

TH-L23

G-16

FISSURATION A L'HUMECTATION
D'UN SOL ARGILEUX

Mémoire de Fin d'Etudes
ENITA Dijon-Quetigny

Frédéric CARDON-DUBOIS

Septembre 1985

ERRATUM

p. 9, lire "(cf. figure 2)" au lieu de "cf. figure 4".

p.15, lire "cf. schéma 2" au lieu de "cf. schéma 1".

Au verso de la page 23, photo n°6, lire "Wi = 12,5 %" au lieu de "Wi = 14,3 %"

Au verso de la page 27, l'abscisse représente le temps en heures.

Au verso de la page 29, légende de la photo n°11,

"Surface d'un massif de Wi = 7,8 % après 2h30
d'humectation".

AVANT - PROPOS

Ce mémoire a été réalisé à la Station de Science du Sol d'Avignon dans le cadre de l'option Agronomie de l'E.N.I.T.A. de Dijon.

Je remercie chaleureusement, **P. STENGEL**, Directeur de la Station, qui m'a accueilli et m'a guidé tout au long de mon travail.

Je tiens à remercier, également, **J. GUERIF** et **M. BOURLET**, tant leur aide fut précieuse pendant ce stage.

Enfin que tous ceux qui m'ont aidé dans la réalisation de cette étude, et notamment **P. BERTUZZI**, trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.

Je remercie également **N. LEITGOLD** qui a bien voulu assurer la frappe de ce mémoire.

R E S U M E

La connaissance du processus de fissuration à l'humectation peut constituer un élément de prévision de l'aptitude d'un sol compacté à une régénération naturelle.

L'observation d'une surface de sol argileux compacté, avant et après des pluies différentes a laissé entrevoir qu'une fissuration fine pouvait se produire lors du gonflement. Cependant les résultats expérimentaux n'ont pas permis d'affirmer de façon incontestable que la fissuration a lieu pendant la phase d'humectation.

L'humectation au laboratoire de massifs de sols argileux remaniés a mis clairement en évidence certaines conditions d'apparition de la fissuration (sol initialement désaturé, humectation par eau libre). L'étude morphologique, par analyse d'image, a montré une intensification croissante de cette fissuration avec la succion initiale de l'eau des massifs. Celle-ci était, beaucoup plus importante quand la teneur en eau avant réhumectation était inférieure à la limite de retrait.

Les limites de notre dispositif expérimental sont dues au fait que l'on ne pouvait connaître la distribution de l'eau à l'intérieur des massifs au cours de la réhumectation. De ce fait, l'analyse du système de porosité n'a pu être effectuée correctement.

S U M M A R Y

The knowledge of the cracking process consecutive to wetting can be a predicting element for soil suitability for structure regeneration after compaction.

The observation, prior and after different rain intensities, of the surface of a clayey soil, showed that swelling induced important cracking. But the experimental results couldn't demonstrate that the cracking process took place during wetting.

The study of the rewetting of cylindrical remoulded samples showed clearly some conditions of cracking occurrence during wetting. The sample must be initially un-saturated and wetted with free water ($\psi = 0$). A morphological study, with an image analyzer, showed that cracking increased with the initial water potential of the cylinder. The cracking was more important when water-contents prior rewetting were inferior to the shrinkage limit.

The limits of our experimental design are mainly due to the fact that water-content measurements within the cylinder were impossible during wetting and then porosity analysis was not feasible.

PLAN

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : ETUDE AU CHAMP	2
I. Objectifs	2
II. Matériels et méthodes	2
II.1. Le site expérimental	2
II.2. Les traitements	3
- Le compactage	3
- L'arrosage	4
II.3. Techniques de mesures	5
- Mesures de la compacité : profils hydriques et profils de densité	5
- Appréciations du gonflement vertical : techniques d'aspérimétrie	5
- Appréciation de la fissuration :	6
- Méthode de Newman	6
- Analyse d'images	7
III. Résultats - Discussion	8
III.1. Résultat du compactage	8
III.2. Variations d'humidité	9
III.3. Gonflement	10
III.4. Evolution de la fissuration	10
III.5. Discussion	12
CHAPITRE II : ETUDE AU LABORATOIRE	13
I. Matériels et méthodes	13
I.1. Objectifs	13
I.2. Préparation du modèle de sol à structure continue	13
I.3. Le dispositif de réhumectation	14
I.4. Techniques de mesures du volume	15
I.5. Techniques de mesures de la teneur en eau	18

I.6.	Caractérisation de la morphologie de surface	19
I.7.	Méthodes d'analyse des résultats	19
	- Analyse du système de porosité	19
	- Analyse d'images	22
I.8.	Les limites de la méthode	22
II.	Résultats et Discussion	23
	A/ Humectation par de l'eau libre	23
II.1.	Influence de l'humidité initiale sur la fissuration	23
II.2.	Étude des cinétiques d'humectation	28
II.3.	Analyse de la porosité	30
	- Teneur en eau moyenne	30
	- Relation potentiel-teneur en eau	30
	- Estimation du volume d'eau retenue par les fissures	32
	B/ Humectation avec de l'eau portée à un potentiel négatif	33
II.4.	Discussion méthodologique	34
III.	Discussion	35
IV.	Conclusion	38

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

INTRODUCTION

Le sol est un milieu physique poreux. Les pores jouent un rôle considérable dans l'aération du sol (diffusion des gaz), la circulation des solutés et la pénétration racinaire.

Mais le sol est fragile et déformable. La mécanisation de l'agriculture l'utilisation de matériels de culture et de récolte de plus en plus lourds, combinés à l'évolution des systèmes de culture, ont contribué à rendre le problème des tassements accidentels de plus en plus aigü (**GUERIF, 1983**).

Le tassement entraîne une réduction du volume poral. La diminution de la porosité libre à l'air limite la diffusion des gaz et la perméabilité. Ce qui accroît les risques d'asphyxie. Le tassement modifie également les propriétés mécaniques du sol : résistance à la rupture, et résistance à la pénétration (**GUERIF, 1983**). Ces conséquences sont importantes vis-à-vis de la difficulté de reprise postérieure par le travail du sol.

Un des programmes de recherches de la Station de Science du Sol d'Avignon est d'étudier le processus de régénération naturelle des sols cultivés.

Le cas des sols argileux est particulier. Ceux-ci ont la propriété de se fragmenter au cours des cycles d'humectation-dessiccation. Ce phénomène est la conséquence de la variation de volume des argiles avec leur teneur en eau, quand leur nature minéralogique leur confère des propriétés de retrait-gonflement. L'amplitude du retrait gonflement détermine d'ailleurs l'intensité des processus d'évolutions structurales naturelles (**PINOCHET, 1981**).

La reprise d'un sol compacté par un travail mécanique, ramène à la surface du sol des mottes très dures difficiles à briser par une simple action mécanique. La fissuration naturelle constitue dans ce cas le meilleur moyen d'obtenir une fragmentation des mottes.

L'objectif de ce travail est d'évaluer le rôle direct essentiel de l'humectation dans le processus de fissuration. Celui-ci est généralement attribuée au gonflement-retrait ou aux alternances dessiccation-humectation sans que soient séparées les parts respectives de chacune de deux phases de variation de l'humidité. La description de la fissuration et son analyse mécanique ne sont généralement abordés qu'en retrait, pour des raisons de simplicité méthodologique plus grande. Cependant, des observations ont montré que l'affinement de la maille de fissuration pouvait se produire à l'humectation. Il s'agit de vérifier en conditions mieux contrôlées l'existence de ce processus d'évolution structurale et si possible d'en préciser les principaux facteurs.

CHAPITRE I : ETUDE AU CHAMP

I- OBJECTIF

Cette expérience de terrain avait pour but de vérifier in situ, et dans des conditions contrôlées, ou tout au moins connues, l'apparition d'un processus de fissuration à l'humectation, dont l'observation de la structure de surface avant et immédiatement après une pluie avait déjà suggéré l'existence. Celle-ci était par ailleurs corroborée par des observations de laboratoire réalisées sur des plaques de boue séchées à l'air, puis subissant une brumisation.

Nous avons choisi de réhumecter par aspersion, des surfaces initialement compactées à des niveaux variables, puis ayant subi un dessèchement des premiers centimètres superficiels.

Vis-à-vis du problème agronomique du compactage et probablement de l'amplitude de la fissuration, il eût été également, voire plus justifié, d'étudier le comportement de mottes compactes subsistant après travail du sol. Ceci aurait posé des problèmes complexes de description de la fissuration, accessible dans ce cas, uniquement après imprégnation des mottes et réalisation de sections polies (ou lames minces). Ce qui suppose la maîtrise de l'imprégnation d'échantillons humides.

C'est pourquoi nous nous sommes tenus à l'étude de surfaces planes.

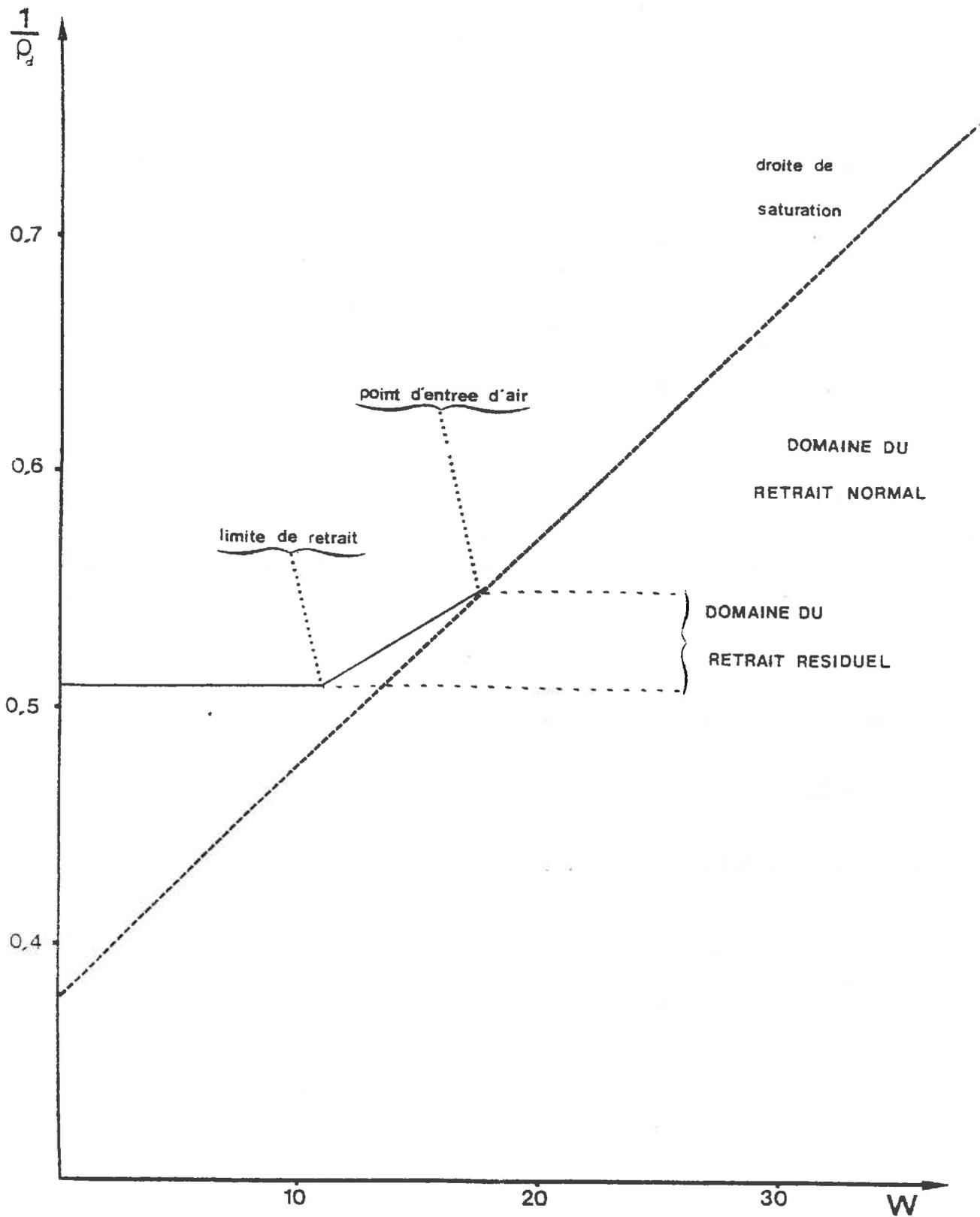
II- MATERIEL et METHODES

II-1. Le site expérimental

La parcelle expérimentale se situait sur le domaine INRA des Vignères, à 20 km d'Avignon. Le sol se caractérise par une teneur élevée en argile (cf. Annexe 1) qui lui confère des propriétés de retrait-gonflement très importantes pour son évolution structurale. Elle se traduit par des mouvements verticaux importants de la surface, la formation de fissures de grandes dimensions au dessèchement et le développement d'une structure très fine (self-mulching) à la surface.

Les propriétés de retrait sont bien décrites par la courbe de retrait d'agrégats de 2-3 mm présentée à la Figure 1.

Figure 1
Courbe de retrait d'agrégats(2-3 mm) des Vignères



La parcelle était divisée en trois bandes de 60 cm de largeur sur 6 m de longueur. L'isolement des conditions climatiques était réalisé grâce à la mise en place d'un tunnel plastique.

La succession des opérations culturales a été la suivante :

- Un labour à 30 cm avant l'hiver
- Une reprise au printemps avant le semis du maïs
- Un arrosage de 40 mm pour ramener le sol à la capacité de rétention
- Un ressuyage de 24 h
- Un compactage par un rouleau, d'intensité variable pour chaque bande
- Un dessèchement d'une dizaine de jours pendant lequel une fissuration de retrait est apparue.

II-2. Traitements

II.2.1. Le Compactage

Le tassement avait pour but de créer :

- Un état structural initial aussi continu que possible (noté TF) dans lequel toute la porosité structurale visible serait due au phénomène de fissuration. Il fournit une indication de la régénération structurale possible dans les conditions de tassement maximal, pour la pratique agricole courante.
- Un état tassé (noté Tf) dans lequel persisterait une porosité structurale pour juger éventuellement de l'interaction entre l'état structural initial et l'intensité des mécanismes de division par retrait-gonflement.
- Le témoin non roulé (noté TNR) ne présentait qu'un intérêt limité vis-à-vis du phénomène de la fissuration, qui n'affecte de façon perceptible et en l'absence de transpiration par une plante, que la croûte superficielle. Le seul résultat à attendre à son sujet concernait son gonflement.

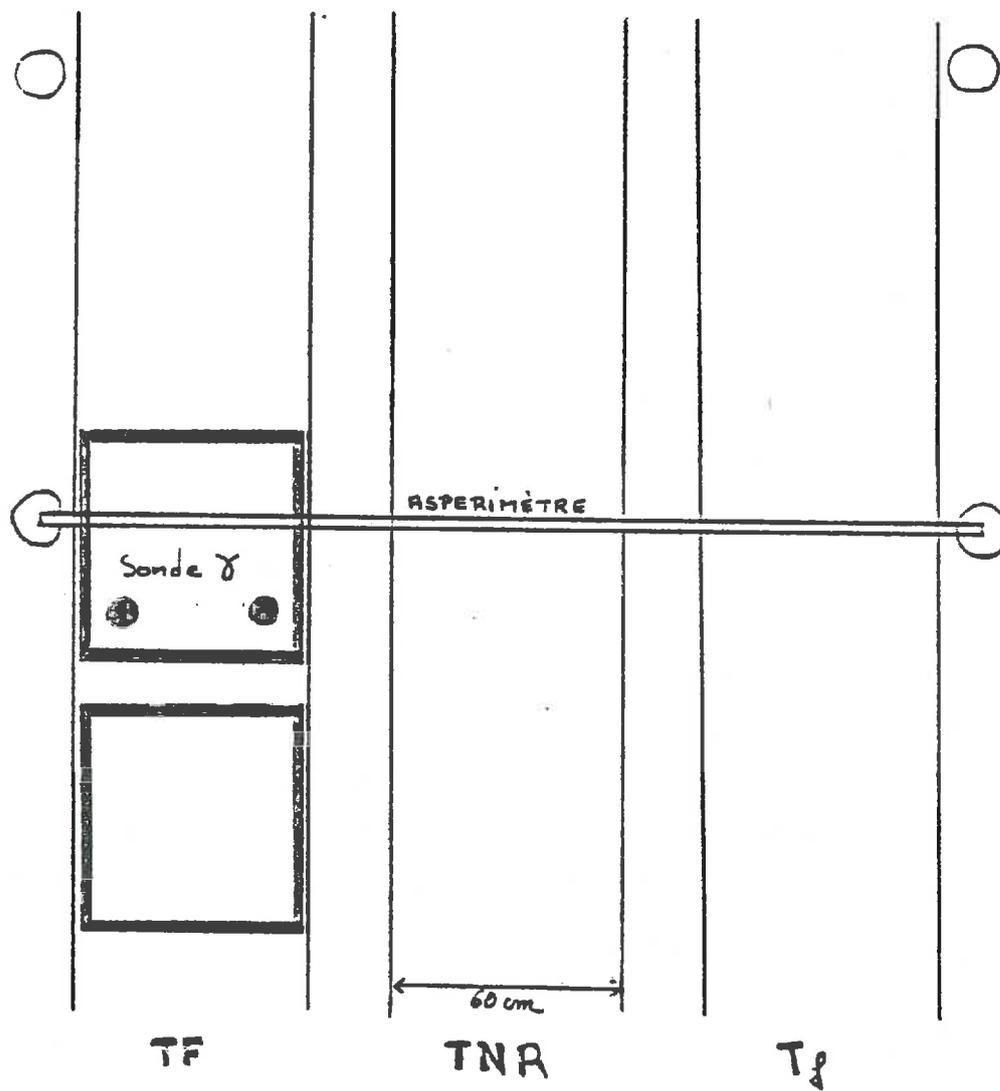


Figure 2 Site experimental des Vignères

II-2.2. L'arrosage

Il a été assuré manuellement par aspersion fine avec un petit asperseur de jardin à air comprimé.

Le débit était constant pour les trois doses. Il s'agissait :

- d'éviter la formation de flaques en surface. Cette condition était réalisée par un débit de 15 mm/h,
- de faire varier réellement la dose apportée dans la couche sèche de surface. L'accroissement de la dose par accroissement du débit risquait en effet d'augmenter davantage les flux convectifs dans les fissures formées au retrait que la diffusion dans les volumes continus.

Trois doses d'irrigation ont été apportés pour chaque bande de tassement :

- 30 mm/2 heures
- 15 mm/1 heure
- 7,5 mm/1/2 heure.

De plus, un arrosage de 3,5 mm a été réalisé sur la bande Tf seulement. Nous manquions de place sur les deux autres bandes. Après chaque arrosage, les sites étaient bachés de façon à éviter l'évaporation.

Un site d'étude était défini par deux carrés de 50 cm de côté. Il correspondait à un traitement compactage pour une dose d'arrosage (cf. Figure 2). L'expérimentation s'est déroulée comme suit :

- Caractérisation de l'humidité initiale par un profil hydrique
- Caractérisation de la compacité initiale par un profil de densité
- Caractérisation de la morphologie fissurale de départ par photographie
- Caractérisation du relief par aspérimétrie
- Aspersion
- 24 heures après, nous avons refait les mêmes mesures pour l'état final.

Un des deux carrés était utilisé pour les prélèvements d'humidité et les mesures de gonflement, l'autre pour la photographie de surface.

II-3. Techniques de mesure

II-3.1. Mesure de la compacité : Profils hydriques et profils de densité

Les profils de densité ont été obtenus par l'utilisation de la double sonde gammamétrique LPC-INRA (STENGEL et al., 1983).

a) Conditions de réalisation

Les méthodes mises en œuvre pour la réalisation des différents profils sont complémentaires. Les prélèvements de sol pour la mesure de l'humidité et les mesures de densité ont été réalisées perpendiculairement au sens de roulage, c'est-à-dire parallèlement à la direction de l'aspérimètre.

Les prélèvements de sols pour la mesure de l'humidité sont effectués lors du perçage des trous nécessaires pour la mise en place des tubes de la sonde γ . Ils sont réalisés par tranche de 5 cm jusqu'à 30 cm. La scrutation gamma s'effectue elle, tous les 2,5 cm.

b) Limites

Par suite de la faible surface des sites et du peu de places disponibles, nous n'avons pu effectuer de répétitions pour les mesures de densité. Cela pose le problème de la reproductibilité de la mesure vis-à-vis de l'hétérogénéité du sol des Vignères.

