche de 0 dans les conditions d'apport d'eau choisi ; la zone du front d'humectation, à fort gradient, et la zone sèche dans laquelle l'humidité initiale n'a pas été modifiée,
- résultant de cette distribution des teneurs en eau, l'existence de contraintes de cisaillement de grande intensité dans la zone du front d'humectation,
- du fait de ces contraintes de cisaillement, le développement de contraintes de compression tendant à limiter le gonflement de la zone inférieure et à l'opposé de contraintes de traction tendant à dilater la zone sèche.

Deux types de rupture apparaissent alors possibles :

- soit une rupture par cisaillement dans la zone du front si la résistance en traction de la zone sèche est suffisante,
- soit une rupture de la zone sèche si la résistance au cisaillement dans la zone du front est supérieure à sa propre résistance en traction.

On doit observer un type de rupture ou l'autre suivant :

- la forme du front d'humectation,
- les relations entre propriétés mécaniques et teneur en eau du matériau,
- l'épaisseur des différentes zones.

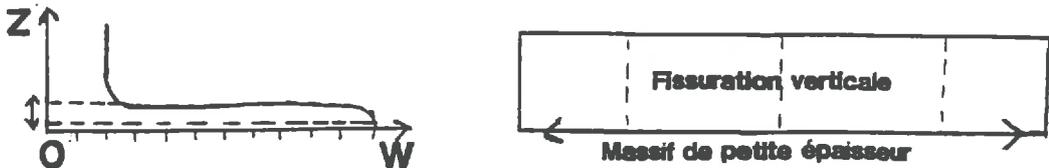
En particulier, lorsque le front d'humectation s'approche de la surface supérieure, l'épaisseur décroissante de la zone sèche réduit proportionnellement sa résistance à la traction et permet nécessairement sa fissuration. On doit donc observer une zone de fissuration préférentiellement verticale à la face supérieure des éprouvettes cylindriques.

Au contraire, en début d'humectation, l'épaisseur et la résistance de la zone sèche étant élevée, on doit surtout observer le cisaillement dans la zone en cours d'humectation et des fissures préférentiellement horizontales.

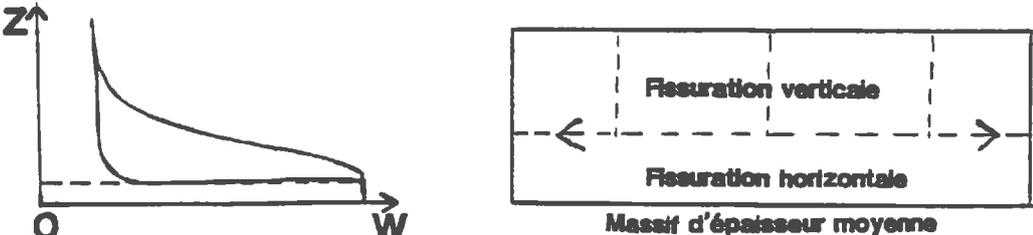
#### IV.1.2. Influence de la géométrie des échantillons

Suivant un tel schéma, la fissuration d'une éprouvette d'épaisseur faible (figure 7a) doit se produire dans la zone sèche en traction pour une quantité d'eau

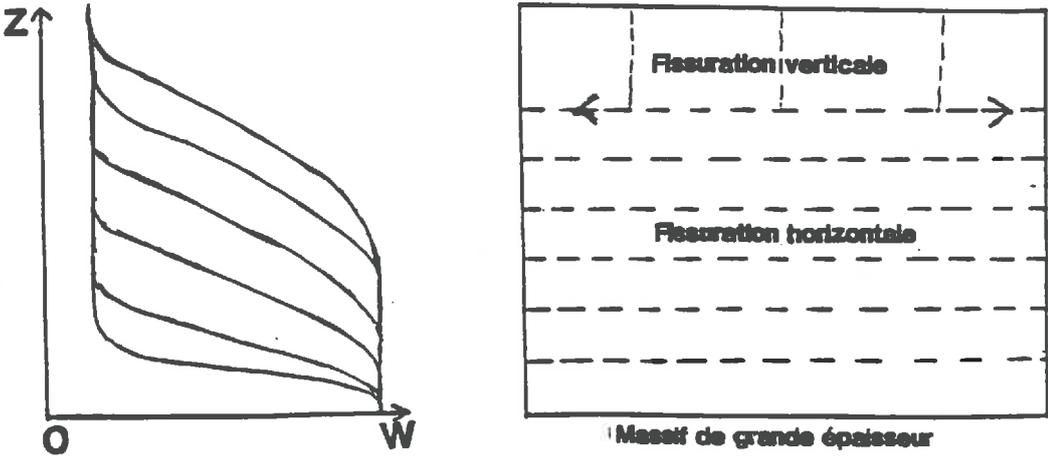
Figures (7a; b; c) : Schéma de modalités des éprouvettes en fonction de l'épaisseur des éprouvettes.



7a.



7b.



7c.

absorbée faible. La zone de fissuration horizontale doit être d'épaisseur réduite et correspondre à une zone de front d'humectation à gradient très fort.

Pour une épaisseur croissante de l'éprouvette, la quantité d'eau absorbée et l'épaisseur de la zone humectée, préalablement à la fissuration de la zone sèche, doivent être plus élevée (figure 7b). Corrélativement, la forme du profil dans la zone du front d'humectation doit évoluer vers des gradients moins prononcés. Pour une épaisseur suffisante (figure 7c), on doit atteindre, suivant un modèle de Green et Ampt (HILLEL, 1980) un régime de translation du front. Dans ce cas, quelle que soit l'épaisseur totale de l'éprouvette, on ne doit observer de fissuration de la zone sèche que quand son épaisseur devient inférieure à un seuil constant. Seule l'épaisseur de la zone de fissuration par cisaillement doit varier avec celle de l'éprouvette.

Un tel schéma ne décrit évidemment que la première étape de fissuration de la zone sèche. L'observation des modalités de fissuration dans les conditions étudiées ici (STENGEL, BOURLET, 1987) a montré que les fissures ouvertes dans la zone sèche jouent un rôle de chemins préférentiels pour l'eau. Les modalités d'humectation postérieure deviennent extrêmement complexes et ne peuvent plus être décrites par un schéma unidimensionnel. La résultante finale, lorsque l'équilibre hydrique est atteint, ne peut donc être déduite directement des hypothèses présentées.

Cependant, les mêmes considérations mécaniques appliquées soit à la fissuration par retrait, soit à la fissuration par gonflement (STENGEL, 1988) conduisent à lier la densité de fissuration, ou la finesse des éléments structuraux qui en résultent, à l'épaisseur de la couche concernée. Les résultats expérimentaux ont montré dans diverses conditions (STENGEL, 1988) l'existence d'une relation linéaire décroissante entre densité de la fissuration et épaisseur de la couche fissurée. Il était donc intéressant d'étudier les effets des variations probables d'épaisseur de la couche sèche fissurée, entre les cas correspondant aux figures 7a et 7b, sur la quantité de fissures formées.

