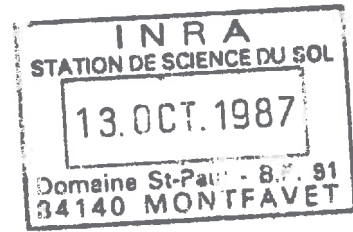


~~TH - L26~~



GF2

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE  
PARIS-GRIGNON  
Chaire d'Agronomie  
Fernando DE LEON

FISSURATION A L'HUMECTATION  
DES SOLS : ETUDE  
EXPERIMENTALE SUR  
ECHANTILLONS REMANIES

Septembre 1987

Institut National Agronomique

PARIS-GRIGNON

Chaire d'Agronomie

INRA

Station de Science du Sol d'Avignon

M E M O I R E

FISSURATION A L'HUMECTATION

DES SOLS: ETUDE

EXPERIMENTALE SUR

ECHANTILLONS REMANIES

Présenté par Fernando DE LEON

En vue de l'obtention du Diplôme d'Agronomie Approfondie

Mention : "Sciences et Techniques des Productions Végétales"

Ce travail a été dirigé par:

Pierre STENGEL

Station de Science du Sol. INRA Avignon

Septembre 1987

## REMERCIEMENTS

J'aimerais exprimer mes remerciements à :

- Mr. Pierre STENGEL, Directeur de la Station de Science du Sol, qui a dirigé mon stage

- Mr. Michel BOURLET, Assistant Ingénieur, qui m'a orienté dans les techniques de laboratoire.

C'est avec le concours d'eux que j'ai pu arriver jusqu'au bout de mon travail.

Je tiens à remercier également Mr. Jérôme GUERIF qui est à l'origine de mon stage, et toute la Station de Science du Sol de l'INRA d'Avignon, avec une attention particulière aux thésards et stagiaires qui m'ont souvent apporté leur aide.

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

## CRACKING BY WETTING OF SOIL : EXPERIMENTAL STUDY

### ABSTRACT

Previous studies had demonstrated that cracking occurred during wetting of a swelling clay material, according to its initial water-content. In the present work, the effect of three factors on cracking during wetting were studied : soil texture, potential of the wetting water, and gas pressure into the material sample.

The study was conducted in laboratory conditions, with remoulded samples initially homogeneous and continuous. Three different textures were compared : clayey, silty-clayey and silt. In each case, variations of cracks length per unit area  $L_F$  with initial water content  $w_i$  of the sample were measured by image analysis.

Results show that cracking by wetting exists in each soil material.  $L_F$  decreased generally when clay content diminishes. But relationships between  $L_F$  and  $w_i$  is different for silt material L as compared with clayey A and silty-clayey LA.  $L_F$  decreases markedly when  $w_i$  increases for A and LA, and varies much less for L. In these case  $L_F$  decreases only when  $w_i$  is closed to air-entry point  $w_{AE}$ . Relationships with swelling magnitude is different for each material.

Potential of wetting-water  $\psi$  modifies  $L_F$  values. When  $\psi$  varies from 0 to -20 mbar  $L_F$  diminishes from 4  $\text{cm.cm}^{-2}$  to 1  $\text{cm.cm}^{-2}$  approximately. Cracking by wetting seems to occur only when two conditions are realized :

- $w_i$  must be inferior to a given value dependant on the texture
- the material must be in contact with water whose potential is near 0.

On the clay material, cracking under vacuum and at atmospheric pressure were not different. In these experimental conditions, compression of internal atmosphere is not the cause of the stresses which are generating the cracks.

## RESUME

Partant des résultats antérieurs sur la fissuration à l'humectation d'un matériau argileux, on a étudié l'influence de trois facteurs : la texture du matériau, le potentiel de l'eau provoquant la réhumectation, la pression gazeuse interne.

Le travail a été réalisé en laboratoire, sur des massifs continus préparés à partir de matériaux naturels remaniés. Les textures étudiées correspondaient à un matériau argileux A, un matériau limoneux L et un limono argileux LA. Pour chacun d'eux, on a étudié l'influence de l'humidité initiale des massifs avant réhumectation.

Les résultats ont montré que la fissuration à l'humectation existait pour les trois matériaux. Globalement, son intensité décroît quand la teneur en argile diminue. Néanmoins, l'effet de l'humidité initiale apparaît différent dans le cas du matériau limoneux. L'humidité initiale croissante provoque une diminution rapide de la longueur surfacique  $L_F$  des fissures formée pour les matériaux A et LA, elle semble peu dépendante de l'humidité initiale pour le matériau L, tant que l'humidité est notablement inférieure à celle du point d'entrée d'air. La relation entre  $L_F$  et le gonflement total (potentiel de gonflement) n'est pas unique pour les différents matériaux.

Le potentiel de l'eau mise au contact avec les massifs pour la réhumectation modifie fortement la longueur  $L_F$ . Pour un potentiel de -20 mbar, elle est divisée par 4 sur le matériau argileux. La fissuration à l'humectation semble donc dépendre d'un seuil de dessiccation initial, variable suivant la texture, et d'un contact avec de l'eau à potentiel voisin de 0.

Sur le matériau argileux, la fissuration sous vide et à la pression atmosphérique ne sont pas différentes. Dans les conditions expérimentales choisies, la compression de l'atmosphère interne ne semble pas jouer un rôle important dans la fissuration.

## PLAN

I. INTRODUCTION	1
II. MATERIELS ET METHODES	2
1. Présentation d'ensemble	2
2. Préparation des échantillons	2
3. Réhumectation	3
4. Mesures	4
5. Relation potentiel-teneur en eau	5
6. Matériaux utilisés	6
III. RESULTATS	7
1. Influence de la texture sur la fissuration à l'humectation	7
1. Gonflement des échantillons	7
2. Intensité de la fissuration	7
3. Relation avec le potentiel de gonflement	9
4. Relation avec la cinétique d'humectation	10
2. Influence du potentiel de l'eau apportée	13
3. Influence de la pression gazeuse	14
IV DISCUSSION	15
V CONCLUSION	19
BIBLIOGRAPHIE	
ANNEXES	

## I. INTRODUCTION

L'étude des processus d'évolution structurale par retrait et gonflement présente un intérêt majeur pour la prévision des états structuraux dans les couches de surface des sols cultivés d'une part, et la modélisation des transferts dans les sols gonflants d'autre part.

Le présent travail concerne principalement le premier de ces deux aspects. Il se situe dans le cadre général de l'étude de la régénération de la structure du sol après compactage. Son objectif est de contribuer à la mise au point de moyens d'estimation de la durabilité des effets du compactage et d'améliorer ainsi l'évaluation quantitative des risques de dégradation physique.

Les processus de fissuration par retrait-gonflement jouent un rôle très important dans le développement de la structure du sol en général et tout particulièrement dans le processus de division de mottes ou de couches de sol initialement compactées par des actions mécaniques d'origine anthropique. Généralement, la fissuration est considérée comme étant liée au retrait, donc à la dessiccation, et la majorité des travaux expérimentaux, ou les tentatives de description et de modélisation, ont porté sur cette étape des variations de teneur en eau. Les observations de terrain montrent cependant que certaines structures fines des sols gonflants ne sont décelables qu'à l'état humide et des considérations sur les déformations relatives et les pressions de gonflement suggèrent que les ruptures devraient être induites par l'humectation de matériaux gonflants initialement secs.

Un travail expérimental, réalisé antérieurement à la Station de Science du Sol d'Avignon (STENGEL et BOURLET, 1987) a démontré que sur un matériau argileux gonflant on observait bien en laboratoire une fissuration au cours de l'humectation d'échantillons initialement continus (à l'échelle macroscopique). De même, in-situ, sur un sol argileux initialement compacté à l'état humide, puis desséché, la réhumectation provoque un développement important de fissures.

La surface de fissure par unité de volume (ou la longueur par unité de surface si l'on raisonne dans un plan) qui est ainsi formée semble pouvoir être très supérieure à celle qui apparaît au cours de la dessiccation. Ceci justifie qu'on accorde un intérêt spécifique au rôle de l'humectation dans le processus de fissuration.

L'existence du phénomène de fissuration et l'humectation étant ainsi considérée comme établie, une étape préalable aux tentatives de modélisation consistait à rechercher les principaux facteurs déterminant son apparition et son intensité. Les résultats antérieurs, déjà cités, suggéraient que la fissuration ne se

produit que lors d'un apport d'eau à un potentiel élevé (voisin de zéro) sur un matériau initialement sec. Plus précisément, la fissuration n'avait été observée que lors de la réhumectation d'échantillons initialement non saturés, mis en contact avec de l'eau à un potentiel inférieur, en valeur absolue, à quelques dizaines de mbar.

Entre l'état sec à l'air et le point d'entrée d'air (correspondant sur le matériau utilisé à une teneur en eau massique de 0.15 g/g), la longueur de fissure formée (par unité de surface) décroissait de façon apparemment linéaire.

Le travail ici présenté avait pour but de vérifier la validité de ces conditions et leur stabilité pour d'autres matériaux, afin de pouvoir évaluer l'importance réelle du phénomène de fissuration à l'humectation : matériaux concernés, conditions climatiques nécessaires, profondeurs affectées.

## II. MATERIELS ET METHODES

### II.1. Présentation d'ensemble

L'ensemble des travaux a été réalisé en conditions en laboratoire, sur des échantillons de géométrie et d'état physique contrôlés, puis réhumectés dans des conditions standard. On a observé, en fonction de l'état physique initial et des conditions d'humectation, le développement des fissures.

### II.2. Préparation des échantillons

Le protocole de préparation est résumé à la figure 1. Il comprend les étapes suivantes :

- Préparation de la pâte initiale : une masse de matériau terreux tamisée à 2 mm est mise au contact d'une quantité d'eau correspondant à une humidité voisine de 1,9 HE (où HE est l'humidité équivalente). Le mélange progressif par agitation manuelle est complété par une agitation mécanique prolongée ( $\approx$  1h). Après une nuit, l'agitation est répétée de façon à obtenir une pâte d'apparence lisse.

- Contrôle de l'humidité : la pâte ainsi obtenue est déposée dans des cylindres de 10 cm de diamètre, posés sur une couche du même matériau sec à l'air et tamisé à 2 mm. Le ressuyage sur cette couche sèche est prolongé jusqu'à obtention d'un équilibre apparent, c'est-à-dire jusqu'à ce que les variations de teneur en eau en 24 h deviennent négligeables. Le temps nécessaire a varié dans notre cas de 5 jours à 30 jours suivant les matériaux utilisés.



Fig. 1 PREPARATION DES ECHANTILLONS

Calcul de 1.9 HE de l'échantillon  
tamisé

Addition d'eau dégazée

Malaxage à la main

4 H

Addition d'eau jusqu'à 1.9 HE

Malaxage mécanique

Obtention de la boue

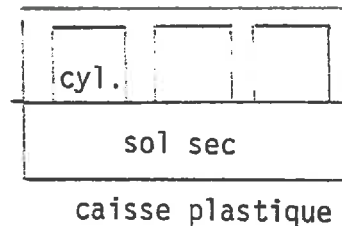
Repos de la Boue à 5° C

12 H

Continuation du Malaxage

2H

Placement de la boue dans les  
cylindres métalliques (Ø 12cm;  
hauteur 10cm) du système de  
ressuyage:



1/2 H

Période de Ressuyage  
(en fonction de la texture)

5 -  
30 Jours

Enlèvement de grand massifs  
du système de ressuyage

1/2 H

Coupure en deux des grands massifs    Obtention des Modèles Text.

Dessechement à l'air



Variable

Uniformisation de  $W_i$  à l'intérieur  
du modèle (5°C)

48 H

Les monolithes ainsi obtenus sont ensuite découpés perpendiculairement à l'axe du cylindre, de façon à obtenir des massifs cylindriques d'une épaisseur comprise entre 3.0 et 3.5 cm. Les parties extrêmes du cylindre initial sont utilisées pour la mesure de l'humidité.

Les massifs issus du découpage sont alors desséchés par évaporation et amenés à une teneur en eau moyenne correspondant à la valeur recherchée.

Pour ce faire, ils sont placés dans l'atmosphère du laboratoire, les deux faces planes étant disposées verticalement et la surface cylindrique étant protégée de l'évaporation par couverture au moyen d'une feuille d'aluminium.

Enfin, les massifs sont placés dans des boîtes étanches, au réfrigérateur, pendant 48 h, de façon à réduire les différences éventuelles de teneur en eau induites par l'évaporation.

### II.3. Réhumectation

Le dispositif de réhumectation est présenté à la figure 2.

Le sable qui constitue le corps poreux supportant l'échantillon a été choisi de façon à rester saturé dans la gamme de succions appliquées lors de la réhumectation d'une part, et à assurer un débit non limitant qui permette de maintenir la valeur de potentiel imposé à la base de l'échantillon d'autre part.

Les billes de polystyrène expansé entourant l'échantillon ont une double fonction :

- limiter l'évaporation par la paroi du massif cylindrique,
- assurer un frettage mécanique, reproductible pour tous les échantillons et évitant l'effondrement des massifs sous l'effet de la gravité.

Dans le cas de la réhumectation sous vide, ce dispositif ne pouvait être utilisé, et les massifs ont été réhumectés avec le matériel décrit figure 3.

La réhumectation est poursuivie jusqu'à ce que les quantités d'eau absorbée en 24 h deviennent négligeables, c'est-à-dire le volume d'eau sorti de la burette d'alimentation soit égal, à l'incertitude près, au flux d'évaporation résultant des défauts d'étanchéité du dispositif. Bien que les précautions prises aient permis de rendre celui-ci très faible ( $< 1 \text{ cm}^3/\text{g}$ ), il peut difficilement être rendu totalement négligeable, en particulier du fait de la nécessité d'éviter la compression de l'atmosphère dans la cellule de réhumectation.

Suivant les matériaux et leur humidité initiale, la durée d'obtention de ce quasi équilibre est très variable, de 1 à 20 jours. Dans certains cas, avec des massifs initialement continus et saturés, la vitesse d'humectation est trop faible pour qu'il soit possible pratiquement d'approcher l'équilibre. Nous y reviendrons.

