



**HAL**  
open science

# Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies

Yves Le Bissonnais

► **To cite this version:**

Yves Le Bissonnais. Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies. Sciences du Vivant [q-bio]. Université d'Orléans, 1988. Français. NNT : . tel-02857690

**HAL Id: tel-02857690**

**<https://hal.inrae.fr/tel-02857690>**

Submitted on 8 Jun 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L37  
GD9

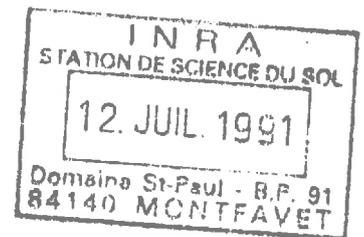
UNIVERSITE D'ORLEANS  
U.E.R. DES SCIENCES FONDAMENTALES ET APPLIQUEES

# THÈSE

présentée  
pour l'obtention du Doctorat de Science de la Terre  
de l'Université d'Orléans

par

**Yves LE BISSONNAIS**



## **Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies**

soutenue le 7 novembre 1988 devant le Jury composé de :

MM. F. LELONG	}	Président
J. BOIFFIN		Rapporteurs
G. MONNIER	}	Examineurs
J. DE PLOEY		
M. JAMAGNE		
C. VALENTIN		

## **AVANT-PROPOS**

Je voudrais remercier ici Messieurs F. LELONG, J. BOIFFIN, G. MONNIER, J. DE PLOEY, M. JAMAGNE et C. VALENTIN pour leur parrainage scientifique et l'attention qu'ils ont bien voulu porter à ce travail, A. BRUAND, E. COULON, M. ROBERT, V. SORANI et D. TESSIER avec lesquels les fréquentes discussions ont toujours été fructueuses, et surtout tous mes collaborateurs du S.E.S.C.P.F. pour leur amitié et leur aide quotidienne tout au long de ce travail.

## **SOMMAIRE**

### **o INTRODUCTION GENERALE**

### **o PREMIERE PARTIE : ETUDE DES PROCESSUS DE DIVISION DES AGREGATS PAR L'EAU**

- Chapitre 1 : Les différents mécanismes de la désagrégation :  
Bibliographie
- Chapitre 2 : Le système expérimental
- Chapitre 3 : Le comportement d'agrégats immergés dans l'eau
- Chapitre 4 : Le comportement d'agrégats réhumectés par capillarité
- Chapitre 5 : Synthèse : Les différents mécanismes de désagrégation par l'eau et les scénarios d'évolution structurale

### **o DEUXIEME PARTIE : ETUDE DE L'ACTION DES GOUTTES DE PLUIE A LA SURFACE DU SOL : DESAGREGATION, MOBILISATION ET DEPLACEMENT DE PARTICULES**

- Introduction
- Chapitre 1 : Les différents mécanismes de désagrégation liés à l'action des gouttes de pluie
- Chapitre 2 : L'influence des caractéristiques des pluies sur la désagrégation
- Chapitre 3 : L'évolution structurale d'un massif d'agrégats sous l'action d'une pluie
- Chapitre 4 : Le déplacement des particules sous l'impact des gouttes de pluie

- Conclusion de la deuxième partie
- o **SYNTHESE ET CONCLUSION GENERALE**
- o **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**
- o **LISTE DES TABLEAUX**
- o **LISTE DES FIGURES**
- o **TABLE DES MATIERES**
- o **ANNEXES**

## RESUME

Ce travail traite du déterminisme de l'évolution structurale superficielle des sols sous l'action des pluies.

L'approche développée est fondée sur l'utilisation d'agrégats provenant des horizons de surface de sols limoneux cultivés, calibrés et amenés à différents états hydriques initiaux. On a cherché à contrôler et à faire varier indépendamment les différents facteurs intervenant dans le processus de dégradation structurale et on s'est attaché à mesurer la dimension des particules produites par la désagrégation.

Une première partie est consacrée à l'étude des mécanismes élémentaires de désagrégation pour différentes conditions de mise en contact de l'eau avec les agrégats, puis les résultats sont validés dans une seconde partie, dans laquelle on a étudié l'action de pluies simulées au laboratoire, sur des agrégats isolés et des massifs d'agrégats.

Les résultats mettent en évidence les différents processus de désagrégation intervenant, en fonction des conditions de mise en contact de l'eau avec les agrégats et de leur état hydrique initial : désagrégation par éclatement, microfissuration, désagrégation mécanique. Les mesures de distribution dimensionnelle des particules produites précisent la spécificité des différents types d'évolution structurale qui ont lieu, et suggèrent que la structure et les propriétés hydrodynamiques des croûtes doivent être très variables selon les situations.

On peut distinguer deux composantes dans l'action des pluies à la surface du sol : l'une résultant de la mise en contact de l'eau avec la terre, à laquelle correspondent désagrégation par éclatement et microfissuration ; l'autre fonction de l'énergie cinétique des pluies, qui est responsable de la désagrégation mécanique, du rejaillissement et du tassement de la surface.

Une ébauche de modélisation de l'évolution structurale superficielle, fondée sur les interactions entre les états initiaux, les caractéristiques des pluies et les propriétés des matériaux, est proposée.

Mots clés : Agressivité des pluies – Croûtes de battance – Désagrégation mécanique – Désagrégation par éclatement – Erosion – Etat hydrique – Microfissuration – Ruissellement – Sols limoneux.

## **Analysis of aggregates breakdown mechanisms and particles mobilization under rainfall effect**

The aim of this work is to study the determinism of superficial structural evolution under rainfall effect.

The approach is based on the use of calibrated aggregates, sampled in loamy soils, and prepared at different water potentials.

We try to control and to obtain independant variations of the main factors leading to structural degradation processes, and we measure the size of resulting particles.

The first part deal with elementary mechanisms of breakdown, relating to different ways of aggregates wetting. Results are validated in the second part, in which we study the effect of simulated rainfall on individual or stacked aggregates.

Results show the different processes of breakdown which occur, in relation with initial water content and wetting conditions : slacking, microcracking, and mechanical breakdown.

Study of particles dimentional distribution points out the nature of differences between the main types of structural evolution, and suggests that structure and hydrodynamical properties of crusts may be variable according to the situations.

We distinguish two components in the rainfall effect : the first one which is due to the contact between aggregate and water corresponds to slacking and microcracking; the second one which is due to rainfall kinetic energy induces mechanical breakdown, splash and surface compaction.

Finally, a scheme of superficial structural evolution is proposed, based on interactions between initial state, rainfall characteristics and soil properties.

**Additional key words : Sealing, crusting, runoff, interrill erosion, silty soil.**

**- INTRODUCTION GENERALE -**

## INTRODUCTION GENERALE

### 1) SITUATION ET CONTEXTE DU SUJET

L'érosion hydrique est l'un des principaux phénomènes responsables de l'évolution des reliefs à la surface du globe. Elle résulte du ruissellement des eaux de pluie à la surface des sols ou des roches affleurantes.

Cependant, par rapport aux diverses situations que l'on peut rencontrer, les régions de grande culture d'Europe du Nord-Ouest, présentent des caractéristiques climatiques et topographiques très modérées, et peu favorables au déclenchement de l'érosion. (FOURNIER, 1960 ; PIHAN, 1979 ; MONNIER et BOIFFIN, 1986 ; BOIFFIN et al., 1986).

Les manifestations de ruissellement et d'érosion, parfois très importantes, sont dans ce contexte particulier, liées au moins en partie, à l'évolution des systèmes de culture et de l'organisation spatiale (AUZET, 1987a) :

- \* sols nus pendant de longues périodes de l'année avec un affinement très poussé de la surface (lits de semences), qui se transforment rapidement en une croûte de battance sous l'action des pluies,
- \* parcelles de grandes dimensions après les remembrements, ne présentant plus d'obstacles au ruissellement sur les versants (haies, rideaux, fossés),
- \* mise en culture de versants plus raides, autrefois maintenus en prairie permanente.

Dans cette situation, le phénomène majeur à l'origine du ruissellement est l'évolution structurale de la surface du sol sous l'action des pluies, qui conduit à la formation de croûtes superficielles.

Les conséquences de la formation de ces croûtes de battance sont non seulement hydrologiques, mais également d'ordre agronomique (HENIN et al., 1960 ; AWADHWAL & THIERSTEIN, 1985 ; POESEN & GOVERS, 1985 ; VALENTIN, 1987) :

o mauvaise implantation des cultures, soit par limitation du transfert d'oxygène entre l'atmosphère et le lit de semence (RICHARD, 1988), soit par obstacle mécanique à la levée ;

o mauvaise reconstitution des réserves en eau (SEBILLOTTE, 1968).

Ce sujet est donc d'actualité, à la fois par rapport à l'optimisation de l'implantation des cultures, et par rapport à l'analyse des manifestations du ruissellement, vis-à-vis de la protection de l'environnement et de la gestion des ressources en eau (AUZET, 1987b).

## **2) POSITION DU PROBLEME : LE PROCESSUS GENERAL DE FORMATION DES CROUTES.**

L'entraînement de particules solides par le ruissellement, mais également le déclenchement du ruissellement lui-même, résultent d'une succession d'étapes qui correspondent à des processus différents (ELLISON, 1947 ; FEODOROFF, 1965 ; COLLINET & VALENTIN, 1985 ; FOSTER, 1985 ; DE PLOEY & POESEN, 1985 ; DE PLOEY & BRYAN, 1986 ; GOVERS et al., 1987).

BOIFFIN (1984) a montré comment la formation des croûtes de battance était le résultat d'un enchaînement de processus directement ou indirectement causés par la pluie : détachement de particules solides, immédiatement ou ultérieurement suivi d'un déplacement vers les zones basses du microrelief (interstices, microdépressions), et enfin compactage et coalescence des matériaux ainsi cumulés.

Les conditions dans lesquelles s'opèrent ces deux dernières étapes élémentaires (déplacement et compactage-coalescence) peuvent être très variées et ont une grande influence sur la morphologie et les propriétés des croûtes formées (BOIFFIN et MONNIER, 1986 ; BOIFFIN et BRESSON, 1987). Cependant, c'est la division des fragments qui détermine au départ la masse totale et la nature des particules mobilisées. C'est bien ce processus qui, avant tout, contrôle l'évolution morphologique (extension, épaissement, microstructure) des croûtes de battance. (VALENTIN, 1981 ; CASENAVE et VALENTIN, 1988). Il faut donc étudier comment s'opère cette division des fragments de terre par la pluie (on ne s'occupera pas dans ce travail du détachement par le ruissellement, et d'une manière générale de tout ce qui concerne les conséquences du ruissellement, qui relèvent de processus très différents).

A partir d'un ensemble d'observations et de données expérimentales acquises sur deux matériaux limoneux, il a été proposé (BOIFFIN, 1984) de distinguer trois principaux mécanismes de divisions :

– la désagrégation par éclatement qui résulte de la compression qu'exerce la phase liquide, lors de l'imbibition d'un fragment non saturé, sur l'air qui subsiste en son sein (YODER, 1936 ; HENIN, 1938),

– la désagrégation sans éclatement, directement liée à l'application de contraintes mécaniques externes sur un massif de cohésion plus ou moins faible selon son humidité,

– la microfissuration, c'est à dire l'individualisation d'agrégats de taille millimétrique à la périphérie des fragments terreux, en réponse à des alternances dessiccation – humectation.

Il est indispensable, pour comprendre les variations de quantité et de nature des particules produites lors d'un épisode pluvieux donné, de distinguer les rôles respectifs des différents processus. L'un de nos objectifs principaux sera donc de déterminer les conditions d'apparition et d'évaluer l'importance des différents mécanismes du détachement, tout particulièrement en ce qui concerne les propriétés du sol et les caractéristiques de la pluie.

Jusqu'à présent, ces mécanismes ont été principalement étudiés en privilégiant l'influence des facteurs de constitution. Par exemple le rôle des matières organiques vis-à-vis de la mouillabilité (MONNIER, 1965), qui influe à la fois sur la vitesse de progression des ménisques lors de l'imbibition et sur la pression finale atteinte. L'importance de ce paramètre est liée aux possibilités d'échappement d'air au cours de l'humectation. D'autres travaux ont au contraire mis l'accent sur les caractéristiques des gouttes de pluie (LAWS, 1941 ; BUBENZER & JONES, 1971 ; GHADIRI & PAYNE, 1977 ; AL-DURRAH & BRADFORD, 1981).