## **IV.2. Influence de l'épaisseur des éprouvettes cylindrique sur la fissuration de la face supérieure**

### **IV.2.1. Variation en cours d'humectation**

Les caractéristiques des éprouvettes étudiées sont présentées au tableau 5.

Les résultats obtenus sur quatre éprouvettes cylindriques d'épaisseur différentes sont présentés à la figure 8. Conformément aux hypothèses précédentes, les quantités d'eau absorbées préalablement à l'apparition des premières fissures croissent en

Tableau 5: Caracteristiques initiale et finale des massifs Cylindriques d'épaisseurs differentes réhumectés

N° du massif	1	2	3	4
Epaisseur du massif (mm)	7.3	12.4	26	37.9
Indice de vide texturale	0.343	0.360	0.365	0.344
Teneur en eau initiale (g/g)	4.6	4.6	4.6	4.6
Teneur en eau finale (g/g)	49.5	47.7	42.7	36.4
Longueur de fissure (cm/cm <sup>2</sup> )	6.34	5.98	4.15	3.0
Indice de vide structurale surf.	0.139	0.120	0.125	0.161
Durée d'humectation (h)	24	24	24	24

Fig. 8: Variation de la longueur surfacique des fissures formées en fonction de la quantité d'eau absorbée

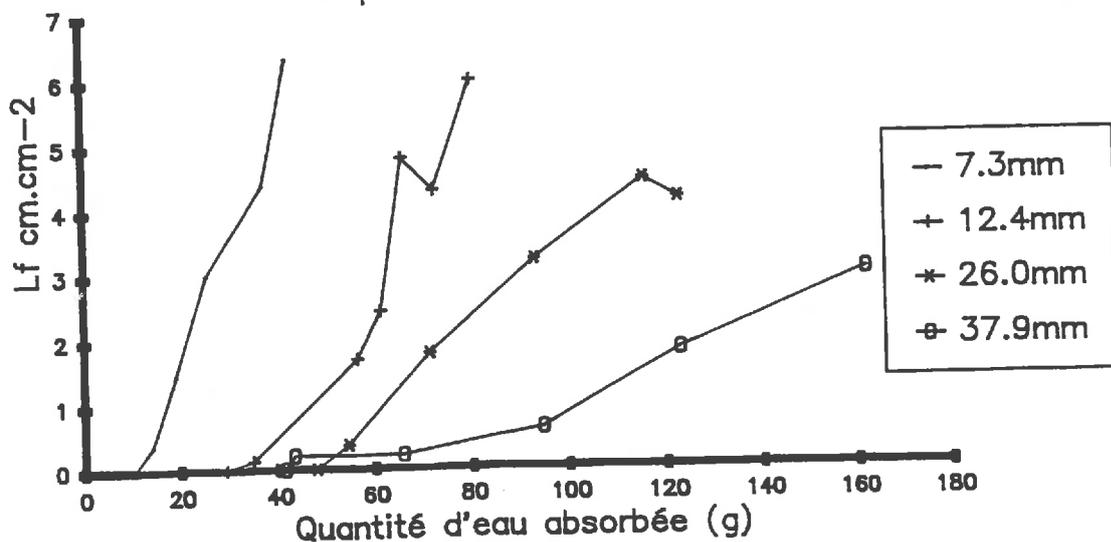


Fig. 9: Variation de la longueur surfacique des fissures en fonction de la teneur en eau moyenne des éprouvettes

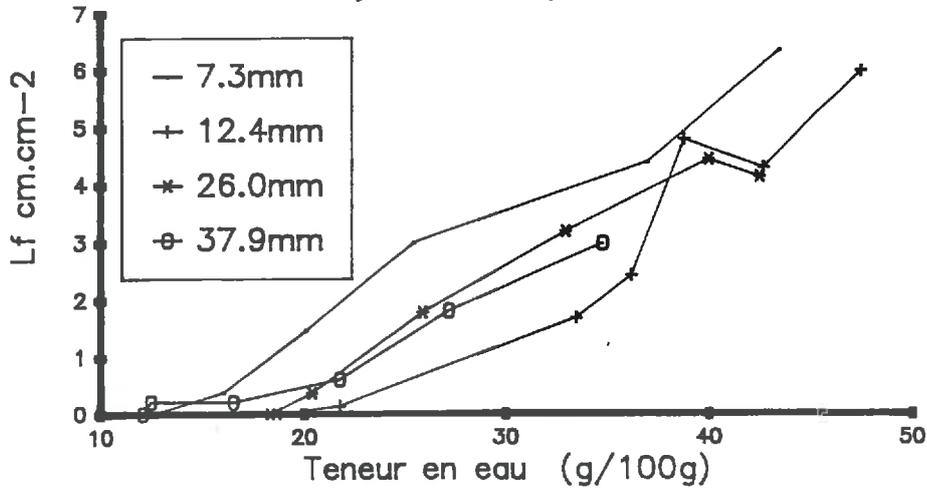


Fig. 10: Variation de la porosité fissurale avec la teneur en eau moyenne des éprouvettes