II-3.2. Appréciation du gonflement vertical : Technique d'aspérimétrie

a) Principe d'utilisation

Cette méthode a permis de mesurer le gonflement vertical du sol après arrosage (cf. Description de l'appareil en Annexe 2). La variation de longueur de la partie supérieure des tiges entre l'état initial et final représente le gonflement vertical du sol.

b) Calcul du gonflement

Le support de l'aspérimètre étant placé à 30 cm de profondeur, la variation de cote mesurée représente le gonflement de la couche 0-30 cm. On peut évidemment le rapporter à la couche ayant effectivement gonflé à partir des profils d'humidité.

II.3.3. Appréciation de la fissuration

a) Méthode des intersections de Newman (1965)

Elle a été utilisée lors de la détermination des longueurs de racines présentes dans un échantillon de terre :

Soit une surface S sur laquelle on a disposé au hasard un certain nombre de segments de droite de longueur totale H . Selon Newman, le nombre d'intersections N avec les segments d'une racine étalés sur cette surface est d'autant plus grand que la racine est plus longue. N peut donc être utilisé pour estimer la longueur de la racine.

Soit l la longueur totale des racines, on a la relation suivante :

$$l = \frac{\pi N S}{2 H} \quad (1)$$

* Principe de la mesure

Sur un carré de 50 cm de côté, une règle de D cm de longueur ($D = 30$ cm) a été jetée 20 fois au hasard. A chaque jet, les intersections avec les fissures ont été comptées. Soit N le nombre total d'intersections correspondant aux C comptages ($C = 20$).

La longueur des fissures est calculée à partir de la formule (1). On a :

$$L = \frac{\pi N S}{2(C \cdot D)} \quad (\text{cm})$$

* Limite de la méthode

La méthode de Newman est basée sur une probabilité de rencontre de la règle avec les fissures supposées sans épaisseur. Il est clair que lorsque l'épaisseur de l'élément compté n'est pas infinitésimale, un biais est introduit dans la probabilité d'intersection qui peut être déterminante.

b) Analyse d'images

Pour chaque site, une photographie est réalisée. Elle permet de suivre l'évolution de l'état de surface après aspersion. Les photographies sont traitées avec l'analyseur d'images. Nous avons essayé par cette technique d'analyse de caractériser la morphologie de la fissuration.

L'image à analyser est transmise à un numériseur par l'intermédiaire d'une caméra vidéo. Celui-ci est capable sur une image en noir et blanc de distinguer 256 niveaux de grisés et d'affecter une valeur numérique à chaque niveau de gris. La numérisation consiste en un quadrillage de l'image en 512 x 512 pixels formant une trame carrée. Chaque pixel ainsi déterminé, se voit affecté une valeur numérique de 0 à 255 caractérisant le niveau de gris du point d'image qui lui correspond.

L'image est ainsi transformée en une matrice chiffrée de 512 x 512. C'est sur cette matrice que l'ordinateur travaille.

Nous effectuons par la suite une séquence d'opérations. Celles-ci seront détaillées en annexe 4.

L'opération principale consiste en un seuillage de l'image grâce auquel on distingue deux phases dont on veut décrire la géométrie. Dans notre cas, les deux phases sont les fissures d'une part et les éléments structuraux continus d'autre part. Le seuillage consiste à choisir un critère concernant le niveau de gris ou ses variations qui permettent de décider si un trait de l'image est une fissure ou pas (cf. Annexe 4). La difficulté vient du rendu des couleurs de l'objet, des ombres et du relief de la surface.

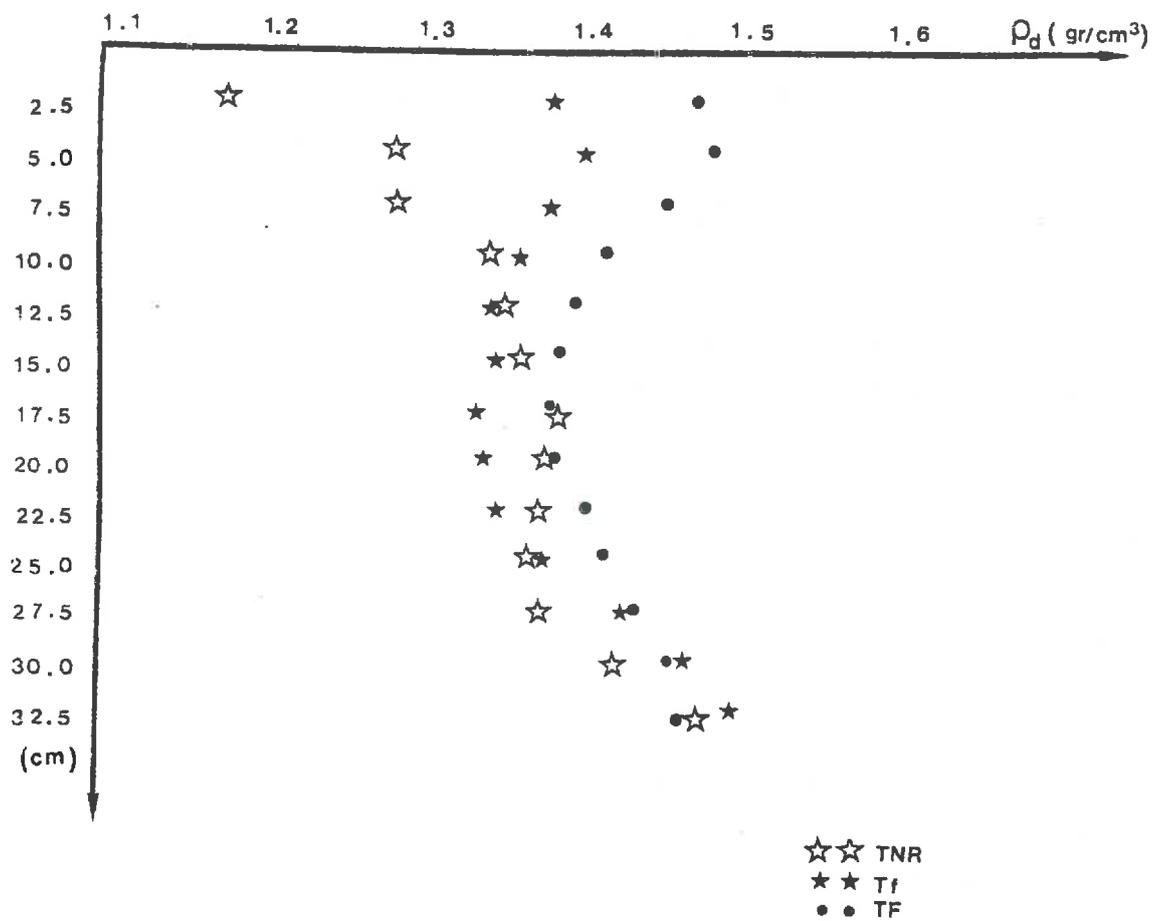
Certaines zones de l'image peuvent avoir des valeurs de gris identiques à certaines fissures. Si notre oeil est capable de reconnaître une fissure par sa géométrie, en revanche l'analyseur n'effectue la distinction que sur des valeurs de gris.

Pour les fissures les plus grosses, le seuillage ne pose en général pas de problèmes, par contre un biais peut être introduit au niveau des fissures plus petites et des bords de fissures dont le gradient de gris est faible.

Pour introduire le moins de biais possible, nous avons utilisé successivement deux techniques de seuillage :

- Un seuillage simple basé sur les niveaux de gris pour distinguer les fissures les plus nettes et les plus larges, en évitant de sélectionner les bords des fissures.
- Un seuillage dit "chapeau haut de forme" pour sélectionner les fissures plus fines sans surestimer les fissures plus larges.

Figure 4 : Profils de densité de l'état initial



L'image seuillée est transformée en image binaire. Deux niveaux de gris seulement : 1 pour les fissures et 0 pour le reste.

Sur cette image binaire, toute mesure va consister à compter les pixels de niveau 1, avec ou sans transformation préalable de l'image permettant d'accéder à différentes variables morphologiques.

Nous avons effectué les mesures suivantes :

- évaluation de la porosité fissurale
- évaluation de la longueur des fissures
- calcul de la granulométrie des fissures : distinction des longueurs de fissures selon leur largeur.

III- RESULTATS - DISCUSSION

III.1. Résultats du compactage

Les profils de densité obtenus immédiatement après compactage des deux traitements sont présentés à la Figure 3. Ils montrent que les deux traitements sont différenciés par le niveau de compacité atteint et la profondeur affectée par le tassement. Le Tableau 1 donne les valeurs de la porosité structurale dans la couche 0-5 cm. Elle correspond à la couche la plus superficielle, qu'on peut mettre en relation avec la fissuration observée en surface.

Tableau 1

Porosité structurale (%) initiale des différents traitements

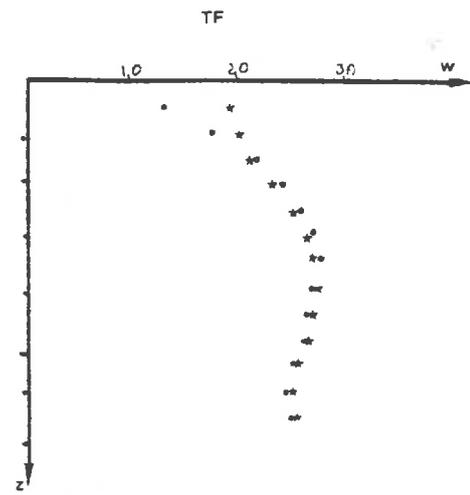
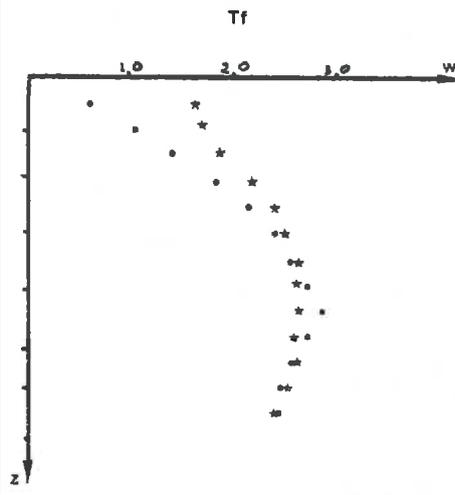
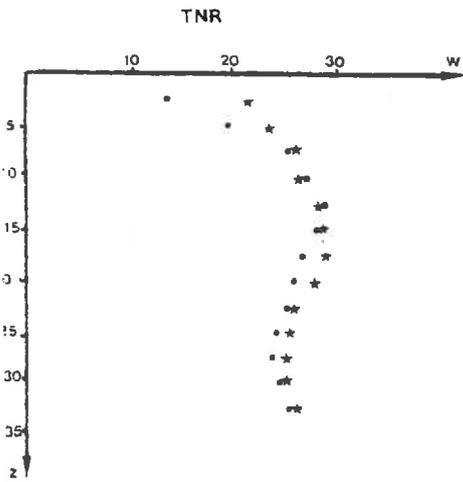
Profondeur d en cm	TNR		Tf		TF	
	W	n _s	W	n _s	W	n _s
2,5	26,7	25,1	28,7	9,7	25,9	7,2
5	29,3	14,9	30,7	5,6	27,4	4,4

L'écart important des densités ne se traduit que par une faible différence de porosité structurale entre les deux intensités de tassement. On peut supposer, cependant, qu'après desséchement, le traitement Tf avait à une même humidité que le traitement TF, une porosité fissurale plus importante, puisque son humidité initiale était plus forte et donc l'amplitude de retrait possible.

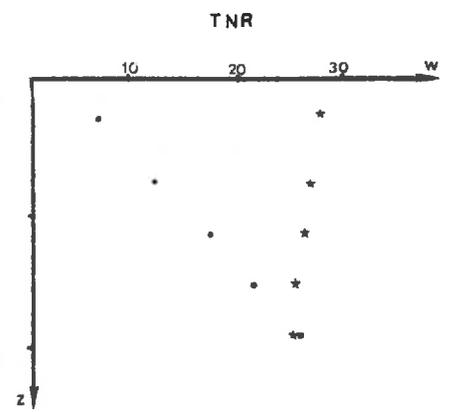
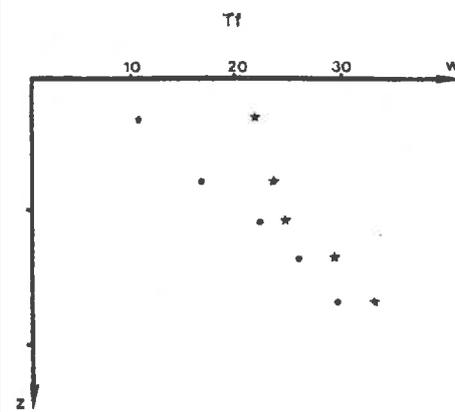
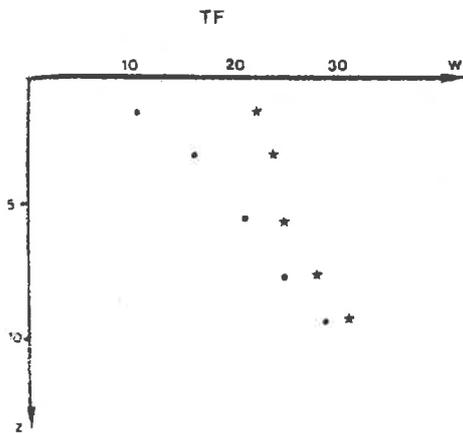
Figure 2 Profils hydriques

• etat initial ★ 24 H après humectation

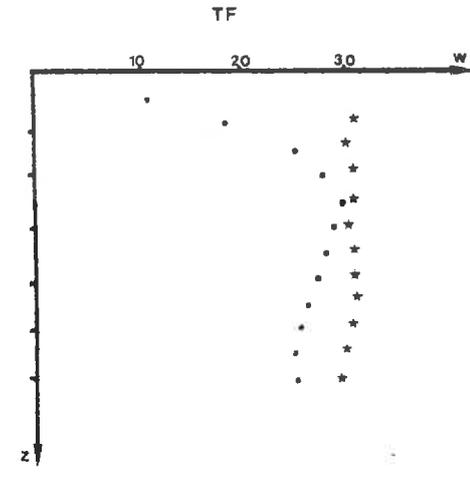
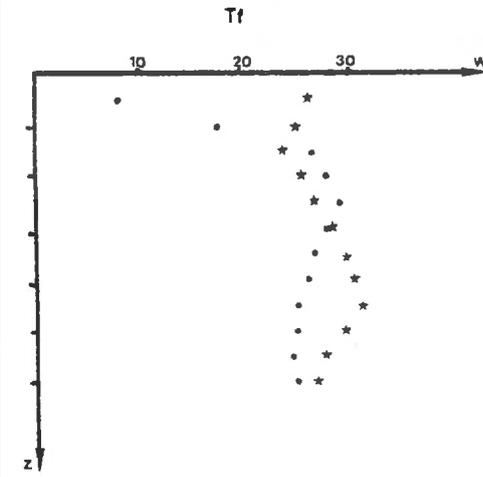
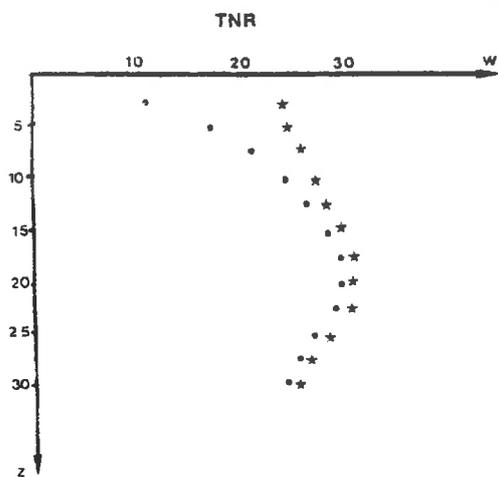
P = 7,5mm



P = 15mm



P = 30mm



III.2. Variations d'humidité

Les profils hydriques obtenus avant arrosage et au moment de l'observation des fissures montrent un accroissement de l'humidité (cf. Figure 4). Les différences entre profils initial et final montrent que l'humectation n'a concerné qu'une profondeur de 5 cm pour l'apport de 7,5 mm, 15 cm pour l'apport de 15 mm et 30 cm pour l'apport de 30 mm. Cependant, la forme des profils et les valeurs atteintes dans les couches superficielles, qui sont très inférieures dans la plupart des cas à la capacité de rétention, montrent que l'eau apportée en surface a migré en profondeur, sans amener (ou après avoir amené) la surface à un état de gonflement maximum. On peut l'expliquer par deux mécanismes :

- Un transfert convectif dans les fissures
- Une redistribution par diffusion.

La forme des profils, qui suggère un gradient de succion positif (sauf pour la dose 30 mm), indique (l'évaporation étant exclue du fait de la couverture plastique) que le premier de ces mécanismes a dû intervenir au moins en partie dans le phénomène.

Les bilans hydriques représentés au Tableau 2 fournissent des résultats cohérents, à l'exception d'un seul cas (Tf 7,5 mm) où la quantité d'eau retrouvée dans le sol est supérieure à la quantité apportée.

On est conduit, dans ce cas, à incriminer la représentativité du profil initial, particulièrement sec, et probablement réalisé à proximité d'une fissure profonde.

Outre les doutes qui pèsent alors sur la validité des autres profils, ceci pose le problème méthodologique très général pour les études comportant la mesure des profils hydriques à proximité de la surface.

L'humidité peut être évaluée précisément par gravimétrie, mais le caractère destructif de cette méthode empêche de procéder sur des petites surfaces, aux répétitions nécessaires.

Dans les autres traitements, on constate que la proportion d'eau retenue est de l'ordre de 60 % de la dose apportée. L'écart peut résulter, en partie, d'une percolation en profondeur dans les fissures, mais ce phénomène ne peut être analysé rigoureusement, en tenant compte des différences d'humidités initiales entre traitements, du fait de l'imprécision des mesures d'humidités.

dose d'irrigation	TNR		Tf		TF	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
7,5	4,3	2,5	2,5	2,8	3,1	1,3
15	6,9	4,4	3,3	2,6	2,3	2,4
30	6,3	6,7	7,4	4,6	5,4	5,3

(1) gonflement mesuré à l'aspérimètre

(2) Calculé à partir de l'hypothèse d'un gonflement isotrope

Tableau 3 : Gonflement vertical dans les différents traitements (en mm)

On peut cependant remarquer que les autres facteurs de perte d'eau (évaporation pendant la durée de l'arrosage) peuvent difficilement atteindre les valeurs estimées.

Tableau 2
Variation de réserve hydrique des sites pour les
différentes doses d'irrigation (en mm)

Dose en mm	TNR	Tf	TF
7,5	+ 5,9	+11,6	+ 4,2
15	+14,3	+ 9,0	+ 8,0
30	+19,8	+19,5	+19,4

III.3. Gonflement

Les gonflements verticaux calculés à partir des résultats de l'aspérimétrie sont présentés au Tableau 3. Ils montrent que les mouvements verticaux de la surface du sol, dans les matériaux argileux, ne sont pas négligeables même pour des apports d'eau faibles. En toute circonstance, l'hypothèse d'invariance de la densité sèche doit donc être écartée.

Le calcul du gonflement à partir de l'hypothèse d'un gonflement isotrope et de la courbe de retrait d'agrégats (Annexe 3) donne des résultats assez proches de ceux obtenus par le premier calcul. Ceci est satisfaisant, compte-tenu des incertitudes liées à l'évaluation des variations de teneur en eau.

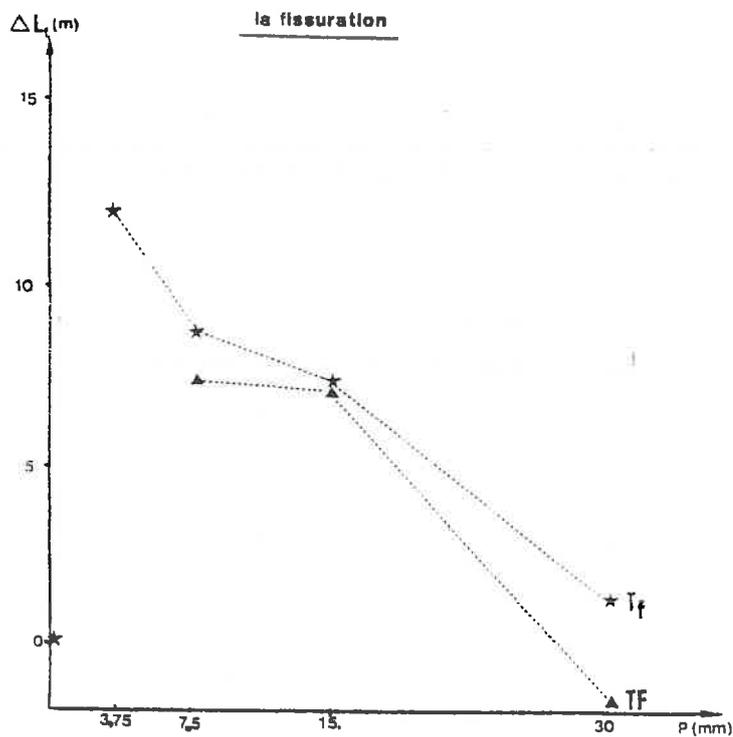
Cela ne permet pas de vérifier l'hypothèse d'isotropie dont l'inadéquation a déjà été démontrée dans d'autres conditions sur le même sol (HALLAIRE, 1985 ; STENGEL et GUERIF, 1985).