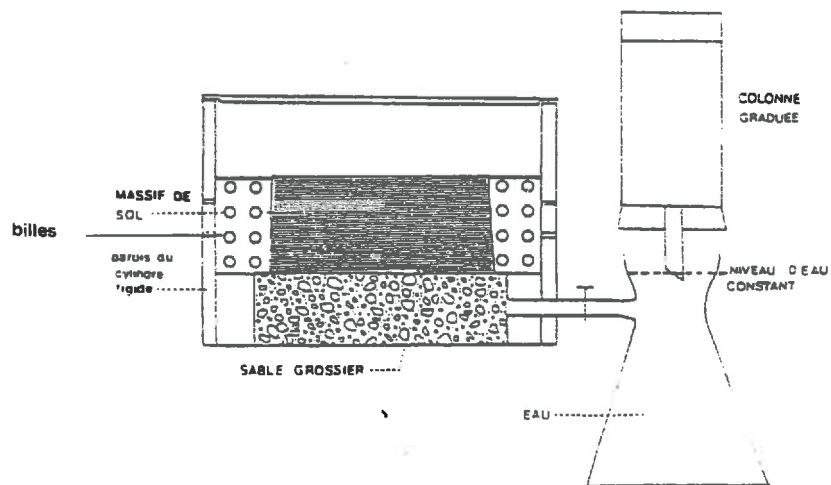


Figure 2 : Schéma du dispositif de réhumectation

HUMECTATION SOUS VIDE

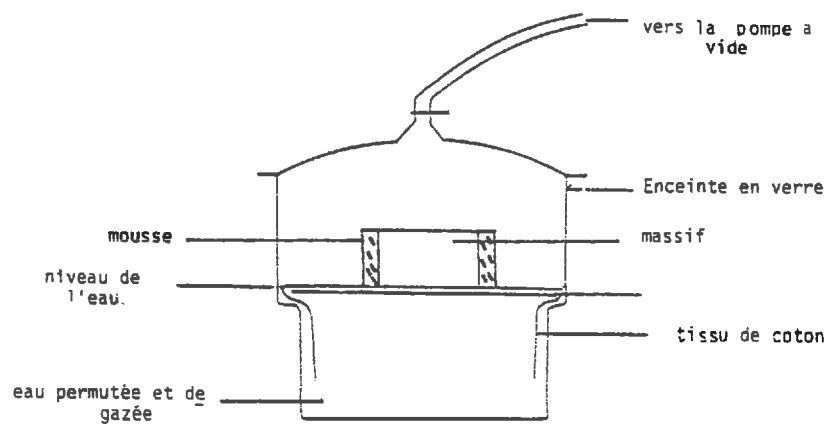


Figure 3 : Schéma du dispositif de réhumectation sous vide

## II.4. Mesures

### II.4.1. Absorption d'eau

La quantité d'eau absorbée par le massif est déduite de la lecture périodique du niveau dans la burette d'alimentation avec une précision de  $\pm 1 \text{ cm}^3$ . La pesée finale du massif humide permet d'évaluer l'évaporation pendant la durée totale de la réhumectation. La cinétique d'absorption est corrigée en admettant que le flux d'évaporation est constant au cours du temps. Cette hypothèse est vraisemblable dans la mesure où l'ensemble du dispositif est placé dans une pièce climatisée.

Toutefois, l'ouverture indispensable des cellules pour la prise de vue photographique induit une évaporation rapide dont il est impossible de tenir compte.

### II.4.2. Observation de la fissuration

Chaque massif est observé périodiquement et durant toute la phase de formation des fissures sa face supérieure est photographiée lorsque des modifications de la morphologie fissurale sont perceptibles.

La photo 1 montre les conditions de la prise de vue photographique. Les caractéristiques du matériel photographique utilisé figurent à l'annexe 2. Les négatifs photographiques utilisés sont ensuite numérisés et les images obtenues traitées sur l'Analyseur d'image.

Les variables mesurées sont les suivantes :

- Longueur totale des fissures par unité de surface
- Granulométrie des fissures en longueur
- Porosité fissurale
- Granulométrie des fissures en porosité.

L'organigramme de la méthode retenue pour l'extraction des fissures et des éléments structuraux des images figure à l'annexe 3.

Les photographies 2 et 3 illustrent ses performances. On constate que la transformation de l'image photographique initiale en image binaire contenant seulement, et toutes les fissures (ou éléments structuraux) apparaît globalement satisfaisante, mais induit aussi certains biais dont il est difficile d'évaluer visuellement l'importance quantitative. Il s'agit :

Photo 1 : Système d'humectation

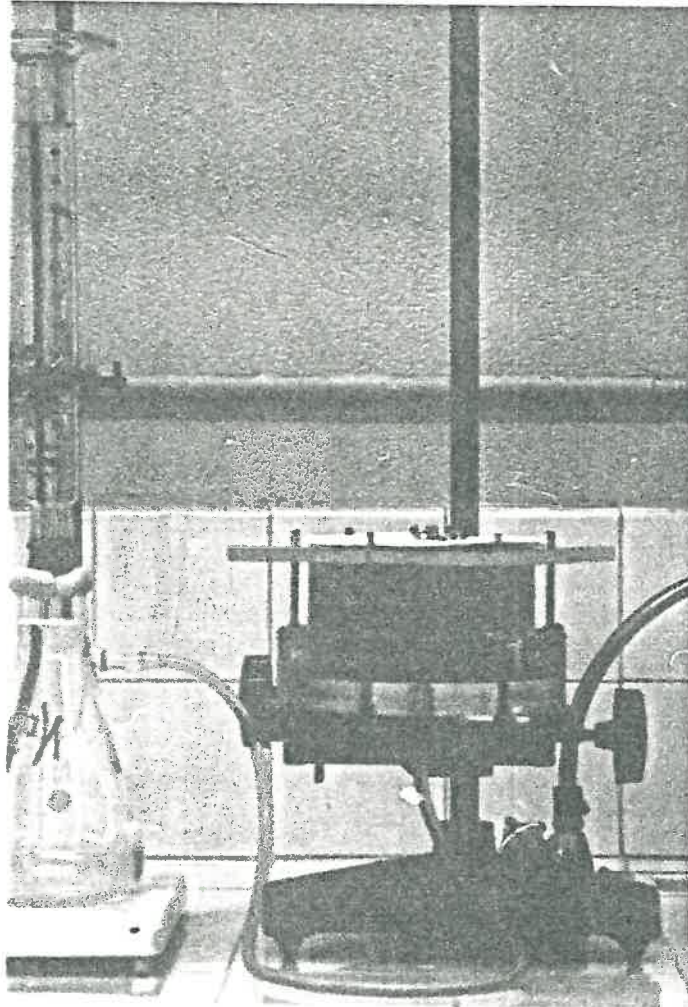


Photo 2 : Image photographique d'un massif fissuré ( $w_i = 5,6\%$ )

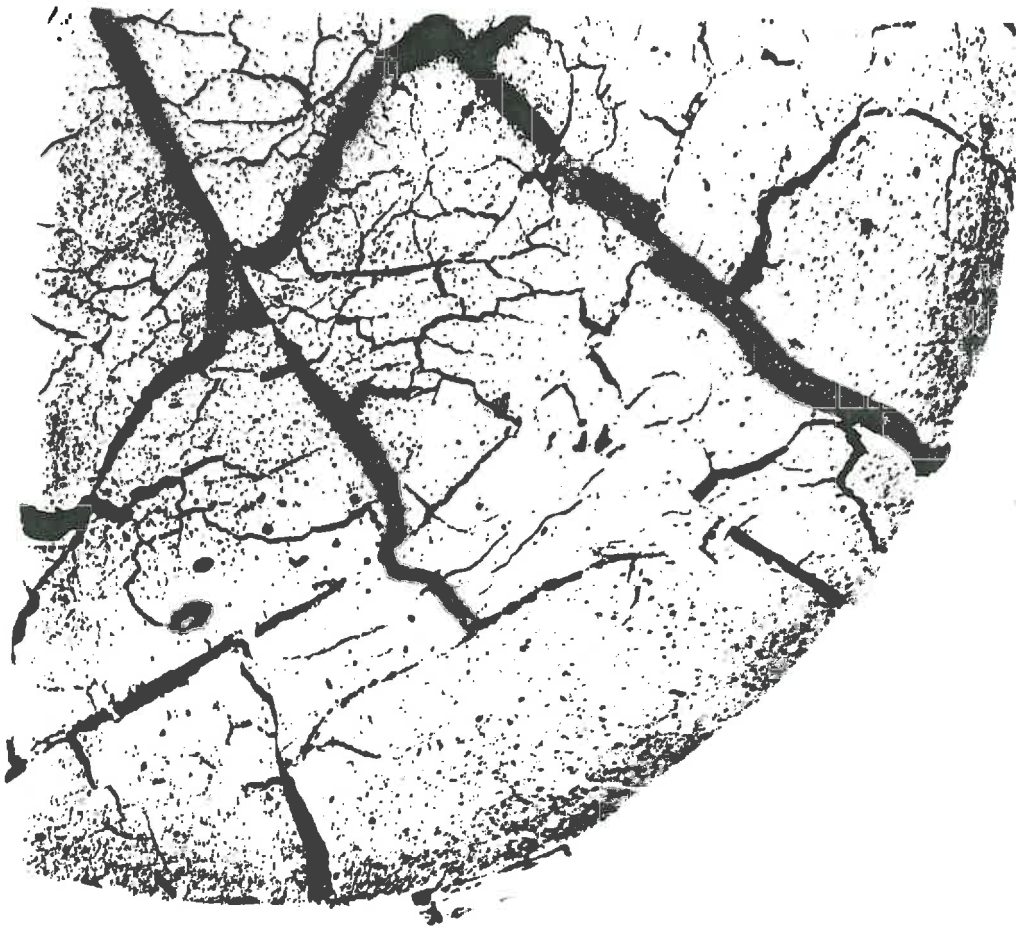


Photo 3 : Image numérique transformée pour la mesure



- de la disparition d'une partie des fissures les plus fines,
- de la présence de "bruits" résultant de l'impossibilité d'éliminer certains traits de l'image initiale, indiscernables des fissures : stries provoquées par le polissage des échantillons, taches sombres, telles que les concrétions présentes dans le matériau limoneux.

Faute de méthodes de référence, il est impossible de quantifier ces biais. On peut seulement affirmer que la longueur de fissures fines est inéluctablement sous évaluée, et doit être considérée comme une borne inférieure.

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

Les teneurs en eau ont toutes été déterminées par la méthode gravimétrique avec séchage à l'étuve à 105°C pendant 48 h.

Les méthodes de mesure des diverses densités sont :

- la méthode au pétrole pour les agrégats jusqu'à un volume unitaire de l'ordre du  $\text{cm}^3$  (MONNIER et al., 1973),
- la mesure directe du diamètre et de l'épaisseur pour les massifs cylindriques au moyen d'un pied à coulisse ayant une précision de 1/20e de mm,
- la méthode à la paraffine (STENGEL, 1981) pour les monolithes humides en cours de ressuyage.

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

Les données permettant d'établir la relation potentiel-teneur en eau ont été obtenues sur des échantillons préparés de façon strictement identique aux massifs utilisés pour étudier la fissuration. Afin de réduire les durées d'équilibre, on a opéré avec des volumes plus petits, en découpant des cubes de 1 à 2  $\text{cm}^3$  de volume. Dans tous les cas, ces échantillons ont été initialement séchés à l'air et la relation potentiel-teneur en eau obtenue correspond à la réhumectation.

Pour les potentiels les plus élevés ( $> -10$  mbar), la réhumectation a eu lieu sous vide, avec le dispositif décrit précédemment pour l'étude de la fissuration.

Pour les valeurs plus faibles du potentiel, la réhumectation a été réalisée sur des tables à dépression.

Les durées d'équilibre ont été de l'ordre de la semaine, contrôlées par la stabilité de la teneur en eau.



Les précautions prises (dimension réduite des échantillons et humectation sous vide poussée) ont permis, dans tous les cas, d'éviter l'apparition de fissures visibles. Par rapport aux massifs fissurés, les teneurs en eau mesurées peuvent donc être considérées comme celles de volumes continus. Des teneurs en eau plus élevées, mesurées sur des massifs fissurés, résultent donc de la présence d'eau retenue dans les fissures.

Toutefois, pour utiliser ces données dans le calcul de la quantité d'eau localisée dans les fissures, nous devons formuler l'hypothèse que la relation potentiel-teneur en eau ( $\psi(w)$ ) en réhumectation est indépendante de l'état de dessiccation initial. Plusieurs auteurs ont montré que sur des matériaux subissant une première dessiccation (matériaux dits "vierge"), la relation  $\psi(w)$  en réhumectation dépendait du potentiel atteint lors de la dessiccation (TESSIER, 1984, en particulier). Il s'agit donc d'une hypothèse forte. Des travaux postérieurs devront permettre de s'en affranchir par l'obtention des mesures correspondant à chaque humidité initiale. La durée d'obtention des résultats expérimentaux rendait difficile l'acquisition des données pour chaque humidité initiale dans le cadre de ce stage.

## II.6. Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés ont été prélevés dans les couches de surface de trois sols choisis en raison de leur composition granulométrique et des propriétés de gonflement qui en résultent. Leurs caractéristiques analytiques figurent au tableau 1.

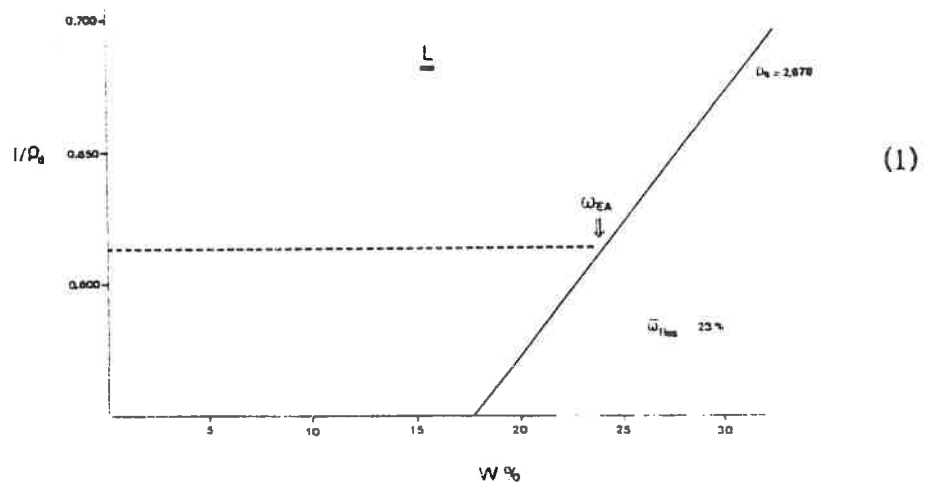
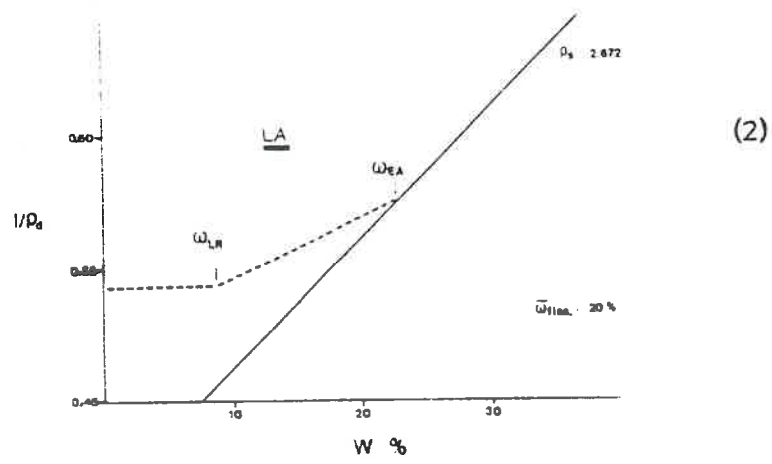
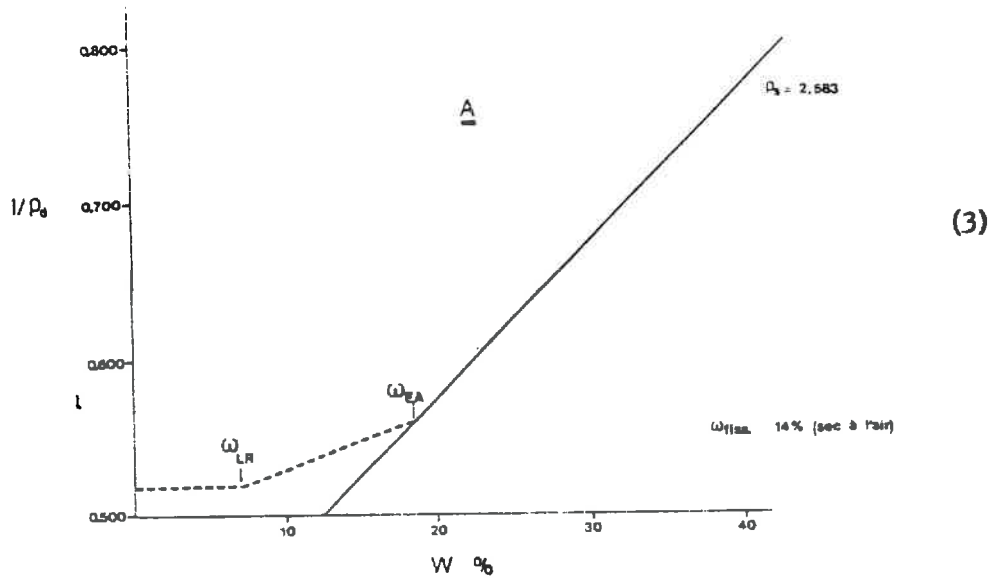
Leurs propriétés de gonflement sont décrites par leur courbe de gonflement (figure 4). Celles-ci sont très différentes et représentent deux des trois types de courbes décrites par STENGEL (1982) en fonction de la teneur en argile :