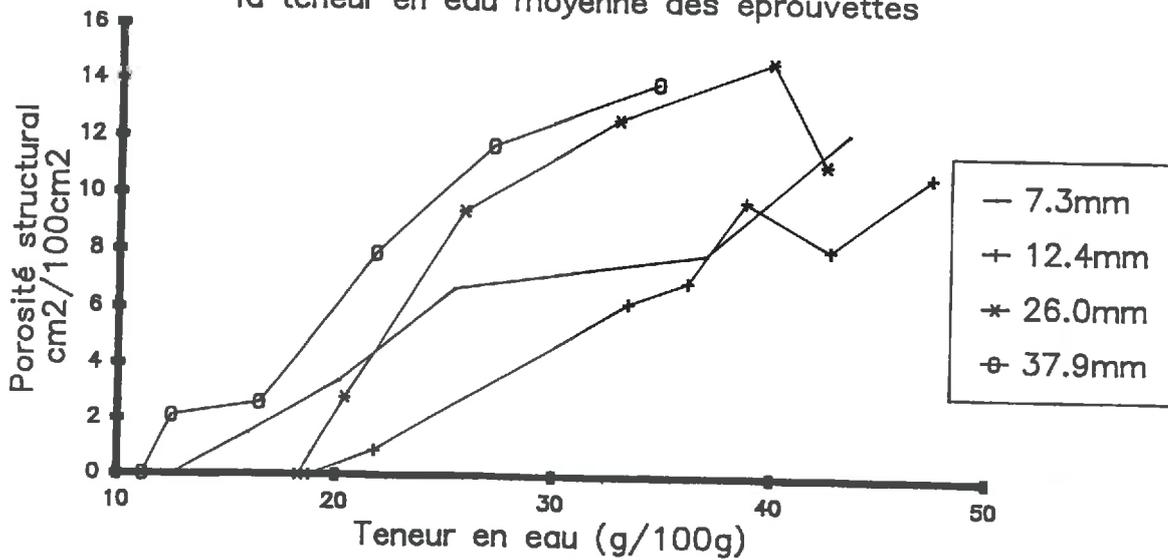


Fig. 11: Distribution d'épaisseur des fissures à la fin de l'humectation

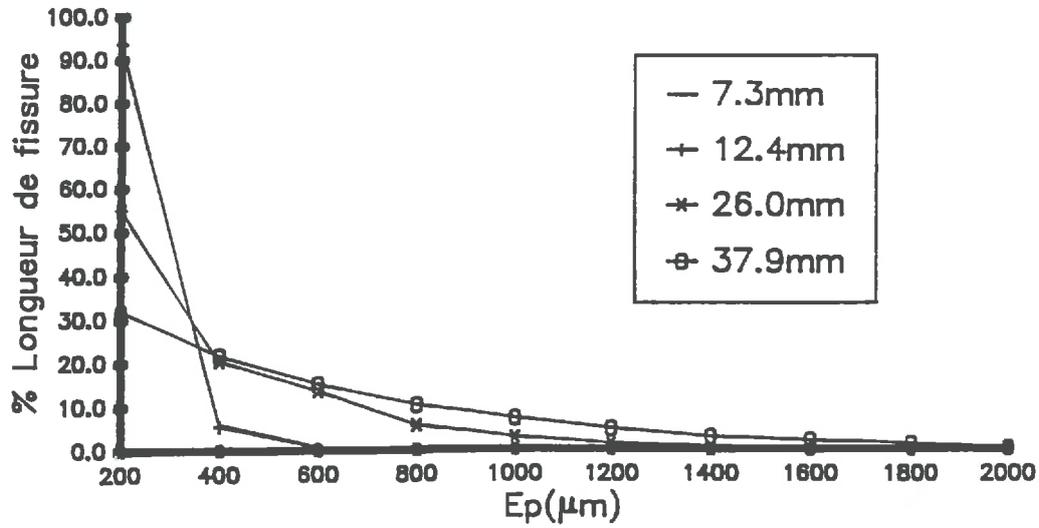
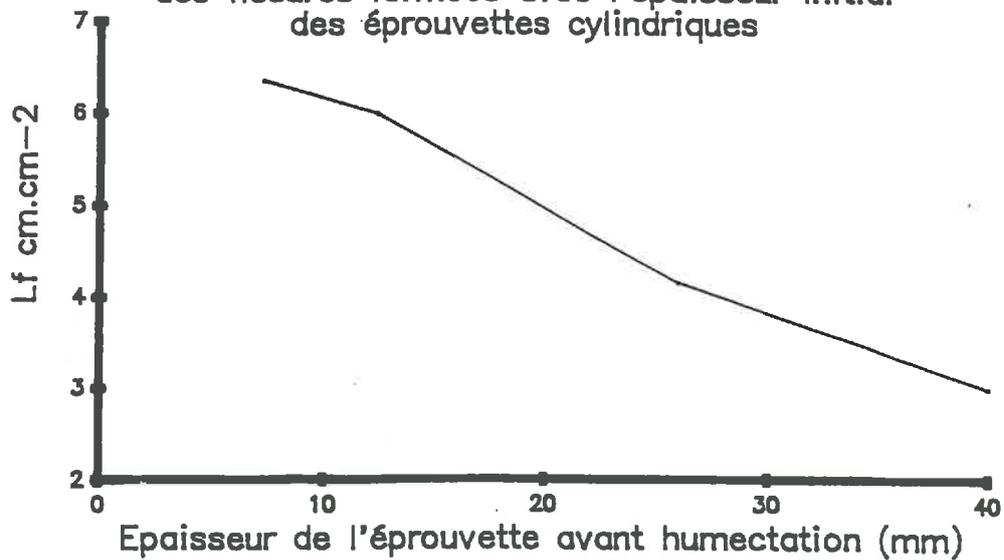


Fig. 12: Variation de la longueur surfacique des fissures formées avec l'épaisseur initial des éprouvettes cylindriques



fonction de l'épaisseur des cylindres. On remarque cependant le comportement particulier du cylindre le plus épais (37,9 mm). L'apparition précoce d'une première fissure se manifeste par une croissance initiale très faible de la longueur surfacique. Il s'agit en fait d'une première fissure périphérique dont les modalités de formation ne relèvent pas du schéma monodimensionnel précédent. Elle résulte d'une humectation plus rapide à la périphérie du cylindre, observée à diverses reprises et sur laquelle nous reviendrons.

Sur un plan plus général, soulignons :

- que des apports d'eau variant entre 2 et 10 mm approximativement sont susceptibles de provoquer la division d'éléments structuraux d'épaisseur variant, en ordre de grandeur, de 1 à 4 cm,
- que ce processus, allant jusqu'à la fissuration de la zone sèche se produit en un temps court. Dans le cas présent, celui-ci varie entre 20 mn (7,3 mm) et 80 mn (37,9 mm).

Exprimés en terme de teneur en eau moyenne des éprouvettes (figure 9), les résultats peuvent être interprétés en terme d'épaisseur relative de la couche humectée (incluant la zone du front d'humectation) et de la couche encore sèche. La position des courbes indique que la couche humide a, au moment de l'apparition des premières fissures verticales, une épaisseur relative croissante avec l'épaisseur de l'éprouvette. L'écart entre les cylindres de 26 et 38 mm apparaît faible, ce qui est conforme aux hypothèses initiales. Le cas du cylindre de 12,4 mm est cependant contradictoire puisque c'est celui pour lequel l'apparition des fissures correspond à la teneur en eau la plus élevée. Faute d'une description détaillée de la distribution de l'eau dans l'échantillon, il est difficile de proposer une explication fiable. Il importe de souligner que dans tous les cas la teneur en eau des éprouvettes inclue à la fois l'eau absorbée dans les volumes restés continus (ou dans la porosité texturale) et de l'eau localisée dans les fissures. Cela explique en particulier l'humidité maximale plus faible observée dans le cylindre le plus épais, moins fissuré.

Enfin, la décroissance finale de LF (cylindre de 26,0 mm) s'explique par la diminution d'épaisseur de fissures fines due au gonflement. Elles cessent d'être visibles ou décelables à l'analyseur d'image, ce qui ne signifie pas qu'elles disparaissent en tant que discontinuité mécanique.

Ce phénomène apparaît plus marqué lorsqu'on exprime la quantité de fissures par leur porosité (figure 10). La position relative des courbes est alors modifiée, la porosité de fissures la plus forte correspondant aux cylindres les plus épais. Cela résulte évidemment de la différence des épaisseurs de fissures, qui croissent avec celles des éprouvettes (figure 11). Dans les échantillons les plus fins n'existent que des fissures

fines : elles sont pratiquement toutes d'épaisseur  $\leq 200 \mu\text{m}$  ce qui correspond à la limite d'estimation sur notre analyseur d'image compte tenu du grossissement utilisée. En revanche, dans les échantillons les plus épais apparaissent des fissures grossières d'épaisseur comprise entre 1 et 2 mm. Ces variations d'épaisseur induites par le gonflement après fissuration de la zone sèche, correspondent au moins pour partie à des déformations affectant des zones déjà très humides et déformables. Elles mettent en jeu des pressions de gonflement qui peuvent être très faibles, les conditions mécaniques aux limites du cylindre (frottement sur le support, frettage latéral) et la pesanteur. Elles ne sont donc pas interprétables dans le cadre présenté.