III.4. Evolution de la fissuration

a) Evolution de la longueur de fissures

Les deux méthodes de détermination de la longueur des fissures ont été utilisées pour six sites sur les douze. L'analyse des photographies, pour des raisons de temps disponible, n'a pu être réalisée complètement.

Néanmoins, le coefficient de régression de la relation établie entre les valeurs des deux méthodes est de **1,03**. Les deux méthodes aboutissent à des résultats dont l'écart n'est pas significatif par rapport aux biais probables sur chacune d'entre elles. Cela conforte simultanément la méthode de Newman et la sécurité du traitement par analyse d'images.



Dose d'irrigation	TF		Tf	
	(1)	(2)	(1)	(2)
3,5			12,0	200
7,5	7,4	88	8,8	126
15	7,2	88	7,4	160
30	-2,4	-25	1,3	23

- (1) en mètre de fissure
 (2) les valeurs sont en pourcentage de l'état initial

Tableau 4 : Accroissement de la longueur de fissure après arrosage

	TF 7,5		Tf 7,5	
	Initial	24 h	Initial	24 h
Longueur totale en m	8,37	15,11	8,80	15,0
Longueur par classes de largeur : (cm)				
0-0.5 mm	2.92	8.82	2.80	8.9
0.5-1.0 "	1.75	4.42	1.9	3.02
1.0-1.5 "	1.20	1.26	1.3	1.35
1.5-2.0 "	0.95	0.50	0.9	1.1
2.0-2.5 "	0.67	0.10	0.5	0.5
2.5-3.0 "	0.28	0.01	0.2	0.09
3.0-3.5 "	0.03	0.01	0.05	0.01

Tableau 5 : Granulométrie des fissures :
 Variation après arrosage

La relation entre la variation de longueur de fissures et la pluviométrie est présentée à la Figure 5 et au Tableau 4. Le maximum est observé pour la dose la plus faible, c'est-à-dire 3,75 mm. L'apport 30 mm n'a pas entraîné d'accroissement de la fissuration.

On peut penser que pour des doses élevées, le gonflement aboutit à refermer partiellement, voire totalement des fissures, qu'elles soient préexistantes (formées lors du retrait) ou qu'elles soient apparues en cours d'humectation. Par ailleurs, même en prenant des précautions lors de l'apport d'eau, pour limiter l'effet de l'impact des gouttes, une certaine dégradation de la surface peut également contribuer à obturer des fissures, particulièrement pour les doses les plus fortes.

L'apport d'une dose de 3,7 mm sur un site Tf a par contre fortement augmenté l'état de fissuration initial (L_f a été multiplié par 3 dans ce cas). Ainsi, une faible précipitation semble suffire pour provoquer une fissuration relativement importante.

Par ailleurs, il est évident que la fonction $\Delta L_f = f(P)$ (P étant les précipitations) est nulle à l'origine. Au vu de ces résultats, on ne peut pas affirmer, cependant, l'existence d'un seuil P_0 , nécessaire pour déclencher une fissuration.

b) Evolution de la granulométrie des fissures

Elle a été calculée pour les deux sites qui ont subi une pluviométrie de 7,5 mm. Les résultats (cf. Tableau 5) montrent que les fissures de moins d'1 mm de largeur ont vu leur longueur s'accroître, contrairement aux fissures de plus de 1,5 mm. Et ceci indépendamment de l'état initial de compactage.

Cette variation de granulométrie peut s'interpréter de deux façons :

- d'une part les fissures nouvelles apparues après arrosage sont plus fines que celles formées au retrait,
- d'autre part, le gonflement a réduit l'épaisseur des fissures préexistantes.

La part relative de chacune de ces deux explications pourra être estimée par analyse d'image.

Photo n° 1

Site Tf

Etat initial

W = 8 %

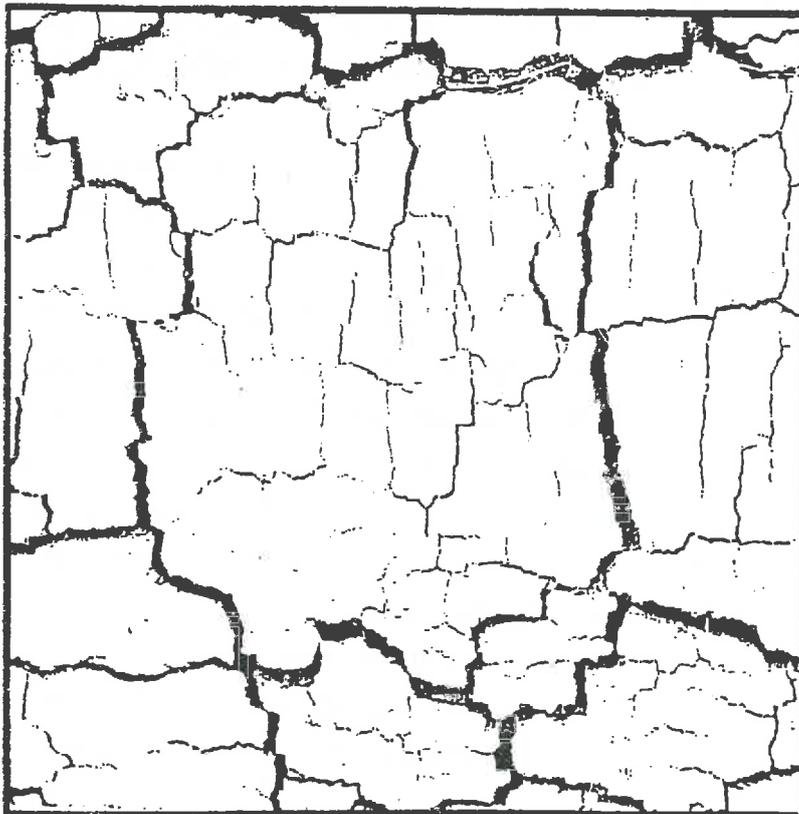
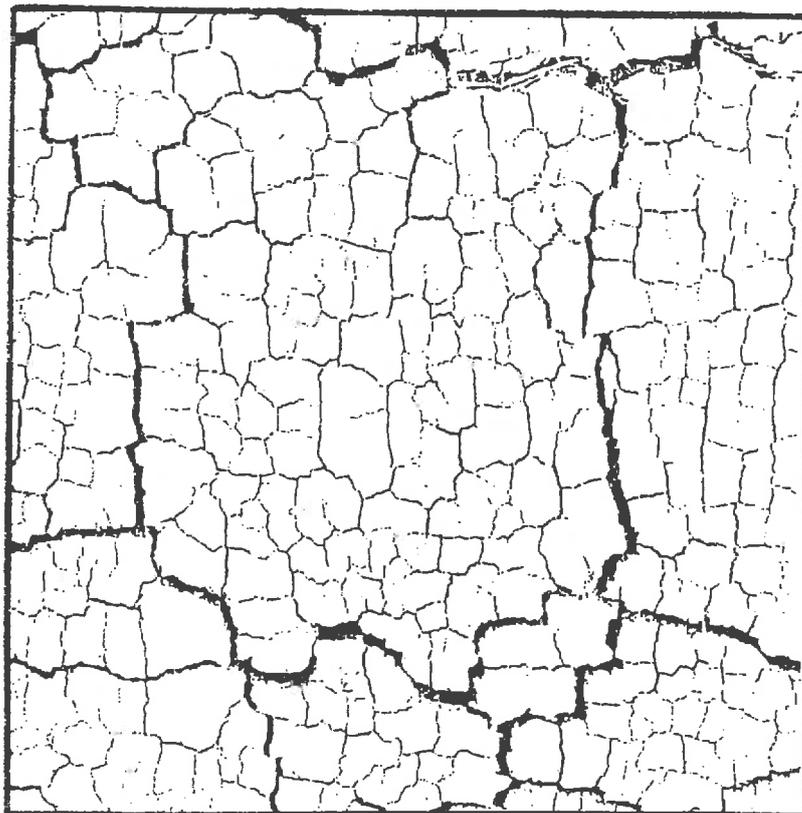


Photo n° 2

Site Tf

24 H après un apport
de 7,5 mm

W = 16%



III.5. Discussion

Nous avons constaté, en analysant les résultats de cette expérimentation qu'une fissuration était apparue sur des sites initialement secs, après précipitations.

Il est apparu que, d'une part la longueur totale s'était accrue et que d'autre part la proportion des fissures fines avait augmenté (cf. Photos n° 1 et 2).

Cependant, on ne peut conclure de façon formelle que la fissuration observée s'est produite en cours d'humectation dans la couche superficielle. En effet, si nous admettons que le débit d'aspersion Q est suffisant pour amener la surface des éléments structuraux à potentiel nul ($Q >$ Infiltrabilité des éléments structuraux continus), leur humidité lors de l'observation implique l'existence d'une phase de redistribution par diffusion et donc de décroissance de la teneur en eau. La fissuration peut être imputée à cet épisode de retrait et non au gonflement initial.

Deux explications peuvent être proposées :

- l'apport d'eau provoque le gonflement du sol. Après être passé par un maximum de teneur en eau, la surface du sol a commencé à se dessécher. C'est pendant cette phase de retrait que s'est produite la fissuration.

- L'apport d'eau à la surface du sol a provoqué, par l'établissement d'un gradient de potentiel élevé entre la couche réhumectée et la couche immédiatement inférieure encore sèche, une rupture des éléments structuraux continus. Du fait du gonflement simultané en surface, nous n'avons pu l'observer.

Cette dernière hypothèse implique qu'effectivement, la fissuration peut avoir lieu au gonflement. Nous n'avons cependant pas pu l'observer, n'étant pas placé dans les meilleures conditions. Cela nous conduit à penser qu'une expérimentation de ce type sur des mottes compactes aurait été sans doute plus démonstrative.

Remarquons que, si vis-à-vis du mécanisme de la fissuration, la chronologie précise du phénomène est primordiale, par rapport à ses conséquences in-situ et à sa description globale, elle est relativement secondaire. En effet, du point de vue de l'action extérieure, ce type de fissuration correspond bien à une fissuration à l'humectation dont fait partie la redistribution.

Cependant, il ne nous est actuellement pas possible de trancher sur l'une des deux explications possibles.

C'est pourquoi, nous avons essayé par une étude au laboratoire de mettre en évidence ce phénomène en maîtrisant mieux les différents paramètres.

CHAPITRE II : ETUDE AU LABORATOIRE

I. MATERIEL ET METHODES

I.1. Objectifs

L'expérimentation au champ n'ayant pas apporté de réponse claire quant à la fissuration au gonflement, nous avons pour objectifs au laboratoire :

- d'une part de mettre en évidence de façon incontestable, par l'absence de redistribution et d'évaporation, que la fissuration se produit à l'humectation,
- d'autre part de définir les conditions d'apparition de cette fissuration, à savoir l'humidité initiale du sol (teneur en eau et potentiel de l'eau) et les conditions d'humectation.

I.2. Préparation du "modèle" de sol à structure continue

La terre utilisée provenait du même sol des Vignères. Une certaine quantité de terre fine a été mélangée, par agitation, d'une durée de 4H dans un malaxeur, avec une certaine quantité d'eau dégazée représentant 1.9 fois son humidité équivalente (KHEYRABI-MONNIER, 1968).

Ce mode de préparation a permis d'obtenir une pâte visuellement homogène et saturée. Celle-ci, dans un moule cylindrique, a été ensuite mise à ressuyer. Pour cela, nous avons posé les cylindres de base sur de la terre fine et sèche, provenant du même sol, jusqu'à obtention de l'équilibre entre les deux parties ; l'équilibre se situe au niveau de la capacité de rétention. 30 jours étaient nécessaires à l'obtention de l'équilibre.

A l'issue de ce ressuyage, l'humidité était déterminée par pesée de deux fractions du volume total. La précision de cette estimation était importante car elle seule permettait de calculer le poids de solide du massif de sol. Ce dernier ne pouvant être détruit en fin d'humectation.

Le massif de sol (c'est ainsi que nous appellerons notre "modèle" de sol continu tout au long de ce mémoire) était ensuite porté à différentes valeurs de teneur en eau par dessiccation lente à l'air. Deux faces seulement étaient soumises à l'évaporation. Ces conditions de séchage permettaient d'éviter la

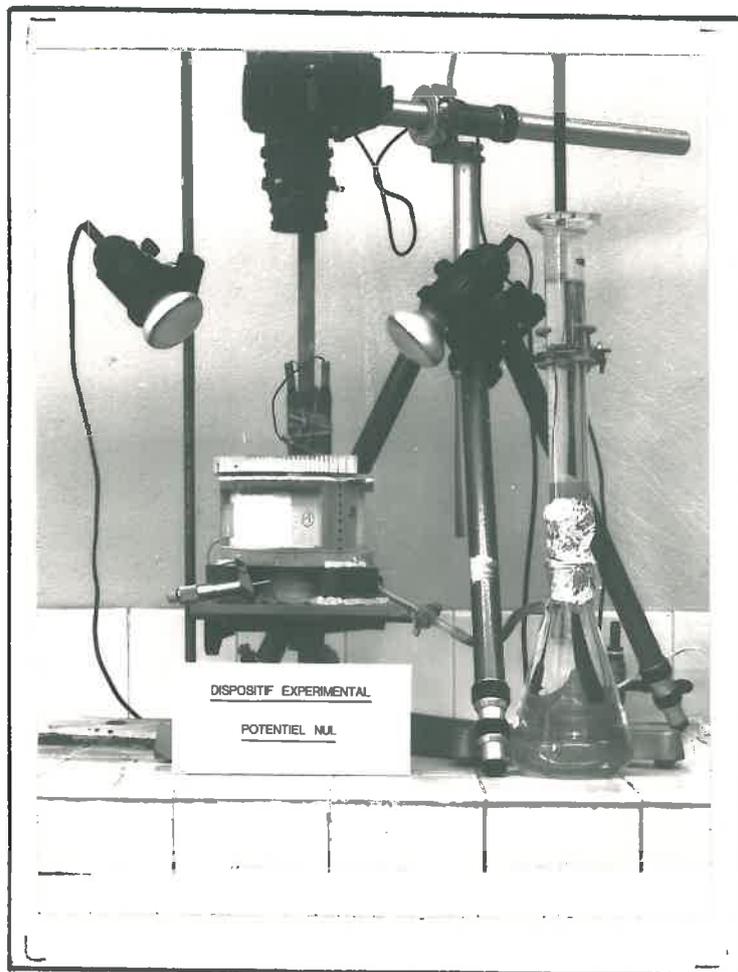
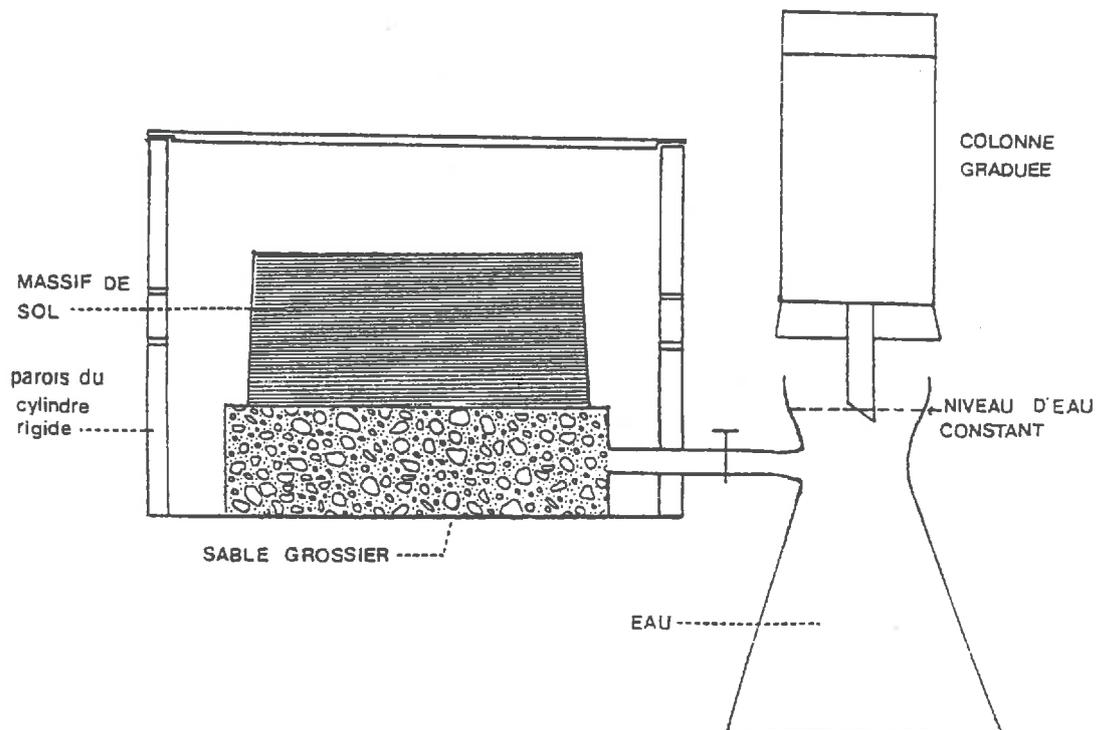


Photo n° 3



Shéma 1 Apport d'eau libre

fissuration à la dessiccation, en particulier dans la phase finale du dessèchement, qui se produit en cas de séchage tridimensionnel. De plus, le risque de différenciation de l'organisation entre la périphérie et l'intérieur du massif était réduit.

En suivant cette méthode, nous avons obtenu une gamme de massifs de sol continus, de différentes teneurs en eau, et de densité homogène.

La variation de la densité a été évaluée sur un massif. Onze fragments ont été prélevés, la densité de chacun d'eux a été déterminée par la mesure de la poussée d'Archimède dans du pétrole (MONNIER et al., 1973). La densité moyenne obtenue est de 1.96, avec un écart-type de 0,01, soit un coefficient de variation de 0,9 %.

L'inconvénient de cette méthode est que l'obtention de tels massifs demande cinq jours pour un massif à 20 % de teneur en eau et 20 jours pour un massif sec à l'air à partir de la fin du ressuyage.

I.3. Le dispositif de réhumectation

La simulation des conditions de terrain aurait dû nous conduire à choisir un apport d'eau par aspersion. En revanche, un tel dispositif ne permettait pas de maîtriser le potentiel et donc la vitesse d'infiltration de l'eau, compte-tenu des risques d'accumulation ou de ruissellement à la surface en particulier.

La recherche des conditions d'apparition de la fissuration conduisait donc plutôt à maîtriser le potentiel de l'eau apportée, le flux dans le sol argileux à conductivité très faible étant déterminé par les propriétés de transfert du sol, sauf pour des débits d'apports extrêmement réduits, difficiles à réaliser en pratique.