Mais d'autres facteurs a priori déterminants, vis-à-vis des possibilités de désagrégation, et très variables dans les conditions du champ cultivé, ont reçu jusqu'à présent moins d'attention ; il s'agit respectivement :

– de l'état hydrique des fragments terreux lors de l'imbibition, qui influe à la fois, et de manière ambivalente, sur le volume d'air initialement présent dans l'agrégat et sur la cohésion des ciments terreux (DE PLOEY, 1978 ; KEMPER & ROSENAU, 1984 ; COUSEN & FARRER, 1984 ; BULLOCK et al., 1988),

– de la dimension de ces fragments, qui, pour une taille de gouttes déterminée, contribue à fixer la surface d'imbibition et donc, a contrario les possibilités d'échappement de l'air à partir des surfaces non obstruées. Elle influe également, a priori, sur la résistance

mécanique qu'oppose un fragment à la compression interne (STUTTARD, 1984 ; ZOBECK & ONSTAD, 1987),

– et surtout d'une manière plus générale, des conditions de mise en contact de l'eau avec les fragments de terre de la couche de sol affectée par la pluie.

L'objet du travail présenté ci-dessous est, à partir d'une analyse expérimentale du rôle de ces différents facteurs, de contribuer à définir les types de situations correspondant à une importance relative différente de chacun des mécanismes, et à caractériser les conséquences qui en résultent vis-à-vis de la masse et la distribution dimensionnelle des particules mobilisées. Cette analyse nous conduira à envisager sur de nouvelles bases l'appréciation de l'agressivité des pluies et de la sensibilité des matériaux.

### 3) DEMARCHE

Compte-tenu de cet objectif, il nous a paru nécessaire de contrôler le plus précisément possible les paramètres étudiés, et de se placer à des échelles de temps et d'espace les plus élémentaires possibles, vis-à-vis du phénomène (échelle de l'agrégat et de l'évènement pluvieux).

Nous avons donc travaillé uniquement au laboratoire, sur des fragments de terre prélevés à la surface de sols cultivés.

On a cherché à contrôler et à faire varier indépendamment les différents paramètres évoqués ci-dessus, à savoir :

- les caractéristiques des matériaux,
- l'état hydrique et structural des agrégats,
- les conditions d'apport d'eau.

D'autre part, on s'est attaché à prendre en compte comme variable de sortie, les données les plus significatives pour le phénomène général étudié, qui est l'évolution structurale superficielle. On a donc essentiellement mesuré la quantité et la dimension des particules produites par la désagrégation.

Cette démarche nous a conduit à adopter la progression suivante :

o Dans une première partie, après avoir effectué quelques rappels sur les connaissances actuelles concernant les mécanismes de désagrégation, nous nous placerons dans des conditions expérimentales contrôlées, et nous étudierons le comportement d'agrégats de matériaux limoneux dans différentes conditions de mise en contact de l'eau

avec ces agrégats : immersion, réhumectation par capillarité, de manière à isoler les mécanismes intervenant.

On fera varier parallèlement les caractéristiques des matériaux et l'état initial des agrégats.

o Dans une seconde partie, nous nous placerons dans des conditions analogues à celles des pluies, en utilisant un goutteur et un simulateur de pluie. Ceci, afin de vérifier la pertinence, en conditions de pluie, des résultats obtenus dans la première partie, et d'étudier l'action propre à la pluie, en particulier en ce qui concerne le rôle de l'énergie cinétique.

Nous examinerons tout d'abord l'action d'une pluie standard sur les agrégats de quelques matériaux, en comparant la taille des particules produites à celle obtenue pour les différents mécanismes élémentaires.

Puis nous étudierons l'influence des caractéristiques des pluies sur la désagrégation.

La dynamique de formation des croûtes et l'évolution de leur structure seront ensuite analysées, à partir de mesures et d'observations réalisées sur des cylindres remplis d'agrégats et soumis à des pluies simulées.

Le dernier chapitre sera consacré à l'analyse du déplacement des particules sous l'action des gouttes de pluie.

Nous effectuerons enfin, une synthèse des résultats de ces deux parties, et nous proposerons quelques éléments en vue d'une modélisation de l'évolution structurale superficielle et de la formation des croûtes.

**– PREMIERE PARTIE –**

**ETUDE DES PROCESSUS DE DIVISION DES  
AGREGATS PAR L'EAU**

## CHAPITRE 1 :

### LES DIFFERENTS MECANISMES DE LA DESAGREGATION : BIBLIOGRAPHIE

La désagrégation résulte d'un déséquilibre entre les forces de liaison et les forces de rupture. HENIN (1938), a mis en évidence l'importance de la force liée à la pression exercée par l'air interne de l'agrégat, piégé lors de la réhumectation. Mais conjointement à l'application de cette force de compression, une diminution des forces de liaison intervient à cause de la réhumectation. Pour de nombreux auteurs, le facteur principal de la désagrégation est la force d'impact des gouttes (MIHARA, 1951 ; ECKERN, 1954 ; Mc INTYRE, 1958 ; FREE, 1960 ; NEARING & BRADFORD, 1985).

Ceci illustre la complexité des processus de désagrégation et la pluralité de ses causes.

Dans la mesure où ces forces sont difficilement mesurables ou quantifiables, il est rarement possible de faire la part exacte des différents mécanismes à l'origine de la fragmentation des agrégats par l'eau, à partir de bilans d'énergie.

Nous allons donc tenter dans ce premier chapitre de recenser, à partir de données bibliographiques, ces différentes forces de liaison et de rupture, en nous intéressant particulièrement à leur origine et à leurs facteurs de variation.

#### 1 – LES FORCES DE LIAISON AU SEIN DES AGREGATS

Elles résultent essentiellement de la nature et des propriétés des constituants en présence. On peut mentionner (HARRIS et al., 1966) :

- la liaison des argiles par les dipôles d'eau,
- le pontage des domaines d'argiles par les forces intercrystallines et les cations échangeables,
- l'enrobage des particules par des précipitations colloïdales : silicates, oxydes, oxyhydroxydes, humates...
- la stabilisation par des polymères organiques.

L'eau peut également jouer un rôle à une échelle macroscopique, par l'intermédiaire des forces capillaires (AZZAOU, 1988).

Les liaisons ainsi contractées ont une résistance très variable, et on ne peut le plus souvent la mesurer que de manière très indirecte, en fonction des moyens à mettre en oeuvre pour détruire les agrégats.

D'autre part, il s'agit de forces de nature différente, qui sont donc difficilement comparables entre elles, et qui répondent de manière variable à l'action des forces de rupture.

Parmi les recherches effectuées sur les liaisons entre particules des sols, de nombreux travaux concernent d'une part les interactions entre particules argileuses (QUIRK, 1950 ; EMERSON, 1962 ; TESSIER, 1984), et d'autre part celles entre les polymères organiques ou minéraux et les autres particules du sol (EMERSON & RAUPACH, 1964 ; THENG, 1982).

Compte-tenu de la complexité des systèmes naturels, la plupart des études de ces interactions ont été effectuées sur des systèmes expérimentaux : argiles provenant de gisement, ou obtenues par séparation, et mises en suspension. Par conséquent, les données obtenues ne peuvent pas être appliquées aux agrégats de sol, on ne peut les considérer que comme des éléments d'interprétation de certains processus observés.

Les différents mécanismes et forces de liaison mis en évidence par ces travaux font intervenir :

– la nature minéralogique et les caractéristiques des particules argileuses présentes, et en particulier la surface spécifique et la capacité d'échange cationique (EMERSON, 1962 ; GREENLAND, 1965). Ces caractéristiques déterminent en effet l'aptitude des particules à établir des liaisons entre elles, directement ou par l'intermédiaire de cations ou de polymères.

Elle augmente quand on passe des kaolinites aux illites et aux smectites, qui sont les trois grandes catégories d'argiles présentes dans les sols.

Il est probable que ce rôle de la nature des argiles intervienne également dans les sols ; cependant, la faible différenciation minéralogique des matériaux de surface des sols limoneux risque de limiter son importance. C'est ce que nous chercherons à vérifier en prenant en compte une gamme de plusieurs matériaux limoneux et en effectuant une analyse poussée de leur phase argileuse.

– La nature des cations échangeables, et surtout leur valence qui détermine la possibilité de pontage entre particules, qui modifie la rétention en eau, le gonflement et les propriétés de dispersion des matériaux (SHAINBERG, 1985). Dans les sols, c'est surtout

le couple Ca/Na qui intervient, et il est bien connu que les matériaux riches en sodium ont une structure particulièrement vulnérable en présence d'eau.

GREENLAND et al (1975), en appliquant à 180 sols britanniques le test d'EMERSON (1967), fondé sur le comportement qualitatif d'agrégats lors de leur immersion dans l'eau, considèrent qu'il existe 2 seuils de taux de Sodium échangeable (respectivement 5 % et 17 % de la C.E.C. ) qui limitent des comportements structuraux caractéristiques vis-à-vis de la dispersion.

Cependant ces taux n'étant jamais atteints, sauf cas particuliers, dans les sols limoneux cultivés, nous vérifierons le rôle de ce facteur à partir d'une approche expérimentale, en réalisant un échange cationique sur l'un des matériaux limoneux.

– Enfin, la présence de précipitations colloïdales ou de polymères. Ces composés peuvent jouer un rôle très important sur la cohésion des agrégats. C'est le cas en particulier des oxydes de fer et d'aluminium dans certains sols tropicaux : les forces de liaison sont alors largement supérieures aux forces de rupture pouvant intervenir lors des pluies (CHAUVEL et al., 1976 ; CAMBIER, 1986).

Cependant, ces oxydes ne sont présents qu'en très faible quantité dans les matériaux de surface des sols des régions tempérées.

la présence de polymères organiques est en revanche plus fréquente, et ceux-ci ont fait l'objet de nombreux travaux (WILLIAMS et al., 1968 ; VICENTE & ROBERT, 1981 ; THENG, 1982). Les polymères chargés semblent les plus efficaces pour améliorer la cohésion des matériaux car ils peuvent à la fois jouer un rôle dans la floculation, et dans la stabilisation des particules. Pourtant, ces substances organiques, dites liées, car formant un complexe avec l'argile, présentent une forte variabilité au niveau de leur origine, et surtout sur le plan de leur structure et de leurs propriétés chimiques.

Leur action qui dépend largement de ces derniers points (BOTTERO, 1979 ; ROBERT & al., 1983 ; CHENU, 1985), est donc susceptible de varier dans le temps, et leur efficacité est difficile à évaluer.

Il semble que le rôle le plus net des composés organiques vis-à-vis de la désagrégation, soit de limiter la vitesse de pénétration de l'eau dans les agrégats et donc la compression de l'air, par diminution de la mouillabilité des parois des pores (MONNIER, 1965).

Les tensions capillaires dues à la présence d'eau au sein du système, sont fonction de l'état énergétique de l'eau, de la distribution de la taille des pores, et des propriétés physico-chimiques des parois de ces pores ; elles sont donc modifiées lors d'un apport d'eau.

La résultante de ces différentes forces est la cohésion du matériau, qui est liée à la nature de ses constituants, à leur organisation, et qui varie en fonction de l'état d'hydratation du système.

## 2 – LES FORCES DE RUPTURE DES AGREGATS

L'intervention de forces de rupture des agrégats lors des pluies est liée à un apport d'énergie par les gouttes de pluie (WISCHMEIER & SMITH, 1958 ; GHADIRI & PAYNE, 1977).

L'énergie totale de ces gouttes peut se décomposer en énergie cinétique et en énergie libre.

o L'énergie cinétique, qui dépend uniquement de la masse et de la vitesse de chute des gouttes, mais qui peut se révéler plus ou moins efficace suivant l'état de la surface du sol : le choc est plus ou moins élastique ou amorti en fonction de la rigidité du point d'impact, c'est à dire de la taille, de la structure et de l'assemblage des agrégats et de leur état hydrique. En effet l'eau étant incompressible, elle rend les chocs beaucoup plus rigides que lorsque les agrégats sont secs, et que l'air présent dans les pores peut jouer le rôle d'amortisseur "pneumatique" (PALMER, 1965).

o L'énergie "libre", qui dépend cette fois du potentiel hydrique de la surface.