#### **IV.2.2. Etat final**

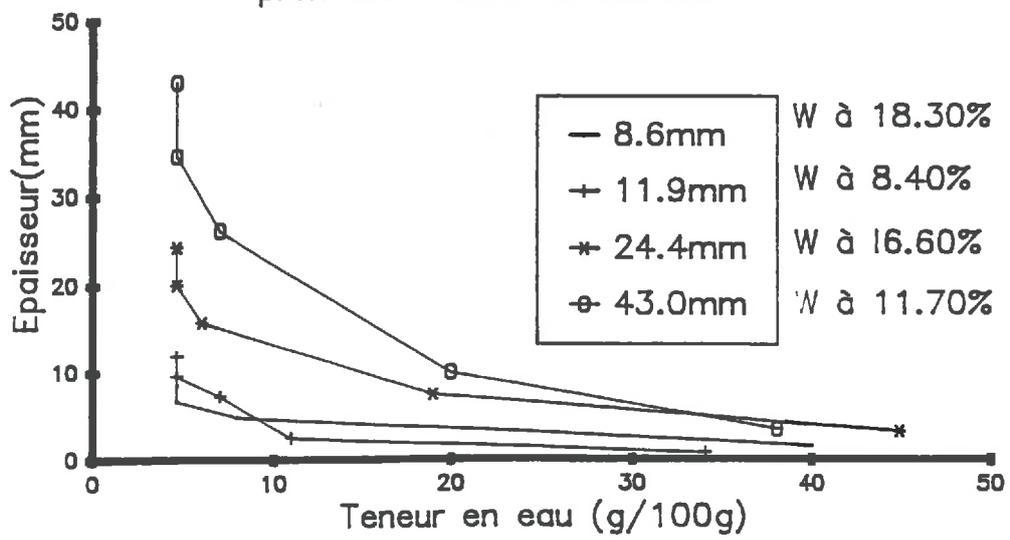
Quant à l'intensité de la fissuration produite, les photographies 5 à 8 en donnent une idée précise. On voit que la division finale de la structure est fine dans tous les cas, ce qui confirme le rôle prépondérant que peut jouer l'humectation dans la formation des agrégats de petites dimensions en sol argileux. A l'état d'humidité final, la longueur de fissures LF décroît avec l'épaisseur de l'échantillon (figure 12). On retrouve ainsi une relation globale, déjà observée dans d'autres conditions. Nous avons déjà souligné cependant qu'elle est difficilement interprétable en terme de mécanisme de fissuration dans ce cas. L'écart entre les deux cylindres les plus épais suggère qu'on ne peut pas les considérer comme deux réalisations du cas décrit à la figure 7c, pour lesquels on devrait s'attendre à observer des résultats identiques. Du point de vue du protocole expérimental, cela signifie qu'il aurait été souhaitable d'inclure une éprouvette d'épaisseur plus grande pour confirmer ou infirmer l'hypothèse d'existence d'un palier.

Quant aux valeurs absolues des longueurs de fissures formées, on doit d'abord remarquer que les longueurs mesurées sur les cylindres les plus épais sont identiques à celles obtenues précédemment sur le même matériau par DE LEON (1987). Pour des cylindres de 30 à 35 mm, cet auteur avait trouvé des valeurs de LF de 3,5 à 4  $\text{cm.cm}^{-2}$ . Ceci confirme la reproductibilité de la préparation des éprouvettes et des conditions expérimentales. Sur les cylindres les plus fins, les valeurs atteintes correspondent à la formation d'agrégats de dimension proche de 3 mm, montrant clairement l'intensité du phénomène de division.

#### **IV.3. Conditions d'apparition des fissures dans la zone sèche**

Afin de se placer plus précisément dans les conditions d'observation de la réalisation du schéma de la figure 7, sur des éprouvettes de différentes épaisseurs, on a interrompu l'humectation au moment d'apparition des premières fissures affectant la

Fig. 13: Profil hydrique à l'apparition de première fissure en surface



face supérieure encore sèche. On a d'une part étudié la distribution des teneurs en eau dans ces éprouvettes, d'autre part observé la morphologie fissurale sur des coupes verticales.

#### IV.3.1. Profils hydriques au moment de la fissuration

Les profils hydriques mesurés sont présentés à la figure 13. Leur forme apparaît cohérente avec les schémas de la figure 7. En revanche, la comparaison entre les profils 1 et 2 d'une part, 3 et 4 d'autre part ne correspond à la succession des schémas a, b et c. Dans le cas des profils 1 et 2, cela s'explique par les modalités d'apparition très précoces de la première fissure du cylindre 2. Il s'agit une fois encore d'une fissure périphérique de type tangentiel, résultant d'une humectation préférentielle en bordure du cylindre. Le profil correspond à une quantité d'eau absorbée très faible, l'humidité moyenne étant de 8,4 % alors qu'elle était lors de la première fissuration (diamétrale) du cylindre 1 de 18,3 %.

Quant aux profils 3 et 4, l'hypothèse d'une translation du front d'humectation si elle n'est pas exactement vérifiée, n'est pas non plus à rejeter de façon certaine, compte tenu des incertitudes liées au mode d'obtention des profils.

La forme des profils induit une incertitude importante sur la délimitation de la zone supérieure sèche, subissant la traction de la couche inférieure au cours du gonflement. Il est clair quant au fond que cette limite n'est pas à rechercher dans la forme des profils hydriques, mais dans l'analyse de la distribution des contraintes dans le volume en cours de gonflement. A défaut de disposer de cette analyse, il est raisonnable de considérer comme "sèche" toute zone non encore affectée par le gonflement, c'est-à-dire dont l'humidité est restée inférieure à la limite de retrait (ou de gonflement) telle qu'elle apparaît à la figure 4 (WLR).

Les deux couches correspondant aux valeurs d'humidité les plus faibles sur chacun des cylindres ont des humidités répondant à ce critère. On peut donc calculer l'épaisseur de la zone subissant la traction, et affectée par une fissuration verticale, à partir des données qui ont permis d'établir les profils hydriques. Les résultats sont présentés au tableau 6. Ils montrent, conformément aux commentaires sur les profils hydriques, l'existence de variation peu cohérentes entre les cylindres 1 et 2 d'une part, 3 et 14 d'autre part.

Tableau 6: Epaisseurs des couches humide et seche à l'apparition des premières fissures en surface.

Cylindre z (mm)	Humidité d'arrêt	Epaisseur humide(mm)	Epaisseur seche(mm)
6.8	18.3	3.50	3.30
11.9	8.4	1.70	10.20
24.4	16.6	9.30	15.10
43.0	11.7	1.40	29.00

Tableau 7: Epaisseurs des couches des fissures horizontales fissures verticales.