Deux dispositifs ont été bâtis, qui permettaient d'apporter de l'eau à différents potentiels :

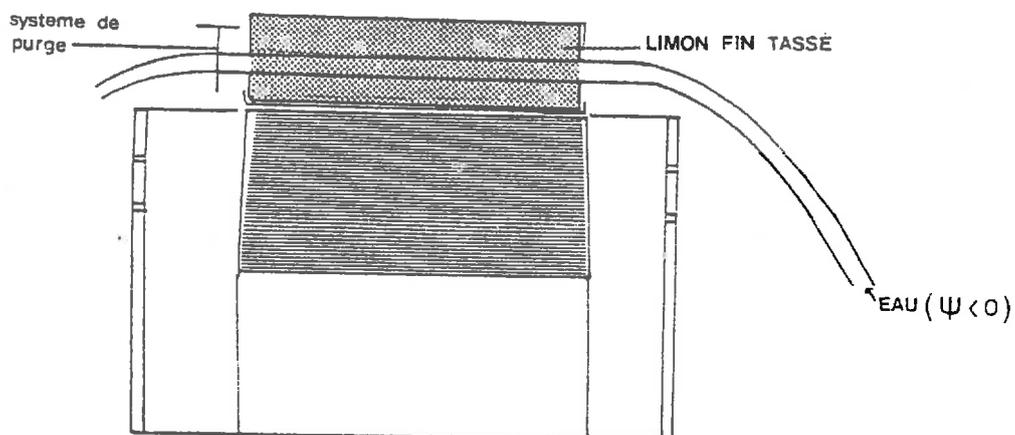
- Un apport d'eau libre à la base du massif,
- Un apport d'eau portée à un certain potentiel par le sommet du massif.

a) Le dispositif d'apport d'eau libre (cf. photo 3)

Le massif est posé sur une couche de sable grossier saturé en eau. Il est alimenté en eau par un vase de Mariotte qui maintient constant le niveau de l'eau libre (potentiel nul) à la base du massif en réhumectation. Compte-tenu de la conductivité du sable grossier utilisé, on peut donc considérer que les conditions d'apport d'eau sont le potentiel nul à la base du massif avec un débit déterminé uniquement par l'infiltrabilité dans le massif (Voir schéma 1).



Photo n°4



Schema 2 Apport d'eau à potentiel variable

Par rapport aux conditions de terrain, compte-tenu de l'infiltrabilité des différents massifs (cf. paragraphe II.2.), on peut considérer que même avec des pluies d'intensité faible (4 mm/h), on aboutit nécessairement à la surface des massifs continus, à la présence d'un film d'eau à très faible succion pendant la durée de la pluie.

Ce dispositif ne s'éloigne donc pas trop des conditions naturelles d'humectation, aux sens relatifs du gradient de succion et du gradient de potentiel gravitaire près (ce dernier est négligeable dans la phase initiale).

Le massif de sol, enfermé dans un cylindre rigide, était isolé des conditions extérieures. Nous voulions en effet supprimer le plus possible l'évaporation. L'étanchéité a été testée : pendant 48 heures, le dispositif n'a perdu que deux centimètres-cube d'eau. Pour éviter un écroulement des massifs réhumectés, ceux-ci ont été frettés par une bande de mousse qui n'empêche pas le gonflement.

b) L'apport d'eau soumise à un potentiel négatif

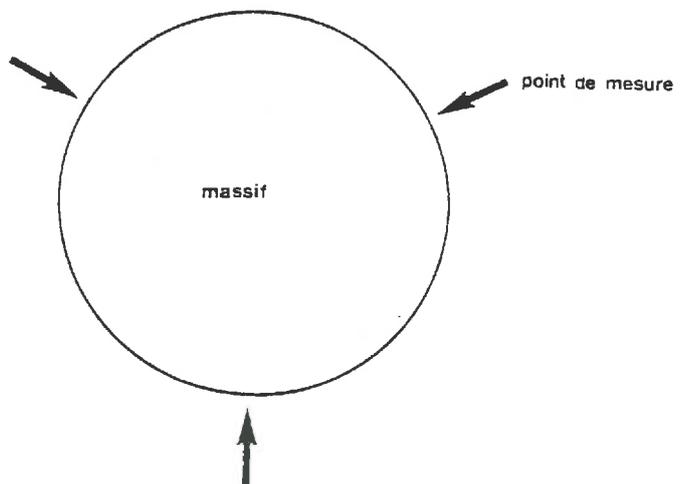
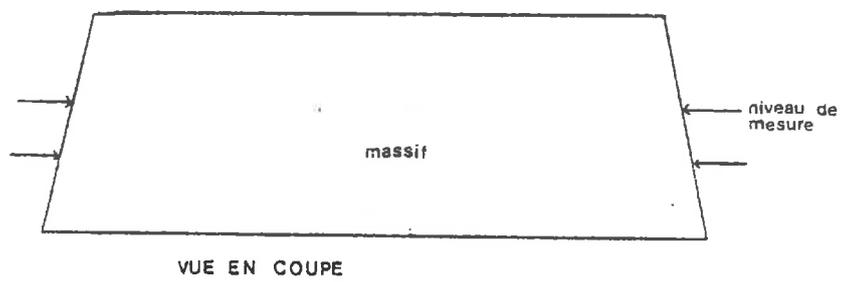
Un cylindre de PVC de 3 cm de hauteur et 10 cm de section est rempli de limon fin. Il est traversé par une bougie percée, reliée à un réservoir d'eau. Tassée, la couche de limon est saturée en permanence (cf. Schéma 1). Entre la couche de limon (ou tensiostat) et le réservoir, la hauteur est variable, de sorte que l'on peut faire varier le potentiel de l'eau (cf. photo 4). Le massif de sol est installé sous le cylindre de limon. La succion exercée assure l'écoulement de l'eau depuis le réservoir jusqu'au tensiostat. Ce dispositif isole, de la même façon, le massif des conditions extérieures.

I.4. Techniques de mesure du volume

a) Mesure de la hauteur

Le gonflement vertical est mesuré avec une jauge de profondeur (graduée en 1/10e de millimètre), sur huit points alignés sur un diamètre. Un mini-aspérimètre est posé sur le cylindre rigide qui englobe le massif et sert ainsi de référence fixe pour la mesure des variations de hauteur

La valeur du gonflement vertical dh est la moyenne des huit valeurs mesurées.



Schema 3 Mesures du gonflement horizontal

b) La mesure du diamètre

Compte-tenu du frettage, elle s'est effectuée sur seulement deux ou trois niveaux espacés d'un centimètre, sur trois génératrices du cylindre à 120° l'une de l'autre. Nous avons utilisé la même jauge de profondeur (cf. schéma 3).

Le gonflement latéral d est, à un temps donné, évalué par la moyenne de 6 à 8 valeurs.

c) Précision de l'évaluation

Pour faciliter nos calculs, nous avons supposé que nos massifs pouvaient être assimilés à des cônes. Cette hypothèse a été vérifiée sur un des massifs dont la taille le permettait .

Mais cette hypothèse n'a de validité que si le diamètre calculé ainsi est une évaluation du diamètre à la mi-hauteur du cône, initialement et pendant l'humectation.

Au cours du gonflement, les points de référence se décalent par rapport à la position fixe de la jauge. L'évaluation du diamètre peut accorder de ce fait plus d'importance à la base du massif.

Nous avons alors évalué l'erreur faite sur le calcul du volume .
A l'état initial, l'erreur varie de 2 à 6 %. Nous ne disposons pas, par la suite, d'informations suffisantes pour estimer l'erreur en cours d'humectation et à l'état final.

De toute façon, l'erreur estimée sur le calcul du volume initial montre que celle-ci est suffisamment importante pour que l'on puisse envisager une formulation différente d'un simple calcul de moyenne, pour le calcul du volume global.

Il se trouve, cependant, que le massif de sol se déforme latéralement au cours de l'humectation. En effet, la fissuration entraîne une déformation aléatoire. La circularité de la section ne peut alors plus être démontrée. Il est clair, également, que ne pouvant pas modéliser cette déformation, il nous est impossible d'estimer l'erreur que l'on fait alors sur l'estimation du gonflement.

Il devient alors évident qu'envisager un mode de calcul du volume qui corrige la côte du diamètre estimé sur le massif, alors qu'on ne sait pas quelle précision accorder à cette valeur, ne résoudrait en rien le problème de l'évaluation précise du volume (des différents massifs) en cours de réhumectation.

Nous sommes donc obligés d'admettre l'existence d'une erreur (qui peut être importante) sur l'évaluation du volume et de nous référer à la première hypothèse, pour des simplicités de calculs.

d) Mode de calcul du volume

* Volume initial

Il est calculé à partir des mesures de dimension du massif, au pied à coulisse (cette méthode n'est pas contestable puisque sur cinq répétitions, le coefficient de variation était de 0,11 %).

Nous avons fait sur chaque massif, neuf mesures du diamètre au sommet et à la base et neuf mesures de hauteur. Le diamètre estimé D_i est la moyenne des mesures.

Soit D_o le diamètre initial
 H_o la hauteur initiale

$$\text{On a } V_o = \frac{\Pi D_o^2}{4} \cdot H_o \quad (\text{cm}^3)$$

* Volume en cours d'humectation

On a, au temps i

$$V_i = \frac{\Pi D_i^2}{4} \cdot H_i$$

avec $D_i = D_o + ddi$ = estimation du diamètre au temps i

$H_i = H_o + dhi$ = estimation de la hauteur au temps i

ddi est le gonflement latéral :

$$ddi = \frac{1}{6} \sum dij \quad (\text{l'indice } j \text{ représente la position de la mesure sur le massif})$$

dhi est la mesure du gonflement vertical :

$$dhi = \frac{1}{8} \sum hij$$

I.5. Techniques de mesure de la teneur en eau

a) Teneur en eau initiale

La teneur en eau utilisée est la teneur en eau massique exprimée en % de la masse du sol sec à 105°C.

$$W_o = \frac{m_{L_o}}{m_s} \cdot 100 = \frac{MSH - m_s}{m_s} \cdot 100$$

m_L est la masse d'eau contenue dans le massif

m_s est la masse de sol sec à 105°C

MSH est la masse du sol humide.

b) Teneur en eau finale

En fin d'humectation, le massif est pesé. Nous connaissons ainsi la masse de sol humide finale :

$$W_f = \frac{MSH_f - m_s}{m_s} \cdot 100$$

et $Q_f = MSH_o - MSH_f =$ quantité absorbée pendant l'humectation.

c) Teneur en eau en cours d'humectation

La quantité d'eau absorbée au cours du temps est déterminée par une lecture sur la colonne graduée du vase de Mariotte (soit V_i). La lecture à 72 heures donne la quantité d'eau totale absorbée au cours de l'humectation, soit V_f . Il se trouve que V_f est supérieur dans tous les cas à Q_f . Il y a donc une perte d'eau. L'absence de fuites ayant été vérifiée, nous avons retenu l'hypothèse d'une perte d'eau par évaporation. Pour connaître l'humidité exacte du massif, il était nécessaire d'effectuer une correction. L'évaporation est surtout importante lors de l'ouverture du cylindre (mesures de volume) et lors de la prise de photographie (éclairage 200 W d'appoint). La fréquence des mesures étant plus élevée dans les premières 24 heures de l'humectation, il est logique de penser que les pertes sont plus importantes durant cette période.

Pour cette raison, nous n'avons pas retenu l'hypothèse d'une vitesse d'évaporation constante. Nous avons admis que la proportion d'eau évaporée par rapport à la quantité d'eau totale débitée était constante au cours du temps. Le nombre d'ouverture du dispositif pour les observations était grossièrement proportionnel à la vitesse d'absorption d'eau.

Aussi, nous avons corrigé de la manière suivante :

Soit la perte totale $E = V_f - Q_f$

$$\text{on a } e = \frac{V_f - Q_f}{V_f} \cdot 100$$

Par suite $Q_i = V_f (1 - e)$ est la quantité d'eau absorbée par le massif au temps i

$MSH_i = MSH_0 + Q_i$ est la masse de sol humide au temps i .

On a alors

$$W_i = \frac{MSH_i - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad \text{est la teneur en eau au temps } i.$$

I.6. Caractérisation de la morphologie de surface

A chaque mesure du volume, une photographie de la surface a été prise. Elle a permis de fixer la morphologie de la fissuration et de garder ainsi l'évolution chronologique du phénomène observé.

Les images obtenus ont été ensuite traitées avec l'analyseur d'images.

I.7. Méthodes d'analyses des résultats

I.7.1. Analyse du système de porosité

a) Principe

L'état physique du massif a été décrit par analyse de la porosité selon les techniques mises au point à la Station de Science du Sol d'Avignon (FIES, 1971 ; FAURE et al., 1973 ; MONNIER et al., 1973).

L'analyse requiert la mesure de la densité texturale ρ_d^t et de la densité du massif en place ρ_d correspondant à un même état d'hydratation (STENGEL, 1983).

La densité texturale a été évaluée à partir de la courbe de retrait des massifs.

b) La courbe de retrait

Elle a été établie en suivant les variations de volume et d'humidité des massifs continus en dessiccation.

Les points singuliers de la courbe : ordonnée à l'origine, limite de retrait et point d'entrée d'air, ont été déterminés visuellement. Les trois segments de la courbe de retrait ont ensuite été tracés manuellement (cf. Annexe 5).

Dans notre cas, l'utilisation des méthodes d'ajustements non linéaires aurait été illusoire. Compte-tenu du nombre et de la précision des résultats expérimentaux, nous n'aurions pas amélioré la précision par rapport au tracé manuel des courbes. On ne peut pas affirmer que nos massifs sont réellement des massifs texturaux. Il subsiste toujours un certain volume de vide inhérents au mode de remplissage du moule. Ainsi, la courbe de retrait n'indique pas la valeur de la densité texturale, mais en fait la valeur de la densité des massifs n'ayant pas fissuré. Ceci ne présentait toutefois pas d'inconvénients pour évaluer la porosité fissurale. Nous appellerons ρ_d^t la valeur de la densité indiquée par la courbe de retrait pour chaque humidité.

Afin d'utiliser cette valeur de densité pour le calcul de la porosité au gonflement, nous avons admis que l'effet d'hystérésis était négligeable. De nombreux auteurs sont d'ailleurs d'accord sur ce sujet, pour ce qui concerne la couche de surface des sols cultivés (YONG et WARKENTIN, 1975 ; STENGEL, 1979).

c) La densité apparente des massifs

Elle est calculée à partir des mesures de volume du massif décrites précédemment et de la masse de sol sec estimée en début de ressuyage.

$$\rho_d = \frac{m_s}{V_T} \quad \text{g/cm}^3$$

V_T est le volume total en cm^3

m_s est la masse de sol sec en g.

d) Humidité du massif

Elle est déterminée au cours du temps à partir de la mesure de la quantité d'eau débitée par le réservoir.

Cependant, au cours de l'humectation (avant l'équilibre), il est clair qu'il existe un gradient d'humidité. D'autre part, à l'équilibre, il existe également un gradient de potentiel gravitaire. La teneur en eau n'est donc pas homogène pendant et à la fin de l'humectation.

Pour pouvoir effectuer une analyse de la porosité, nous avons cherché à déterminer le gradient d'humidité.

Celui-ci a été caractérisé pour un massif d'humidité initiale de 6 %. Nous avons en effet établi une relation entre la teneur en eau finale et le potentiel de l'eau (voir méthode en annexe 6.). Sur un échantillon remanié desséché initialement à 6 %, puis réhumecté, l'état d'équilibre est caractérisé par un gradient de teneur en eau de 28 à 33 % entre le sommet et la base du massif, ceci à cause du potentiel gravitaire.

Pour des raisons pratiques, il n'a pas été possible de le faire pour les différentes humidités initiales de nos massifs. En revanche, les cinétiques d'humectation (cf. paragraphe II.2.) des massifs situés au départ sous la limite de retrait aboutissent toute à un palier après 25 heures d'humectation. On peut donc penser que l'équilibre est atteint.

La relation potentiel-teneur en eau, en humectation, est dépendante de l'état de dessiccation initiale (TESSIER, 1980) au moins lors de la première dessiccation d'un matériau dispersé.

Cependant, en supposant que le domaine de validité de la relation potentiel-teneur en eau puisse être étendue à tous les échantillons dont l'humidité initiale est inférieure à la limite de retrait, nous avons calculé les composantes fissurales et "texturales" de la porosité, en tenant compte du gradient d'humidité, pour les massifs situés sous la limite de retrait.

Dans le cas des massifs situés au départ au-dessus de la limite de retrait, les cinétiques d'humectation ne permettent pas d'étendre le domaine de validité de cette relation au-delà de ce point. Pour ces massifs, nous ne pouvons qu'admettre l'existence d'un gradient sans pouvoir le caractériser.

De même, au cours de l'humectation, il ne nous a pas été possible de déterminer le gradient.

Dans ce cas, nous avons supposé que l'humidité globale était représentative du gonflement textural moyen du massif et effectué l'analyse de la porosité sur cette base.

e) Calculs

* Densité texturale ρ_d^t

$$1/\rho_d^t = 0,0096 W + 0,393 \quad \text{si } W > 17,5 \%$$

$$1/\rho_d^t = 0,008 W + 0,431 \quad \text{si } 11 < W < 17,5 \%$$

$$1/\rho_d^t = 0,522 \quad \text{si } W < 11 \%$$

* Porosité structurale en %

$$n^s = 100 \left(1 - \frac{\rho_d^t}{\rho_d} \right)$$

I.7.2. Analyse d'images

La méthode est présentée au **Chapitre I**, paragraphe **II.3.3**.

I.8. Les limites de la méthode

Un des points les plus criticables du protocole concerne la durée de la réhumectation. Pour des raisons pratiques, elle a été fixée à 72 heures. Il aurait été plus rigoureux d'attendre que tous les massifs aient atteint l'équilibre pour arrêter l'humectation. Mais la vitesse d'absorption des massifs saturés et proches de la saturation était telle que cela aurait demandé une durée qui n'était pas compatible avec un stage de six mois.

Une durée de 72 heures a permis aux massifs les plus secs d'atteindre l'équilibre (cf. paragraphe **II.2**).

L'observation de la porosité fissurale est très localisée puisque la photographie ne concerne que la surface. Nous n'avons aucune information sur la fissuration interne hormis l'analyse des systèmes de porosité. Mais nous avons vu que d'une part les incertitudes sur l'estimation du volume sont assez élevées et que d'autre part, on ne pouvait connaître l'humidité du volume textural au cours du temps.

TABLEAU 6
EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES MASSIFS

Humidité initiale W_i	4.0	5.6	7.1	10.5	12.5	14.3	15.3	17.7	20.7
Potentiel initial U_i (vms)	900	660	470	220	140	96	78	54	24
Teneur en eau volumique θ	7.72	10.58	13.63	20.16	23.25	25.74	27.08	31.51	34.73
densité sèche ρ_d	1.93	1.89	1.92	1.92	1.86	1.80	1.77	1.78	1.68
Taux de saturation S	0.27	0.35	0.48	0.70	0.75	0.77	0.92	0.93	0.93
Humidité finale W_f	36.4	33.7	33.0	34.0	30.1	30.7	23.8	25.0	25.6
Taux de saturation θ	45.5	47.2	44.2	45.6	43.0	41.4	37.4	40.5	40.4
ρ_d	1.25	1.19	1.34	1.34	1.43	1.35	1.57	1.62	1.58
Gonflement G	2.03	2.35	1.68	1.68	1.34	1.63	0.87	0.74	0.83

$$\theta = w \cdot \rho_d / S = \frac{\theta}{mT} \times 100 \quad (mT \text{ est la porosité totale})$$

$$G \text{ est le gonflement par rapport au volume de sol sec} \quad G = \frac{e^T - e_d}{e_d}$$

$$(e^T = \text{indice des vides totale} \quad e_d = \text{indice des vides à l'état sec})$$

Un des moyens d'observations de la fissuration interne consiste à imprégner le massif réhumecté de résine polyester et d'effectuer par la suite des coupes à différents niveaux. Les photographies prises peuvent être ensuite analysées par l'analyseur d'images.

Cette méthode a l'inconvénient d'être très longue et nous n'avons pu l'envisager pour ce mémoire.

D'autre part, il est bien évident que les résultats obtenus sur l'analyseur d'images ne sont valables que pour ces massifs et dans nos conditions expérimentales. Les valeurs de la porosité fissurale, en particulier, sont influencées par la présence ou l'absence d'un frettage. De plus, entre la prise de vue par l'appareil photographique et l'acquisition de l'image par la caméra vidéo, il y a trois traitements différents dont on n'est pas sûr qu'ils n'effectuent pas déjà un seuillage.

Cependant, la prise de vues, le traitement chimique des photos et l'acquisition de l'image par la caméra vidéo étant standardisés le plus possible, on peut penser que le biais introduit ne varie pas beaucoup entre les photos, bien que l'on ne puisse maîtriser tous les paramètres.

II- RESULTATS ET DISCUSSION

A/ Humectation par de l'eau libre

II.1. Influence de l'humidité initiale sur la fissuration

Neuf massifs de sol ont été réhumectés dans les conditions définies au paragraphe précédent. Leur teneur en eau couvrait les trois domaines de la courbe de retrait. Leurs caractéristiques initiales sont indiquées dans le Tableau 6.