En effet, la succion capillaire entraîne une compression de l'air au sein des agrégats, par simple mise en contact de l'eau libre avec la terre (HENIN, 1938).

La désagrégation a lieu lorsque la pression de l'air dépasse la résistance mécanique des assemblages de particules.

Elle est d'autant plus probable et intense que le volume d'air est important et surtout qu'il risque d'être piégé.

Le premier type d'action (lié à l'énergie cinétique), a souvent été le seul pris en compte par les observateurs sur le terrain, du fait de la confusion possible entre les deux mécanismes à un pas de temps d'observation trop élevé : en effet, la phase d'éclatement est très fugace et d'autant plus courte que l'intensité de la pluie est forte, et que l'humidité initiale est élevée (Mc INTYRE, 1958 ; BOIFFIN, 1984).

D'autre part, des expériences montrant l'importance du rôle de l'énergie cinétique sur l'intensité du ruissellement (HUDSON, 1981), ont contribué à renforcer le poids donné à l'énergie cinétique des pluies dans les phénomènes de désagrégation.

Cependant des observations détaillées et des expériences au laboratoire ont rapidement montré l'importance du mécanisme d'éclatement vis-à-vis de la dégradation structurale superficielle (YODER, 1936 ; HENIN, 1938 ; ELLISON, 1945).

Cet éclatement, très accentué lorsque l'on immerge des agrégats secs dans l'eau, dépend surtout sur le terrain, de la cinétique d'humectation des agrégats (CONCARET, 1967). Celle-ci est largement influencée par la mouillabilité de la terre, qui dépend de la présence de matières organiques et de l'histoire hydrique du matériau (BOIFFIN, 1976 ; BOIFFIN et SEBILLOTTE, 1976 ; KEMPER & ROSENAU, 1984).

Un apport d'eau libre sur des matériaux à potentiel non nul peut également entraîner des contraintes de rupture au sein des assemblages, par gonflement différentiel, lorsque des gradients de potentiel importants apparaissent (STENGEL, 1982).

D'autre part, la présence d'eau peut entraîner en elle-même un affaiblissement des forces de liaison, consécutif au gonflement de la phase argileuse, et pouvant conduire à la dispersion dans le cas de matériaux sodiques (SHAINBERG, 1985).

Les forces de rupture correspondant à ces deux types d'énergie sont donc de nature très différente, et le rôle des facteurs de constitution vis-à-vis de ces forces est probablement différent selon les cas.

Les niveaux d'assemblages auxquels elles s'appliquent sont également très différents : cela peut aller de l'échelle de la particule à celle du pore millimétrique.

Il est clair que ces différents types de forces de rupture interviennent la plupart du temps simultanément ou successivement au cours des pluies : l'apport d'eau est normalement associé à une certaine énergie cinétique, sauf en cas de submersion ou d'irrigation localisée. Cependant, leur importance respective pourra être très variable selon les situations.

En définitive, on peut dire que la désagrégation lors de la mise en contact avec l'eau, résulte d'une combinaison des différents mécanismes que nous venons de décrire, et qui correspondent d'une part à l'affaiblissement des forces de liaison, et d'autre part à l'application de forces de rupture (fig.1).

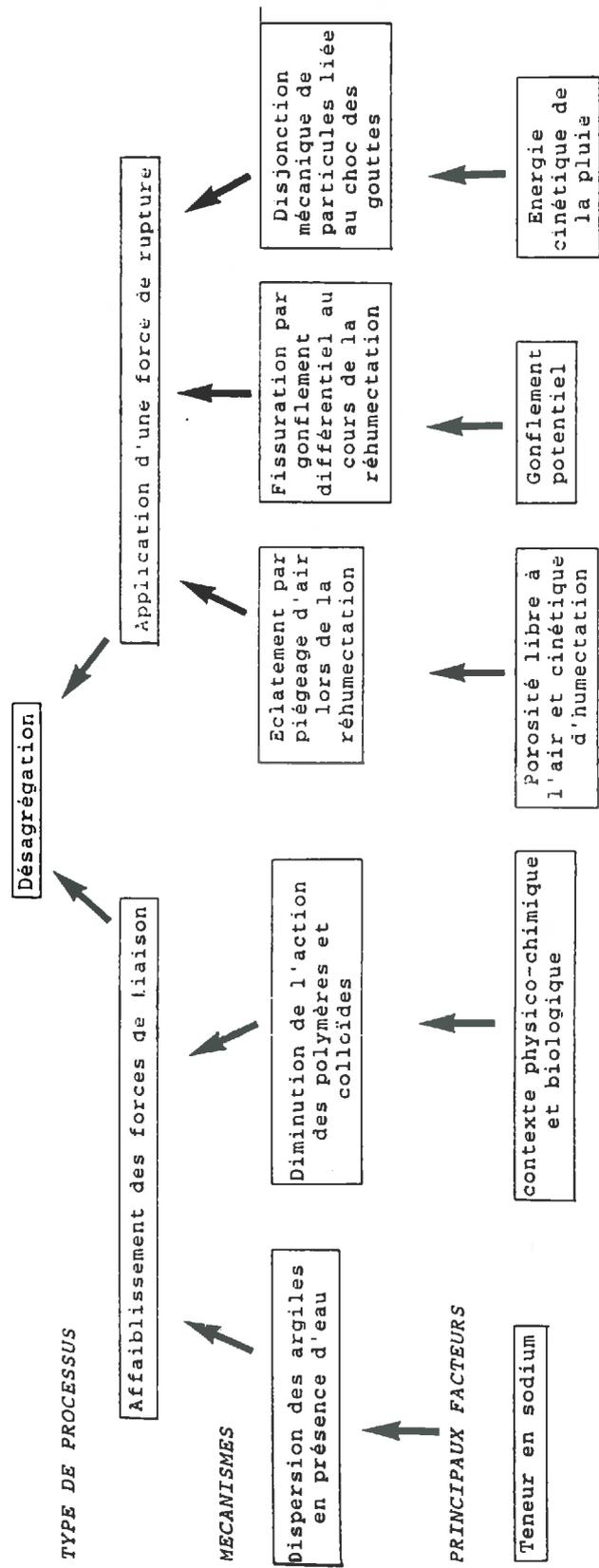


Figure 1: Les différents mécanismes à l'origine de la division des agrégats par l'eau.

### 3 – CONCLUSION : LES MECANISMES DE LA DESAGREGATION

L'ensemble de ces recherches montre que :

1) La cohésion des agrégats est assurée par la présence de composés minéraux ou organiques, jouant le rôle de ciments au sein des fractions minérales plus grossières et moins réactives, qui constituent le squelette du matériau.

2) L'efficacité de ces ciments est fonction des liaisons qu'ils peuvent établir entre eux et avec les autres particules, ces interactions étant fortement liées à la nature des cations présents, ainsi qu'à la présence de composés polymérisés.

Dans le cas où ces liaisons sont très faibles, les ménisques d'eau peuvent également assurer à certains potentiels une relative cohésion du matériau (sables ou limons purs).

3) Les pluies peuvent correspondre à l'application de deux types de forces de rupture : les unes liées à l'énergie cinétique des gouttes, les autres liées à la seule mise en contact de la terre avec de l'eau libre. Ces dernières ne peuvent intervenir que lorsque les agrégats ne sont pas saturés.

4) Les différents mécanismes pouvant entraîner la division des agrégats se rattachent à deux pôles :

o d'une part, ceux qui diminuent ou annulent l'effet des forces de liaison :

– dispersion des argiles en milieu aqueux lorsque le taux de saturation en sodium dépasse un certain seuil,

– suppression de l'effet des polymères ou de colloïdes, par modification du contexte physico-chimique ou biologique (modification du pH ou traitements chimiques conjointement à l'apport d'eau),

– gonflement lié à l'hydratation.

o d'autre part, ceux qui correspondent à l'application d'une force de rupture :

– fissuration par gonflement différentiel de l'agrégat au cours de la réhumectation. Elle est liée aux propriétés de gonflement des matériaux et à la vitesse d'humectation. On peut la qualifier de microfissuration, pour la distinguer de la fissuration d'horizons du sol,

– éclatement lié à la pression exercée par l'air piégé au sein de l'agrégat lors de la réhumectation,

– rupture mécanique liée au choc des gouttes de pluie à la surface du sol.

C'est essentiellement la combinaison entre les caractéristiques de constitution des matériaux, l'état hydrique initial des agrégats, et les caractéristiques de l'apport d'eau, qui va déterminer la nature des mécanismes de la désagrégation.

L'objectif de notre travail va donc être d'identifier ces mécanismes, et de définir les conditions dans lesquels ils interviennent, lors d'une pluie, afin de prévoir et de comprendre l'évolution morphologique des croûtes selon les conditions climatiques et la nature des matériaux.

Cet objectif nous conduira donc d'une part, à considérer une gamme de matériaux recouvrant une certaine variabilité des forces de liaison, et d'autre part, à reproduire des conditions de mise en contact terre-eau correspondant à l'application des différentes forces de rupture.

Le choix des matériaux et des méthodes utilisés dans notre travail résulte de ce double impératif.

## CHAPITRE 2 :

### LE SYSTEME EXPERIMENTAL

#### 1 – PRESENTATION DES MATERIAUX

Le choix des matériaux sur lesquels nous avons travaillé relève d'une série d'impératifs liés aux objectifs définis précédemment : il s'agit de couvrir une large gamme de comportements vis-à-vis de la battance, mais aussi d'analyser l'ensemble des mécanismes à l'origine de ces comportements, ainsi que leur déterminisme. Pour cela, il a été nécessaire d'utiliser non seulement des matériaux limoneux naturels, mais aussi des matériaux plus argileux et des matériaux modifiés par des traitements.

##### A) La gamme des matériaux limoneux

Nous avons travaillé dans un premier temps sur des matériaux présentant tous une texture à dominante limoneuse, mais nous permettant d'exploiter une large gamme de comportements moyens observés vis-à-vis de la battance. Ils proviennent de différentes régions de la moitié Nord de la France, et ont été prélevés dans l'horizon labouré (Ap), sur des parcelles portant des successions de cultures annuelles.

Le tableau 1 regroupe les caractéristiques analytiques des 7 échantillons étudiés.

##### \* Granulométrie

En dehors de la forte dominance limoneuse déjà mentionnée (2-50  $\mu\text{m}$  compris entre 62,2 et 78,5 p100), ces matériaux ont en commun une faible teneur en sables grossiers (moins de 3 p100 de particules  $> 100 \mu\text{m}$ ). Ils sont très peu ou pas calcaires, et présentent des pH voisins de la neutralité.

La principale variation porte sur leur teneur en argile ( $< 2 \mu\text{m}$ ), qui s'échelonne entre 11,5 et 31,4 p100.

	GRANULOMETRIE (microns)							C %	pH	Calc %	CEC méq/ 100g	10MO/ A	CEC/ A
	0-2	2-5	5-10	10-20	20-50	50-100	>100						
Montluel	11.5	4.3	6.1	15.4	44.6	15.0	3.2	0.84	6.1	0.0	4.7	1.2	41
Hesdin	13.3	3.4	5.3	14.3	46.6	16.7	0.3	1.10	7.0	0.3	7.7	1.4	58
Le Ménard	16.5	4.7	7.6	21.8	44.4	4.0	2.8	1.02	7.2	0.0	8.4	1.0	51
Grand Juday	19.0	4.7	8.3	21.0	42.0	3.4	2.0	0.79	6.6	0.0	8.7	0.7	47
Palaiseau	20.4	2.6	5.8	16.7	46.6	6.2	1.6	1.11	6.2	0.3	10.1	0.9	51
Chêne	22.4	4.1	5.9	17.9	44.2	5.3	0.3	1.02	8.0	0.9	10.6	0.8	51
Boigneville	31.4	4.1	7.0	17.2	33.9	6.1	0.3	1.06	6.8	0.3	15.9	0.6	51

Tableau 1: Caractéristiques analytiques des matériaux limoneux.

**\* C.E.C.**

Ramenée à 100 g d'argile granulométrique, la CEC s'écarte peu d'une valeur moyenne voisine de 50 meq ; sauf pour MONTLUEL et HESDIN, le premier étant en dessous et le second au-dessus de cette valeur.