Echantillon cylindrique épaisseur (mm)	Horizontale (mm)	Verticale (mm)
37.9	27.80	10.10
22.7	12.40	10.30
11.1	1.50	9.60
7.3	2.90	4.40

- à vérifier l'applicabilité du schéma élaboré pour la géométrie cylindrique et un flux unidimensionnel,
- à établir expérimentalement l'influence relative de la dimension des sphères et de la quantité d'eau absorbée sur les modalités de fissuration et particulièrement la dimension des éléments structuraux formés.

Seuls des résultats préliminaires, très partiels, seront présentés ici. Trois points essentiels en ressortent.

#### IV.4.1. Existence de la fissuration par humectation

Des sphères de diamètre compris entre 7,3 mm et 40 mm ont été réhumectées jusqu'à l'équilibre dans les conditions présentées plus haut. Dans tous les cas, on a observé une fissuration de la totalité du volume de la sphère. Cette fissuration provoque une division d'apparence aussi fine que dans le cas de la géométrie cylindrique.

#### IV.4.2. Conditions de fissuration

La photographie n° 10 présente la coupe d'une sphère de diamètre 40 mm, après une durée d'humectation de 33 mn. Ce temps d'humectation correspond à une humidité moyenne de 10 g/100 g. On distingue clairement sur cette coupe :

- la zone périphérique humide où les fissures visibles sont tangentiellles,
- la zone centrale sèche fissurée radialement.

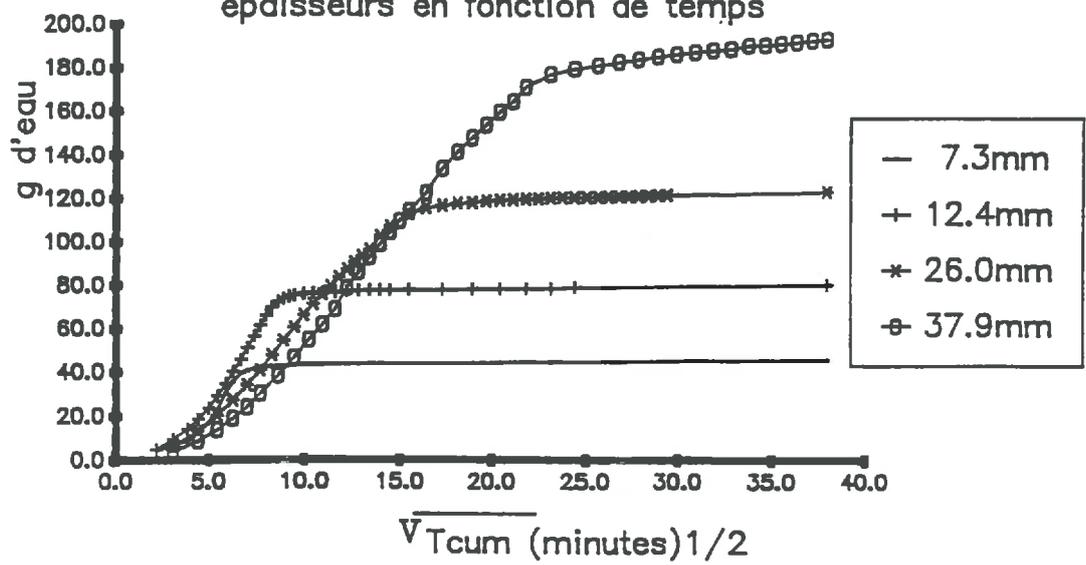
On retrouve donc les caractéristiques morphologiques des éprouvettes cylindriques qui autorisent à admettre l'application des mêmes hypothèses mécaniques à la géométrie sphérique.

#### IV.4.3. Rôle des transferts en phase vapeur

La fissuration très précoce des sphères soumises à l'humectation, et la fissuration "spontanée" de sphères de grand diamètre (8 cm) séchées à l'air, dans l'atmosphère du laboratoire, indiquent que les variations de pression de vapeur, peuvent provoquer la fissuration de volumes apparemment "secs". Le rôle de ces variations de pression partielle de vapeur d'eau dans l'évolution de la résistance mécanique des éléments structuraux de surface a déjà été montré par UTOMO et DEXTER (1981). Ces auteurs travaillaient sur des sols vertiques dont les propriétés sont très voisines de celles du matériau étudié ici.

La prise en compte d'un tel phénomène et un couplage avec le processus décrit plus haut pour les éprouvettes cylindriques apparaît extrêmement complexe. Les déformations et les pressions de gonflement mises en jeu sont en effet très difficiles à

Fig. 14: Quantité d'eau absorbée par des éprouvettes cylindriques de différents épaisseurs en fonction de temps



évaluer. Par ailleurs, les résultats des mesures de résistance mécanique sur les cylindres conservés dans les mêmes conditions que les éprouvettes sphériques, montrent qu'ils n'ont pas été affectés par ce phénomène. Les valeurs de résistance mécanique mesurées étaient, en effet, très proches des valeurs obtenues par GUERIF (1988) sur le même matériau, avec des échantillons conservés à l'abri des variations d'humidité atmosphérique. Une étude expérimentale spécifique paraît donc nécessaire pour préciser les conditions dans lesquelles les transferts d'eau en phase vapeur sont susceptibles de provoquer la rupture.

#### **IV.5. Relation avec la cinétique d'humectation**

Les travaux antérieurs (STENGEL, 1988) avaient clairement montré que les variations de cinétiques d'humectation entre matériaux de texture différents ne pouvaient s'expliquer sans prendre en compte les rôles des fissures dans le transfert d'eau. Ainsi, contrairement aux relations communément admises entre texture et conductivité hydraulique, le matériaux argileux étudié ici s'humectait plus rapidement qu'un matériau limono-argileux ou limoneux. D'autre part, on observait des accroissements de flux en cours d'humectation qui ne paraissaient pouvoir s'expliquer que par une part accrue du transfert dans les fissures. Le dispositif de mesure des flux utilisé alors (lecture directe du volume dans la burette constituant le vase de Mariotte) était cependant d'une précision réduite. Les conditions de pesée en continu du vase de Mariotte assurant une précision et un pas de temps de beaucoup plus fins, il est intéressant de rechercher les relations entre la variation de quantité d'eau absorbée par les éprouvettes et le processus de fissuration.

##### **IV.5.1. Cinétiques d'humectation**

Les cinétiques d'absorption d'eau des cylindres de différentes épaisseurs sont présentées à la figure 14. L'allure générale des courbes apparaît régulière et ne montre pas de discontinuité flagrante révélatrice de l'effet de la fissuration. La courbure des courbes dans leur partie initiale montre cependant un accroissement du flux qui n'est pas compatible avec l'application des modèles hydrodynamiques adaptés aux matériaux non déformables. La courbe relative au cylindre le plus épais indique qu'après 24h l'équilibre de potentiel n'était pas encore atteint. La comparaison des quantités de fissures formées avec des données antérieures, obtenues après des durées d'équilibre plus prolongé, montre que cela n'a pas affecté de façon perceptible le résultat final.