Tous les massifs ont gonflé comme en témoignent les variations de densité. Cet aspect sera abordé dans une deuxième partie.

a) Observation visuelle

L'observation visuelle de la surface (voir photos n° 5 à 10, page suivante) montre que la fissuration ne s'est produite que pour des massifs d'humidité initiale inférieure à 15 %. En revanche, nous avons observé des petites fissures à la base du massif n° 8 ($W_i = 15,3 \%$), donc non décelables en surface. Pour les deux massifs d'humidité initiale 17,7 et 20,7 %, aucune fissuration n'est apparue.

Ainsi, la fissuration ne s'est produite que pour les massifs initialement désaturés. Le point d'entrée d'air semble donc constituer un seuil à partir duquel il y a rupture des massifs lors d'une réhumectation par de l'eau libre.

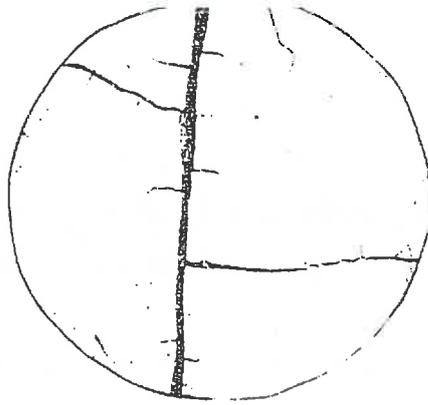


PHOTO N° 6

Wi = 14.3 %

PHOTO N° 5

Wi = 14.3 %

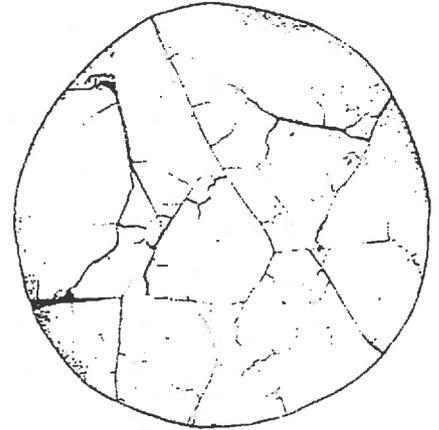
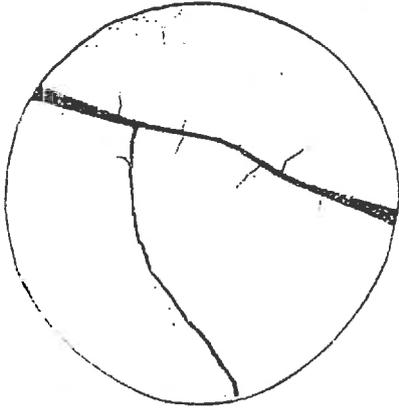


PHOTO N° 7

Wi = 10.5 %

PHOTO N° 8

Wi = 7.14 %



PHOTO N° 10

Wi = 4.0 %

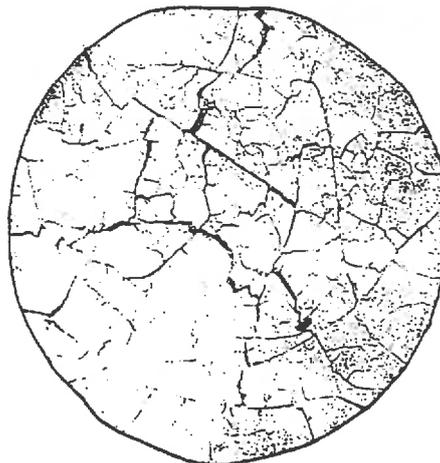
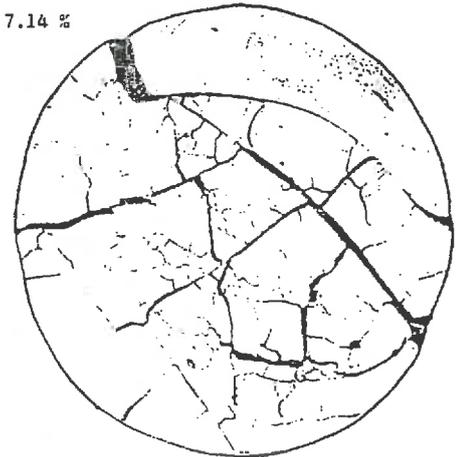


PHOTO N° 9

Wi = 5.6 %

Figure 6 :
Influence de l'humidité initiale sur la porosité fissurale
présente à la surface du massif

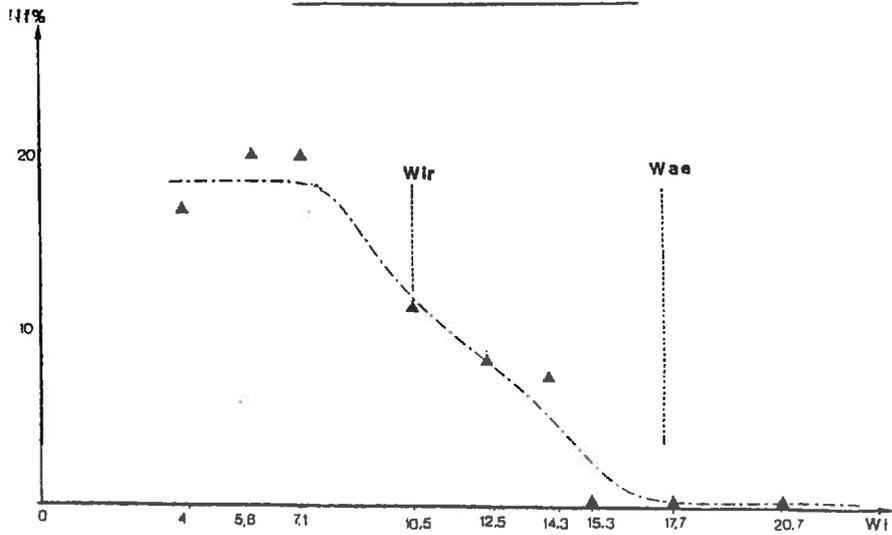
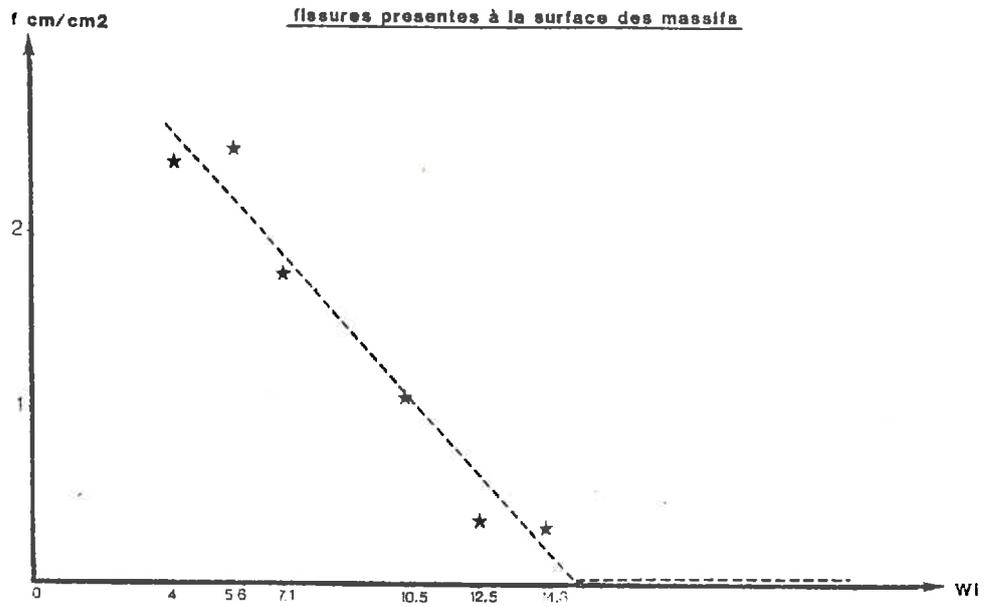


Figure 7 :
Influence de l'humidité initiale sur la longueur totale de
fissures présentes à la surface des massifs



L'observation visuelle montre également que la fragmentation s'intensifie, au fur et à mesure que le niveau initial de dessiccation croît, au moins jusqu'à la limite de retrait, à partir de laquelle les variations sont difficilement décelables.

De part et d'autre de la limite de retrait, le changement morphologique est très net. Avant la limite de retrait, le massif est divisé en 3 ou 4 morceaux par des fissures relativement larges (2,5 à 4 mm) (Photos n° 5 et 6). Après la limite de retrait, la fissuration est apparue plus rapidement. Quelques fissures ont d'abord séparé le massif en quelques fragments (moins de 10), puis la fissuration s'est intensifiée par l'apparition de très nombreuses fissures fines.

On peut assimiler ce comportement fissural à l'acquisition d'un réseau secondaire de fissures de faible largeur (moins de 0,5 mm de large) qui divise plus finement le massif.

Nous avons tenté de quantifier ces variations en mesurant par analyse d'images, sur les photographies qui précèdent, la porosité fissurale, la longueur totale des fissures et leur granulométrie (Distribution des longueurs par classes de largeurs). La description des critères utilisés et le protocole opératoire sont présentés en annexe.

b) Porosité fissurale

Les résultats obtenus sur l'analyseur d'images montrent un accroissement de la porosité fissurale avec la valeur absolue du potentiel initial de l'eau du massif (cf. fig. 6). La porosité fissurale sera notée n_F .

Elle est nulle pour les trois massifs les plus humides initialement. Elle s'accroît ensuite régulièrement dans le domaine du retrait résiduel. Elle semble marquer un palier après la limite de retrait, mais compte-tenu du faible nombre de points dans ce domaine, nous ne pouvons être très affirmatif.

c) Longueur de fissures

La longueur totale des fissures présentes à la surface du massif apporte une indication sur la finesse de la fragmentation. On peut, en effet, considérer raisonnablement, que plus la longueur des fissures est importante, plus le nombre d'éléments structuraux est élevé.

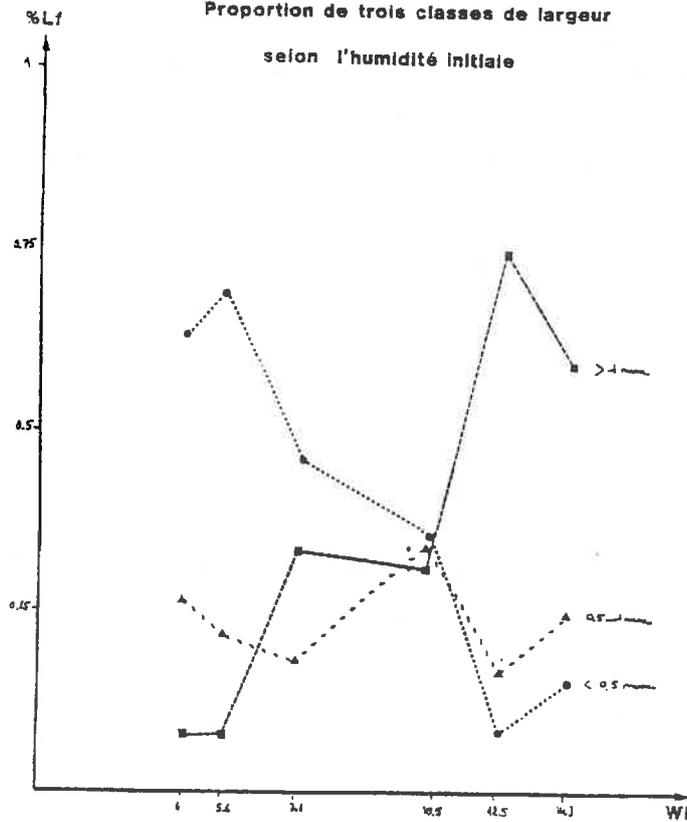
La courbe de la longueur totale des fissures en fonction de l'humidité initiale (cf. fig. 7), démontre bien ce que l'on avait pressenti par une observation visuelle, à savoir que la finesse de la fragmentation augmente avec le niveau initial du desséchement.

W_i	4	5.6	7.1	10.5	12.5	14.3
Porosité fissurale n_f	17	20.0	19.7	11.0	8.2	7.2
Longueur totale LT (en cm)	198.2	245.2	138	84.12	30.7	27.8
Surface (cm ²)	83.86	98.2	77.28	77.11	84.9	86.17
Longueur en cm/cm ²	2.42	2.49	1.78	1.09	0.36	0.32
Longueur par classe : (en cm)						
0-0.5 mm	1.54	1.72	0.82	0.39	0.03	0.05
0.5-1.0	0.63	0.56	0.33	0.37	0.06	0.08
1.0-1.5	0.14	0.15	0.27	0.22	0.08	0.05
1.5-2.0	0.04	0.05	0.18	0.07	0.04	0.05
2.5-3.0	0.01	0.01	0.10	0.03	0.01	0.03
3.0-3.5			0.03	0.01	0.01	0.02
3.5-4.0			0.03	0.01	0.03	0.02
4.0-4.5					0.05	0.01
4.5-5.0					0.05	
L 0-0.5 /LT	0.63	0.69	0.46	0.36	0.08	0.16
L 0.5-1.0 /LT	0.26	0.22	0.18	0.34	0.17	0.25
L 1.0-1.5 /LT	0.06	0.06	0.15	0.20	0.22	0.16
L 1.0-5.0 /LT	0.08	0.08	0.34	0.31	0.75	0.59

Tableau 7 : Granulométrie des massifs en fin d'humectation

Figure 8 :

Proportion de trois classes de largeur
selon l'humidité initiale



L'allure de la courbe $L_F = f(W_i)$ diffère de celle de la courbe $n_F = f(W_i)$. Elle ne confirme pas l'existence d'un palier d'intensité de la fissuration pour $W_i < W_{LR}$. De fait, nous disposons de peu d'arguments pour admettre l'existence d'un tel palier, nous en avons peu également pour rejeter cette hypothèse. Il est clair qu'il nous manque des informations sur le comportement fissural des massifs de sols pour des humidités initiales inférieures à 4 %. La réhumectation de tels massifs donnerait confirmation ou non à l'existence d'un palier.

On peut admettre cependant que la porosité est plus affectée par le frettage que la longueur totale des fissures qui, si elles sont fines, interviennent peu sur le gonflement latéral. L'ébauche d'un palier de porosité tient peut être à la présence d'un frettage.

De toute façon, l'existence ou non d'un palier d'intensité de la fissuration ne représente pas à ce stade d'analyse du phénomène une nécessité théorique. Nous avons constaté, et ceci est important, que l'affinement de la structure augmente quand l'humidité initiale décroît. La longueur de fissures est bien corrélée avec l'humidité de départ ($r = -0,98^{**}$). On peut surtout remarquer sur cette courbe la rupture de pente brutale entre les massifs non fissurés et ceux qui ont fissuré. La fissuration à l'humectation ne s'est produite que dans un intervalle nettement borné de teneur en eau, et schématiquement, on peut caractériser son allure en disant que la fissuration fine se produit dans le domaine du non retrait.

d) Granulométrie des fissures

Pour chaque massif, les fissures ont été classées selon leur largeur. Neuf classes ont été constituées. Elles s'étagent de moins de 0,5 mm de largeur à plus de 5 mm (cf. Tableau 7).

L'écart entre les différents massifs se situe essentiellement sur les fissures les plus fines (classe de largeur de moins de 0,5 mm). Elles représentent 46 à 70 % de la longueur totale pour les humidités inférieures à W_{LR} , 8 à 16 % pour celles supérieures à W_{LR} et 36 % pour le massif situé à la limite de retrait.

Elles apparaissent donc surtout aux faibles humidités initiales. On observe, par ailleurs, une stabilité de la classe 1 mm. La proportion est à peu près équivalente pour tous les massifs. En revanche, on note une diminution de la proportion des fissures de plus d'un mm de largeur quand l'humidité initiale décroît (cf. figure 8).

Ces résultats font ainsi apparaître une intensification de la fragmentation avec la succion matricielle initiale. La fissuration fine se fait certainement en partie en réduisant le volume des fissures larges.

Figure 10 : Evolution de la longueur des fissures
au cours de l'humectation

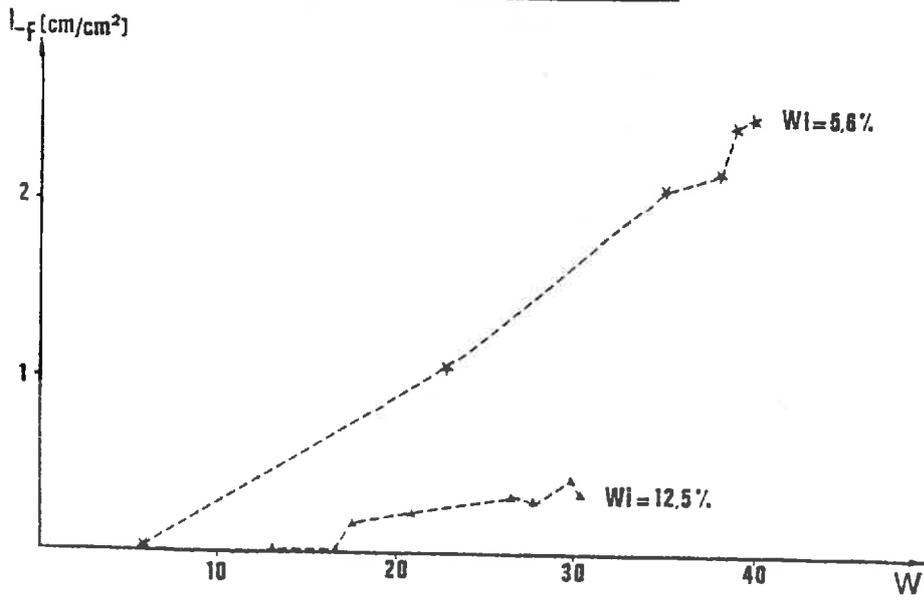
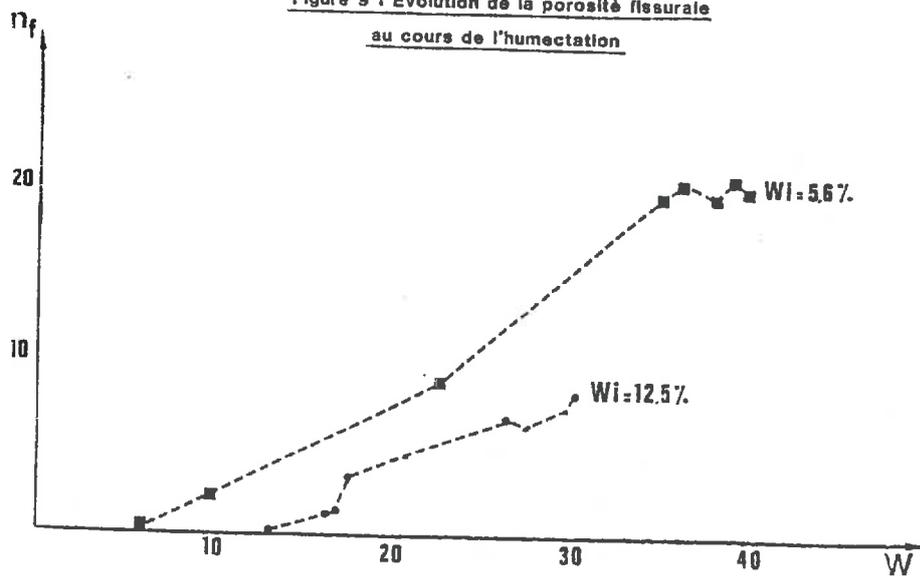


Figure 9 : Evolution de la porosité fissurale
au cours de l'humectation



e) Variation de la porosité fissurale en cours d'humectation

Nous avons besoin pour discuter de la dynamique de la fissuration, des résultats de l'étude de la cinétique d'humectation. Les deux points sont en effet étroitement liés. Nous avons néanmoins choisi de discuter d'abord de la dynamique fissurale en présentant rapidement les conclusions nécessaires à la compréhension du paragraphe.

La cinétique d'humectation sera traitée au paragraphe II.2.. Celle-ci a montré que tous les massifs ont subi un gonflement. La vitesse d'humectation a été très différente entre les massifs du domaine de retrait résiduel et ceux du domaine du non-retrait (cf. figure 12). L'état assimilable à l'équilibre n'a été atteint que pour ces derniers.

Pour deux massifs situés, l'un dans le domaine du retrait résiduel ($W_i = 12,5 \%$) et l'autre après la limite de retrait ($W_i = 5,6 \%$), nous avons déterminé la variation de la porosité fissurale et de la longueur des fissures au cours de la réhumectation.

On observe (figure 9) que l'accroissement de la porosité fissurale du massif de $W_i = 5,6 \%$, est régulier jusqu'à une humidité de 35 %, à partir de laquelle elle marque un palier.