**\* Matières organiques**

La teneur en carbone organique est faible et peu variable d'un échantillon à l'autre. Une certaine variabilité apparaît cependant, lorsque l'on calcule le rapport MO/A dont MONNIER (1965) a montré qu'il était une variable plus pertinente de l'efficacité des matières organiques sur la stabilité. Toutefois ces teneurs restent faibles, et peu susceptibles d'améliorer de façon sensible la stabilité, sauf peut-être pour les 2 ou 3 échantillons les moins argileux, et en particulier HESDIN dont le rapport MO/A atteint 1,4.

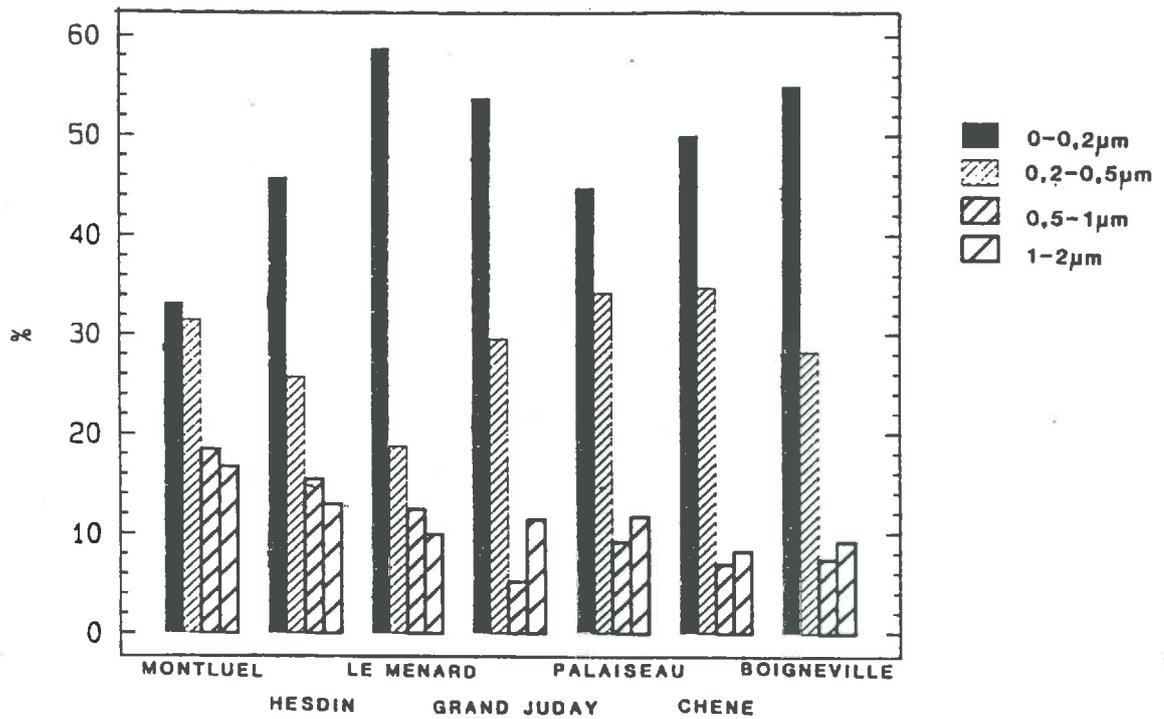


Figure 2: Proportions relatives des différentes fractions argileuses des matériaux limoneux.

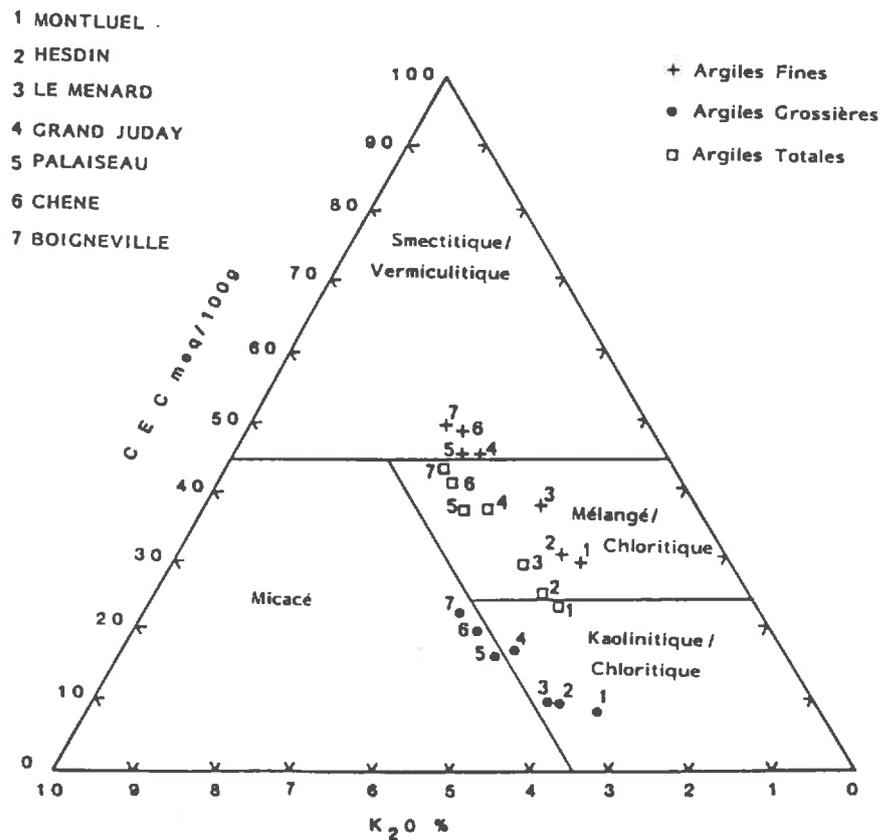


Figure 3: Classes minéralogiques des argiles définies par la C E C et le taux de K<sub>2</sub>O.

**\* Minéralogie des matériaux**

On a cherché à approfondir la caractérisation de la fraction argileuse des matériaux. En effet, celle-ci étant largement responsable de la cohésion des matériaux, on peut supposer qu'au-delà des variations quantitatives de cette fraction, des variations qualitatives puissent également intervenir et jouer un rôle sur la structure des matériaux, et sur leur résistance mécanique.

Nous nous sommes donc intéressés à la répartition granulométrique et à la nature minéralogique de cette fraction  $< 2\mu\text{m}$ .

La figure 2 montre que certaines différences existent entre matériaux, quant à la répartition de la taille des particules les plus fines. Ces différences apparaissent d'ailleurs liées à la teneur en quartz de ces fractions (tab. 2), ainsi qu'à leur nature minéralogique (fig.3).

	Argiles fines	Argiles grossières	Argiles totales	Limons 2-5 $\mu\text{m}$	Teneur en argiles corrigées : (Arg. granul. - Quartz)
Mt	0	21.9	12.8	75	10.0
Hd	0	16.8	8.3	56.5	12.2
LM	0	30.4	11.1	88	14.7
GJ	0	32.4	10.6	86	17.0
Pal	0	24.2	10	70	18.4
Ch	0	18.4	6.8	57	20.9
Boi	0	24.8	8.6	70.5	28.7

Tableau 2: Teneur en quartz des fractions fines des matériaux limoneux.

En définitive, il semble que dans notre gamme de matériaux, les variations qualitatives de la fraction argileuse soient faibles, et aillent toutes dans le même sens, en accentuant le poids des différences quantitatives ; c'est-à-dire que les matériaux ayant le plus faible taux de particules  $< 2\mu\text{m}$ , sont aussi ceux pour lesquels la teneur en quartz de cette fraction est la plus forte et la réactivité des argiles minéralogiques la plus faible.

Ces résultats analytiques montrent que la variabilité de la nature minéralogique des argiles des horizons superficiels des sols limoneux étudiés est faible, et qu'elle est liée à la teneur en argile des matériaux.

Le critère "teneur en argile", est donc en même temps un indicateur de la qualité de cette phase, et il devrait avoir un poids important vis-à-vis du comportement structural des matériaux (JAMAGNE, 1973).

**\* Stabilité structurale**

Les résultats (tableau 3) du test de stabilité structurale de HENIN et MONNIER (1956) (pratiqués ici sur la terre < 2 mm) font apparaître, en utilisant la fiche d'interprétation proposée par MONNIER et al (1982), des comportements globaux allant de stable à très instable. Ils confirment donc l'ampleur de la gamme de comportements tendantiels recherchée ; mais aussi la faible influence de la matière organique (Agb) et le rôle déterminant de la texture (Aga) dans la variabilité des comportements vis-à-vis de la désagrégation par l'eau.

	Age	Aga	Agb	<20µm max	S	K	Diagnostic
Montluel	8,5	9,0	7,3	23,8	9,68	1,83	très instable
Hesdin	5,8	14,2	2,7	17,3	2,47	2,84	instable
Le Ménard	4,9	8,0	5,2	31,4	10,59	1,49	très instable
Grand Juday	5,5	20,1	3,9	34,9	4,77	1,34	instable
Palaiseau	3,3	8,5	2,7	29,6	9,93	2,32	très instable
Chène	2,2	10,3	1,5	30,4	7,38	3,25	très instable
Boigneville	15,4	35,0	3,8	28,3	1,67	5,72	stable

Tableau 3: Résultats des tests de stabilité structurale réalisés sur la terre fine (<2 mm)

Une grande partie des expérimentations a été réalisée avec ces sept matériaux. Mais à chaque fois que l'utilisation de cette variabilité de constitution ne nous est pas apparue nécessaire à l'analyse, nous nous sommes limités à un, deux ou trois de ces matériaux : essentiellement PALAISEAU qui présente les caractéristiques moyennes de notre gamme, et pour lequel de nombreuses données complémentaires sont disponibles, en particulier du

point de vue du comportement au champ et du point de vue micromorphologique (BOIFFIN, 1984). Nous avons également privilégié, dans certains cas MONTLUEL et BOIGNEVILLE qui correspondent aux extrêmes de notre gamme.

Inversement, il a été nécessaire, à certains stades de notre travail, de recourir à d'autres matériaux, soit pour augmenter artificiellement et mettre plus clairement en évidence le rôle de certaines caractéristiques de constitution (cas du sodium et de la matière organique), soit pour faciliter l'analyse de certains mécanismes (rôle de l'argile et du gonflement).

On a donc adjoint à la gamme initiale de matériaux, d'une part deux matériaux plus argileux, et d'autre part des matériaux modifiés à partir de ceux de départ.

### B) Les deux matériaux argileux

Ces deux matériaux, à dominante texturale argileuse, seront utilisés pour analyser les mécanismes de désagrégation liés aux propriétés de gonflement des agrégats lors de leur réhumectation.

Leur origine est très différente de celle des limons : respectivement terrasses alluviales de la Durance (VIGNERES), et argile cénomanienne du Cher (LIGNERES).

Leurs principales caractéristiques figurent dans le tableau 4.

	Granulométrie ( $\mu\text{m}$ )					C.E.C. meq/100 g	Carb. Org. %
	0 - 2	2 - 20	20 - 50	50 - 100	> 100		
Les Vignères	45.8	36.3	9.6	6.4	1.9	19.6	2.2
Lignères	92.9	3.7	0.8	1	1.6	29.6	0.2

Tableau 4: Caractéristiques analytiques des matériaux argileux.

### C) Les matériaux "traités"

On a procédé à deux types de traitement sur des matériaux limoneux de la gamme initiale.

o On a d'une part modifié la garniture cationique de BOIGNEVILLE, en le rendant sodique, sans modifier la structure des agrégats. On a utilisé pour cela, la procédure suivante :

– les agrégats de départ ont été immergés dans l'éthanol à 70 % dans lequel a été dissous la quantité de NaCl nécessaire à saturer la proportion de capacité d'échange du matériau désirée ; après 12 h d'échange on a siphonné le surnageant et on a recommencé deux fois l'opération ; puis on a lavé l'échantillon avec le mélange eau-éthanol à 70 % pur, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de traces de chlore dans le surnageant.

On a finalement obtenu deux matériaux : l'un légèrement enrichi en sodium, et l'autre dont la totalité de la capacité d'échange est occupée par du sodium (Na ech = 15 meq/100 g).

o L'autre type de traitement a consisté à augmenter le taux de matière organique de deux matériaux : MONTLUËL et PALAISEAU, en pulvérisant à la périphérie des agrégats une solution d'acides humiques extraits d'une tourbe par la méthode décrite par CHASSIN et al. (1978).