- la courbe (1) (Echantillons limoneux) correspond aux matériaux dit "non gonflants". Elle est caractérisée par l'absence de retrait résiduel et un gonflement limité en domaine saturé (gonflement "normal") de faible amplitude,
- les courbes 2 et 3 (texture limono argileuse et argileuse) représentent deux modalités contrastées des courbes de matériaux caractérisés par une forte interaction argile-squelette. Elles présentent une amplitude de retrait résiduel différente, celle-ci étant maximale pour les textures dont la teneur en argile est voisine de 25 à 30 % (PINOCHET, 1981). La courbe 3, quant à elle, est très proche de celle qu'on observe

Origine	Les Vignères	Boigneville	Marçon
Classe texturale (GEPPA)	Argileux A	Limons Argileux LA	Limons L
< 2 µm	529	295	114
2-20 µm	340	292	295
20-50 µm	61	356	459
50-200 µm	56	61	102
200-2000 µm	14	16	30
Carbone Organique %	12,5	9,4	8,1
Calcaire Total %	26,4	0	0
C.E.C. meq/100 g	22,6	16,9	5,7
pH	8,2	7,5	6,7

Tableau 1 - Composition des matériaux étudiés.

Figure 4 : Courbes de gonflement des matériaux étudiés



pour des matériaux à comportement d'argile pure, pour lesquels le retrait résiduel est déterminé directement par les propriétés de l'argile.

On dispose donc d'échantillons dont les propriétés de gonflement retrait recouvre une large proportion de la gamme de variations probables, nous permettant d'étudier les relations entre ces propriétés de gonflement et la fissuration à l'humectation.

### III. RESULTATS

#### III.1. Influence de la texture sur la fissuration à l'humectation

##### III.1.1. Gonflement des Echantillons

Le tableau 2 montre l'amplitude des accroissements de teneur en eau qu'ont subis les massifs soumis à réhumectation et les gonflements correspondants, calculés au niveau textural, c'est-à-dire sans tenir compte du volume des fissures. Conformément aux résultats antérieurs sur le matériau A, les teneurs en eau en fin d'humectation apparaissent décroissantes quand l'humidité initiale  $w_i$  augmente. Dans certains cas, malgré des durées très prolongées de contact avec l'eau à potentiel nul, les valeurs de teneur en eau finale  $w_f$  restent inférieures aux valeurs d'équilibres calculées à partir de la courbe de potentiel.

##### III.1.2. Intensité de la fissuration

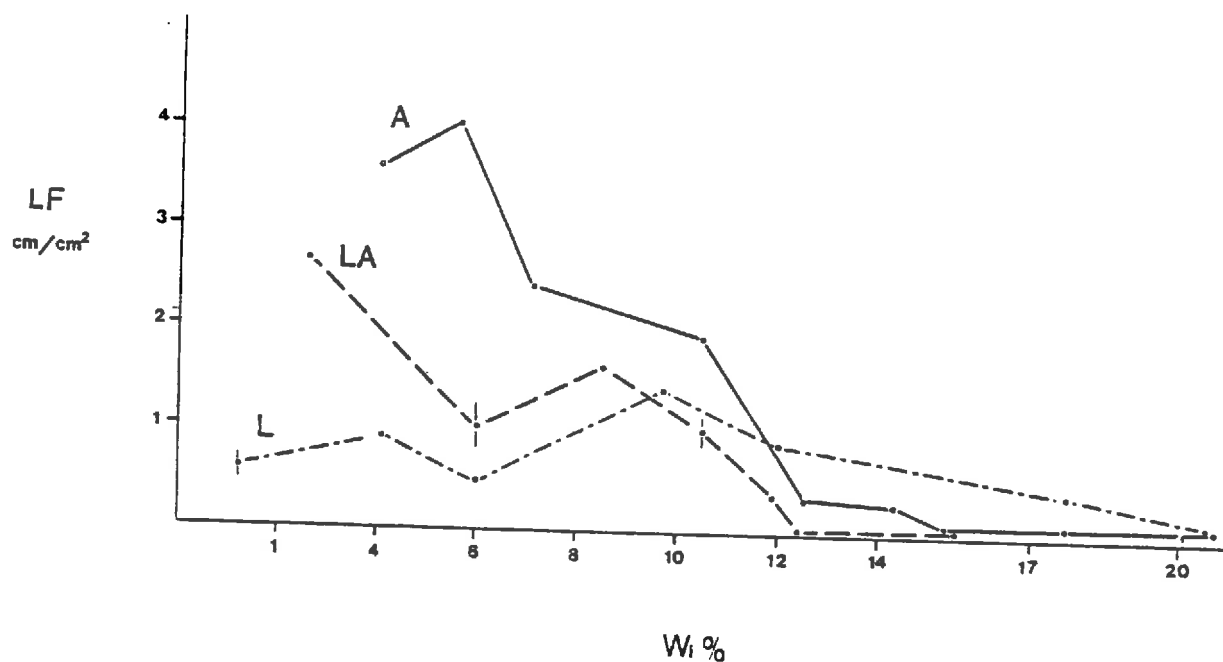
Les longueurs de fissures par unité de surface et la porosité correspondante pour les trois matériaux sont présentées aux figures 5 et 6. Les variations de chacune de ces deux caractéristiques de la fissuration avec l'humidité initiale des massifs sont voisines pour chacun des matériaux. L'épaisseur des fissures et la porosité qui en résulte étant sous la dépendance des conditions mécaniques imposées à la périphérie des massifs, apparaissent plus spécifiquement liées aux conditions expérimentales particulières que nous avons choisies. L'essentiel de l'interprétation portera donc sur la longueur surfacique  $L_p$ .

Par comparaison avec les résultats concernant le matériau argileux, déjà décrit précédemment par STENGEL et BOURLET (1987), les deux matériaux limono argileux LA et limoneux L se différencient notablement.

	N° du Massif	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Teneur en eau initiale $w_i$ %	4,0	5,6	7,1	10,1	12,5	14,3	15,3	16,3	17,7	20,7	27,2
	Teneur en eau finale $w_f$ %	36,4	39,7	33,0	34,0	30,1	20,7	23,8	32,2	25,0	25,0	39,5
A	Teneur en eau d'équilibre %	28,0										
	Potentiel de gonflement %	26,3	26,1	25,7	24,3	22,8	21,6	20,6	19,5	17,5	12,4	1,3
	Durée d'humectation h	72	72	72	72	72	72	72	330	72	72	279
	Teneur en eau initiale $w_i$ %	2,6	2,6	6,0	6,1	8,5	10,4	10,5	11,0	11,9	12,4	15,5
	Teneur en eau finale $w_f$ %	26,7	28,3	26,9	26,6	26,1	29,3	25,3	23,4	27,1	19,9	22,3
IA	Teneur en eau d'équilibre %	25,7										
	Potentiel de gonflement %	18,3	18,3	17,1	17,0	16,6	15,5	15,5	15,0	14,3	7,3	4,4
	Durée d'humectation h	106	141	212	245	214	311	288	287	311	366	334
	Teneur en eau initiale $w_i$ %	1,2	1,2	4,1	6,0	9,7	12,0	17,7	20,5			
	Teneur en eau finale $w_f$ %	30,0	28,8	30,9	29,6	27,8	27,7	27,8	24,3			
L	Teneur en eau d'équilibre %	25,4										
	Potentiel de gonflement %	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6			
	Durée d'humectation h	286	189	216	122	191	217	426	167			

Tableau 2 - Caractéristiques initiale et finale des massifs réhumectés.

**Figure 5 : Influence de l'humidité initiale des massifs sur la longueur de fissures formées à l'humectation**



**Figure 6 : Influence de l'humidité initiale des massifs sur la porosité des fissures formées à l'humectation**

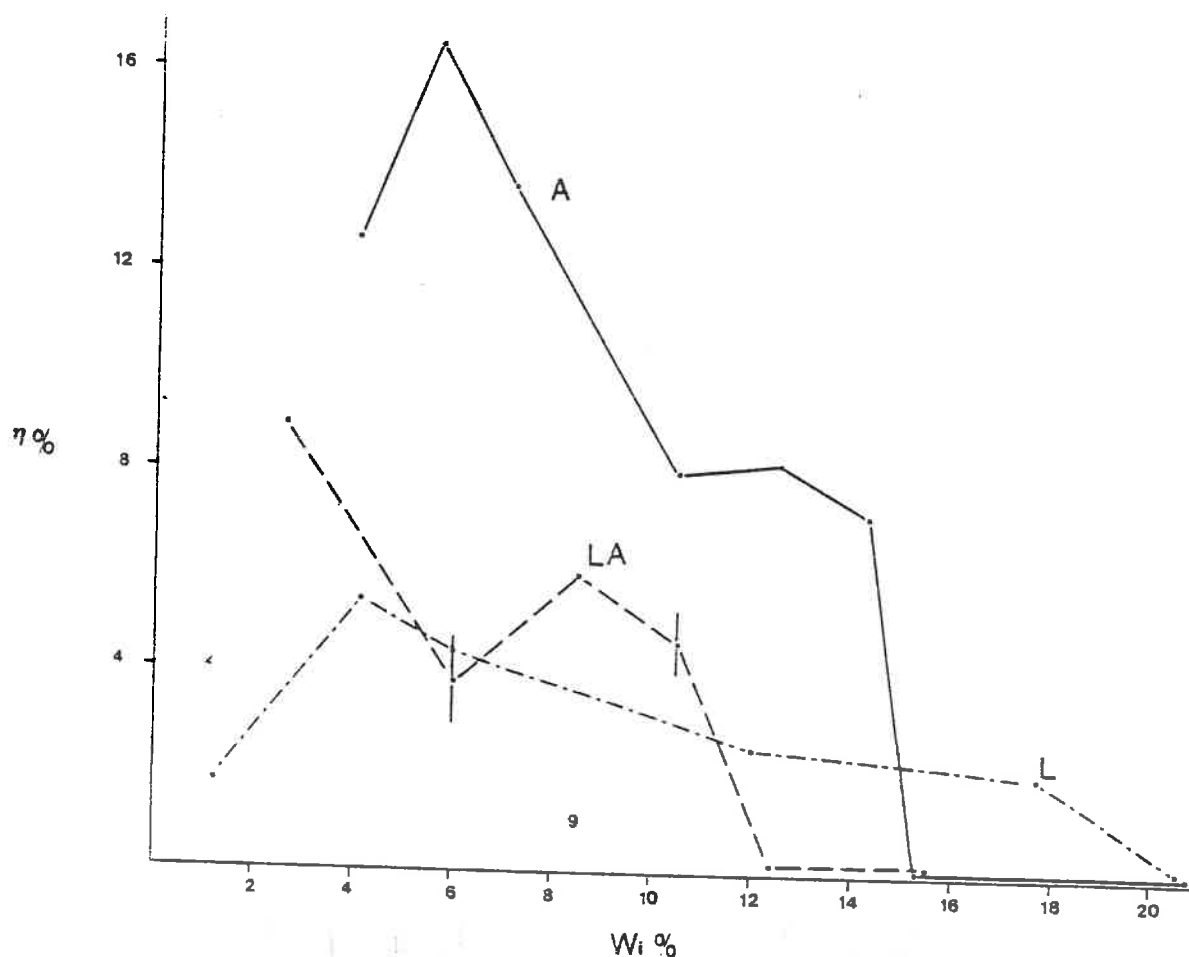


Photo 4 : Massifs argileux en fin d'humectation

a  $w_i = 5,6$

b  $w_i = 10,5$

c  $w_i = 14,3$

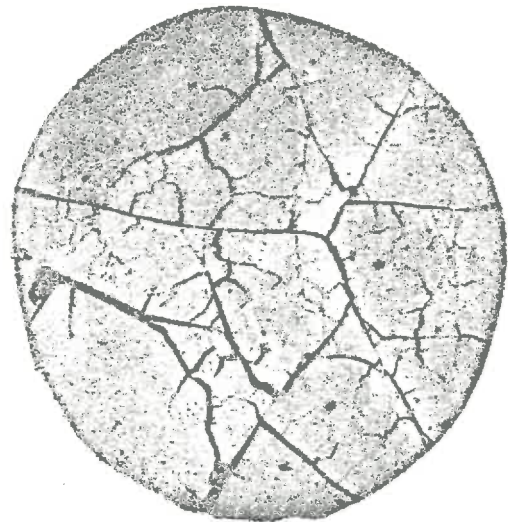


Photo 5 : Massifs limono-argileux en fin d'humectation

a  $w_i = 2,6$

b  $w_i = 8,5$

c  $w_i = 11,9$



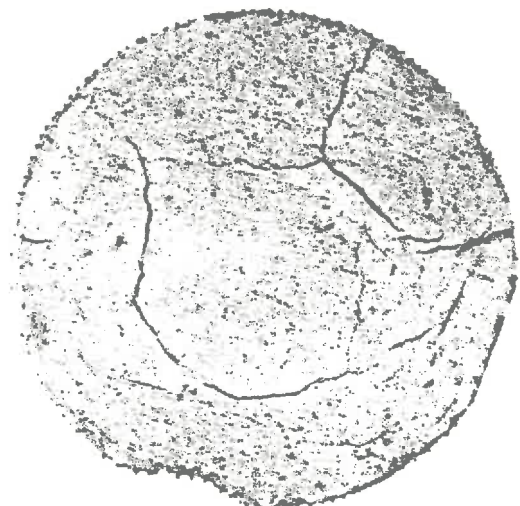


Photo 6 : Massifs limoneux en fin d'humectation

a  $w_i = 1,2$

b  $w_i = 6,0$

c  $w_i = 17,7$



Dans le cas du matériau LA, la longueur de fissure varie en fonction de l'humidité initiale de façon très analogue au matériau argileux. On observe une décroissance de la longueur de fissures formées entre l'état sec à l'air et une teneur en eau d'environ 12 %, à partir de laquelle elle devient très voisine de 0. Cette teneur en eau seuil se situe à une valeur apparemment proche de la limite de retrait  $w_{LR}$ . L'incertitude de la détermination expérimentale de  $w_{LR}$  n'autorise pas cependant à considérer cette localisation relative comme réellement établie de façon sûre. Quant aux valeurs absolues, le classement des courbes est conforme à ce qu'on pouvait attendre de l'observation du comportement structural des deux sols en place et des relations habituelles entre teneur en argile et intensité de la fissuration. A humidité initiale égale, la longueur de fissures formée est environ deux fois plus élevée dans le matériau A. Malgré le caractère arbitraire du système de fretage adopté, notons à propos de la porosité observée pour les échantillons les plus secs qu'elle correspond aux valeurs maximales de porosité fissurale qu'on observe in-situ sur les sols dont ont été tirés les échantillons, en l'absence de travail du sol (pour le sol de BOIGNEVILLE, STENGEL 1983, pour le sol des Vignères STENGEL 1985).