La porosité du massif $W_i = 12,5 \%$ croît, elle aussi, de façon régulière bien que moins fortement. Par contre, nous n'observons pas de palier. Il semble que cela soit dû au fait que ce massif n'a pas atteint l'équilibre. Si l'on avait prolongé la réhumectation jusqu'à obtention de l'équilibre, nous aurions peut être abouti à un palier de porosité fissurale. Mais compte-tenu des écarts de porosité entre les deux massifs, aux mêmes humidités, il est vraisemblable que le palier se serait situé à un niveau inférieur.

L'effet de l'humidité initiale, décrit au paragraphe précédent, ne semble donc pas pouvoir être attribué uniquement à la différence des humidités finales.

f) Evolution de la longueur des fissures au cours de l'humectation

Sous un angle comparatif, l'observation des courbes d'évolution des longueurs de fissures pour ces deux massifs conduit aux mêmes hypothèses que précédemment.

On note cependant que si la porosité fissurale du massif à $W_i = 5,6 \%$ marque un palier, il n'en est pas de même de la longueur des fissures qui continue de croître (cf. figure 10).

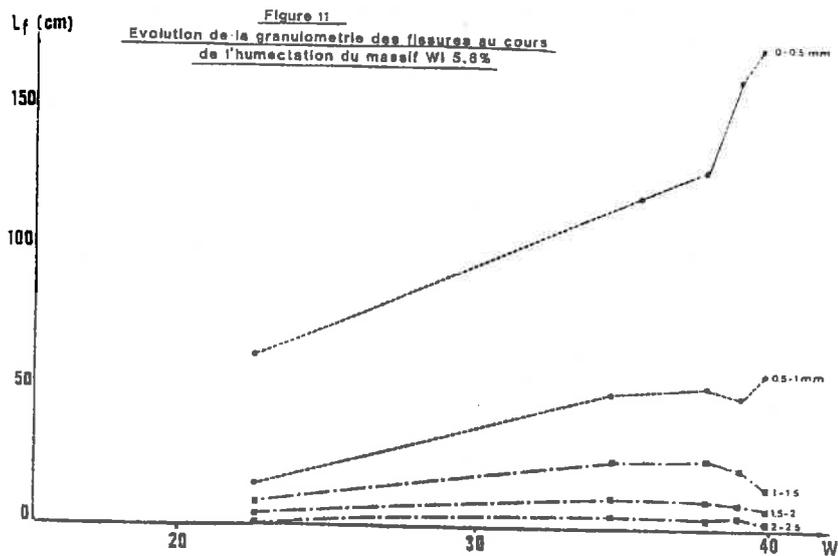
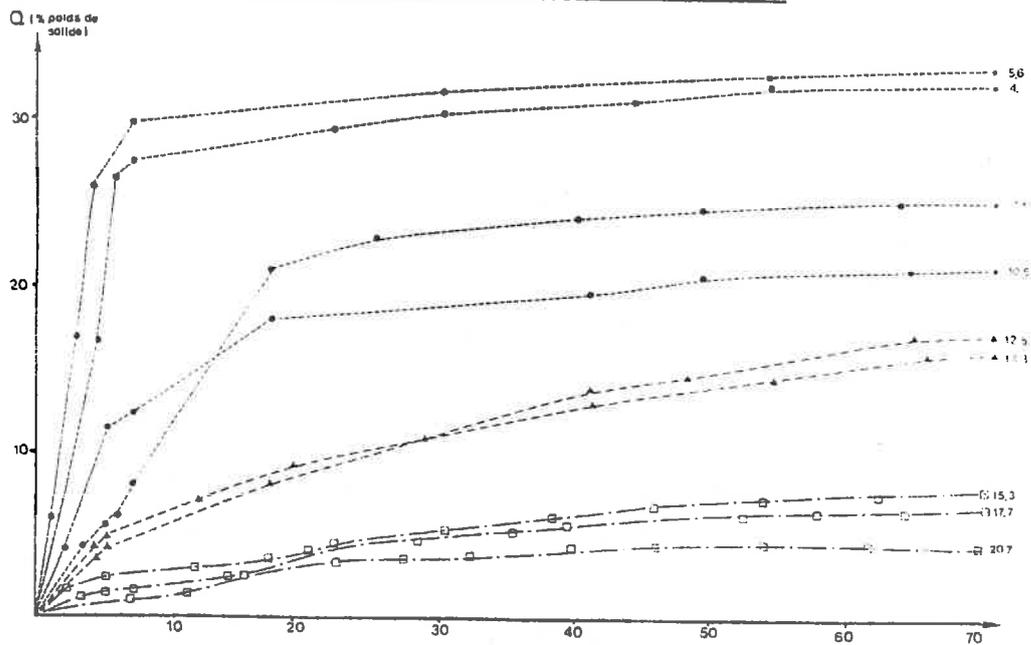


Figure 12 : Quantité d'eau absorbée au cours du temps



Cela prouve qu'aux humidités très élevées et supérieures à la valeur d'équilibre de potentiel sur les massifs continus (ou texturaux), le gonflement n'est pas terminé à l'échelle texturale. Donc l'humidité dans la porosité texturale est encore inférieure à la valeur d'équilibre, une partie de l'eau étant nécessairement contenue dans les fissures. D'autre part, comme dans le cas des variations de la porosité, l'allure des courbes rend peu probable l'hypothèse où l'écart entre les valeurs de L_F pour différentes humidités initiales serait dû seulement aux écarts d'humidité finale. Ces écarts d'humidités finales W_F évalués globalement sur le massif, surestiment par ailleurs les écarts de gonflement à l'échelle texturale. En effet, la proportion d'eau contenue dans les fissures est nécessairement plus faible dans les massifs les moins fissurés. De ce fait, pour une même teneur en eau contenue dans les pores texturaux, leur humidité W_F est inférieure.

g) Evolution de la granulométrie des fissures

La comparaison des variations de la porosité texturale et de la longueur des fissures du massif à $W_i = 5,6$, nous a fait émettre l'hypothèse que le gonflement à l'échelle texturale n'était pas terminé aux humidités élevées, tout au moins dans la couche supérieure. Ceci implique que le gonflement persistant, il se crée des nouvelles fissures fines, au dépens des fissures plus larges qui se referment alors.

Cette hypothèse est confirmée par la courbe d'évolution de la granulométrie des fissures (cf. figure 11). On observe en effet que la classe des fissures de moins de 0,5 mm de large s'accroît fortement après 35 % de teneur en eau alors que les classes de plus d'un mm décroissent.

II.2. Etude des cinétiques d'humectation

Le gonflement des massifs a été calculé par rapport au volume sec ($W = 0 \%$). Il est présenté au tableau 6. On constate que tous les massifs ont gonflé, bien que différemment suivant leur humidité initiale. Le gonflement était d'autant plus élevé que l'humidité initiale était faible. La figure 12 indique l'évolution de la quantité d'eau absorbée au cours de l'humectation pour les différents massifs. On distingue trois allures de courbes :

Figure 13 Evolution de la teneur en eau au cours de l'humectation

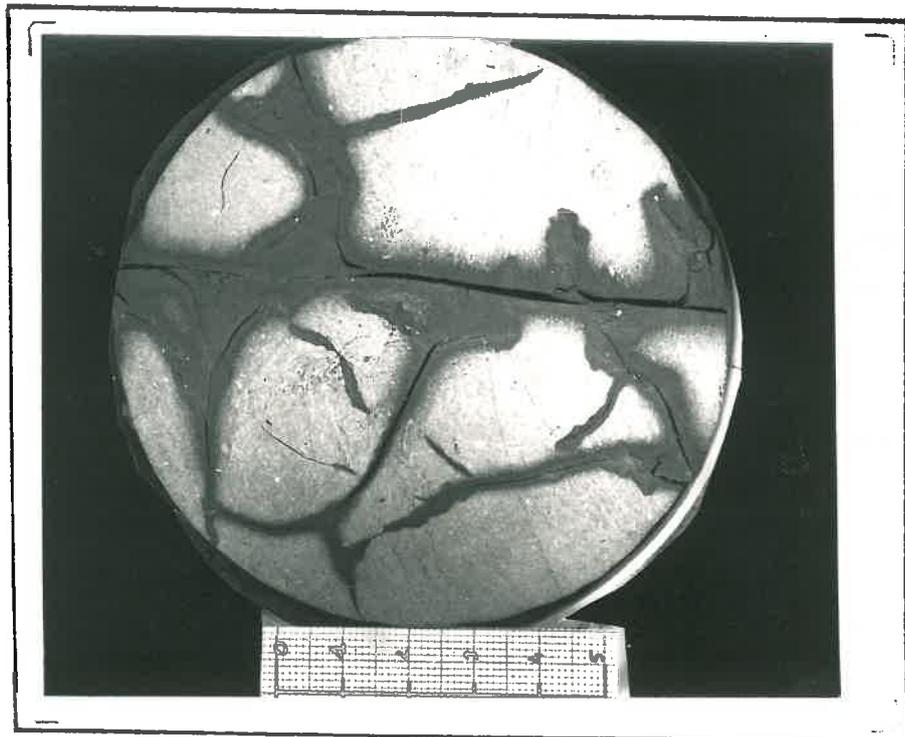
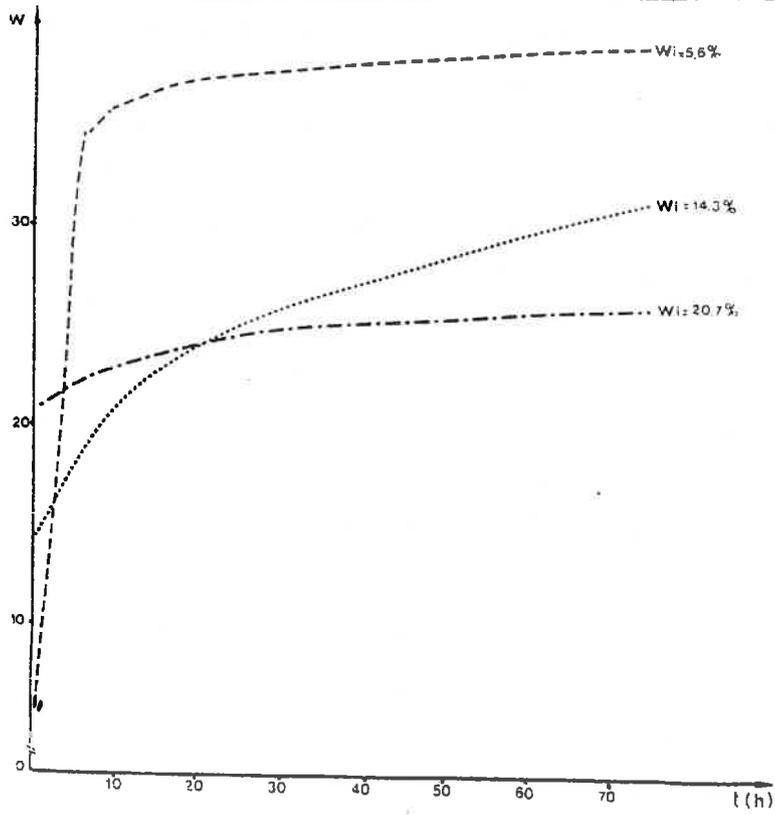
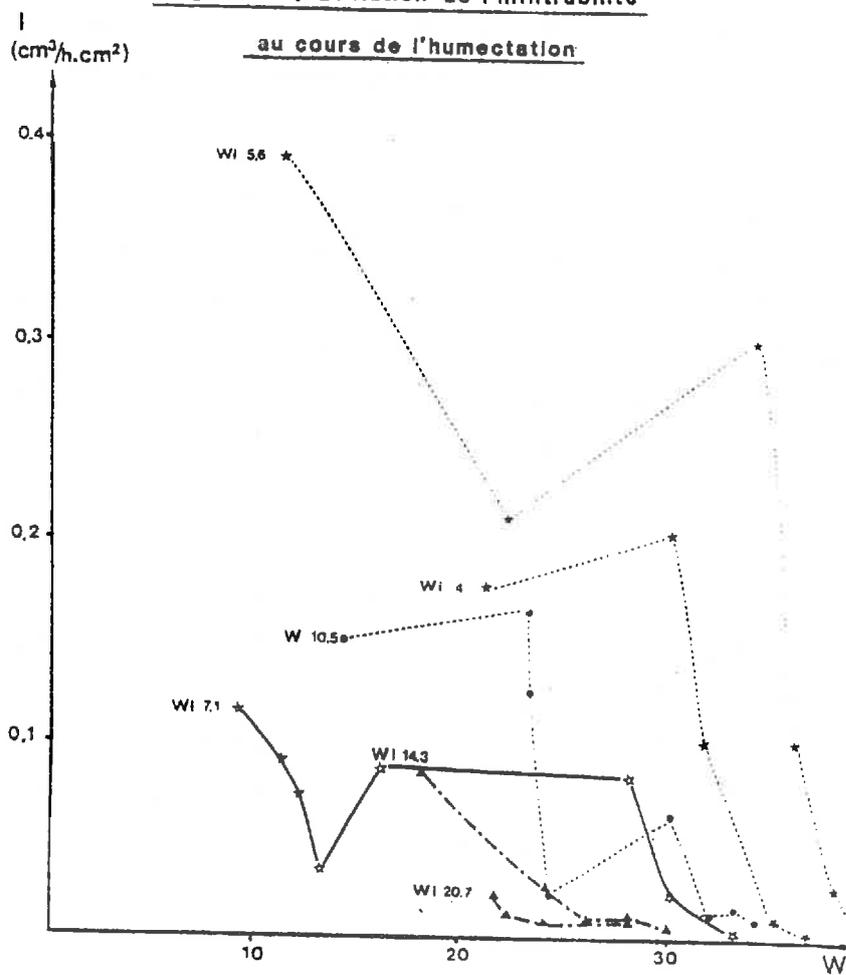


Photo n° 11

**Figure 14 : Evolution de l'infiltrabilité
au cours de l'humectation**



Humidité initiale (%)	20.7	17.7	15.3	14.3	12.5	10.5	7.1	5.6	4.0
Humidité finale (%)	25.6	25.0	23.8	30.7	30.1	34.0	33.0	39.7	36.4
ρ_d^t	1.57	1.58	1.61	1.45	1.47	1.39	1.41	1.29	1.35
ρ_d	1.59	1.62	1.57	1.36	1.43	1.34	1.34	1.19	1.25
n^s	0	0	2.30	7.03	2.9	3.9	5.2	8.0	7.2

Tableau 8 : Analyse de la porosité (effectuée avec la teneur en eau moyenne)

- Une humectation relativement faible, très régulière pour les massifs initialement saturés et celui de W_i 15,3. Ces massifs n'ont pas fissuré.
- Une vitesse d'humectation supérieure pour les massifs du domaine de retrait résiduel. La vitesse est croissante au cours du temps.
- Une réhumectation très rapide durant les premières heures puis l'installation d'un palier après 25 heures pour tous les massifs situés sous la limite de retrait avant réhumectation.

On observe donc un comportement hydrique différent suivant le potentiel initial des massifs. La relation $W = f(t)$ établie à partir de nos mesures, est présentée à la figure 13. Pour des raisons de clarté, il n'a été représenté qu'un massif pour chaque domaine de la courbe de retrait. Cette relation corrobore les observations précédentes. Les massifs les plus secs atteignent des humidités plus élevées et plus rapidement que les massifs humides. Ceci est à mettre en relation avec la porosité observée. On constate en effet que la vitesse d'humectation est d'autant forte que les massifs ont fissuré finement.

La formation de fissures est donc un facteur déterminant dans l'évolution de la conductivité hydraulique des massifs. Les pressions de gonflement provoquant la rupture des massifs, des pores fortement conducteurs apparaissent et conduisent l'eau à la surface du massif. La photo n° 11 est particulièrement démonstrative à ce sujet. On est conduit à penser que pendant cette première phase d'humectation, des gradients de potentiel élevés apparaissent tout au long des fissures humectées provoquant alors une division de plus en plus fine du massif.

Ceci peut expliquer l'évolution de l'infiltrabilité au cours de l'humectation (figure 14). En effet, alors qu'on pouvait s'attendre à ce que celle-ci soit maximale en début d'humectation pour décroître ensuite jusqu'à l'équilibre, nous avons observé un palier d'infiltrabilité pour les massifs de $W_i < W_{LR}$, de valeur d'autant plus élevée que le massif était sec, puis une décroissance très brutale à partir d'une humidité variable entre les différents massifs.

On peut relier la présence de palier à la formation des fissures. Ces dernières conduisant l'eau dans toutes les parties sèches du massif contribuent à maintenir le flux. Ce dernier tend ensuite rapidement vers zéro quand tout le massif est réhumecté.

L'évolution de l'infiltrabilité dans les premières phases d'humectation n'est connue que pour le massif de $W_i = 7,14$ %. L'infiltrabilité élevée au début de l'apport d'eau décroît assez rapidement, pour remonter ensuite brusquement et atteindre le palier. Cet accroissement brutal correspond à la formation des premières fissures. Ainsi, bien qu'on ne l'ait observé que pour un massif, cette évolution de l'infiltrabilité confirme le rôle prépondérant des fissures dans l'accroissement de la conductivité hydraulique.

II.3. Analyse de la porosité

a) Teneur en eau moyenne

L'analyse des systèmes de porosité, en fin d'humectation, a donné les résultats indiqués dans le Tableau 8.

Ces résultats sont difficilement interprétables ; en effet, on observe une valeur de la porosité du massif W_i 15,3 de 2,30 % alors que le massif n'a pas fissuré, tout au moins en surface. Cette valeur est de l'ordre de grandeur de l'incertitude. On observe, également, une différence de porosité entre les massifs W_i 14,3 et W_i 12,5 de 50 % qui ne correspond pas du tout à ce que l'on a décrit par l'analyseur d'images. Les valeurs, pour les massifs les plus secs, sont relativement faibles par rapport à la porosité calculée du massif 14,3. Ces résultats ne sont pas en accord avec ceux donnés par analyse d'image de la surface.

Il y a donc une grande incertitude sur la validité de la mesure. Elle peut être attribuée à la méthode d'évaluation du volume du massif en réhumectation. Nous avons vu au paragraphe "Matériel et Méthodes" que cette estimation était soumise à de nombreuses erreurs que l'on ne pouvait maîtriser. Mais surtout le calcul de la densité texturale à partir de la courbe de retrait et de l'humidité moyenne du massif n'est pas rigoureux. Ceci est lié à la répartition de l'eau dans le massif.

b) Relation potentiel-teneur en eau

Connaissant la densité finale du massif, nous pouvons calculer sa porosité fissurale à partir :

			Porosité structurale %			
Cote	W ψ	γ_d^t	W $_i$ = 4 %	W $_i$ = 5.6 %	W $_i$ = 7.1 %	W $_i$ = 10.5 %
			$\gamma_d = 1.25$	$\gamma_d = 1.19$	$\gamma_d = 1.34$	$\gamma_d = 1.34$
0-1 cm	33.20	1.41	11.35	15.6	5.0	5.0
1-2 cm	30.20	1.46	14.4	18.5	8.22	8.2
2-3 cm	29.40	1.48	15.5	19.6	9.5	9.5
3-4 cm	28.90	1.49	16.1	20.13	10.1	10.1
4-5 cm	28.00	1.51			11.26	
Porosité moyenne ($\bar{W} \psi = 30.1 \%$)		1.47	14.97	19.05	8.8	8.2
Porosité estimée avec \bar{W}			7.2	8.0	5.2	3.9
Porosité fissurale analyseur			17.00	20.00	19.7	11.0
Porosité structurale couche supérieure (1 cm)			16.1	20.13	11.26	10.1

$\bar{W} \psi$ est l'humidité moyenne des quatre couches de sol

\bar{W} est l'humidité moyenne du massif mesuré expérimentalement

Tableau 9 : Analyse de la porosité (effectuée à partir de la relation teneur en eau-potential)

- de la relation potentiel-teneur en eau pour déterminer l'humidité aux différents niveaux,
- de la courbe de retrait des massifs continus pour estimer la densité texturale.

En admettant, par ailleurs, que la densité moyenne du massif est indépendante de la cote, nous pouvons également calculer la porosité fissurale dans chaque tranche de 1 cm d'épaisseur, et en particulier dans la tranche superficielle, la plus proche de la section observée par photographie.

Les résultats figurent au Tableau 9.