Deux doses ont été apportées, correspondant respectivement à 0,3 % et 1 % du poids de l'échantillon. Mais l'apport a été fractionné afin de favoriser une localisation périphérique de la matière organique additionnée.

On a étalé les agrégats à traiter sur un plateau et on a pulvérisé une première dose de 0,1 %. On a laissé sécher l'ensemble à l'air, puis on a agité le plateau pour retourner les agrégats avant d'appliquer une nouvelle dose, et ainsi de suite jusqu'à l'application de la dose totale.

Il s'agit donc dans les deux cas, de la modification d'une des caractéristiques des matériaux traités, sans perturbation de l'organisation et de la structure initiale des agrégats.

## 2 – LES METHODES UTILISEES

On a cherché dans cette première partie, à mettre au point et à appliquer différentes méthodes correspondant à des modalités de l'apport d'eau à la fois variées et contrôlées, afin de faire varier la nature et les modalités d'application des forces de rupture.

On a d'autre part cherché à exprimer les résultats de la manière la plus significative possible par rapport au phénomène étudié, c'est-à-dire l'évolution structurale et la mobilisation des particules.

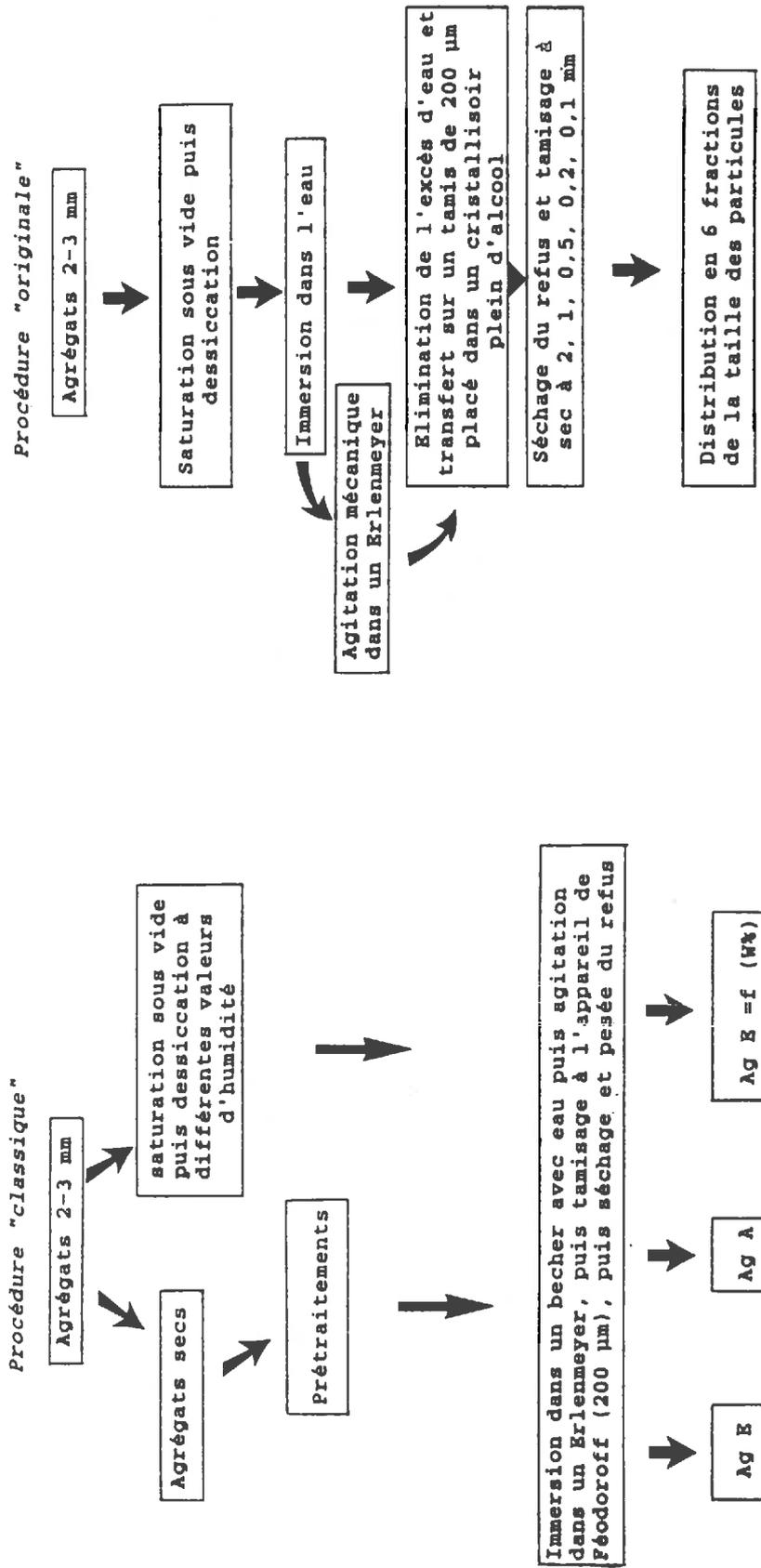


Figure 4: Comparaison des méthodes utilisées pour l'étude du comportement des agrégats immergés dans l'eau.

L'ensemble des méthodes et protocoles utilisés l'ont été afin de permettre une vérification de la validité des hypothèses formulées dans le chapitre précédent, à savoir l'existence d'interactions entre les caractéristiques des matériaux, l'état initial des agrégats et les modalités de l'apport d'eau.

#### **A) Immersion d'agrégats dans l'eau**

Dans la première série d'expériences (chapitre 3), notre objectif étant d'étudier le déterminisme du mécanisme d'éclatement, on a donc utilisé un ensemble de méthodes ayant en commun :

- la mise en contact des matériaux étudiés avec un large excès d'eau (immersion),
- l'évaluation par tamisage du résultat de la division des agrégats.

En fonction des besoins de l'analyse nous avons eu recours à une ou plusieurs des procédures suivantes (figure : 4) :

o La méthode proposée en 1956 par HENIN et MONNIER qui a comme caractéristiques :

- de comparer à l'action directe de l'eau, un test avec saturation préalable des fragments par de l'alcool éthylique, dans le but de minimiser le mécanisme de désagrégation par éclatement,

- de comporter entre l'action initiale de l'eau et le résultat une série d'actions mécaniques : agitation et tamisage sous l'eau, limitant la possibilité d'analyse directe du rôle respectif de l'une ou l'autre, sur la division des fragments soumis au test et leur éventuel dispersion,

- de limiter l'expression des résultats à un taux de particules, dit agrégats stables, constituant le refus d'un tamisage à 200 $\mu$ m (Age et Aga pour le test sans et avec prétraitement à l'alcool respectivement), éventuellement complété par un taux de particules < 20  $\mu$ m, mesuré par sédimentométrie.

La seule modification à la procédure standard, a été d'utiliser des agrégats calibrés entre 2 et 3 mm, afin de mieux contrôler l'état initial des échantillons, pour pouvoir en étudier l'évolution.

Par rapport à l'objectif d'analyse que nous nous sommes fixés, cette méthode présentait donc l'intérêt de fournir une évaluation sommaire d'un comportement global, vis-à-vis d'actions de nature différente, et de fournir un premier moyen d'analyse (comparaison Aga-Age).

o Une procédure mise au point dans le double but :

- de limiter les actions mécaniques préalables, ou impliquées dans l'évaluation de la désagrégation, permettant ainsi de préciser les conditions de l'éclatement,
- de fournir une distribution granulométrique plus complète du résultat de la désagrégation.

On s'est fondé pour cela sur les propriétés de miscibilité de l'alcool éthylique et de l'eau, et sur le comportement des agrégats terreux dans l'alcool.

Le protocole finalement adopté a été le suivant :

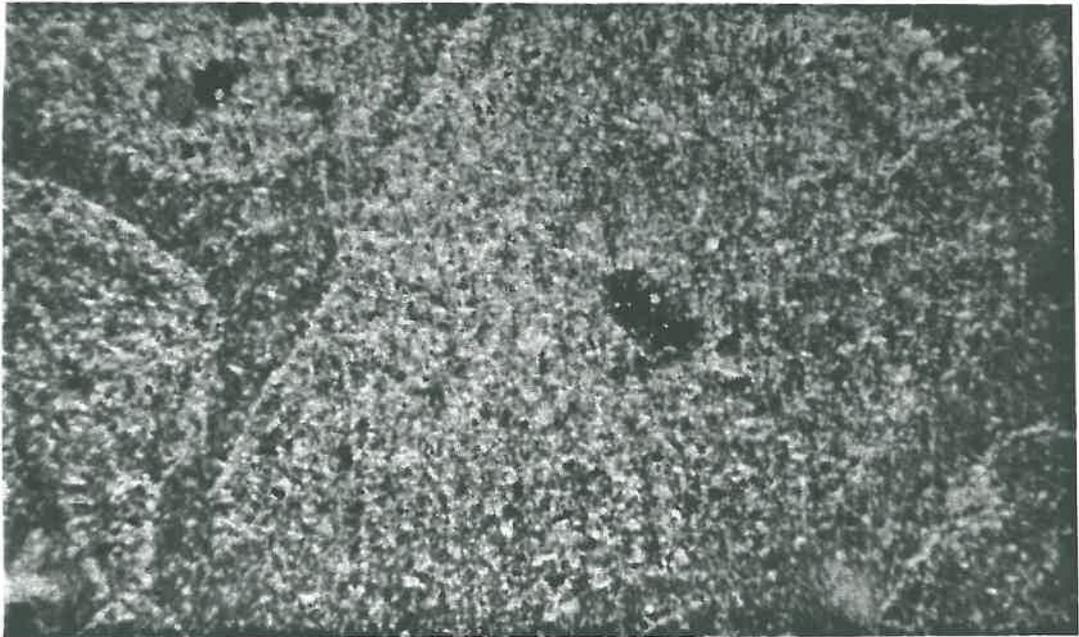
l'échantillon (5 g de terre sèche) est immergé dans l'eau durant le laps de temps choisi (5 mn). L'excès d'eau est alors éliminé par décantation, et l'échantillon est transféré sous l'alcool sur un tamis de 100  $\mu\text{m}$  d'ouverture de maille. L'objectif est de fixer l'état de désagrégation atteint au cours de la première phase, et d'effectuer un premier tri non destructif, à une dimension compatible avec le tamisage sous liquide.

Le refus à 100  $\mu\text{m}$  est alors séché par passage à l'étuve à 105 °C jusqu'à poids constant, puis tamisé à sec, technique non destructive si elle est peu prolongée, à 2, 1, 0,5, 0,2 et 0,1 mm.

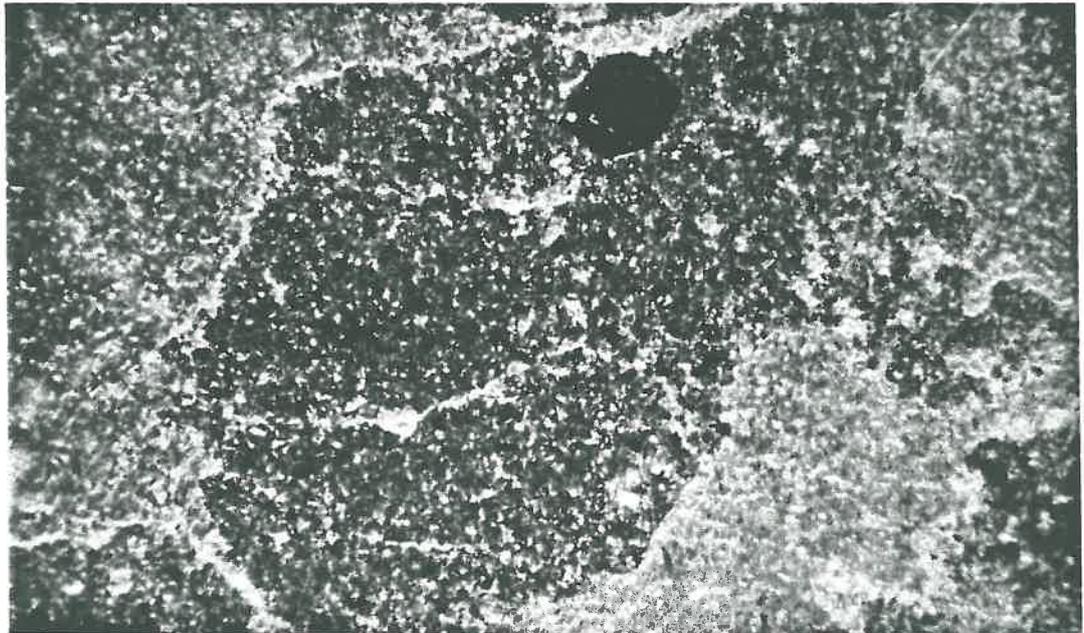
On obtient ainsi une distribution en 6 classes de la taille des particules résultantes, éventuellement complétée par un fractionnement sédimentométrique de la classe < 100  $\mu\text{m}$ .