Dans le cas du matériau L, le premier résultat à souligner est l'existence de la fissuration à l'humectation, dont la réalisation était imprévisible pour ce type de matériau dit "non gonflant" c'est-à-dire dont le gonflement est très faible et limité au domaine saturé. La variation de  $L_F$  avec  $w_i$  est différente des deux cas précédents. La décroissance ne paraît exister de façon indubitable que lorsque  $w_i$  est proche de  $w_{AE}$  teneur en eau au point d'entrée d'air. Pour les valeurs plus faibles de  $w_i$ , le manque de répétitions empêche de conclure avec sécurité sur la réalité des fluctuations enregistrées et l'apparence d'un maximum au voisinage de  $w_i = 10$  %. Par rapport aux possibilités de gonflement, tous ces massifs sont a priori identiques et il paraît cohérent d'assimiler cette partie de la courbe à une horizontale jusqu'à obtention de résultats expérimentaux supplémentaires. En tout état de cause, la décroissance moins rapide avec  $w_i$  induit un croisement de courbes, et donc un domaine d'humidité où la fissuration du matériau L apparaît plus intense que celle du matériau argileux. Cet effet n'est pas strictement anecdotique, les longueurs de fissures formées étant alors de l'ordre du  $cm.cm^{-2}$  et donc loin d'être négligeables. Le constat est de même nature lorsqu'on considère la porosité.

Nous avons présenté à titre essentiellement indicatif les données concernant l'épaisseur des fissures, épaisseur moyenne (figure 7) et importance relative de la classe d'épaisseur la plus fine (figure 8).

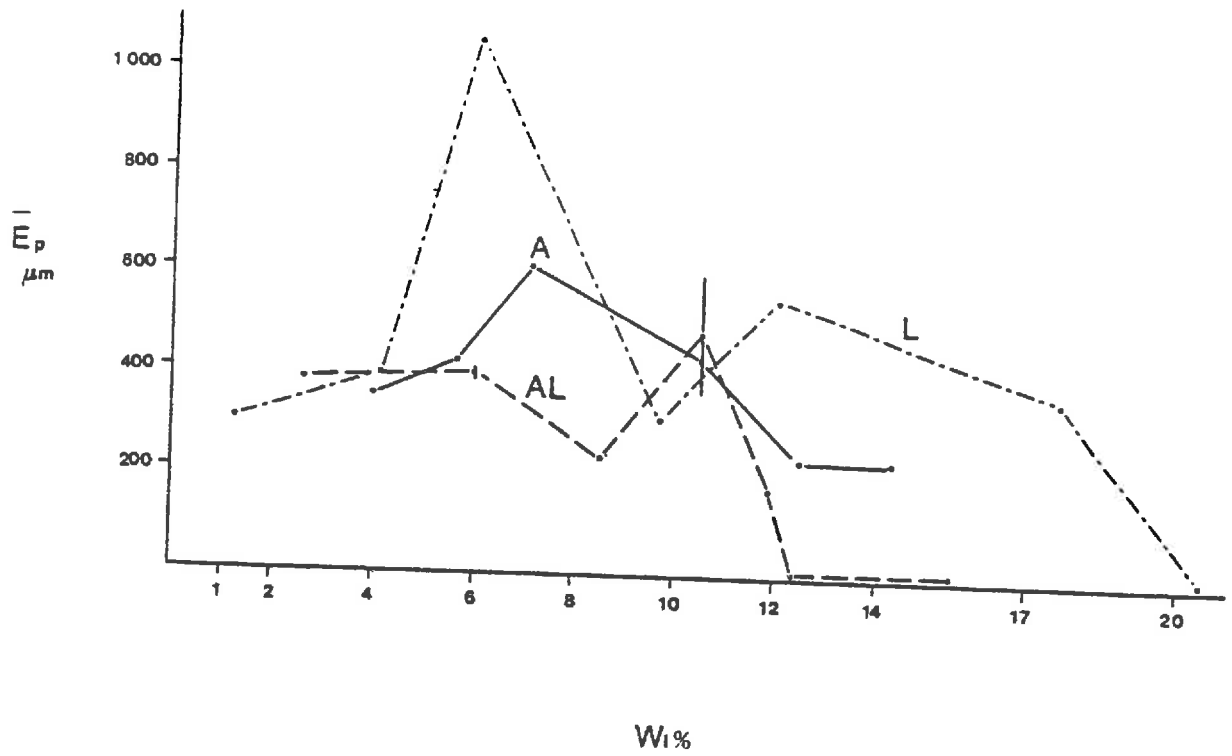


Figure 7 : Influence de l'humidité initiale des massifs sur l'épaisseur moyenne des fissures formées à l'humectation

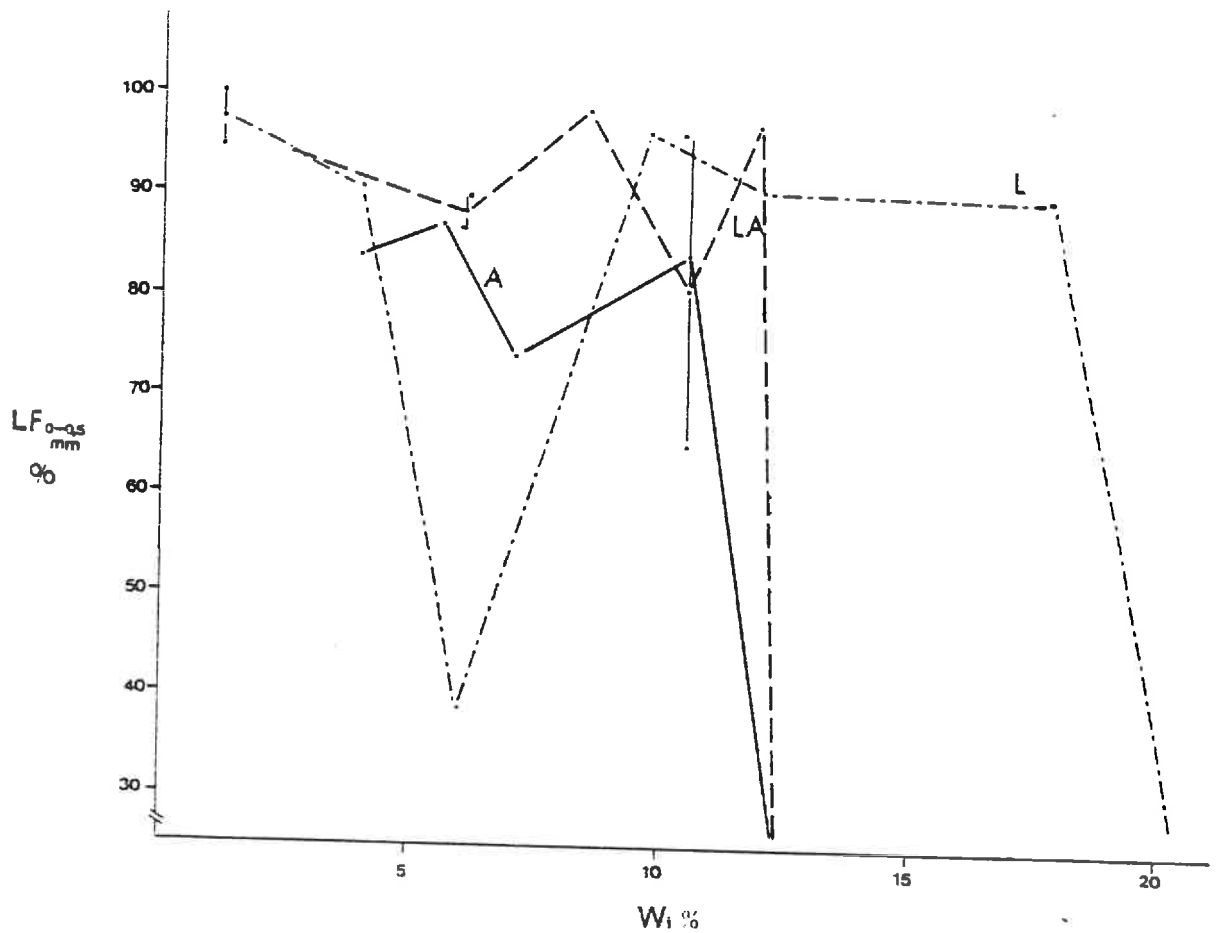


Figure 8 : Influence de l'humidité initiale des massifs sur la proportion de fissures fines en % de la longueur totale

Outre qu'elles sont contingentes aux conditions de frettage des massifs, comme nous l'avons noté à propos de la porosité, elles sont également très grossières en ce qui concerne l'estimation de la largeur des fissures les plus fines. Celle-ci est limitée par la résolution de l'analyseur d'image : résolution de la caméra vidéo et de la numérisation en 512 x 512 pixels. Elle l'est également par la procédure d'analyse elle-même, le pas d'estimation des épaisseurs étant suivant les images compris entre 250 et 400  $\mu\text{m}$ .

Les résultats montrent cependant globalement que la fissuration développe surtout un ensemble de fissures fines, dont l'épaisseur moyenne est de l'ordre de la centaine de  $\mu\text{m}$ . Le résultat apparaît peu dépendant de la texture des matériaux. La classe des fissures les plus fines ( $e_f < 500 \mu\text{m}$ ) représente une proportion généralement supérieure à 80 % de la longueur totale. Cette proportion ne diminue notablement que dans le cas du matériau A pour  $w_i$  supérieur à 10,5 %. Le cas particulier de l'échantillon L pour  $w_i = 6,0 \%$  apparaît à cet égard totalement hétérogène. La morphologie fissurale qu'il présentait était réellement très différente des autres, sans qu'il soit possible d'interpréter ce résultat autrement qu'en mettant en cause la reproductibilité de la préparation des massifs.

### III.1.3. Relation avec le potentiel de gonflement

La cause du phénomène de fissuration étant la déformation induite par l'humectation, plus précisément ses gradients, et/ou les contraintes qui en sont la cause, on peut tenter de comparer l'effet des variations de l'humidité initiale et de la texture sur la base de l'amplitude de gonflement qu'elles déterminent.

Le potentiel de gonflement que nous avons calculé est défini par la relation suivante :

$$G = \frac{V_w - V_i}{V_i}$$

où  $V_i$  : est le volume initial des massifs

$V_w$  : leur volume en fin d'humectation, non compris le volume de fissures

soit 
$$G = \frac{\rho_d}{\rho_{di}} - 1 \quad \text{exprimé en \%}$$

$\rho_{di}$  : masse volumique initiale

$\rho_d$  : masse volumique texturale en fin d'humectation, calculée à partir de l'humidité d'équilibre à  $\psi = -2 \text{ mbar}$  (cote de la partie centrale des massifs) et des valeurs de densités mesurées sur des volumes non fissurés à cette même humidité.

Les résultats sont présentés aux figures 9 et 10. Cette fois encore les matériaux L d'une part, LA et A d'autre part se différencient, comme pouvait le laisser prévoir leur courbe de gonflement respective. On observe pour ces deux derniers une croissance très marquée de  $L_F$  et  $n_f$  au-delà d'une valeur seuil de G. Pour L, G étant indépendant de  $w_i$ , les points sont distribués sur une verticale. Les courbes correspondant au matériau L et LA sont elles-même très sensiblement décalées. La variation du potentiel de gonflement entre échantillons de texture et/ou d'humidités différentes ne peut donc pas être considérée comme la variable explicative unique des différences d'estimation de la fissuration.

Ceci peut être imputé en partie au fait que certains des échantillons initialement humides n'ont jamais atteint l'humidité d'équilibre et que donc le potentiel de gonflement est resté supérieur au gonflement réel. Cela est vrai surtout pour le matériau LA. Toutefois, les différences observées entre matériau pour les cas où l'on peut admettre que le potentiel de gonflement a été effectivement réalisé suffisent à justifier la conclusion qui précède.

En revanche, si l'on se place dans la gamme des humidités  $w_i$  inférieures à la limite de retrait pour les matériaux A et LA, on a, pour une humidité initiale donnée, une intensité de fissuration croissante avec le potentiel de gonflement des différents matériaux. Si l'on considère l'état initial sec à l'air par exemple, on a une relation d'allure linéaire entre  $L_F$  et G. Cette relation est conservée si l'on remplace la variable G par la variable teneur en argile (figure 11). D'autres variables que le potentiel de gonflement doivent être prises en compte pour analyser le phénomène de fissuration à l'humectation, mais le classement de l'aptitude à la fissuration de matériaux différents par leur gonflement potentiel (entre l'état sec et un potentiel voisin de zéro) apparaît justifié. Ceci à condition de l'appliquer à des couches de sol où les variations de potentiel de l'eau atteignent cette amplitude.

#### III.1.4. Relations avec la cinétique d'humectation

L'analyse de phénomène de fissuration à l'humectation nécessiterait la connaissance des gradients de potentiel et teneur en eau à l'intérieur des massifs et des pressions de gonflement qui leurs sont associées. Notre dispositif expérimental ne permet pas d'accéder à ces mesures, par ailleurs extrêmement difficiles, pour ne pas dire impossible, dès que la fissuration induit une hétérogénéité horizontale de teneur en eau. Nous ne disposons que des données globales d'absorption d'eau, dont on ne peut tirer que des informations grossières sur les interactions complexes entre transfert d'eau et fissuration.