On constate :

- que la teneur en eau d'équilibre calculée sur la base de la courbe de potentiel est nettement inférieure à la teneur en eau totale du massif en fin d'humectation. La différence pouvant être imputée au volume d'eau contenue dans les fissures.

- que les valeurs de porosité fissurale moyenne de chaque massif sont très supérieures à celles calculées à partir de la teneur en eau globale.

- que les résultats obtenus pour la couche superficielle sont aux erreurs près, voisins de ceux de l'analyse d'image. Les valeurs sont en effet assez semblables entre elles sauf pour le massif de W_1 7,1 puisqu'elles varient, dans ce cas, de 11,2 à 19,7 %. Cette différence peut être imputée à une surévaluation de la densité.

L'analyse physique de l'état d'équilibre hydrique et la compatibilité de ces résultats conduisent donc à rejeter les résultats antérieurs et à ne retenir que les valeurs obtenus par ce second mode de calcul. Bien qu'elles doivent être directement vérifiées, les hypothèses concernant : la validité de la relation potentiel-teneur en eau pour les différents massifs initialement très secs et la représentativité de la face observée par rapport au volume à une tranche superficielle, se trouvent confortées.

Massifs W_i	4	5.6	7.1	10.5
$\Delta W = \bar{W} - \bar{W}\psi$	7.4	9.7	3.0	4.0
$\Delta Q = m_s \cdot \Delta W$	31.25	43.6	14.3	17.8
$\Delta\theta = \Delta W \cdot \rho_d$	9.25	11.5	4.02	5.4
n_F surface	17.0	20.0	19.7	11.0
$n_F (\bar{W}\psi)$	15.0	19.0	8.8	8.2
Volume de fissures (cm ³)	50.55	72.0	31.35	27.26
Taux de saturation de				
$n_F = \frac{\Delta\theta}{n_F} \cdot 100$	62 %	60 %	46 %	65 %
Volume retenu par les fissures de largeur (cm ³)				
0.5 mm	22.0	25.5	9.50	4.5
0.75 mm	9.0	8.3	4.0	4.2
1.5 mm	2.1	2.2	3.2	2.4
Total = V_F (cm ³)	33.1	36.0	16.7	11.1

Tableau 10 : Estimation du taux de saturation des fissures

c) Estimation du volume d'eau contenu dans les fissures

Le volume d'eau présent dans la porosité structurale est évaluée par la différence $\bar{W} - \bar{W}_\psi$. La loi de Jurin appliquée aux sols nous a permis de déterminer la section maximale des fissures capables de retenir l'eau à différentes cotes du massif.

A une hauteur de 1 cm, les pores de section 1,5 mm peuvent retenir de l'eau, à 2 cm les pores de 0,75 mm, à 3 cm les pores de 0,5 mm sont capables de contenir de l'eau.

A partir de la granulométrie de fissures établie à la surface par analyse d'images, nous avons estimé un volume de fissures remplies d'eau à l'intérieur du massif. Les résultats obtenus (cf. Tableau 10) constituent bien évidemment une approximation car on suppose pour cela que la fissuration est verticale et qu'elle est homogène.

Néanmoins, malgré ces hypothèses assez criticables, la comparaison entre ΔQ et V_F indique que 60 à 120 % de la quantité d'eau présente dans le volume poral structural se retrouve dans le volume estimé des fissures capables de retenir de l'eau.

Compte-tenu des approximations effectuées, ces résultats sont assez satisfaisants. On ne peut pas, en effet, espérer une meilleure précision.

Le volume estimé représente pour ces massifs 41 à 65 % du volume total calculé des fissures.

Par ailleurs, connaissant la porosité structurale évaluée à partir de la courbe de potentiel, nous en avons déduit un volume de fissures. Connaissant également la quantité d'eau présente dans le volume poral structural, nous avons pu déterminer le taux de saturation de la porosité fissurale (cf. Tableau 10). Celui-ci varie de 46 à 65 %.

Aussi, les valeurs calculées du taux de saturation sont assez proches de celles de la part estimée du volume total rempli d'eau.

Ces résultats amènent quelques réflexions :

- L'hypothèse selon laquelle la différence entre \bar{W} et \bar{W}_ψ représentait le volume d'eau retenu par les pores fissuraux semble se justifier.
- Les humidités mesurées par la courbe de potentiel pour les massifs semblent bien représenter les humidités des volumes texturaux.
- La fissuration semble être relativement homogène dans le massif. Cet aspect demande cependant à être approfondi.

B/ Humectation avec de l'eau soumise à un potentiel négatif

En apportant non plus de l'eau libre, mais de l'eau soumise à un potentiel négatif, nous cherchions à savoir quelle pouvait être l'influence du mode d'apport de l'eau, c'est-à-dire du gradient de potentiel, des contraintes et des déformations qu'il implique, sur la fissuration.

Cinq massifs ont été réhumectés par ce dispositif. La dépression était égale à la hauteur des massifs, soit 3,5 à 5 millibars. Les humidités initiales étaient de 4,7 - 6,0 - 9,6 - 12,5 - 19 %.

Nous n'avons observé de fissurations que pour deux massifs très secs. Ils étaient initialement à 4,7 et 6 % de teneur en eau. Leur humidité finale approchait 20 %. En outre, nous avons déterminé pour ces massifs, le gradient hydrique par pesée à 105°C. Celui-ci était très élevé puisqu'il variait de 10 % à la base à 26 % au sommet.

La fissuration observée était superficielle. Il n'y a pas eu de fragmentation des massifs.

Ces observations et les résultats obtenus semblent montrer que le potentiel de l'eau apportée influe fortement sur le processus de fissuration des massifs argileux.

Ceci a été confirmé lors de la réhumectation des cubes argileux pour établir la courbe de potentiel-teneur en eau. En effet, n'avaient fissuré que les cubes soumis à un potentiel nul ou égal à 1 millibar.

Les conditions de fissuration du matériau étudié à l'humectation seraient donc à partir de ces résultats :

- Un état de dessiccation initiale du matériau ($W < W_{AE}$, teneur en eau à l'entrée d'air)
- Un apport d'eau à potentiel et débit suffisants pour porter la surface humectée à un potentiel voisin de zéro.

Ces conditions devraient être complétées par une relation avec le volume d'eau apportée, qui dépend de l'humidité et de la porosité structurale initiale, comme le suggèrent les résultats de l'étude de terrain.

La condition d'apport d'eau à potentiel nul limite le phénomène à la couche de surface des sols ou au voisinage des macropores constituant des chemins d'infiltration préférentiels. Elle doit être cependant vérifiée lors de conditions d'expérimentation mieux contrôlées. En effet, dans le cas de notre dispositif à succion contrôlée, il semble que le débit délivré par la couche de limon fin

était un facteur limitant fortement l'humectation du massif. En effet, l'infiltrabilité initiale du massif étant très élevée, un gradient de potentiel a pu s'établir à l'intérieur du filtre complexe le séparant de la bougie d'alimentation. Les conditions d'apport étaient de ce fait mal définies.

La succion réelle à la surface du massif peut avoir été très supérieure à la valeur nominale imposée par la dépression du réservoir. La cinétique de gonflement a pu, de ce fait, être très différente de ce qu'elle aurait été sans limitation du débit.

II.4. Discussion méthodologique

Ces résultats, dans l'ensemble, font apparaître que si l'on veut continuer les recherches sur la fissuration dans cette voie, certaines précautions méthodologiques doivent être prises.

L'analyse de la porosité nécessite des mesures de volume beaucoup plus précises. Il semble dans ce cas qu'il faille reconsidérer le dispositif expérimental en multipliant les points de mesure et éventuellement envisager un usinage préalable des massifs.

L'étude des cinétiques d'humectation a fait entrevoir la nécessité de bien maîtriser l'évolution de l'infiltrabilité dans les massifs, et d'effectuer des mesures d'humidité très rapprochées dans la phase initiale de l'humectation.

Nous nous sommes rendus compte de la nécessité de connaître la relation potentiel-teneur en eau. Il est clair qu'elle doit être établie, pour une plus grande rigueur et précision de l'analyse, pour toutes les humidités initiales.

Néanmoins, le problème de la connaissance du gradient d'humidité en cours d'humectation sera difficile à résoudre. Or il est essentiel pour décrire la formation des fissures et en comprendre le mécanisme, les contraintes développées à l'humectation étant nécessairement fonction de la distribution de l'humidité et du potentiel de l'eau.

Si la modélisation peut permettre de décrire l'humectation des massifs avant fissuration, il est difficile de prévoir la distribution de l'eau dès que des fissures se forment.

Il est donc indispensable de réaliser des mesures. Elles ne sont accessibles actuellement par aucune technique, surtout si l'on tient compte des effets perturbateurs probables dans la mise en place de capteurs dans le massif.

On est ainsi conduit à proposer une méthode destructive consistant à arrêter l'humectation à des temps différents, étudier la distribution de l'eau et la morphologie fissurale.

Cette façon de procéder ne règle cependant pas tous les problèmes de l'évaluation directe des quantités d'eau contribuant au gonflement (localisées dans la porosité texturale) ou contenues dans les fissures.

III. DISCUSSION

Les résultats obtenus au laboratoire démontrent incontestablement l'existence d'un processus de fissuration à l'humectation. Ils permettent d'établir des hypothèses concernant les conditions d'apparition et certains facteurs de variation.

Le problème principal est évidemment d'évaluer la généralité ou les limites de ces hypothèses. Ceci ne peut être fait, rigoureusement, qu'à partir de modèles de transferts hydriques, des variations des contraintes et de la rupture des massifs. L'observation a montré qu'une telle modélisation, déjà difficile sur des massifs argileux continus, devient impossible à réaliser dès que des premières fissures se forment, du fait de l'hétérogénéité considérable qu'elles induisent.

Outre la tentative de modélisation des premiers stades de l'humectation, un premier développement expérimental serait de vérifier le rôle des modalités d'apport d'eau (potentiel, débit) dans la fissuration et la généralité de la relation entre l'apparition de la fissuration et la position de l'humidité initiale des massifs sur la courbe de retrait. D'autre part, il serait intéressant de savoir si un tel mécanisme de division par fissuration est susceptible d'intervenir dans un massif initialement discontinu et s'il existe, par exemple, une relation avec la dimension des éléments structuraux.

Si l'on accepte la généralisation des hypothèses émises, au moins pour le type de matériau étudié, on disposerait d'une possibilité de prévision de l'intensité de la fissuration, sensiblement améliorée par rapport à ce qui est disponible actuellement. A l'aide d'un modèle de dessèchement de la couche de surface, il serait possible d'estimer la fréquence de dessèchement en dessous du seuil permettant la fissuration à l'humectation. Une analyse statistique des précipitations permettrait ensuite d'évaluer une intensité de fissuration probable en fonction de leur intensité et de la hauteur d'eau tombée.

Malgré ces incertitudes, une telle démarche constituerait un premier pas vers l'analyse de l'évolution structurale du sol en place, limitée jusqu'à présent à un rapprochement entre aptitude au gonflement et aptitude à la fissuration.

L'analyse des mécanismes de la fissuration à l'humectation soulève d'autres interrogations. Sur le plan strictement mécanique, elle relève de la description des contraintes et d'un modèle de rupture difficile à concevoir dans ce type de matériau. Dans le stade initial, les gradients de teneur en eau et des contraintes sont très élevés. Les mesures sont donc très difficiles. Les propriétés mécaniques sont extrêmement variables, de fait l'utilisation de modèles qui supposent l'homogénéité du massif est difficilement envisageable.

On peut simplement proposer la description schématique suivante, fort éloigné d'une analyse théorique.

La pression de gonflement entraîne une déformation de la base du massif. Par suite de l'extrême rigidité de la partie supérieure non encore humectée, il y a rupture du massif. Ceci suppose des forces de tensions importantes en regard de la cohésion de tels massifs à l'état sec.

Les premières fissures formées conduisent l'eau à la surface du massif. L'augmentation de la surface humectée crée des gradients de potentiel dans le massif qui induisent de même la rupture des fragments. On aboutit ainsi rapidement et ce d'autant plus que l'état initial est sec, à une fragmentation du massif en éléments structuraux.

Les conditions d'apparition de la fissuration à l'humectation (massif désaturé, apport d'eau à potentiel nul) suggèrent l'existence d'un rôle important de la phase gazeuse dans l'accroissement de la pression de gonflement. Ce point est fondamental vis-à-vis de la compréhension du gonflement qui ne peut être entièrement interprété par la prise en compte du gonflement interfoliaire de l'argile.

Cependant, les conditions d'humectation d'un massif initialement sec (humidités initiales inférieures à la limite de retrait), ne constituent pas le cas le plus favorable à un piégeage d'air. D'autre part, lors de la réalisation des équilibres de potentiel sur petits volumes (établissement de la relation potentiel-teneur en eau), la fissuration des échantillons s'est produit sous vide et à la pression atmosphérique. Une expérimentation de ce type en conditions très contrôlées (dégazage préalable poussé des échantillons) mériterait d'être réalisée.

Les limites de l'expérimentation de terrain, indispensable pour évaluer l'importance du phénomène étudié en conditions naturelles, sont liées à des problèmes méthodologiques, notamment la difficulté d'observer en surface, la formation de fissures en cours d'arrosage.

On est ainsi conduit à envisager une étude spécifique comportant :

- Une description morphologique (visuelle) de l'épaisseur humectée après la fin de l'apport d'eau
- La réalisation de tests mécaniques ou la mesure de coefficients de transferts (perméabilité) sur des échantillons prélevés pendant et en fin d'humectation, qui seront susceptibles de déceler des discontinuités.

Cette opération est de toute façon difficile à réaliser techniquement du fait du gradient d'humidité et de la nécessité d'effectuer les mesures rapidement.

Aussi, il est clair que la description du phénomène ne peut se limiter à une observation de la surface, en particulier pour analyser l'effet de doses d'irrigations variables, ou pour aborder la fragmentation de mottes superficielles. Le problème de l'imprégnation d'échantillons humides sans modification de leur morphologie structurale apparaît crucial dans ce domaine pour les développements futurs.

IV. CONCLUSION

La réalisation simultanée d'une expérimentation de terrain et de laboratoire nous a confronté aux difficultés méthodologiques propres à chacune d'entre elles. Si l'étude d'un modèle physique au laboratoire permet de conclure sans ambiguïté à l'existence d'une fissuration au gonflement, il est impossible d'en tirer une prévision quantitative in situ en l'absence d'une analyse du déterminisme du phénomène et de la formalisation (plus ou moins grossière) de ces lois. De ce point de vue, la mise en évidence de la fissuration au gonflement peut constituer :

- une première étape de cette analyse
- une base pour la mise au point d'un test, qui serait alors simplifié par rapport à notre dispositif, permettant de caractériser le comportement de différents matériaux.

Chacune de ces voies peut contribuer à la prévision du comportement du sol en place.

L'interprétation de l'approche expérimentale de terrain est plus douteuse, bien qu'elle permette de quantifier l'effet de traitements (tassement initial, dose d'irrigation).

Cela est dû aux difficultés de mesures et d'observations propres aux sols argileux, surtout pendant la phase d'humectation. La variation simultanée de l'humidité, de la densité et de l'organisation structurale rendent très difficile la séparation des variables.

La description morphologique et les mesures du gradient sont complexes du fait de l'hétérogénéité (en particulier de l'humidité) et de la difficulté d'observer la morphologie autrement qu'à l'état sec.

A cet égard cependant, ce travail a montré la possibilité de quantifier les caractéristiques morphologiques par utilisation de l'analyse d'image à partir des photographies de terrain. Ceci constitue un progrès très important pour la description de l'évolution structurale, même si le domaine pratique d'application reste encore limité du fait des conditions nécessaires à l'obtention d'images traitables.

BIBLIOGRAPHIE

- DE CRECY, 1975** - Dessèchement et réhumectation des pâtes argileuses.
Ann. agron. 26(6), 651-669
- FAURE A., FIES J.C., MONNIER G., 1973** - Comportement des sols soumis au roulage.
Station de Science du Sol, INRA, Avignon.
- FIES J.C., 1971** - Recherche d'une interprétation texturale de la porosité des sols.
Ann. agron. 22(6), 655-685
- FIES J.C., 1978** - Porosité du sol - Etude de son origine texturale.
Thèse ULP, Strasbourg, 139 p.
- FIES J.C., STENGEL P., 1981** - Densité texturale des sols naturels :
I- Méthodes de mesure ; II- Eléments d'interprétation
Agronomie 1(8), 651-659
- GUERIF J., 1983** - Le compactage
Compte-rendu séminaire CEE Agrimed (Doc. interne)
- HAINES, 1923** - The volume changes associated with variations of water contents in soils.
J. Agr. Sc. 13, 296-320.
- HALLAIRE V., 1984** - Evolution of crack network during shrinkage of a clay soil under grass and winter wheat crops.
Proceedings of the ISSS symposium on water and solute movement, p. 49-54.
- HALLAIRE V., 1984** - Evolution des réseaux de fissures lors du retrait d'un sol argileux
Comptes-rendus du Colloque Fonctionnement hydrique et comportement des sols. Bull. de l'AFES, 323-328.
- HALLAIRE V., 1985** - Méthodes de mesures du retrait vertical d'un sol argileux.
Actes de l'Atelier CEE "Tassement des sols par compactage - Conséquences - Processus de régénération".
Avignon, 17-18/09/85 (à paraître)
- HILLEL D., 1974** - L'eau et le sol.
Vander Ed. Beauchevrain, 300 p.
- KHEYRABI, MONNIER G., 1968** - Granulométrie et stabilité structurale.
Ann. agron. 19(2), 129-152.
- MONNIER G., FIES J.C., STENGEL P., 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(5), 533-545.

- PINOCHET X., 1981** - Prédiction du retrait gonflement d'agrégats de sol. Relation avec le potentiel de l'eau.
Mémoire de fin d'études ENITA, Dijon.
- 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(1), 27-51.
- STENGEL P., 1983** - Analyse de la porosité.
Séminaire CEE Agrimed (Doc. interne).
- STENGEL P., 1981** - Relations entre le retrait et le potentiel de l'eau dans des mélanges smectite-limon.
C.R. Acad. Sc. Paris, t. 293, 465-468.
- STENGEL P., 1983** - Fragmentation par fissuration.
Compte-rendu du séminaire CEE Agrimed (Doc. interne)
- STENGEL P., GABILLY Y., BERTUZZI P., GAUDU J.C., 1985** - La double sonde gammamétrique LPC-INRA. Précision. Utilisation agronomique.
Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées (à paraître).
- STENGEL P., GUERIF J., 1985** - Effect of tillage techniques on cracking at a heavy clay soils.
Abstract 10th ISTRO Conference GUELPH (Canada), p. 29.
- TESSIER D. et PEDRO G., 1980** - Sur les propriétés de gonflement des argiles dans les sols.
C.R. Acad. Sc. Paris, t. 291, 461-464.
- YONG et WARKENTIN, 1975** - Soils properties and behaviour
Elsevier ed. Amsterdam, 200p.

ANNEXE 1 : ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Profondeur	2 μm	2-20 μm	20-50 μm	50-200 μm	200-2000 μm
0-20	48.0	32.8	8.5	9.0	1.7

Profondeur	M.O %	CaCO ₃ %	CEC meq/100 g	pH
0-20	2.42	26.9	20.1	8.2

ANNEXE 2 : DESCRIPTION DE L'ASPERIMETRE

Cet appareil est destiné à relever simultanément et sur une même ligne les côtes du micro relief observé en plein champ.

Notre appareil est constitué d'un support horizontal de 4,50 de long sur lequel coulissent des aiguilles de 0,70 m et espacées de 25 cm.

Le support est maintenu en place grâce à 2 pieds fixés pour toute la durée de la manipulation. Il est placé parallèlement à la surface du sol. L'appareil est placé perpendiculairement à la direction du roulage. Il englobe les trois bandes de tassement. Les aiguilles sont alors placées et reposent sur la surface du sol. La partie supérieure de toutes les aiguilles est mesurée. Elles sont alors remontées pour permettre l'arrosage. 24 heures après, elles sont redescendues sur la surface du sol. La même mesure est effectuée. La différence de hauteur indique le gonflement du sol entre la surface et le support servant de niveau de référence.