Ces méthodes ont été appliquées à des agrégats calibrés de tailles variables, mais le plus souvent compris entre 2 et 3 mm ou 3 et 4 mm. La morphologie de ces agrégats est illustrée sur la figure 5, qui montre des images de lames minces réalisées avec les agrégats de MONTLUEL, PALAISEAU et BOIGNEVILLE. On observe bien sur ces lames l'augmentation de la phase argileuse, et conjointement, la réduction de la porosité lacunaire. Le choix de ce calibrage initial est lié à la nécessité de bien contrôler l'état structural de l'échantillon étudié, afin de pouvoir en mesurer l'évolution avec suffisamment de précision. Le calibre retenu correspond à l'organisation élémentaire des matériaux de sol : organisation texturale, c'est-à-dire avec le minimum de porosité d'origine structurale. On limite ainsi le risque de prendre en compte un facteur de variabilité difficilement contrôlable.

MONTLUEL



PALASEAU



BOIGNEVILLE

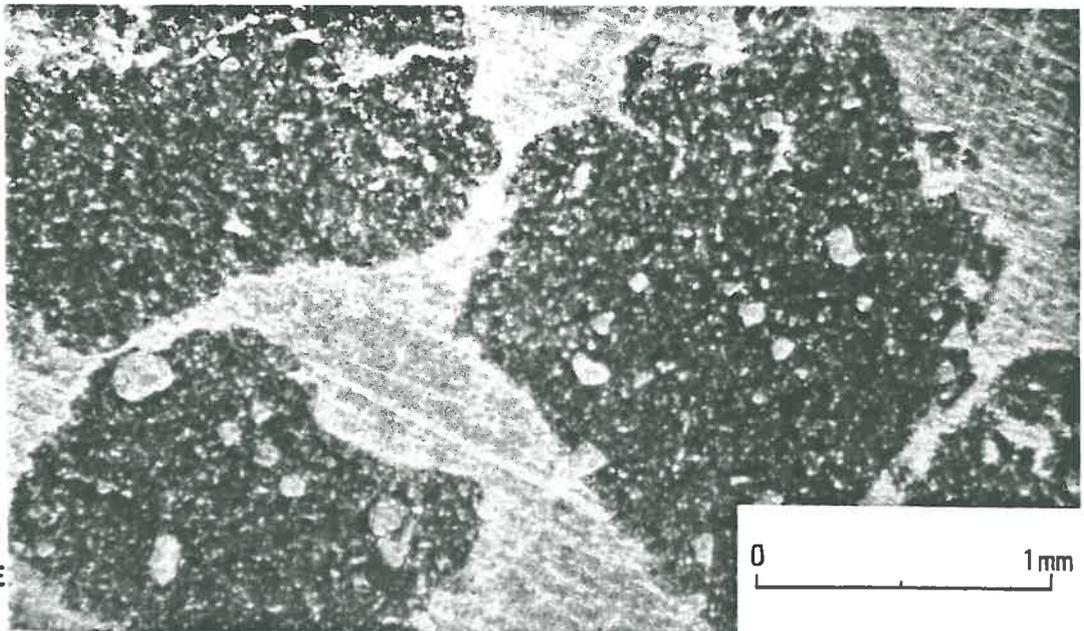


FIGURE 5 : OBSERVATION EN MISCROSCOPIE OPTIQUE SUR LAMES MINCES, DE LA STRUCTURE DES AGREGATS UTILISES.

Nous avons accordé une place importante à l'influence de l'état hydrique initial des échantillons étudiés. Le schéma de HENIN-YODER implique en effet, que le taux de saturation soit un facteur déterminant de l'intensité de la désagrégation et des résultats obtenus par BOIFFIN (1984) et d'autres auteurs (HARTMANN & DE BOODT, 1974 ; COUSEN & FARRÉS, 1984 ; KEMPER & ROSENAU, 1984 ; BULLOCK & al., 1988), ont montré l'importance souvent déterminante de ce facteur dans le comportement ultérieur vis-à-vis de l'eau. Ces résultats suggèrent que l'étude des conséquences de ces variations peut contribuer à l'analyse des différents mécanismes de la désagrégation.

La technique utilisée pour amener les échantillons à un état hydrique initial donné est celle proposée par MONNIER et al., (1973) : humectation des agrégats par capillarité sous vide jusqu'à saturation, suivie d'une dessiccation contrôlée, jusqu'à une humidité ou un potentiel donnés. Ces états hydriques initiaux ont été caractérisés par la teneur en eau pondérale et volumique, par le potentiel hydrique, et par le taux de saturation (les courbes de retrait-gonflement et les fonctions potentiel/teneur en eau obtenues sur agrégats de 2-3 mm figurent en annexes).

### **B) Réhumectation par capillarité**

Dans une seconde série d'expériences, il s'agissait d'étudier les mécanismes de désagrégation liés à la réhumectation progressive des agrégats, afin de limiter l'intervention de l'éclatement.

On a donc mis en oeuvre un protocole pour amener les agrégats à saturation par capillarité, à l'air ou sous vide et permettant de contrôler la vitesse de réhumectation.

La procédure est la suivante :

– les agrégats calibrés entre 3 et 4 mm, séchés à l'air, sont disposés sur une surface de tissus maintenue à un potentiel de  $-3$  mbar,

– lorsque les agrégats sont saturés, ils sont transférés sur un tamis de  $100\ \mu\text{m}$  placé dans un cristalliseur rempli d'éthanol. Puis le refus est séché à l'air et tamisé à sec, selon la même procédure que celle décrite précédemment.

Ainsi, il est possible de comparer l'effet de la réhumectation, aux autres modes de désagrégation, et de le décrire en terme de taille des particules résultantes.

On a pu faire varier la vitesse de réhumectation, tout en conservant le même potentiel hydrique final, en modifiant la nature de la surface de réhumectation sur laquelle sont disposés les agrégats : plus celle-ci est souple et rugueuse, plus le nombre de points de contacts avec l'agrégat est élevé et plus la réhumectation se fait rapidement.

### C) Application d'une énergie mécanique

L'aspect mécanique de la désagrégation a été abordé dans cette partie par le biais d'une comparaison des résultats avec et sans agitation, mais il le sera surtout dans la deuxième partie à l'aide d'un goutteur, car il paraît difficile de reproduire l'action mécanique des gouttes de pluie sur les agrégats par agitation dans l'eau.

### 3 – EXPRESSION DES RESULTATS

On a, dans un premier temps, exprimé les résultats en terme d'agrégats stables, dans l'acception usuelle du test HENIN-MONNIER, c'est-à-dire en calculant le pourcentage pondéral des particules supérieures à 200  $\mu\text{m}$  à l'issue du traitement expérimental.

Pendant, la nécessité d'une description plus précise des résultats s'est rapidement imposée afin d'arriver à une analyse plus fine. Et on a cherché à décrire la **distribution de la taille des particules résultantes (D.T.P.R.)**. Un compromis entre précision et possibilité de mesure nous a conduit à retenir six classes de taille de particules pour cette description : 0-100  $\mu\text{m}$  ; 100-200  $\mu\text{m}$  ; 200-500  $\mu\text{m}$  ; 500  $\mu\text{m}$ -1 mm ; 1-2 mm ; > 2 mm.

On a donc calculé pour chaque expérimentation, le pourcentage pondéral de chacune de ces six classes. Chaque résultat peut donc être représenté graphiquement par une courbe ou un histogramme construit à partir des six pourcentages calculés.

On considère que pour des agrégats initiaux calibrés entre 3 et 4 mm, les cinq premières classes correspondent à des particules résultant de la fragmentation, alors que la sixième (> 2 mm) correspond aux agrégats résiduels. Mais il est clair que pour des agrégats initiaux de plus gros calibre, cette classe peut aussi inclure des fragments d'agrégats, il faudrait dans ce cas élargir la description aux classes supérieures.

A partir de la D.T.P.R., on peut effectuer des calculs complémentaires, ou simplement extraire les valeurs relatives à une ou plusieurs classes données, dont on considère qu'elles sont les plus significatives du mécanisme étudié. On aura ainsi le plus souvent, une première expression globale des résultats (D.T.P.R.), puis une seconde expression plus interprétative, correspondant soit à une indexation des valeurs précédentes, soit à un calcul des proportions relatives de certaines classes, soit à la valeur d'une classe particulière, etc.

**CHAPITRE 3 :**  
**LE COMPORTEMENT D'AGREGATS DE SOLS**  
**IMMERGES DANS L'EAU**

**1) INTRODUCTION**

Une approche classique du comportement structural des agrégats, qui a pour objectif la caractérisation de la sensibilité des matériaux, est fondée sur le concept de stabilité structurale et tend à évaluer à l'aide de tests pratiqués au laboratoire, le comportement de fragments terreux, préalablement calibrés ou non, très généralement initialement secs, lorsqu'ils sont au contact d'un large excès d'eau. De nombreuses variantes dans la procédure du test proprement dit et dans le mode d'expression des résultats ont été proposées et analysées. (QUIRK, 1950 ; HENIN & MONNIER, 1956 ; DE LEENHEER & DE BOODT, 1959 ; KEMPER, 1965 ; BRYAN, 1968 ; PAUWELS et al., 1976 ; MONNIER, 1982). Elles ont en commun :

- de privilégier le rôle des propriétés du sol par rapport à celui des conditions d'humectation,
- de favoriser le mécanisme d'éclatement, lié au piégeage de l'air lors de l'humectation des agrégats (schéma de HENIN-YODER),
- de mêler dans un résultat global, l'effet de mécanismes de division très différents par leur nature et les facteurs qui les commandent : pression capillaire, actions mécaniques de l'agitation et du tamisage,
- de ne fournir de ce fait que des indications globales et tendanciennes sur le comportement comparé de sols placés dans un même contexte général climatique et cultural, ou sur l'évolution du comportement d'un sol donné, en fonction par exemple des variations de son statut organique. Ceci est dans de nombreux cas très suffisant et permet de montrer l'influence de caractéristiques données (MERIAUX, 1958). Par contre, de telles informations ne permettent de prévoir ni la dynamique de formation des croûtes dans des conditions climatiques données, ni a fortiori leur structure et ses conséquences hydriques et mécaniques.