Figure 9 : Relation entre le potentiel de gonflement et la longueur de fissures

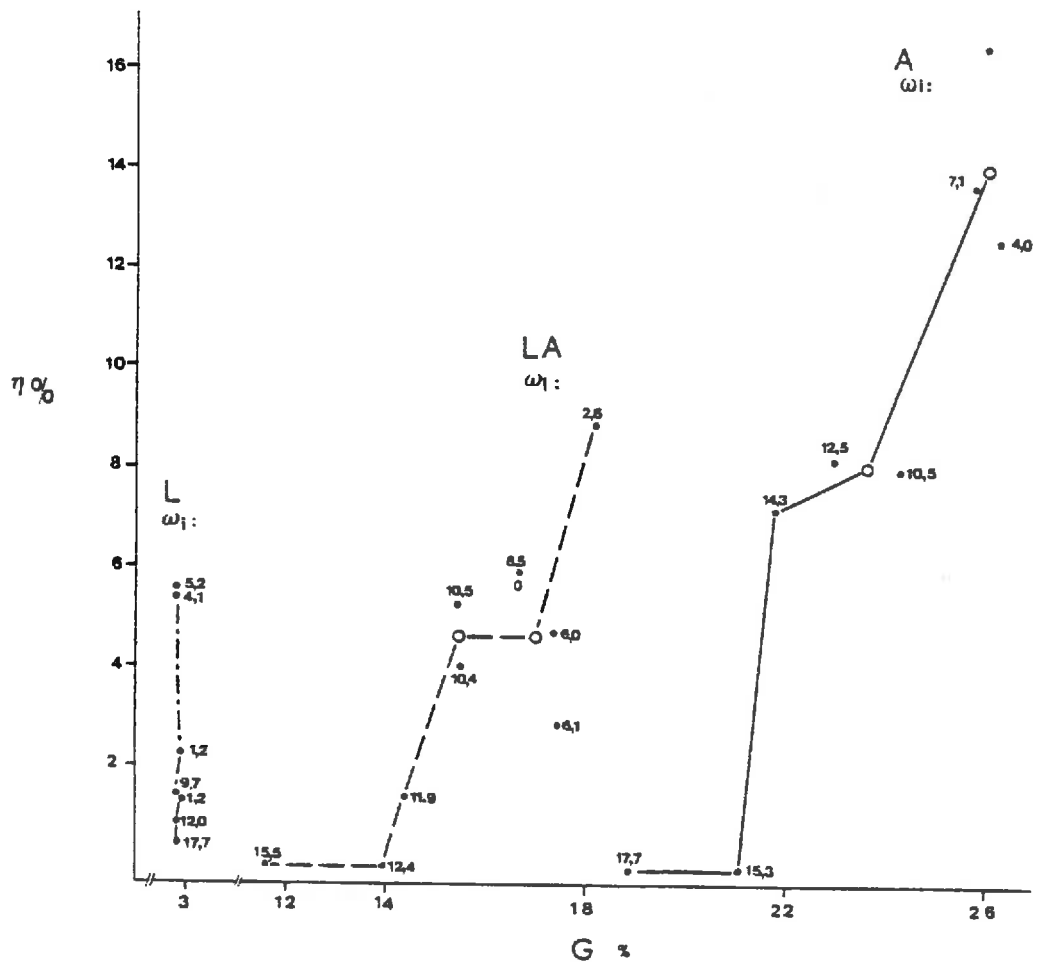
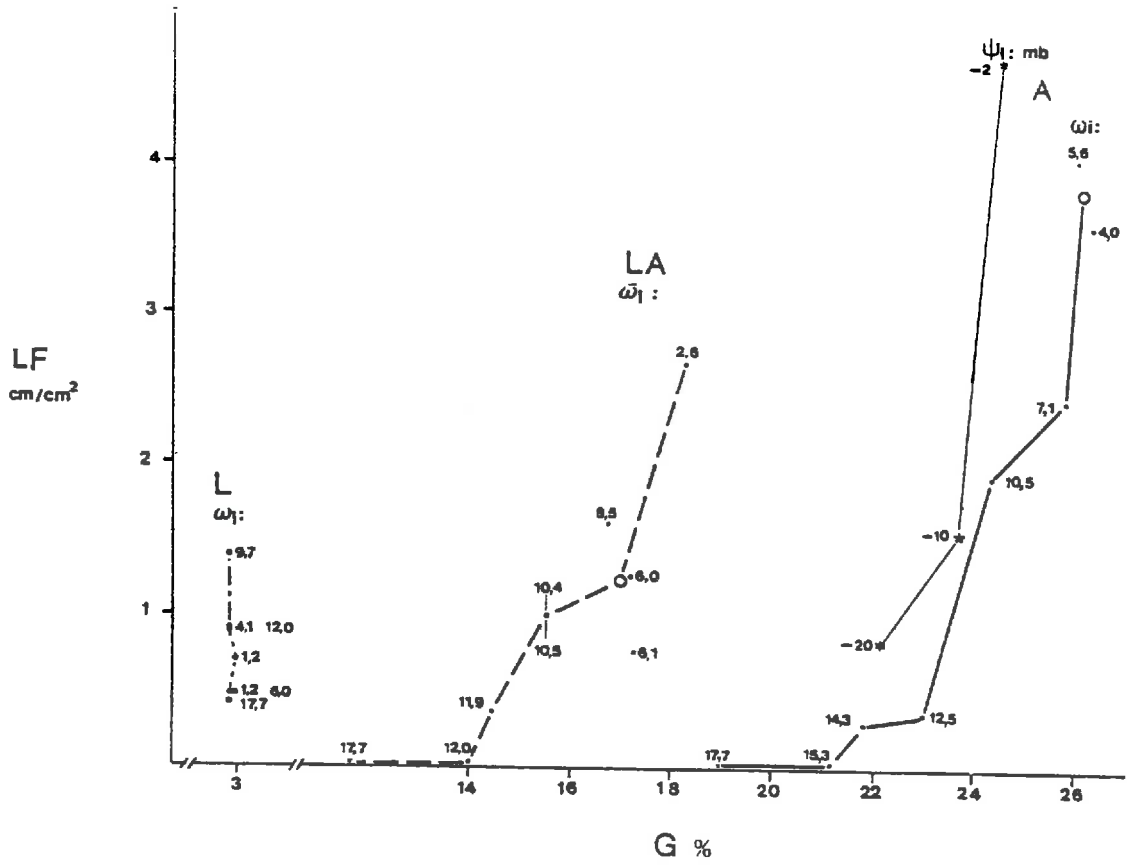
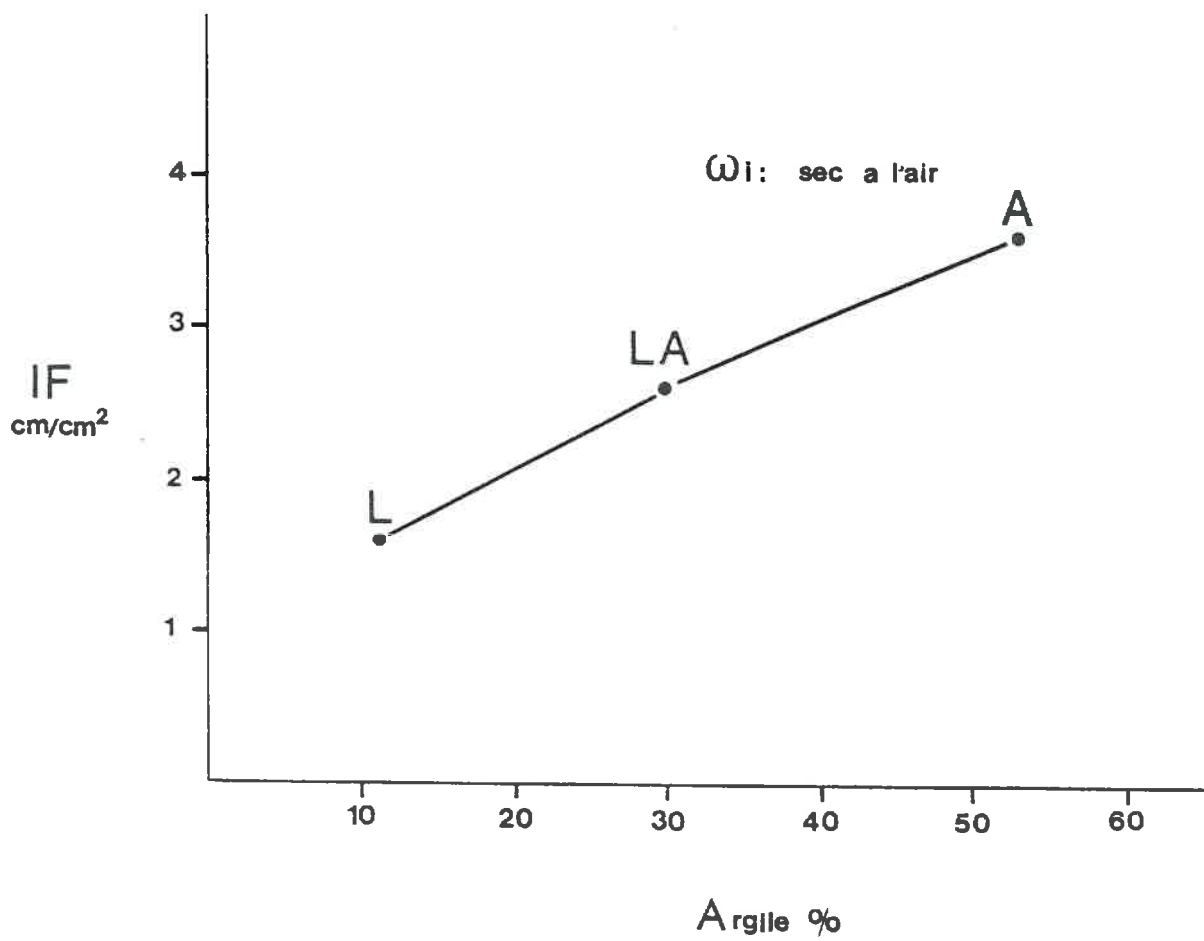


Figure 10 : Relation entre le potentiel de gonflement et la porosité de fissures



**Figure 11 :** Relation entre Teneur en argile et Longueur de Fissures

a) Teneur en eau à la fissuration

Les dates d'apparition des premières fissures à la face supérieure des massifs et les teneurs en eau correspondantes sont indiquées au tableau 3. On constate que pour le matériau L la fissuration a lieu, en général, alors que l'humidité moyenne du massif permet d'admettre qu'il est globalement saturé, ou en tout cas qu'une part importante du volume est saturé. Cela permet de considérer le gonflement normal comme la cause de la fissuration de ce matériau et de négliger le rôle éventuel du gonflement de très faible amplitude, non mesurable, se produisant dans la partie expérimentalement horizontale de la courbe de gonflement.

Pour le matériau A, les premières fissures apparaissent pour des humidités et des temps croissants avec  $w_1$ . Pour les massifs initialement le plus secs, l'humectation des couches inférieures provoque la fissuration des couches supérieures non encore atteintes par le front d'humectation, et la fissuration a lieu en présence d'un très fort gradient de potentiel, résultant de la très faible conductivité hydraulique du matériau continu et sec. Ce processus avait déjà été décrit antérieurement.

Remarquons que les massifs initialement saturés, dont la durée d'humectation a été considérablement allongée par rapport aux travaux antérieurs (elle avait alors été limitée arbitrairement à 72h) ont atteint la teneur en eau d'équilibre. Une quantité très faible de fissures s'y est développée, qui est apparue dans le domaine de gonflement en saturé. Contrairement à ce qu'on observe dans le cas du matériau L, le gonflement en saturé du matériau A, bien que d'amplitude beaucoup plus grand, n'induit qu'une fissuration négligeable.

Pour le matériau LA, l'humidité d'apparition des fissures semble indépendante de  $w_1$ . Par rapport au cas précédent, les temps d'apparition des fissures sont extrêmement élevés et croissent rapidement avec l'humidité initiale.

b) Cinétiques d'humectation

Le commentaire de ces résultats ne peut être abordé sans formuler d'hypothèse sur les variations de la conductivité hydraulique des matériaux continus. Faute de disposer de mesures permettant de connaître la relation  $K(\theta)$  (conductivité hydraulique-teneur en eau volumique), longues et difficiles techniquement, ne serait-ce que qu'à cause de la difficulté d'éviter la fissuration à l'humectation, nous admettrons que la conductivité décroît avec la teneur en argile de nos matériaux. Ceci est conforme aux données classiques sur la relation conductivité-texture, et a peu de chance d'être infirmé dans ce cas particulier, compte-tenu de l'écart important des teneurs en argile, et des caractéristiques communes des squelettes de nos matériaux.



	N° du Massif	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	$w_F$ %	13,6	< 10			16			30,9			28,4
	$t_F$ (h)	0,8	1			5		164				39
IA	$w_F$ %	19		20	21	18	21,5	22	21	21	20	23
	$t_F$ (h)	12	6	50	51	39	146	61	185	112		
L	$w_F$ %	25	22	23	27	19	23	25	22			
	$t_F$ (h)	20	12	6	10	8	42	61	14			

Tableau 3 - Teneur en eau et date d'apparition des premières fissures.

Si nous considérons les cinétiques d'humectation à partir de l'état sec à l'air (figure 12), on constate que leur classement est strictement contradictoire avec cette hypothèse. Pour un gradient de potentiel initial identique, le matériau argileux est celui dont l'humectation est la plus rapide. La plus lente correspond au matériau LA.

L'observation des modalités d'humectation permet d'interpréter ce résultat à partir de la variation supposée de conductivité à l'échelle texturale et du rôle conducteur des fissures formées.

Dans le cas du matériau argileux, la fissuration précoce de la partie sèche des massifs permet un transfert rapide malgré une conductivité texturale très faible. Dans le cas du matériau L, la conductivité texturale élevée assure une part importante du flux d'eau et une infiltrabilité également élevée, malgré une fissuration tardive et n'intervenant que dans le domaine saturé. Pour le matériau LA, la combinaison :

- d'une conductivité texturale réduite par rapport au matériau L du fait de la teneur en argile supérieure,
- d'une fissuration quantitativement plus faible et se produisant à humidité plus élevée que dans le matériau A,

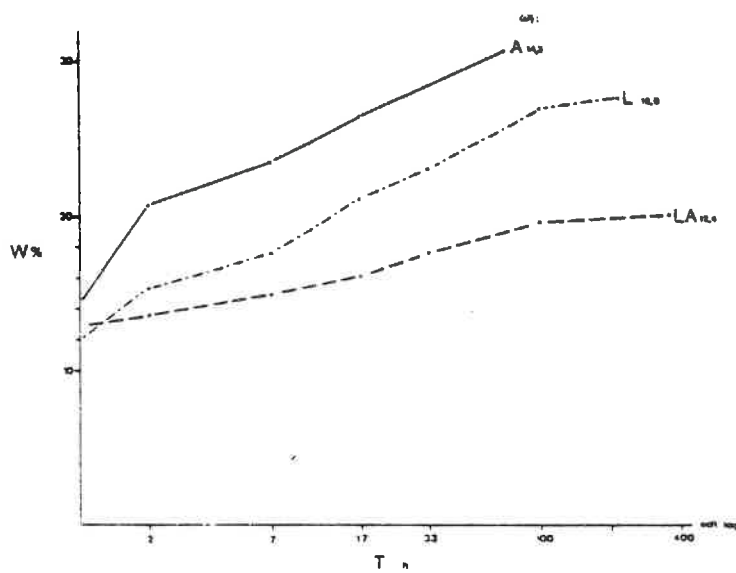
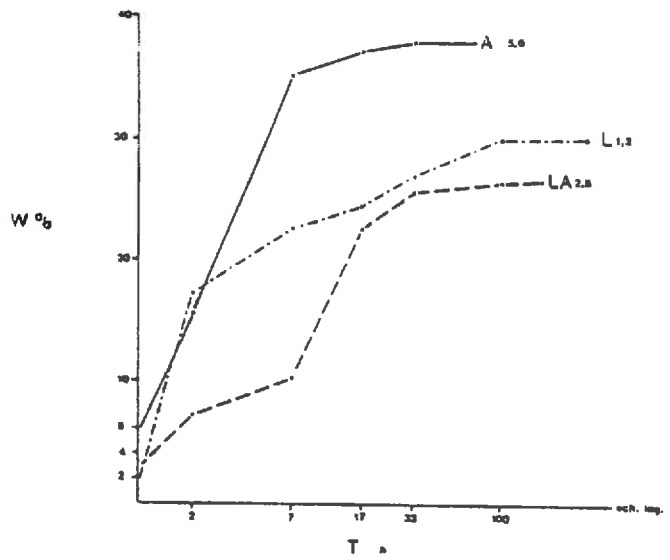
a pour conséquence la cinétique d'humectation la plus lente.