Calcul du gonflement

Soit $\Delta d = d_2 - d_1$ est le gonflement mesuré de la couche 0-30 cm

$$\text{Soit } G \% = \frac{\Delta d}{30} \cdot 100$$

ANNEXE 3 : CALCUL DU GONFLEMENT D'UNE COUCHE DE SOL :

HYPOTHESE D'UN GONFLEMENT ISOTROPE

Volume initial $V_1 = h_1 l_1^2$

Volume final $V_2 = h_2 l_2^2$

$$(1) \frac{\Delta V}{V} = \frac{h_2 l_2^2 - h_1 l_1^2}{h_1 l_1^2} = \frac{h_2 l_2^2}{h_1 l_1^2} - 1$$

Hypothèse d'isotropie

$$\frac{\Delta h}{h_1} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} = \frac{l_2 - l_1}{l_1} = \frac{\Delta l}{l} = \frac{h_2}{h_1} - 1$$

d'où en remplaçant dans (1) $\frac{\Delta V}{V} = \left(\frac{\Delta h}{h_1} + 1 \right)^3 - 1$

si ρ_d est la densité sèche $\frac{\Delta V}{V} = - \frac{\Delta \rho}{\rho}$

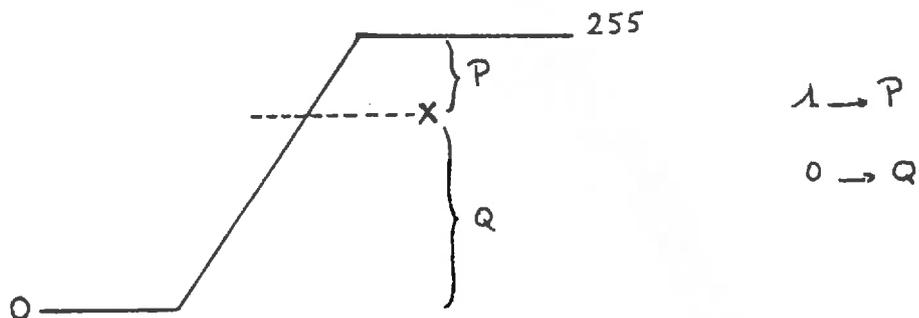
et finalement $\Delta h = h_1 \left[\left(1 - \frac{\Delta \rho}{\rho} \right)^{1/3} - 1 \right]$

ANNEXE 4 : ANALYSE D'IMAGE

I- PREPARATION DE L'IMAGE : DEFINITION DES FISSURES

1/ Le seuillage

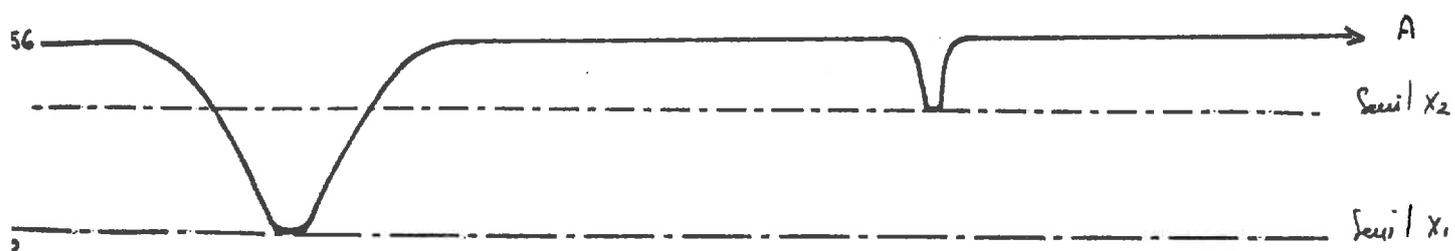
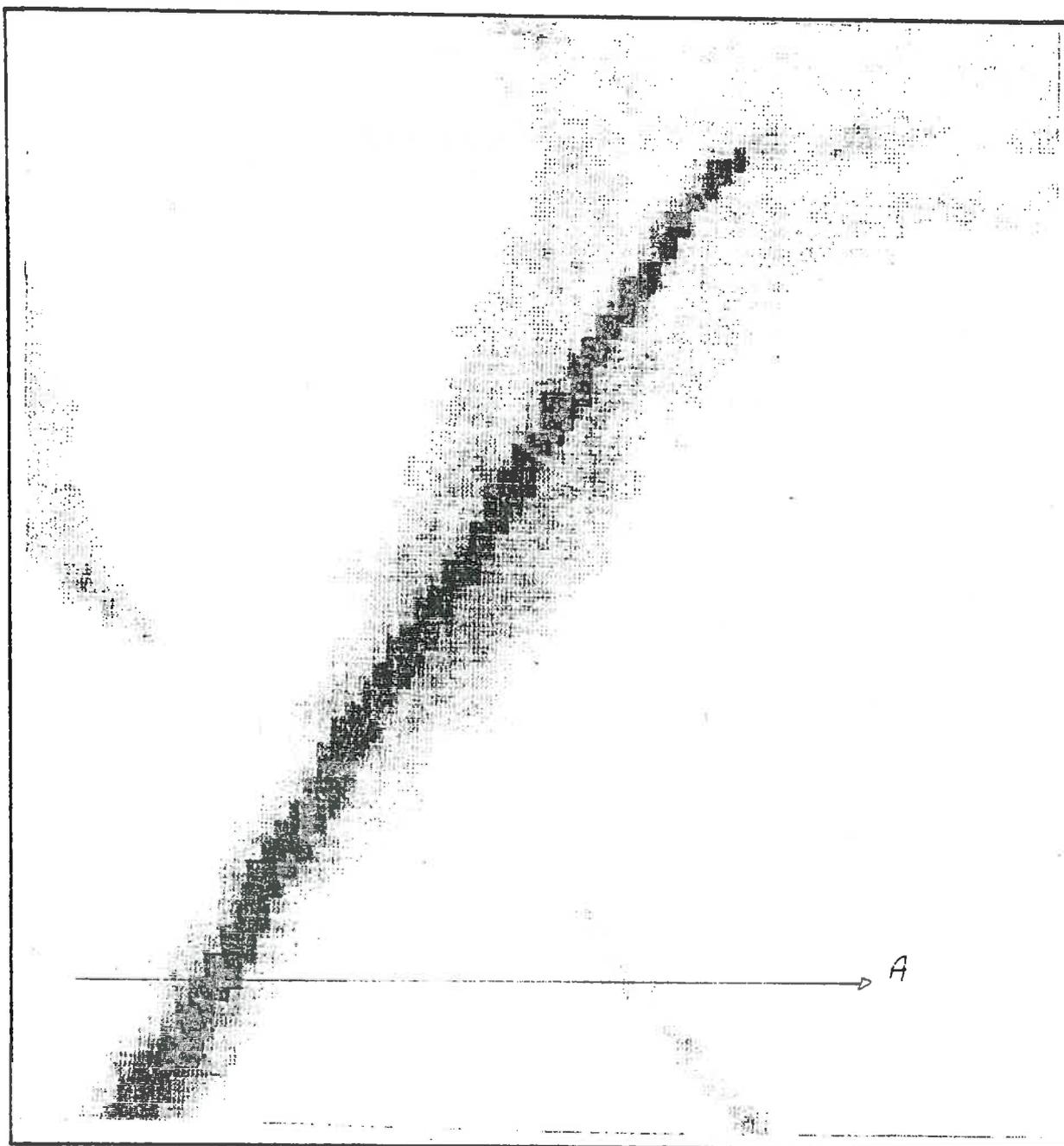
Il consiste à délimiter les frontières des fissures en faisant varier un seuil X sur la gamme des niveaux de gris de 0 à 255. Le seuil X est la borne inférieure des valeurs de gris correspondant aux fissures. La valeur 1 est affectée à tous les pixels dont l'intensité de gris est supérieure à X . La valeur 0 est affectée à tous les autres pixels.



La difficulté du seuillage est due à deux choses :

- les fissures ne sont pas définies par un niveau de gris, mais par une forme. Elles n'ont pas toutes la même intensité de gris.
- les bords des fissures sont souvent mal définis. Il existe une zone de transition avec un gradient de gris entre le corps de la fissure et le fond de l'image.

Il est dû, d'une part, aux ombres portées et à l'humidité lors de la prise de vues, d'autre part aux effets de bordure inhérents aux traitements photographiques et à l'acquisition par la caméra vidéo (balayage).



Resultat du seuillage X_1

Resultat du seuillage avec X_2

— valeur 0
 — valeur 1

Certaines fissures fines ont une intensité de gris identique soit à celle de la zone de transition des fissures larges, soit à certaines zones sombres du fond de l'image. Ainsi l'abaissement du seuil X (à une valeur X_2 par exemple sur le schéma) de façon à comptabiliser les fissures fines pour ne pas perdre de l'information équivaut à comptabiliser la zone de transition dans la surface des fissures. La porosité fissurale s'en trouve d'autant surestimée (cf. Schéma ci-contre). Pour éviter cela, nous avons recours à une deuxième forme de seuillage.

2/ Le seuillage "chapeau haut de forme"

C'est une opération morphologique qui consiste à augmenter l'intensité de gris des fissures fines tout en réduisant l'amplitude de leur zone de transition, et à supprimer dans le même temps les fissures les plus larges. Deux phases :

- Un seuillage avec le seuil X_1 qui délimite les frontières des grosses fissures.
- Un seuillage X' précédé d'un traitement "chapeau haut de forme" pour délimiter les frontières des fissures fines.

En additionnant ensuite les deux images, on obtient une image binaire seuillée où la délimitation des frontières de toutes les fissures n'a pas donné lieu à une mauvaise estimation de la géométrie des fissures.

II- ANALYSE MORPHOLOGIQUE DES FISSURES : QUANTIFICATION

L'image seuillée est une image binaire (2 valeurs 0 ou 1). Une série d'opérations est effectuée.

- a) Evaluation de la surface totale du massif : Cette opération consiste à compter le nombre de pixels dans une zone préalablement déterminée à l'aide d'un marqueur neutre.
- b) Evaluation de la surface des fissures I : L'analyseur somme la valeur de tous les pixels présents dans la même zone, ce qui revient à compter les pixels valant 1.
La porosité fissurale est le rapport $\frac{I}{S} = n_F$

3/ Evaluation de la longueur des fissures

Deux méthodes possibles :

- Squelettisation

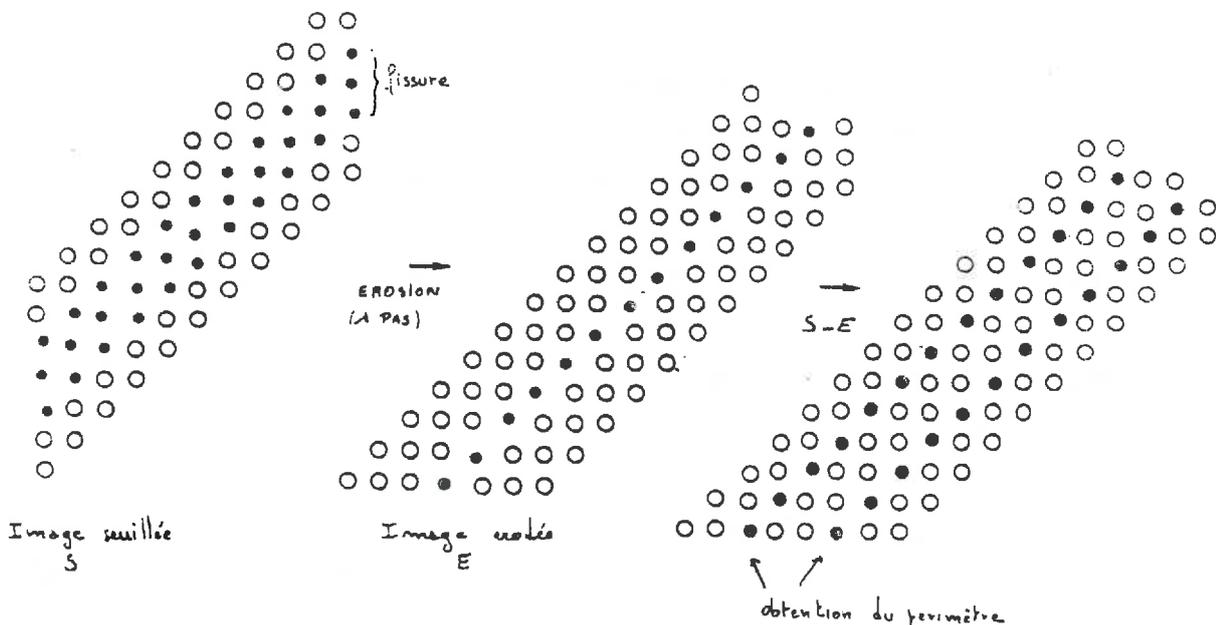
Elle consiste à réduire toutes les fissures à un trait d'épaisseur un pixel.

Il suffit d'évaluer ensuite le nombre de pixels valant 1 pour obtenir la longueur totale.

- Calcul du périmètre

Le calcul du périmètre peut également constituer une évaluation de la longueur des fissures. On suppose pour cela que la largeur des fissures est négligeable devant leur longueur.

Une érosion est effectuée sur l'image seuillée. L'érosion consiste à réduire l'épaisseur des fissures d'un pixel de chaque côté. L'image érodée est alors soustraite à l'image seuillée. On obtient ainsi sur une image tous les pixels qui ont disparu à l'érosion, c'est-à-dire le périmètre des fissures.



Le périmètre s'obtient en sommant tous les pixels de la surface totale.

Le calcul du périmètre par les deux méthodes différentes donne les mêmes résultats. Nous avons décidé d'évaluer la longueur par le calcul du périmètre. Ce dernier est en effet plus rapide.

4/ Granulométrie des fissures

Elle est obtenue en évaluant successivement les périmètres des fissures érodées à chaque étape de deux pixels en largeur (deux pixels correspondent à 0,5 mm dans notre cas).

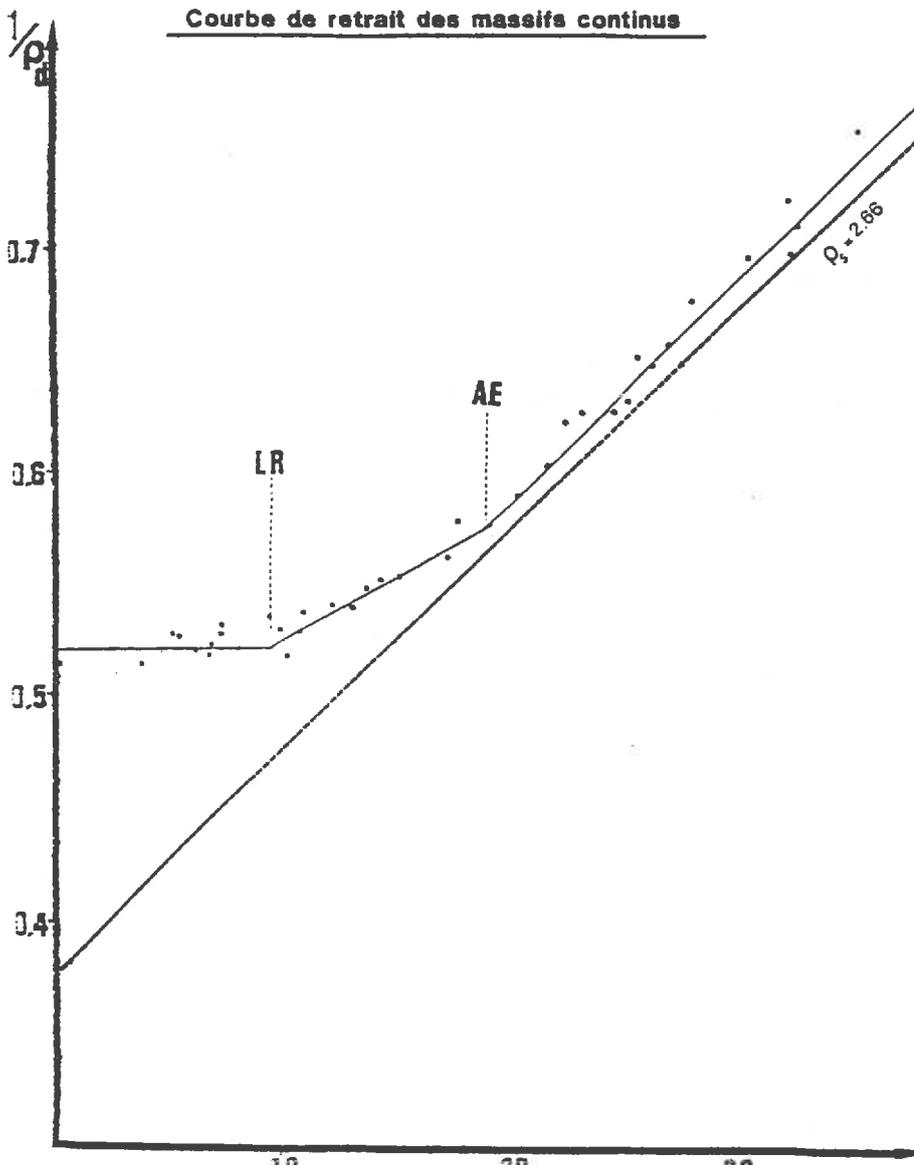
ANNEXE 5

COURBE DE RETRAIT DES MASSIFS

Les points singuliers ont été définis arbitrairement, à partir de la courbe de retrait d'agrégats 2-3 mm.

- Ordonnée à l'origine $W = 0 \%$
 $1/\gamma_d = 0.522$
- Limite de retrait $9 \leq W_{LR} \leq 11,5'$
- Point d'entrée d'air $17.5 \leq W_{AE} \leq 21$

On constate que la droite de saturation expérimentale n'est pas confondue avec la droite théorique, ce qui indique la persistance d'un petit volume d'air. On peut cependant assimiler ce comportement pseudo-saturé au comportement saturé.



ANNEXE 6 : RELATION TENEUR EN EAU-POTENTIEL

Des cubes de 1 cm^3 de sols remaniés (ayant subi la même préparation que les massifs) ont été réhumectés sur un escalier à potentiel.

Il s'agit d'un dessiccateur sur le plateau duquel ont été installés des plats de 1, 2, 3 et 4 cm de hauteur.

L'ensemble était relié par une mèche à de l'eau dégazée.

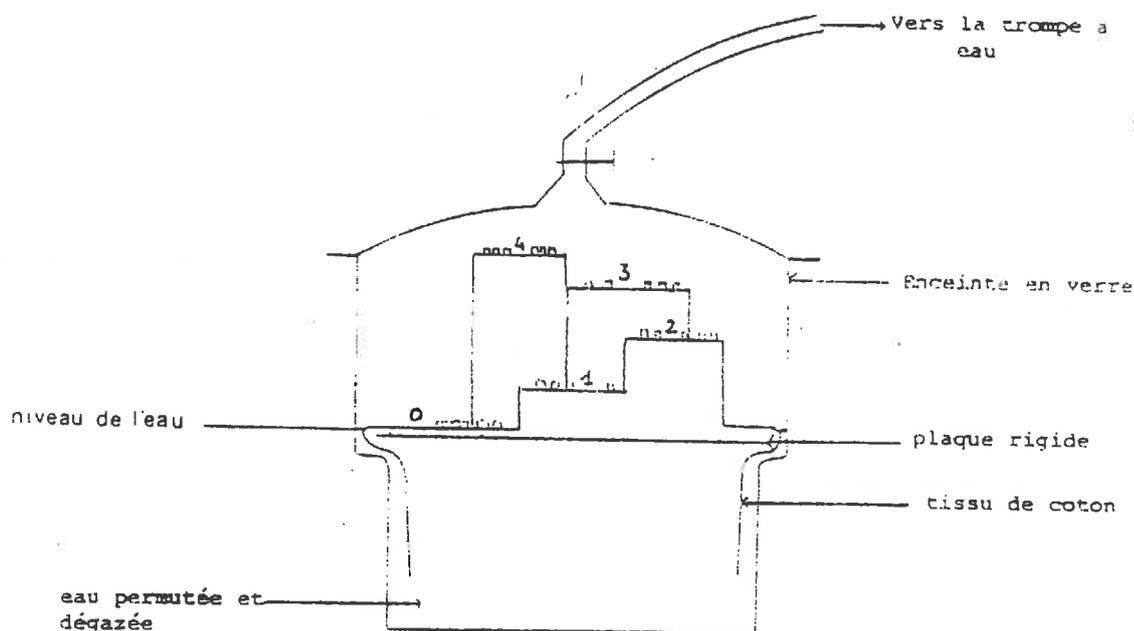


Schéma du montage utilisé

La réhumectation a duré 72 h. L'humidité initiale était de 6 %.

Une réhumectation a eu lieu sous vide, une deuxième à la pression atmosphérique. Les teneurs en eau sont très voisines.

ψ	0	1	2	3	4	\bar{W}
sous vide W	32,75	29,50	29,20	28,85	28,75	30,10
hors vide W	33,70	30,91	29,67	28,90	27,45	30,12