Quant à la comparaison entre cylindres, on constate que les courbes ne se superposent à aucun moment. Si l'on admet l'homogénéité des différents échantillons et l'identité des conditions initiales, les courbes devraient au contraire être identiques tant

Fig. 15: Flux d'entré d'eau dans les éprouvettes cylindriques en fonction du temps

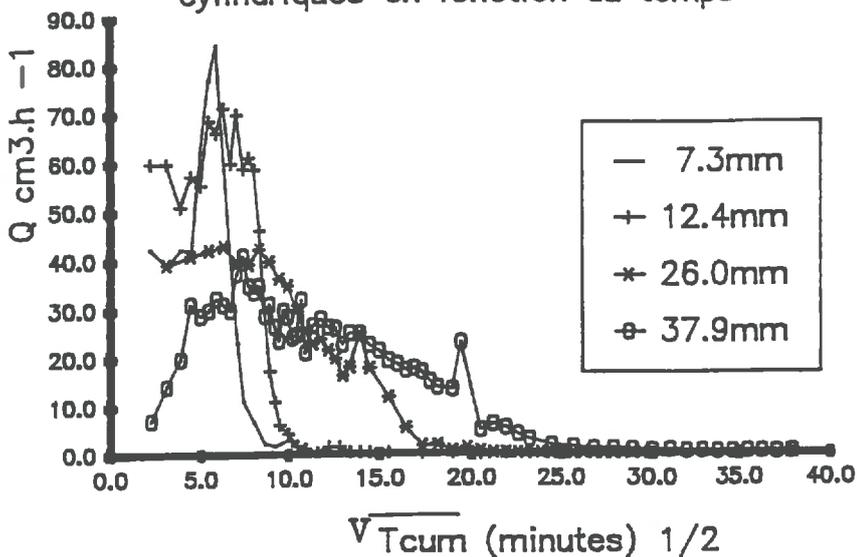


Fig. 16: Flux d'entré d'eau dans les éprouvettes cylindriques en fonction du temps

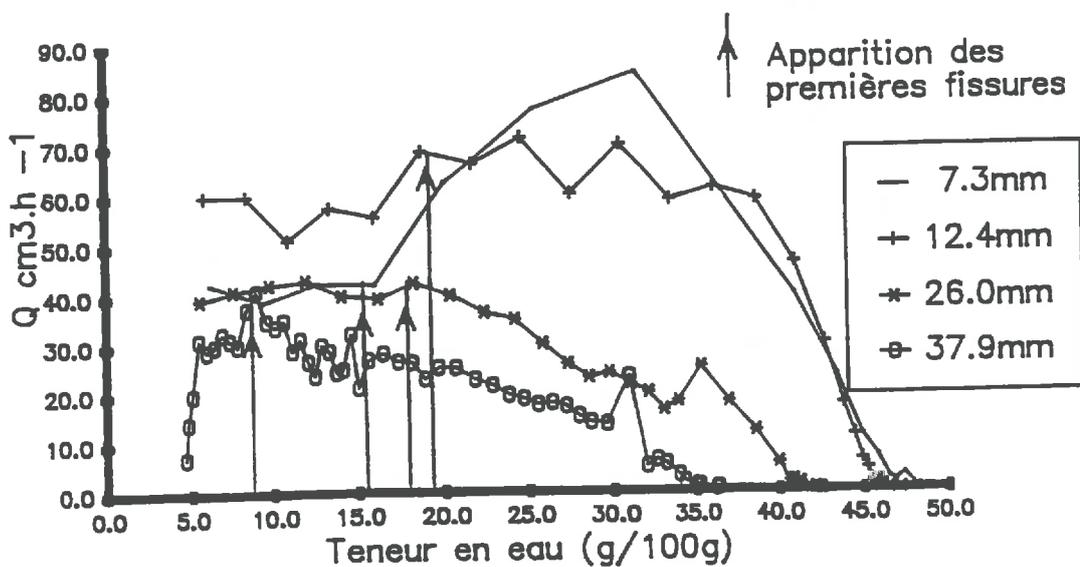
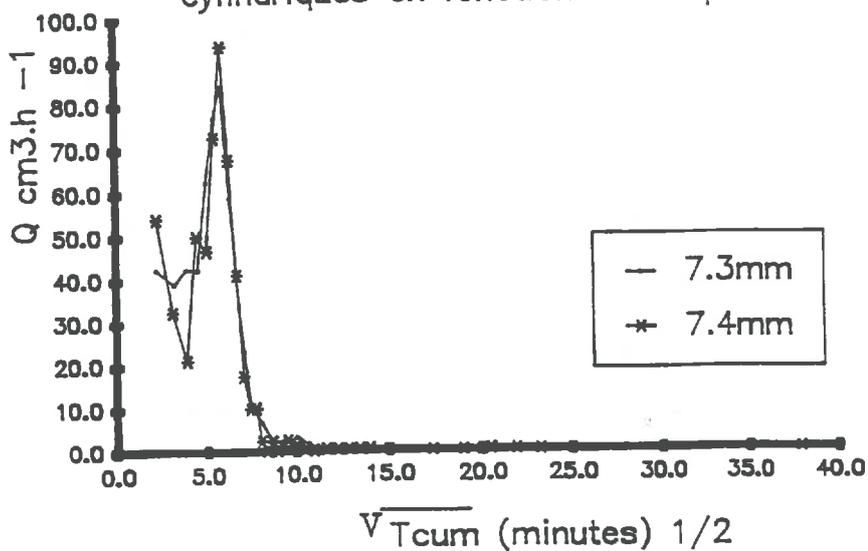


Fig. 17: Flux d'entré d'eau dans les éprouvettes cylindriques en fonction du temps



que la teneur en eau initiale de la partie supérieure des éprouvettes n'est pas modifiée. On peut donc soit remettre en cause la reproductibilité de la préparation des échantillons et des modalités d'humectation, soit admettre que ces différences sont la conséquence de différences d'évolution structurale.

#### IV.5.2. Variations des flux

Les variations du flux d'entrée d'eau dans les cylindres sont présentées figure 15. A l'exception du cylindre d'épaisseur 26 mm, pour laquelle il est faible, on observe un accroissement très sensible du flux dans la première phase d'humectation, d'une durée inférieure à 90 mn dans tous les cas. En présentant les variations de ce flux en fonction de la teneur en eau moyenne des éprouvettes (figure 16), il est plus facile de comparer ses variations à celles de la fissuration. On constate alors que l'apparition des premières fissures à la face supérieure coïncide avec un accroissement du flux. Elle semble précéder immédiatement cet accroissement (cylindres de 7,3 et 37,9 mm) ou être simultanée (cylindre de 12,4 mm). Dans le cas du cylindre de 26 mm, la variation de flux correspondante est trop faible pour être réellement démonstrative. L'hypothèse suivant laquelle l'évolution structurale induit d'importantes variations des propriétés hydrodynamiques en cours d'humectation apparaît cependant confirmée. Ainsi le pic du flux observé pour les humidités élevées sur les cylindres les plus épais peut être rapproché de la diminution d'épaisseur de certaines fissures grossières dans la phase finale du gonflement. Cette diminution permet la saturation de ces fissures par ascension capillaire qui explique l'accroissement de la quantité d'eau absorbée.