Ce classement est conservé dans tout le domaine des humidités initiales induisant la fissuration des matériaux A et LA (figure 13).

Pour les humidités initiales plus fortes (figure 14), les cinétiques d'humectation deviennent extrêmement lentes dans tous les cas, comme le montrent les deux courbes des matériaux A et L (Nous n'avons fait figurer la courbe du matériau LA à  $w_i = 15,5$  % qu'à titre indicatif, son humidité initiale différant très sensiblement des deux autres, et seulement parce qu'il s'agit de la valeur maximale de  $w_i$  expérimentalement étudiée). Dans ces cas, le rôle de transfert des fissures devient très faible, et la comparaison des différents matériaux pourrait être faite sur la base d'un modèle classique de transfert, à condition de mesurer l'évolution des profils de teneur en eau ou de potentiel. En l'absence des données nécessaires, soulignons seulement que à mesure que  $w_i$  croît, non seulement les flux d'eau absorbés par les massifs décroissent, ce qu'explique la diminution de gradient de potentiel, mais la teneur en eau des massifs initialement les plus secs dépasse au bout d'un certain temps celle des massifs les plus humides. L'interprétation précise de l'effet des variations de  $w_i$  relève de l'analyse de l'influence des conditions initiales dans le modèle de transfert en milieu continu. On peut cependant affirmer que ce résultat est principalement une conséquence de la fissuration qui :

**Figure 12 :**

Cinétique d'humectation des massifs initialement secs à l'air

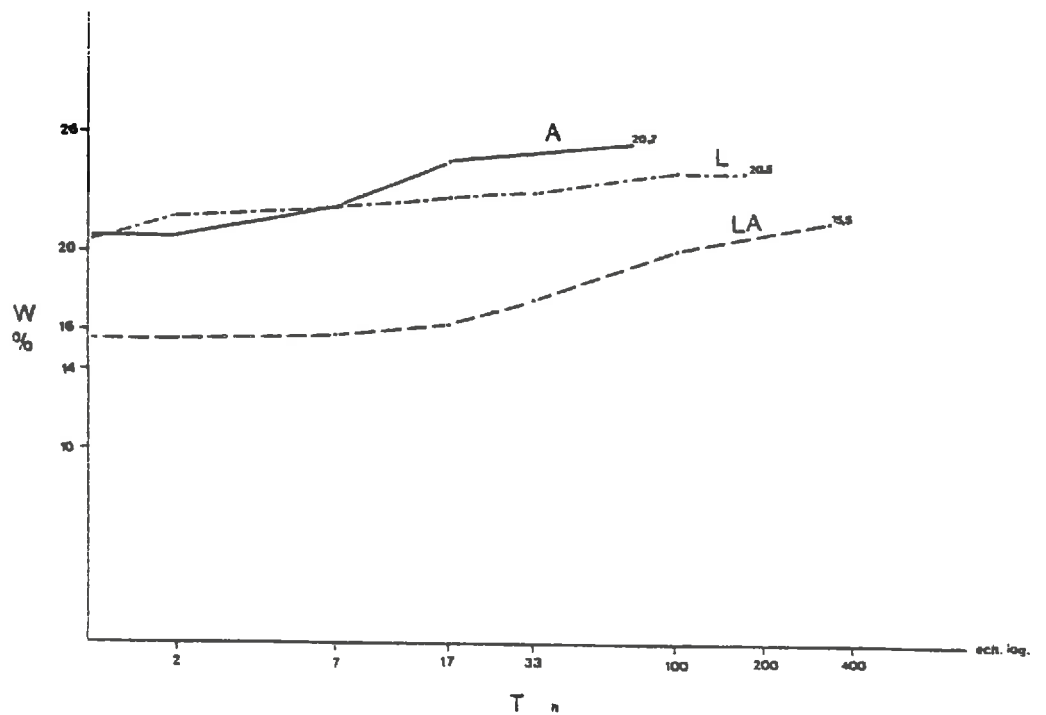


**Figure 13 :**

Cinétique d'humectation des massifs pour  $w_i$  voisin du seuil de fissuration

(A et LA)

**Figure 14 :** Cinétique d'humectation des massifs à  $w_i$  maximal



- accroît considérablement la vitesse d'humectation en jouant le rôle de chemin préférentiel pour l'eau à potentiel voisin de 0,
- élève l'humidité de massif du fait de la rétention dans le volume poral qu'elle induit.

Les interactions entre cinétiques d'humectation et fissuration apparaissent complexes car se produisant dans les deux sens :

- la fissuration modifie la vitesse et les modalités de transfert d'eau par création de chemins préférentiels,
- les modalités d'humectation des volumes non encore fissurés qui en résultent favorisent leur division plus fine.

Ce processus interactif avait été décrit sur le matériau A par **CARDON-DUBOIS (1985)**.

### III.2. Influence du potentiel de l'eau apportée

Les résultats antérieurs suggéraient qu'un apport d'eau soumis à une dépression même très faible suffisait à réduire considérablement l'intensité de la fissuration par rapport à un apport d'eau libre. Pour confirmer ce résultat, nous avons réhumecté 4 massifs du matériau A, initialement secs à l'air, sur une couche de sable saturé à laquelle était appliquée à l'interface massif-sable, les potentiels suivant : 0. , -2 , -10 et 20 mbar. Le sable restant saturé, cette dépression n'avait aucune influence sur sa propre conductivité hydraulique, et le débit d'apport ne pouvait être le facteur de variation des cinétiques d'humectation. Les caractéristiques initiales et finales des massifs figurent au tableau 4. On voit que dans tous les cas, on peut admettre que l'équilibre de potentiel a été atteint en fin d'expérience, dont la durée n'a pas limitée les manifestations éventuelles de la fissuration au gonflement.

Les conséquences de la variation du potentiel de l'eau apportée sur la fissuration sont présentées aux figures 15 et 16. Elles confirment en les précisant les conclusions antérieures. Au-delà d'un seuil de dépression extrêmement faible, compris entre -2 et -10 mbar, la diminution du potentiel de l'eau induit la décroissance rapide de la longueur et de la porosité de fissures formées. Nous avons calculé pour chacun des massifs un potentiel de gonflement. Les points correspondants sont portés sur la figure 9. Ils sont peu éloignés du nuage obtenu pour le matériau A pour les humidités initiales variables.

Pour ce matériau, la variable potentiel de gonflement paraît donc rendre compte des variations de la fissuration résultant de la modification du potentiel de l'eau initial ou du potentiel final.

Potentiel de réhumectation (mbar)	0	-2	-10	-20
Teneur en eau initiale %	4,5	4,5	4,5	4,5
Teneur en eau finale %	41,1	40,9	29,8	26,0
Teneur en eau d'équilibre %	27,9	27,3	26,6	26,0
Potentiel de Gonflement %	26,2	25,5	23,7	22,1
Durée d'humectation h	16	24	241	612

Tableau 4 - Caractéristiques initiale et finale des massifs réhumectés à différents potentiels.

Figure 15 : Influence du potentiel d'humectation sur la longueur de fissures

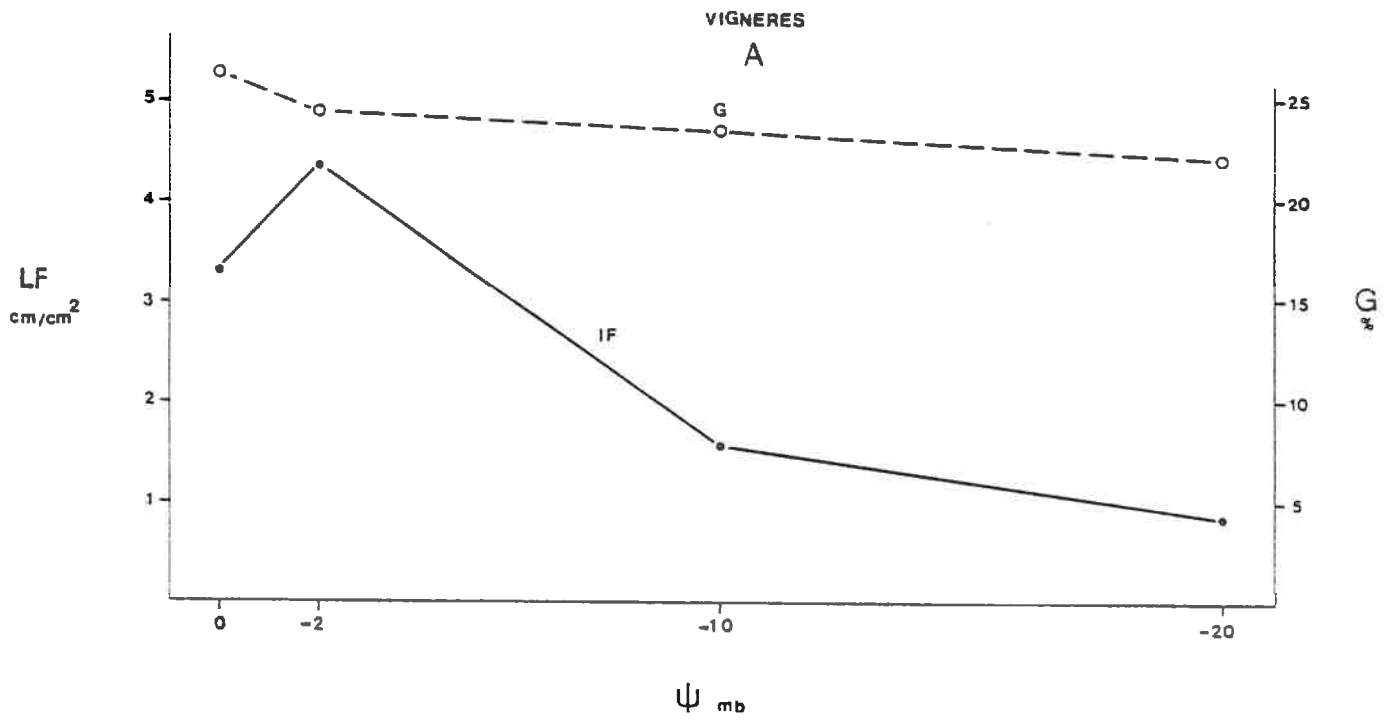
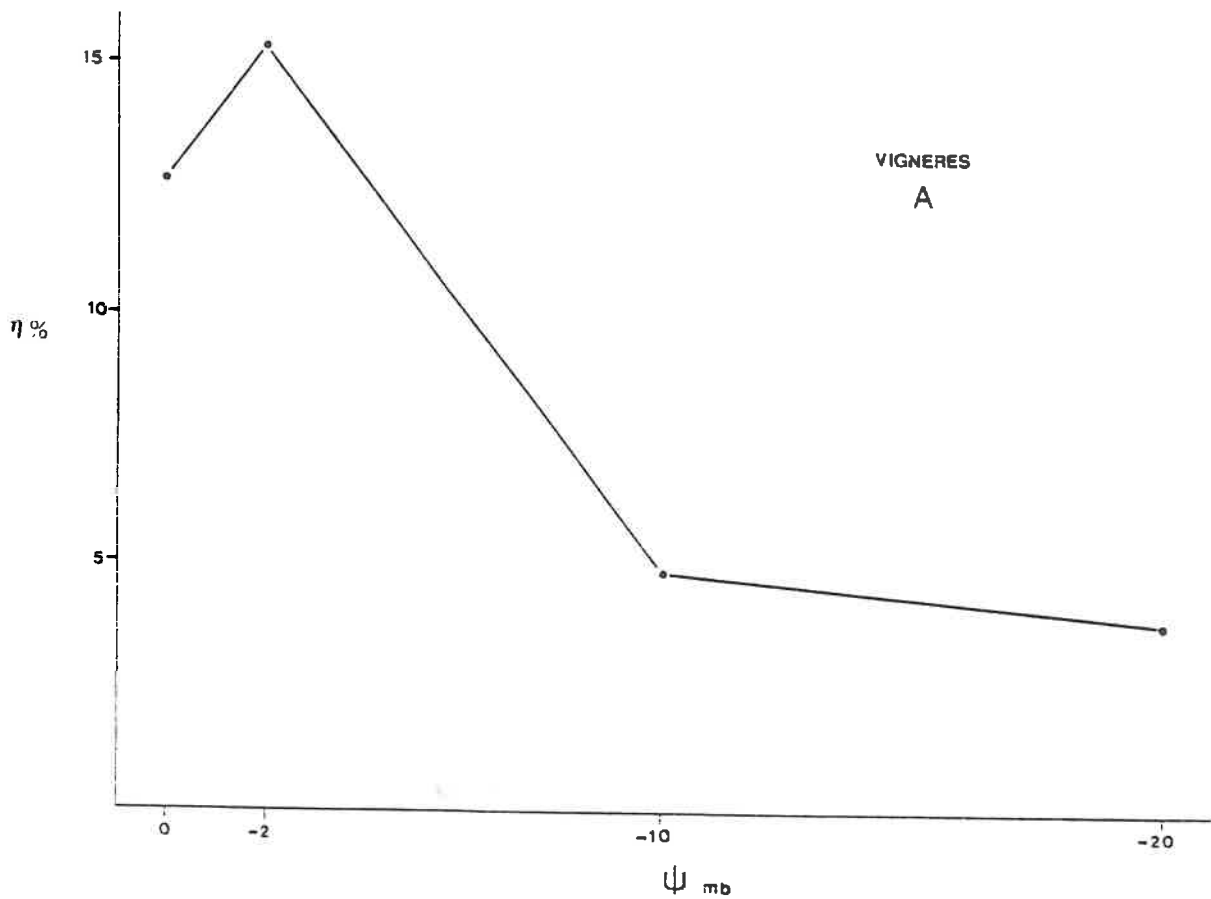


Figure 16 : Influence du potentiel d'humectation sur la porosité de fissures



D'un point de vue strictement corrélatif et pour ce cas particulier, elle semble donc être une variable explicative pertinente.

Par ailleurs, les cinétiques d'humectation (figure 17) sont extrêmement différentes et ceci dès les premières phases de l'humectation. Il paraît difficile d'attribuer ces écarts à la variation de gradient de potentiel, entre un massif sec à l'air dont le potentiel est initialement de -1000 bar approximativement et la succion de l'eau apportée. Outre les variations de conductivité des massifs continus, entre l'humidité correspondant à -20 mbar et celle correspondant à potentiel nul, il est probable que la différence des flux dans les fissures joue un rôle important. Ces fissures sont pour une large part saturées dans le cas d'apport d'eau à potentiel nul, et au contraire remplies d'air à -10 et -20 mbar. L'observation de la surface des massifs montre une réduction presque totale des phénomènes de diffusion à partir de la paroi des fissures dans ces derniers cas.