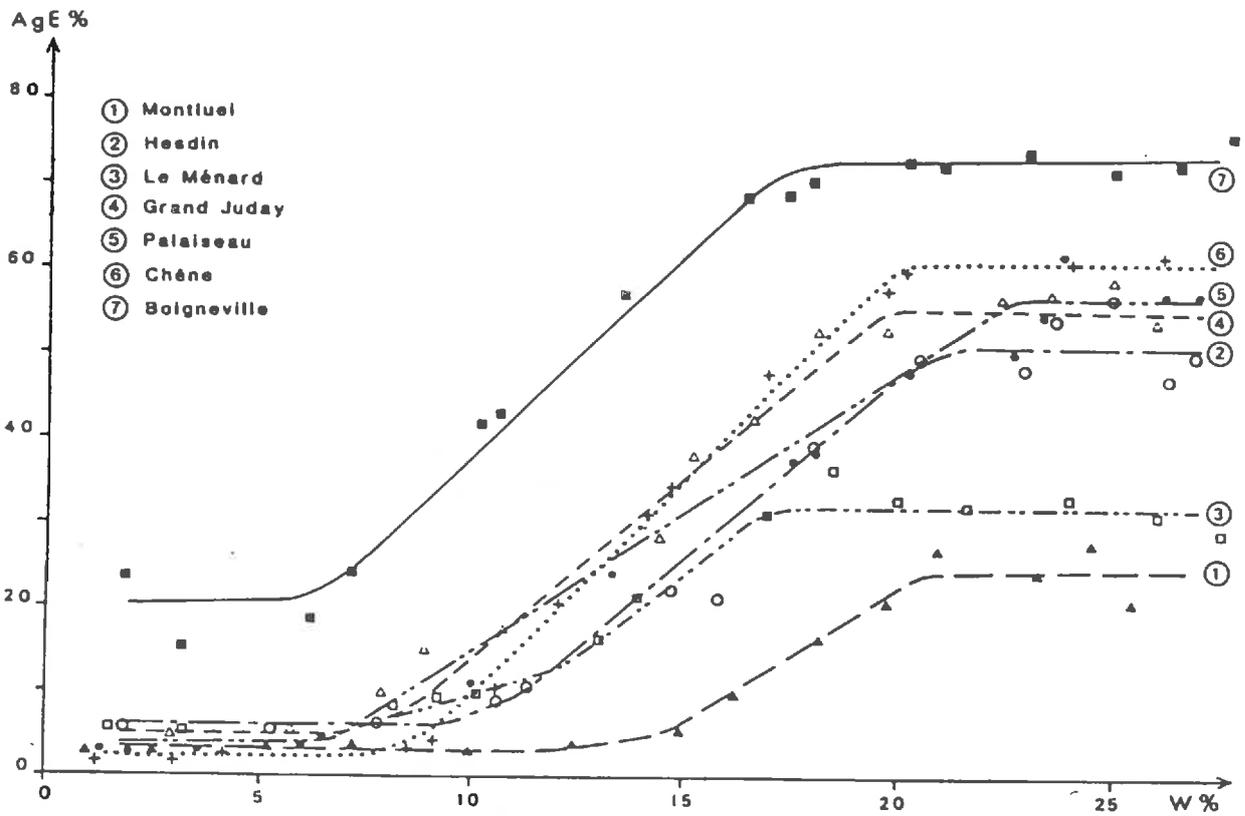


Figure 6: Relations entre le taux d'agrégats stables à l'eau (AgE), et la teneur en eau initiale.

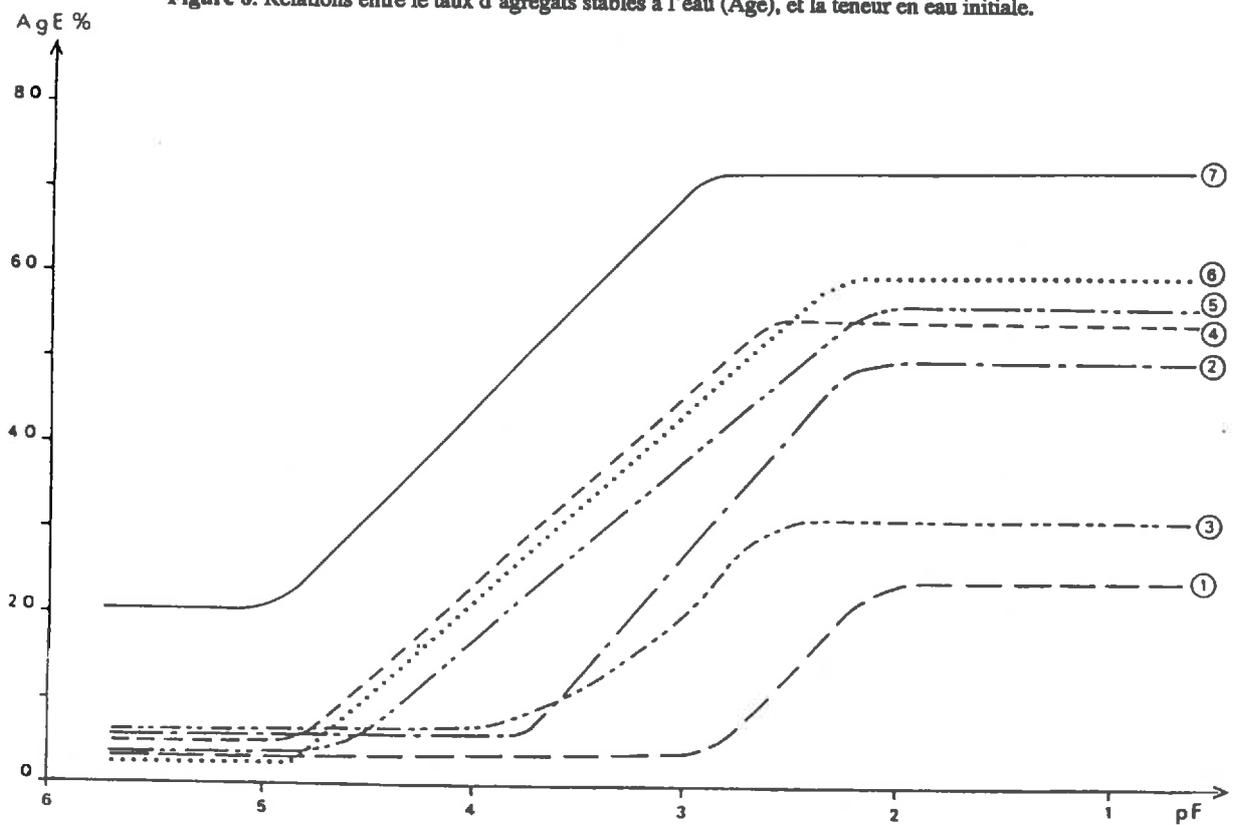


Figure 7: Relations entre le taux d'agrégats stables à l'eau (AgE) et l'état énergétique initial de l'eau dans les agrégats (pF).

Nous nous proposons donc ici d'apporter une contribution à ces questions, à travers la mise en évidence expérimentale de différents mécanismes de désagrégation des mottes sous l'action de l'eau, préalablement à leur déplacement ; l'analyse des facteurs et paramètres qui les commandent et la caractérisation des particules mobilisées par chacun d'entre eux.

Il ne s'agit donc plus de tester les matériaux, mais d'analyser le déterminisme de leur comportement dans différentes conditions de mise en contact avec l'eau. Cette première série d'expérimentations concerne le comportement d'agrégats immergés dans l'eau, et les principaux paramètres étudiés sont l'état hydrique initial, le calibre des agrégats, la granulométrie des matériaux.

## **2) RESULTATS ET DISCUSSION**

### **A – Influence de l'état hydrique initial**

#### **a) Résultats**

– Les figures 6 et 7 représentent les résultats des tests réalisés selon le protocole HENIN, exprimés respectivement en fonction de l'humidité pondérale et du pF initial des agrégats de 2-3 mm.

On peut constater :

– une constance de la forme générale de ces courbes, qui présentent 3 domaines, limités par 2 paliers : désagrégation maximale pour les faibles humidités et minimale pour les humidités élevées, entre lesquelles Age augmente régulièrement avec la teneur en eau, dans la gamme des humidités intermédiaires,

– une discrimination des sols étudiés beaucoup plus forte dans le domaine des humidités élevées que dans celui des faibles teneur en eau, avec des classements différents en fonction de l'humidité : certaines courbes se croisent.

– La figure 8 représente cette fois pour trois des matériaux, l'évolution des proportions des 6 classes de particules, mesurées selon la procédure mise au point et décrite ci-dessus (l'espace entre deux courbes représente la proportion de particules de la classe considérée).

On observe une allure générale de l'influence de l'humidité comparable, avec l'existence des mêmes domaines que précédemment pour toutes les classes de particules.

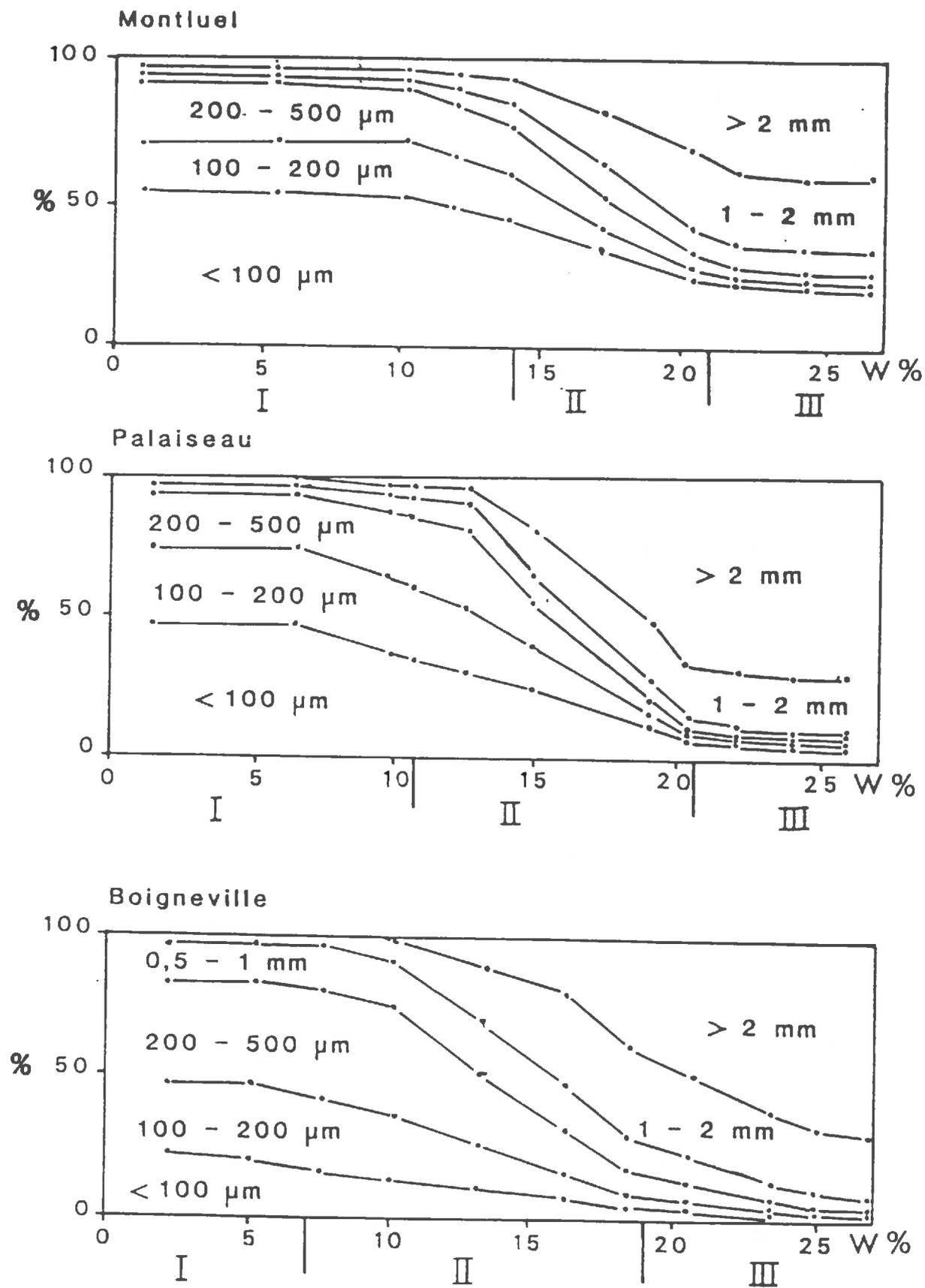


Figure 8: Evolution des D.T.P.R. après immersion en fonction de la teneur en eau initiale (agrégats 2-3 mm). a : Montluel, b : Palaiseau, c : Boigneville.

Cependant, la mesure de la distribution des tailles de particules permet une discrimination accrue des matériaux et des domaines de comportements. Elle met en particulier en évidence les différences dans la quantité totale des particules produites (particules  $< 2\text{mm}$ ), et dans la distribution dimensionnelle de ces particules dans les différents domaines (fig.9).

## **b) Discussion**

### **o La division des agrégats dans le domaine des faibles humidités initiales.**

La désagrégation est maximale dans ce domaine, elle conduit à une disparition quasi-totale des particules les plus grosses. Dans tous les cas, il y a prédominance des particules inférieures à  $500\ \mu\text{m}$ , et à l'intérieur de ces classes, la taille dominante est d'autant plus faible que la teneur en argile est faible (fig. 9a).

Ainsi, il semble que l'on soit en présence d'un résultat analogue pour tous les matériaux et tout au long de la gamme des faibles humidités.