Quant à la reproductibilité des propriétés des échantillons et des conditions d'humectation, elle peut être évaluée par les résultats de la figure 17. Pour deux éprouvettes d'épaisseurs très voisines, les flux sont extrêmement proches et les courbes sont pratiquement identiques à l'exception des premières minutes de l'humectation. En particulier le pic qui suit l'apparition des premières fissures, à la face supérieure, apparaît parfaitement reproductible. La qualité des répétitions a également été vérifiée sur les cylindres les plus épais.

Les résultats sur chacune des classes d'épaisseur apparaissent donc fiables de ce point de vue. Il n'en reste pas moins qu'on peut supposer que la comparaison entre cylindres d'épaisseur différents risque d'être entachée par des différences :

- d'état interne liées à la phase de séchage à l'air préalable à l'humectation,

- des conditions de contact avec le support, du fait de différences de poids des éprouvettes,
- de déformations d'ensemble (courbure) des éprouvettes qui n'affecte de façon visible que les cylindres les moins épais.

## V. DISCUSSION

Les résultats obtenus apportent un ensemble de conclusions de natures différentes. Elles concernent d'une part le rôle et les modalités de la fissuration en cours d'humectation, d'autre part les techniques utilisées.

### V.1. Modalités de la fissuration à l'humectation

Les résultats ont confirmé l'importance de la division de volumes de sol initialement compacts et continus, lors de l'humectation à partir d'un état suffisamment sec. Ils ont montré que celle-ci pouvait aboutir à la formation d'éléments structuraux de petite taille. Cette dimension dépend de celle des volumes continus initiaux. Dans la géométrie d'humectation choisie, la finesse de la fissuration est d'autant plus grande que les volumes continus de départ ont une épaisseur réduite. Sans que cela puisse s'interpréter ici en termes mécanistes, on retrouve une corrélation générale entre épaisseur de la couche subissant les variations d'humidité et densité de la fissuration. Bien que les conditions aux limites soient différentes, notamment d'un point de vue mécanique, on peut supposer qu'on vérifie une relation analogue pour des fragments de croûtes superficielles ou certains éléments structuraux aplatis créés par le travail du sol (lards créés par les instruments à dents en condition humide par exemple).

Quant à l'analyse mécanique du processus de fissuration, le schéma hypothétique élaboré à partir des expériences antérieures est apparu qualitativement cohérent avec les résultats expérimentaux. La superposition de deux zones à direction préférentielles de fissuration respectivement normale et parallèle à la direction du flux, a été observée dans tous les cas. La position de la limite entre ces deux zones dépend de la géométrie du volume continu, ici la hauteur du cylindre humecté, et de la position du front d'humectation au moment de la fissuration de la zone fissurée parallèlement à la direction du flux. Bien qu'il ne soit pas possible de conclure à partir de résultats entachés d'incertitudes qui ont été soulignées, il semble que cette limite entre les deux zones coïncide avec celle de la zone dont l'humidité n'a pas encore varié à ce même moment.

Mis à part l'intérêt que présente cet élément de validation d'une hypothèse mécanique sur les modalités de la rupture, l'interprétation des conditions de formation des structures observées en conditions naturelles peut bénéficier de l'application de ces résultats. Ainsi, les structures fragmentaires de direction préférentiellement horizontales observées à proximité de la surface, en particulier dans des zones compactes, sont considérées généralement comme induites par les contraintes mécaniques dues au roulage. Sans exclure un tel effet, il apparaît que les seules variations d'humidité soient susceptibles d'expliquer leur formation dans les sols présentant une capacité de gonflement.

Enfin, des données plus précises que celles qui avaient été obtenues antérieurement, ont montré la coïncidence entre les évolutions structurales visibles et les variations du flux d'eau pénétrant dans les éprouvettes en réhumectation. Il est clair que les conditions initiales (échantillons secs à l'air et continu) et aux limites (potentiel hydrique nul sur une face) qui ont été choisis tendent à maximiser cet effet de l'évolution structurale liée au transfert d'eau. Il peut être plus réduit et transitoire dans les conditions réelles du terrain. La complexité de la réalisation de l'infiltration dans les sols gonflants est néanmoins clairement mise en évidence. Les connaissances acquises sur les processus d'évolution structurale ne peuvent permettre de prévoir ou de simuler les variations des propriétés hydrodynamiques de ces sols. Elles peuvent, en revanche, rendre interprétables des variations constatées qui seraient incompréhensibles si l'on considère le milieu poreux comme rigide. Elles peuvent également permettre de préciser les limites de validité de certaines estimations des coefficients de transfert.

## **V.2. Protocole expérimental**

Un certain nombre d'éléments d'appréciation des modalités expérimentales et des techniques de mesures et d'observations choisies ont été dégagées.

### **V.2.1. Préparation des éprouvettes**

Du point de vue mécanique, la préparation des éprouvettes cylindriques est apparue satisfaisante. On peut considérer ces éprouvettes comme continues à l'échelle macroscopique et la fissuration observée peut donc bien être attribuée à un effet de l'humectation.

La variabilité de résistance mécanique entre éprouvette ne semble pas supérieure à la variabilité interne à une même éprouvette, telle qu'elle a été estimée sur une population de sphère extraite d'un même cylindre.

La reproductibilité des cinétiques d'humectation confirme à la fois la faible variabilité entre les propriétés d'éprouvettes de même épaisseur, et la maîtrise satisfaisante des conditions aux limites imposées par le dispositif d'humectation. Toutefois, la fréquence des humectations préférentielles à la périphérie des cylindres a empêché l'application d'une analyse fondée sur l'hypothèse d'un flux vertical et homogène sur toute la section du cylindre. Ce "effet de bordure" peut être expliqué en partie par :

- la présence d'un ménisque à la base de l'échantillon dont résulterait l'existence d'une surface d'humectation latérale. Une légère compression du support sur lequel repose le cylindre pourrait expliquer que cette surface soit plus grande sur les échantillons les plus épais ou les déformations latérales du front d'humectation apparaissent les plus importantes. Ce phénomène pourrait être éliminé en rendant non mouillables les parois des cylindres.

- l'hétérogénéité d'orientation des pores texturaux, liée aux flux d'eau durant le dessèchement initial des échantillons. Celle-ci pourrait induire des variations locales de conductivité hydraulique. L'expérience montre qu'il est très difficile d'éviter un gradient radial de teneur en eau au cours de l'évaporation. La solution consisterait alors à préparer des cylindres de plus grand diamètre qu'il faudrait ensuite retailler pour conserver une zone plus homogène.