### III.3. Influence de la pression gazeuse

Une des questions posées pour l'analyse des mécanismes de la fissuration à l'humectation était le rôle éventuel d'accroissement de la pression gazeuse interne suggérée par les conditions de sa manifestation, telles qu'elles avaient été déterminées pour le matériau A :

- humidité initiale inférieure à la saturation,
- apport d'eau à potentiel voisin de zéro.

Celles-ci impliquent, en effet, la possibilité de piégeage d'air et de compression par les ménisques formés dans les pores, suivant le schéma invoqué par HENIN pour expliquer la désagrégation par explosion.

Deux massifs aussi rigoureusement identiques que possibles ont donc été réhumectés sur le même dispositif :

- l'un après un dégazage prolongé (24h) permettant d'abaisser la pression interne au zéro du manomètre ( $P < 10$  mbar),
- l'autre sans dégazage.

Les résultats sont présentés à la figure 18. A la reproductibilité des résultats près (estimée à partir des répétitions sur une même humidité initiale), il n'y a aucune influence de la pression gazeuse interne sur la longueur des fissures formées à l'humectation. Sans exclure définitivement l'effet possible de la compression de l'atmosphère interne, qui apparaît sur des volumes plus petits (agrégats, ou dans notre cas les cubes utilisés pour établir la relation potentiel-teneur en eau), dans les conditions où nous opérons, il apparaît négligeable.

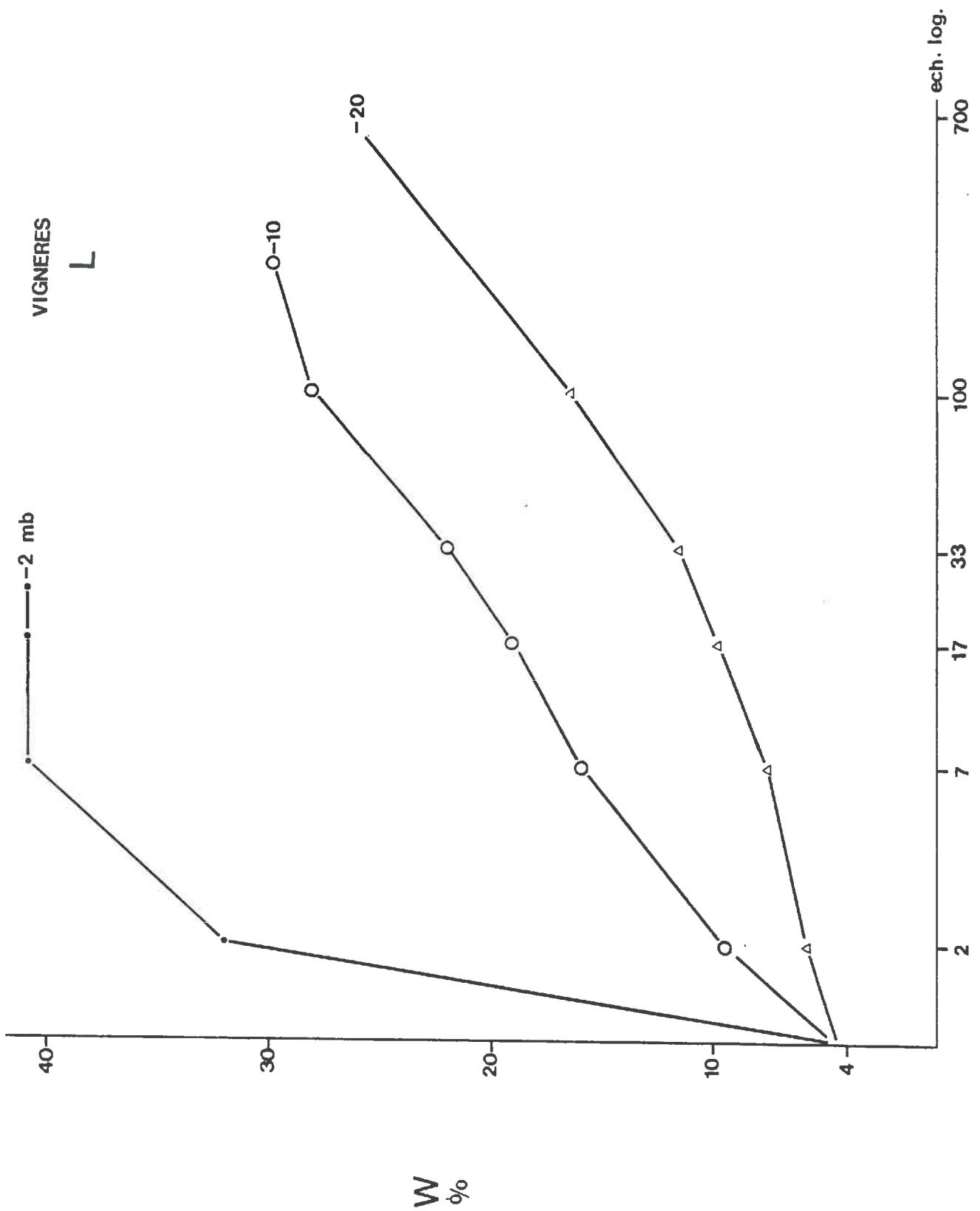
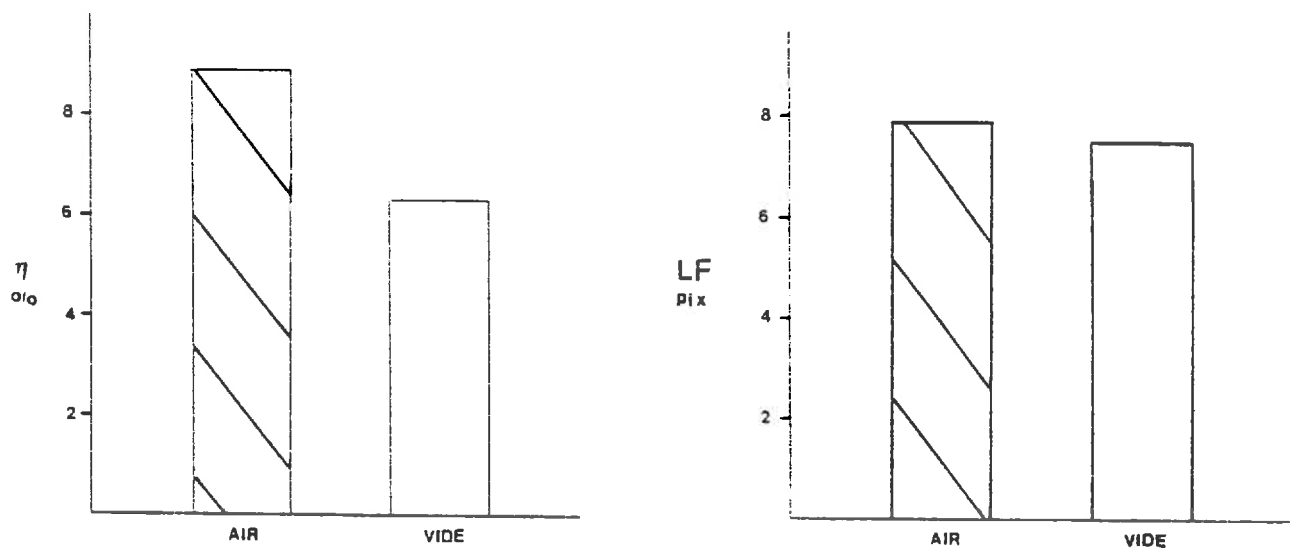


Figure 17 : Influence du potentiel d'humectation sur la cinétique d'humectation



VIGNERES  
A



**Figure 18** : Comparaison des longueurs et des porosités de fissures obtenus par réhumectation d'un massif sec à l'air : sous vide et à la pression atmosphérique (matériau A)

#### IV. DISCUSSION

##### IV.1. Importance des phénomènes de fissuration à l'humectation

Le phénomène de fissuration à l'humectation, dont l'existence avait été établie pour un matériau argileux particulier, qui manifeste in-situ une aptitude élevée à la division par fissuration, semble concerner tous les matériaux ayant une capacité de gonflement, même d'amplitude réduite. Les conditions expérimentales très particulières qui ont été choisies pour ce travail, et essentiellement la préparation des échantillons soumis à l'humectation, impliquent que l'intensité du phénomène soit contrôlée sur des échantillons non remaniés pour évaluer plus rigoureusement son importance dans les conditions naturelles. Sur le matériau argileux, les résultats de terrain avaient été conformes aux observations en laboratoire (STENGEL et BOURLET, 1987). Il faut confirmer cette cohérence pour les autres textures. A cet égard, l'étude de la fissuration par gonflement de mottes (MANICHON, 1982) paraît être la voie la plus appropriée. La structure initialement continue de ce type d'éléments structuraux, et la possibilité de maintenir une porosité inter mottière élevée, évitant toute limitation stérique au gonflement et à la fissuration, permettent de réunir les conditions les plus favorables à l'observation de l'effet direct de l'humectation. Le problème principal est de nature technique : il s'agit de la capacité à quantifier la fissuration de volume de formes irrégulières, sur lesquels on ne peut obtenir d'images de surface plane.

Faute de disposer de techniques d'imprégnation dont l'absence d'effets sur la structure soit garantie et praticable pour tous les états hydriques, l'étude de sections polies (FIES, 1982) ne constitue pas une solution satisfaisante. On est alors contraint de recourir :

- au polissage des faces des mottes  $\Delta$  pour créer des surfaces planes observables,
- d'étudier les effets de la dessiccation sur les fissures créées à l'humectation pour évaluer les biais éventuellement introduits par une imprégnation après séchage.

Ce travail est en cours de réalisation.

Pour la suite de la discussion, nous accepterons dans un premier temps l'hypothèse suivant laquelle les résultats présentés ne sont pas spécifiquement liés aux caractéristiques particulières des échantillons remaniés. On peut alors affirmer que la fissuration à l'humectation est un mécanisme général d'évolution structurale d'une part et que, d'autre part, il doit jouer un rôle important dans les mécanismes

de division. Outre le travail précédemment cité, cela a été vérifié sur des matériaux argileux, calciques et sodiques par SIGALA (1987) étudiant l'évolution structurale de mottes naturelles sous l'effet des pluies. Sur les matériaux limoneux, l'importance de la microfissuration à l'humectation dans l'évolution structurale de surface a été clairement démontrée par BOIFFIN (1984). Elle est confirmée par les travaux en cours de LE BISSONNAIS (communication personnelle).

Toutefois s'agissant de la formation, lors de l'humectation d'agrégats de taille millimétrique ou infra-millimétrique, les différences d'échelles peuvent laisser supposer que des mécanismes différents (au moins en partie) interviennent, dont la comparaison réclame une analyse approfondie.

Ce contact d'ensemble étant formulé, l'évaluation des effets probables de ce phénomène de division apparaît complexe et sa prévision pour différents matériaux et conditions climatiques s'avère extrêmement difficile. On peut, dans un premier temps, formuler une esquisse de typologie grossière à partir des trois cas abordés ici.

#### 1/ Matériaux argileux

Les conclusions des travaux antérieurs ont été confirmées par les résultats supplémentaires que nous avons acquis. La fissuration par humectation est susceptible de produire une division très poussée d'un élément structural continu, aboutissant en une seule phase à des éléments structuraux de dimension millimétrique. Les longueurs de fissures mesurées correspondent à partir d'un modèle de fragmentation cubique à des dimensions d'environ 5 mm.

Les conditions requises sont :

- une humidité initiale inférieure au point d'entrée d'air,
- un apport d'eau à potentiel élevé.

Par rapport aux résultats antérieurs, l'humectation aboutissant à l'équilibre d'échantillons initialement humides ( $w_i > w_{AE}$ ) a montré que la diminution de la longueur de fissures formées n'était pas due uniquement à l'impossibilité d'atteindre la teneur en eau d'équilibre et de réaliser le potentiel de gonflement, dans la durée limitée des expériences initiales. Le gonflement dans le domaine saturé seul a dans ce cas un effet négligeable de fissuration.

Quant à l'analyse des mécanismes, la compression de l'atmosphère interne ne semble pas jouer un rôle déterminant dans la rupture aboutissant à la formation de fissures.

Le caractère très borné des conditions ainsi définies, sous réserve de vérification pour d'autres matériaux argileux, permet d'envisager l'utilisation d'un modèle statistique d'estimation de l'intensité de la fissuration par humectation. En

revanche, l'absence de fissuration induite par le gonflement normal (en particulier) ne peut être expliqué que par un modèle de rupture comportant :

- un sous modèle d'imbibition,
- un modèle mécanique : modèle de distribution des contraintes (pression de gonflement en particulier / modèles de déformation et de rupture).

Quant aux conséquences in-situ de la fissuration à l'humectation, la stabilité de la structure des matériaux argileux (si elle n'est pas affectée par la garniture ionique) les rend durables. Dans le processus global d'évolution structurale son rôle est nécessairement prépondérant, même et surtout au voisinage de la surface subissant directement l'effet de la pluie.

## 2/ Matériaux limoneux

La comparaison avec le cas précédent est moins rudimentaire qu'on pouvait l'imaginer a priori compte-tenu des effets différents de l'humidité initiale ou du potentiel de gonflement qui en résulte.

Partant d'un état initial sec, le classement est strictement conforme aux constats traditionnels : l'intensité de fissuration croît avec la teneur en argile. L'hypothèse, généralement implicite dans les classifications d'aptitude à la fissuration, des relations linéaires avec la teneur en argile n'est pas montrée par nos résultats.

En revanche, pour des humidités initiales élevées, et sans qu'on puisse à partir de ces résultats fixer une borne de teneur en eau ou de potentiel, le matériau limoneux paraît susceptible de se fissurer plus intensément que le matériau argileux.

Contrairement au cas précédent, compte-tenu des humidités où nous avons observé la fissuration, c'est le gonflement dans le domaine saturé qui semble en être le moteur, et ceci est conforme à l'allure de la courbe de gonflement (où le seul gonflement mesurable est le gonflement normal).

Il est clair que les effets de la pression gazeuse et du potentiel de l'eau apportée doivent être mesurés également sur ce matériau, rien ne garantissant qu'ils soient identiques à ceux qu'on a observé sur les matériaux argileux.

Quant à la prévision des conséquences probables pour l'évolution structurale du sol en place, on peut avancer l'hypothèse suivante : toute situation amenant un élément structural (ou une partie de celui-ci) à une humidité provoquant le gonflement normal provoque la fissuration. Le potentiel du point d'entrée d'air étant voisin dans ces matériaux du potentiel à la capacité de rétention, on peut schématiser cette assertion en disant que la présence d'eau à un potentiel supérieur

à la capacité de rétention induit la fissuration, et ceci indépendamment (en pratique) de l'humidité initiale.