- les particularités de la fissuration en bordure de la face inférieure du cylindre. A proximité de cette bordure, les conditions de rupture plane supposées précédemment ne sont plus respectées, et l'observation de cylindres réhumectés montre généralement la formation de fissures obliques proches de l'arête. Celles-ci peuvent favoriser un transfert plus rapide à la périphérie. Ce phénomène est inéluctablement lié à la géométrie cylindrique.

### V.2.2. Etude d'échantillons imprégnés

La comparaison des observations effectués sur des échantillons humides puis les mêmes échantillons après séchage et imprégnation a montré qu'un certain nombre de traits morphologiques pouvaient être observés après imprégnation sans artéfacts rédhibitoires. Cette condition nécessaire pour décrire quantitativement l'état interne des éprouvettes paraît remplie pour des cylindres au moins si le séchage peut en être assuré rapidement. Elle est beaucoup plus difficile à vérifier pour des volumes ne présentant pas de surface plane sur lesquels on ne peut comparer quantitativement des images avant et après imprégnation.

C'est pourtant dans ce cas qu'elle est également le plus indispensable lorsque l'humectation affecte la totalité de la surface externe (cas des sphères ou de mottes compactes), la fissuration n'étant alors pas visible sur cette surface.

## **VI. CONCLUSION**

Intervenant après un ensemble de travaux expérimentaux ayant permis de préciser les conditions d'existence de la fissuration induite par un apport d'eau et son importance pour l'évolution structurale du sol, cette étude avait un objectif plus analytique. Il s'agissait de confirmer la validité d'hypothèses mécaniques susceptibles de servir de base à l'élaboration d'un modèle. Si qualitativement les résultats obtenus sont apparus conformes à ces hypothèses, les conditions d'une validation plus quantitative, ou de la formulation de relations expérimentales à introduire dans le modèle, sont apparues beaucoup plus difficile à réaliser. Le point le plus délicat et la maîtrise de gradients de potentiel hydrique affectant quelques millimètres d'épaisseur. Ceci pose le problème du choix particulier des conditions expérimentales qui ont été retenues : nature du matériau, volume des échantillons.

D'un point de vue plus général, l'importance du phénomène dans les processus d'évolution structurale a été soulignée et le rôle que peut jouer la géométrie initiale des éléments structuraux subissant l'apport d'eau a été démontré. La vérification, même qualitative, du schéma hypothétique de rupture paraît susceptible d'expliquer certaines formes de structures rencontrées en conditions naturelles. La recherche de moyens d'élaborer un modèle permettant la simulation des effets d'un certain nombre de facteurs, impossibles à étudier expérimentalement de façon systématique, variation de la résistance mécanique du matériau, géométrie des éléments structuraux et conditions d'humectation, doit être poursuivie. Mais simultanément, le contrôle de la compatibilité des hypothèses émises avec différents types d'évolution structurale observés in situ permettrait d'évaluer l'efficacité des résultats acquis à des fins de prévisions.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**BOURLET M., FIES J.C., 1981** - Technique d'échange de l'eau de gros échantillons de sol par l'acétone en phase vapeur. *Science du Sol*, 4, 293-304.

**CARDON-DUBOIS F., 1985** - Fissuration à l'humectation d'un sol argileux. Mémoire de fin d'étude ENITA, Dijon, 38p.

**DE LEON F., 1987** - Fissuration à l'humectation des sols : étude expérimentale sur échantillons remaniés. Mémoire INA-PG, 20p.

**DEXTER A.R., 1975** - Uniaxial compression of ideal brittle tilths, *J. Terramechanics*, 12, 3-14.

**DINEL D., 1988** - Fissuration de matériaux terreux au cours de l'humectation : influence des modalités d'humectation et de l'état initial des échantillons. Mémoire de fin d'études, ENITA, Dijon, 20p.

**GUERIF J., 1988** - Détermination de la résistance en traction des agrégats terreux : revue bibliographique et mise au point technique. *Agronomie* 8, 281-288.

**HALLAIRE V., 1987** - Le retrait vertical d'un sol argileux au cours du dessèchement. Mesures de l'affaissement et conséquences structurales. *Agronomie*, 7, 631-637.

**HILLEL D., 1980** - Fundamentals of Soil physics, Academic Press, 412p.

**HIRAMATSU Y., OKA Y., 1966** - Determination of the tensile strength of rock by a compression test of an irregular test piece. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 3, 89-99.

**MANICHON H., 1982** - Influence des systèmes de culture sur le profil cultural : élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse INA-PG, 213p.

**MONNIER G., STENGEL P., FIES 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.

**STENGEL P., 1983** -Simplification du travail du sol en rotation céréalière : conséquences physiques. Colloque ONIC-Rotations Céréalières Intensives, 37p.

**STENGEL P., 1988** - Cracks formation during swelling: effects on soil structure regeneration after compaction : 11th ISTRO Conference, Edimburgh, 1988 - ISTRO, Tillage and Traffic in Crop Production, 147-152.

**STENGEL P., 1988** - Etude expérimentale de la fissuration au cours du dessèchement et de l'humectation. Séminaire du Département de Science du Sol. L'Isle/Sorgue (FRA) 1987, INRA Paris, 161-183.

**STENGEL P., BOURLET M., 1987** - Fissuration d'un sol argileux gonflant après compactage. CEE Rotterdam, Monnier G., Goss M.J. (Ed.), Soil Compaction and Regeneration, 95-110.

**UTOMO W.H., DEXTER A.R., 1981** - Tilth mellowing. *Journal of Soil Science*, 32, 187-201.

## Annexe

### Organigramme des mesures par analyse d'image

- 1/ Extraction des fissures de grande épaisseur :
  - Seuillage sur un niveau de gris → image I
  
- 2/ Extraction des fissures fines :
  - Ouverture (dilatation x érosion) sur l'image 8 bits
  - Transformation Chapeau Haut de Forme  
(érosion x 2 dilatations x 1 érosion - suivie d'une soustraction de l'image d'origine)
  - Seuillage → image II
  
- 3/ Elimination des bruits
  - des deux images I et II → image III
  - Elimination des points isolés
  - Squelettisation
  - Ebarbulage (élimination des extrémités du squelette par pas de 1 pixel) 1 ou 2 suivant dimensions des objets à éliminer
  - Elimination des points isolés
  - Reconstruction de l'image III : tous les objets restant retrouvent la forme initiale conservée dans l'image III
  - Sélection selon la surface : élimination de tous les objets d'une surface inférieure à un seuil donné (entre 10 et 20 pixels pour les images traitées ici)
  
- 4/ Mesures :
  - Longueur de fissures :
    - Mesures de la longueur du périmètre, divisé par deux
  - Porosité :
    - Rapport du nombre de pixels des fissures où nombre de pixels du marqueur (limitation de l'image étudiée)
  - Granulométrie des fissures :
    - Erosion successive par pas d'un pixel suivie de mesures de longueur et de porosité.