La conductivité hydraulique élevée à l'échelle texturale permet en outre de supposer que les volumes affectés à partir de zones d'apport d'eau à potentiel  $\approx 0$ , soient importants. Même si la porosité ou la surface volumique de fissures restent comparativement limitées, on devrait donc observer un effet notable de division des éléments structuraux continus. Cet effet est toutefois susceptible d'être masqué en raison de la faible résistance mécanique du matériau dans les conditions hydriques où la fissuration se produit. A la surface du sol, l'énergie mécanique apportée par la pluie peut vraisemblablement détruire les éléments structuraux issus de la division. Les conséquences de la fissuration par humectation ont une probabilité plus élevée de persister dans les couches sous-jacentes.

### 3/ Matériau limono-argileux

Indépendamment des aspects cinétiques, celui-ci a un comportement très voisin de celui du matériau argileux (de ce point de vue, la typologie des courbes de retrait-gonflement qui regroupe les deux dans un même ensemble semble pouvoir être étendue aux conséquences structurales du gonflement). La décroissance très prononcée de la longueur de fissures formées quand l'humidité initiale varie à une allure identique, ainsi que la relation avec le potentiel de gonflement. Elle atteint une valeur très voisine de 0 pour  $w_i$  proche de la limite de retrait, sans que la coïncidence entre ces deux valeurs puisse être démontrée.

La différence essentielle, outre la variation des quantités de fissures développées, réside dans la cinétique d'humectation et donc de fissuration. La fissuration beaucoup moins précoce laisse à la conductivité à l'échelle texturale une fonction prépondérante dans l'infiltrabilité. Il n'y a pas, comme dans le matériau argileux, fissuration d'une épaisseur importante de matériau sec en aval du front d'humectation jouant le rôle de chemins préférentiels et de source secondaire d'apport d'eau à potentiel  $\approx 0$  dans la zone sèche. La conductivité dans la porosité texturale étant plus faible que celle du matériau limoneux, cette texture apparaît comme celle dont la vitesse d'humectation est la plus lente. Cette lenteur du transfert d'eau peut elle-même limiter l'importance du phénomène de fissuration à l'humectation dans les conditions naturelles. Par ailleurs, la prise en compte de l'évolution structurale paraît pouvoir modifier sensiblement, au moins pour certaines conditions, les idées tirées de l'hypothèse capillaire sur les relations textures-propriétés de transfert. Elle montre également à quel point l'application de la loi de

DARCY généralisée en négligeant les déformations de l'espace poral, peut conduire à des résultats erronés.

Du fait de son importance possible, la priorité dans les travaux futurs sur la fissuration à l'humectation paraît devoir être accordée à la vérification de ses effets sur des échantillons non remaniés. L'analyse des mécanismes quant à elle passe nécessairement par un modèle mécanique de rupture. Celui-ci est strictement indispensable en particulier pour :

- aborder le rôle de la géométrie des éléments structuraux continus et de la surface d'humectation,
- comprendre les différences des effets de gonflement normal suivant la texture.

Dans un premier temps, une tentative de modélisation de type déterministe devra se limiter à la rupture aboutissant à la formation d'une première fissure dans un volume continu.

## CONCLUSION

Intervenant après un premier travail expérimental sur la fissuration à l'humectation, cette étude a permis de démontrer que le phénomène n'était pas limité à un type de matériau particulier. Ceci conduit à le considérer systématiquement comme une phase probable des processus d'évolution structurale résultant des variations de teneur en eau. Il devient donc essentiel, pour ce thème de la physique du sol :

- de quantifier son rôle dans certaines situations naturelles types,
- de développer des moyens et prévision en analysant son déterminisme et/ou par une approche statistique fondée sur la mise au point d'un test plus rapide que les essais très lourds que nous avons présentés dans ce mémoire.

Quant au premier objectif, l'étude de la division des mottes  $\Delta$  résultant du compactage présente le double avantage de définir un état initial homogène et continu, à une échelle où les moyens de description utilisables restent pertinents. Son intérêt pour l'étude la durabilité du compactage et de ses conséquences cumulatives est par ailleurs incontestable. La principale difficulté réside dans la mise au point d'une méthode opérationnelle d'obtention de données morphologiques.

Quand au second, l'analyse des relations avec le potentiel de gonflement a montré les limites de la recherche d'une relation purement corrélative, pour estimer l'intensité de la fissuration à partir de la connaissance des variations de teneur en eau ou de potentiel sur différents matériaux. Sans négliger pour autant l'intérêt qu'elle pourrait présenter comme outil grossier, ces limitations conduisent à développer une analyse mécanique du phénomène. A cet égard, et bien qu'ils ne soient pas ceux où il se manifeste de la façon la plus intense, les matériaux à texture limoneuse présentent l'avantage que les fissures formées y ont un rôle moins déterminant dans la création d'hétérogénéité d'hydratation. Ils pourraient constituer un meilleur support expérimental à la modélisation que les matériaux argileux.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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

FIES J.C., 1982 - Etudes des écoulements en milieu saturés en relation avec la morphologie de l'espace poral du sol. Rapport du contrat DGRST, Maîtrise de l'eau dans les bassins méditerranéens 79-7-0075, 32 p.

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

MONNIER G., STENGEL P., FIES J.C., 1973 - Une méthode de mesure de la densité apparente des petits agglomérats terreux : application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. Annales Agronomiques 24(5), 533-545.

PINOCHET X., 1981 - Prévision du retrait-gonflement d'agrégats de sol en relation avec le potentiel de l'eau. Mémoire de fin d'étude ENITA de DIJON, 35 p.

STENGEL P., 1982 - Swelling potential of soil as a criterium of permanent direct-drilling suitability. 9th Conference of ISTRO, OSIJEK, ISTRO Wageningen, 131-136.

STENGEL P., 1983 - Analyse de la porosité. Séminaire CEE Agrimed, Avignon, 54 p.

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

STENGEL P., GUERIF J., 1985 - Effect of tillage techniques on cracking of a heavy clay soil. Abstract 10th Conference of ISTRO GUELPH (Canada) p. 29.

TESSIER D., 1984 - Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Thèse Université de Paris VII, 360 p.



Annexe 1 : Relation potentiel-teneur en eau

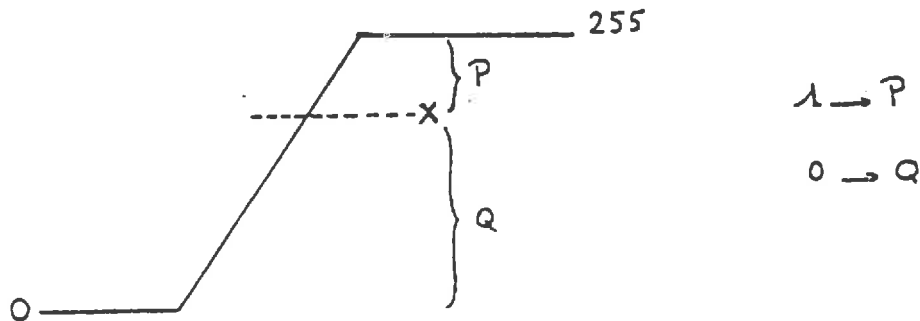
$\psi$ (mbar)	-1	-2	-4	-8	-10	-20
A	28,3	28,0	27,3	26,7	26,7	26,0
W % LA	26,7	25,4	24,8	24,1		
L	26,2	25,1	24,8	23,9		

## ANNEXE 2 : ANALYSE D'IMAGE

### I- PREPARATION DE L'IMAGE : DEFINITION DES FISSURES

#### 1/ Le seuillage

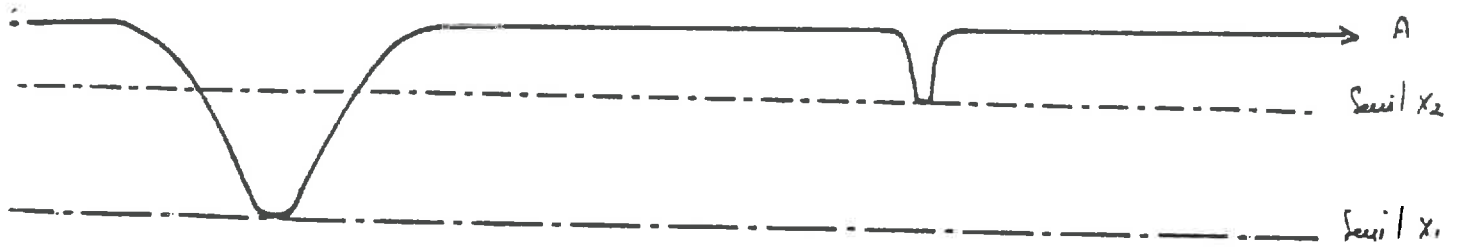
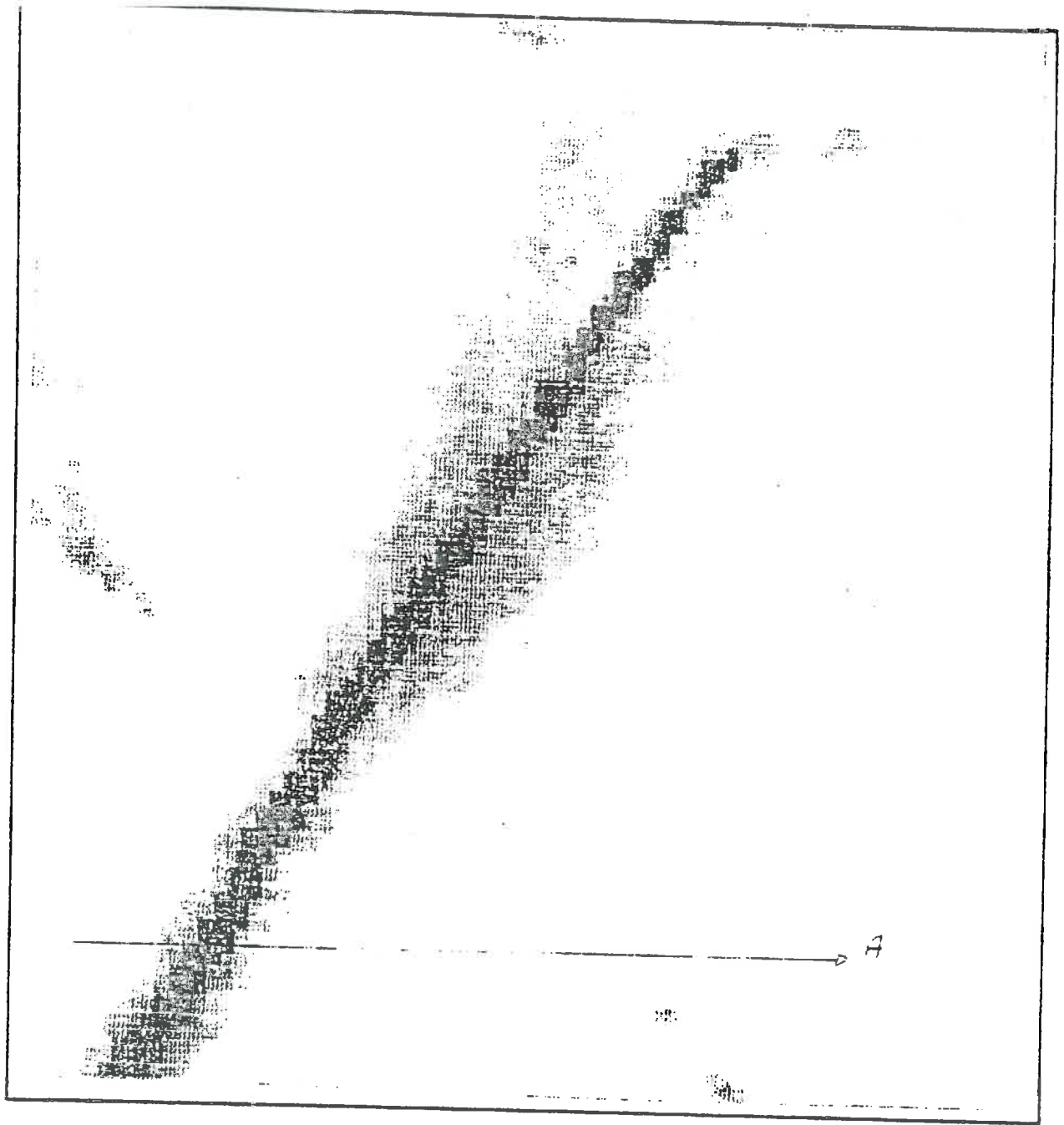
Il consiste à délimiter les frontières des fissures en faisant varier un seuil  $X$  sur la gamme des niveaux de gris de 0 à 255. Le seuil  $X$  est la borne inférieure des valeurs de gris correspondant aux fissures. La valeur 1 est affectée à tous les pixels dont l'intensité de gris est supérieure à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



Résultat du seuillage  $X_1$

Résultat 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

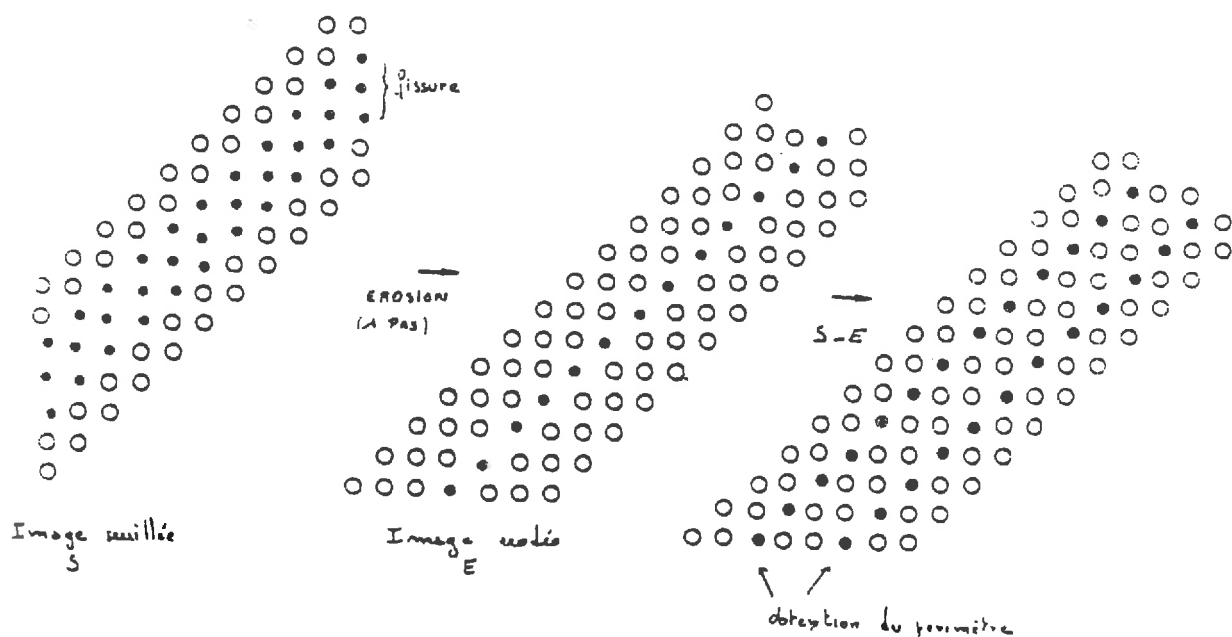
Elle consiste à réduire toutes les fissures à un trait d'épaisseur un pixel.

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 3

### Organigramme des mesures par analyse d'image

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