Cette observation conduit à formuler 2 remarques .

– En ce qui concerne l'expression des résultats il est important de noter que la forme de ces courbes est fortement liée aux mesures effectuées et au choix des variables représentées, en particulier en ce qui concerne la présence des seuils : le fait de les observer, aussi bien au niveau des faibles teneur en eau que des fortes humidités, ne signifie pas forcément qu'il s'agit d'une brutale modification dans l'évolution du résultat ; l'apparition d'un palier peut être simplement liée au fait que la mesure effectuée ne permet plus de détecter cette évolution. En effet, on n'effectue que des mesures discontinues qui sont liées aux mailles de tamis utilisées ( $100\ \mu\text{m}$  minimum). Ainsi, il est possible que la désagrégation continue d'augmenter au sein de la classe inférieure à  $100\ \mu\text{m}$  lorsque la teneur en eau diminue à l'intérieur du domaine de stabilité minimale.

Cependant la persistance de la présence de ces paliers pour tous les matériaux avec les 2 protocoles différents et pour l'ensemble des classes de taille de particules semble lui conférer une existence significative.

– Par ailleurs, il faut préciser que chaque point représenté sur les graphiques correspond à la valeur moyenne de 2 ou 3 répétitions, et que les écarts-types sur ces mesures sont en général faibles ( $< 5\%$ ), mais variables selon les matériaux et le domaine d'humidité ; ils sont plus élevés pour les fortes teneurs en eau, ainsi que pour les faibles teneurs en eau dans le cas de BOIGNEVILLE.

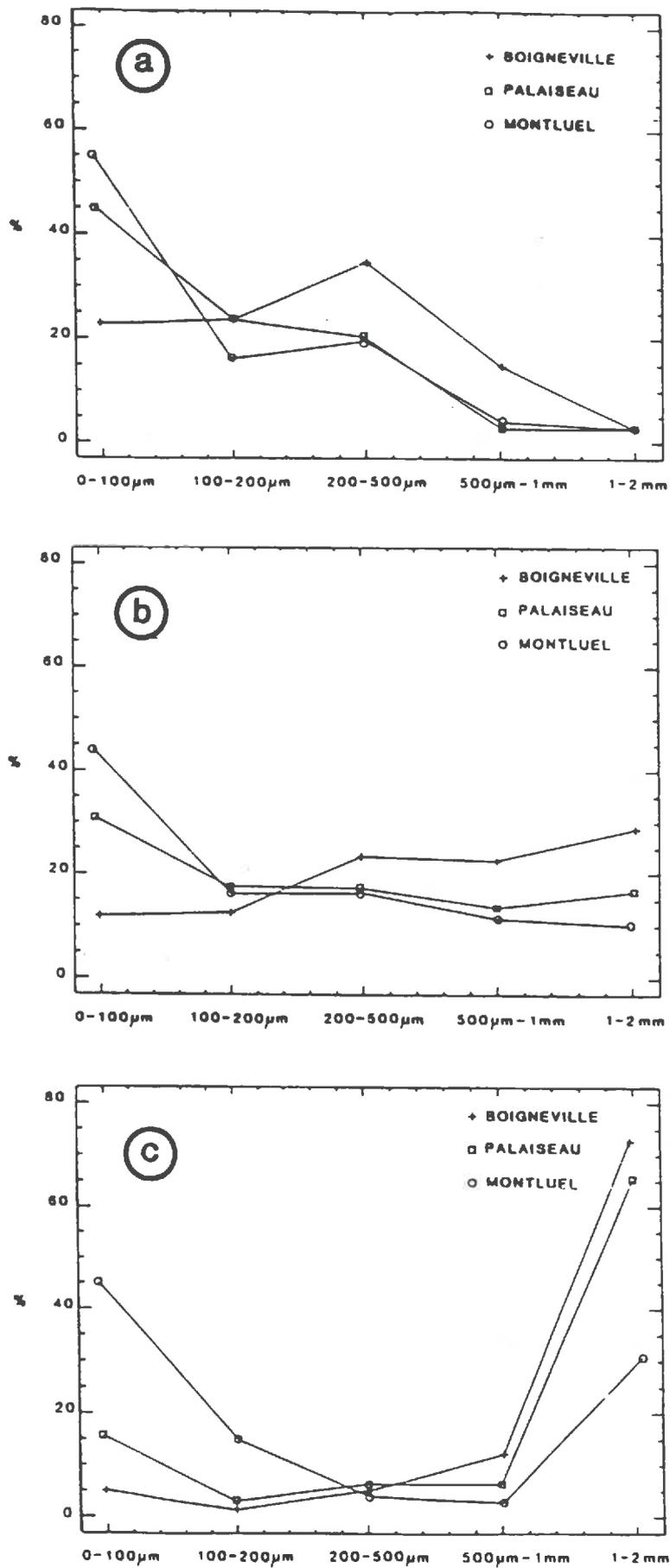


Figure 9: Comparaison des proportions relatives des particules résultantes (< 2 mm) pour les trois matériaux . a : domaine des faibles humidités (W = 5 %), b : domaine des humidités intermédiaires (W = 15%), c : domaine de saturation (W = 25 %).

Ceci étant dit, ce domaine de comportement correspond tout à fait aux conditions de réalisation du phénomène d'éclatement décrit par le schéma de HENIN-YODER évoqué dans l'introduction, et par ailleurs très bien étudié (HENIN, 1938 ; MONNIER, 1965 ; KEMPER, 1965 ; CONCARET, 1968).

Les principaux apports de nos résultats concernent la mise en évidence de l'étendue du domaine hydrique dans lequel ce mécanisme intervient de manière totale : en effet, ce domaine est très variable selon les matériaux, en terme de teneur en eau mais aussi de potentiel hydrique. Le pF à partir duquel la quantité de particules produites commence à augmenter varie entre 5 et 3 lorsque l'on passe de BOIGNEVILLE à MONTLUEL (fig.7).

D'autre part, ces résultats nous permettent de discuter de l'évolution structurale en terme de quantité de particules produites et de dimension de ces particules.

Ainsi, ce domaine correspond à une quantité de particules produites maximale proche de 100 % (fig.8), et à une dimension réduite de ces particules (fig.9a), ce qui permet de prévoir une évolution poussée de la structure de la couche qui subirait une telle désagrégation.

On peut interpréter l'étendue de ce domaine de stabilité minimale, comme correspondant aux teneurs en eau telles qu'il reste un volume d'air suffisant pour que son piégeage entraîne l'éclatement de l'agrégat.

Ainsi, pour MONTLUEL ce domaine s'étend jusqu'à des valeurs de teneur en eau élevées, car d'une part, le volume poral est élevé (fig.5) et d'autre part, il suffit d'un faible volume d'air pour que la pression entraîne la désagrégation.

Inversement, pour BOIGNEVILLE, ce domaine est beaucoup plus réduit. Les matériaux sont mieux discriminés par l'étendue de ce domaine, que par les valeurs de stabilité, quelque soit la manière de caractériser cette stabilité.

La dimension des assemblages de particules résultant de l'éclatement, qui dépend du nombre de points de contact entre particules restant efficaces après cet éclatement, est elle-même liée à la teneur en argile et en autres ciments des matériaux.

L'observation, au microscope binoculaire, des plus petites fractions produites au cours de l'éclatement, montre effectivement qu'il ne s'agit pas de particules élémentaires, mais bien d'assemblages comprenant quelques grains de squelette, d'autant plus nombreux et mieux soudés que la teneur en argile est élevée (fig.10 et 11).

Il semble que pour ces matériaux, peu argileux et non sodiques, le phénomène de dispersion physico-chimique, qui implique une séparation au niveau particulaire des argiles, n'intervienne que très peu dans cette désagrégation.

En effet, les taux de particules inférieures à 20  $\mu\text{m}$  (A+L) que l'on peut mesurer par sédimentation, sont très faibles en l'absence d'agitation, alors que ces valeurs augmentent dans le cas de la procédure de HENIN, après agitation et tamisage dans l'eau (tab.5).

	Particules < 20 $\mu\text{m}$ (A+L) %		taux de dispersion= (A+L)/(A+L)matériau	
	sans agitation	avec agitation	sans agitation	avec agitation
Montluel	10	25	27	67
Palaiseau	9	20	20	44
Boigneville	6	17	10	28

Tableau 5: Comparaison des taux de particules < 20  $\mu\text{m}$  après éclatement, en fonction de l'énergie mécanique appliquée.



0 1mm

Figure 10: Observation en microscopie optique de l'évolution structurale d'un agrégat de Montluel immergé dans l'eau.



0 2mm

Figure 11: Observation en microscopie optique de l'évolution structurale d'un agrégat de Boigneville immergé dans l'eau.

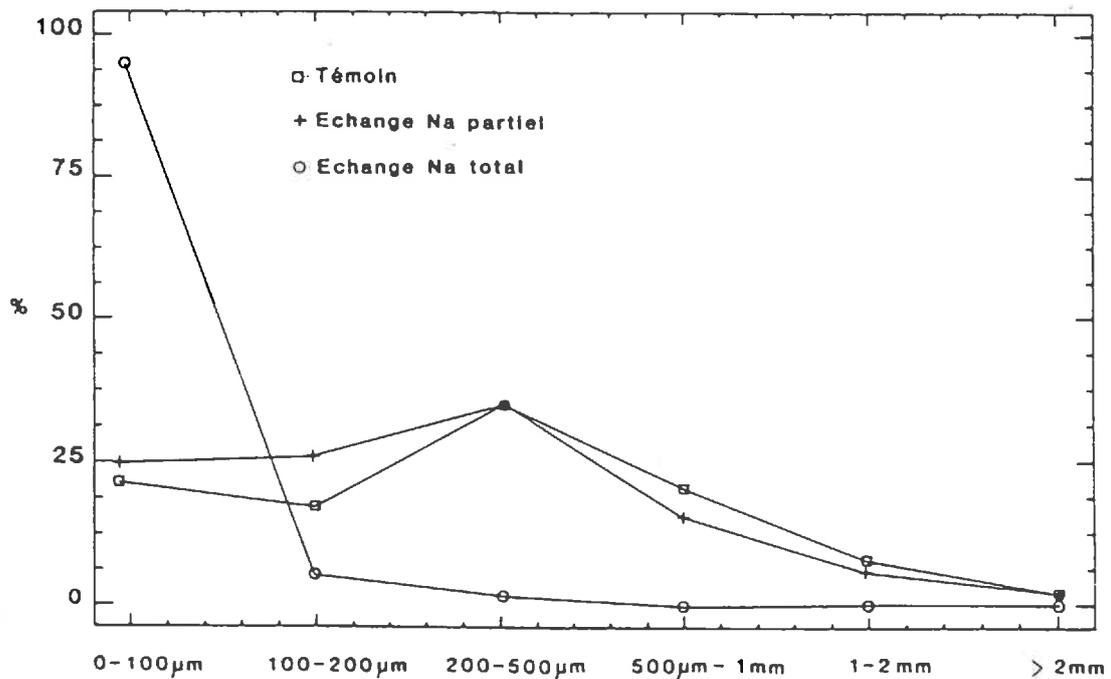


Figure 12: Comparaison des D.T.P.R. après éclatement, pour les agrégats de Boigneville sodiques et non sodiques.

Les particules produites résultent donc d'une disjonction, dont le moteur est l'énergie mécanique appliquée lors de l'agitation. Le processus de dispersion physico-chimique n'est pas, dans ce cas, à l'origine de la désagrégation. Par contre, avec les agrégats de BOIGNEVILLE rendus sodiques, la totalité de l'échantillon est désagrégée en particules élémentaires du simple fait de son immersion dans l'eau (fig.12). Ce dernier résultat met bien en évidence l'existence de ce mécanisme de dispersion, et aussi sa différence de nature avec la désagrégation par éclatement.

Il s'agit bien dans ce cas d'un processus physico-chimique, et le niveau d'organisation auquel se produit la rupture est très différent dans les deux cas : d'un côté on est à l'échelle interparticulaire, et ce sont des particules élémentaires qui sont produites ; de l'autre, les forces de rupture s'appliquent au niveau de la porosité lacunaire et ce sont des assemblages de limon et d'argile qui en résultent.

o En ce qui concerne les matériaux enrichis en matière organique on constate une très forte diminution du phénomène d'éclatement :

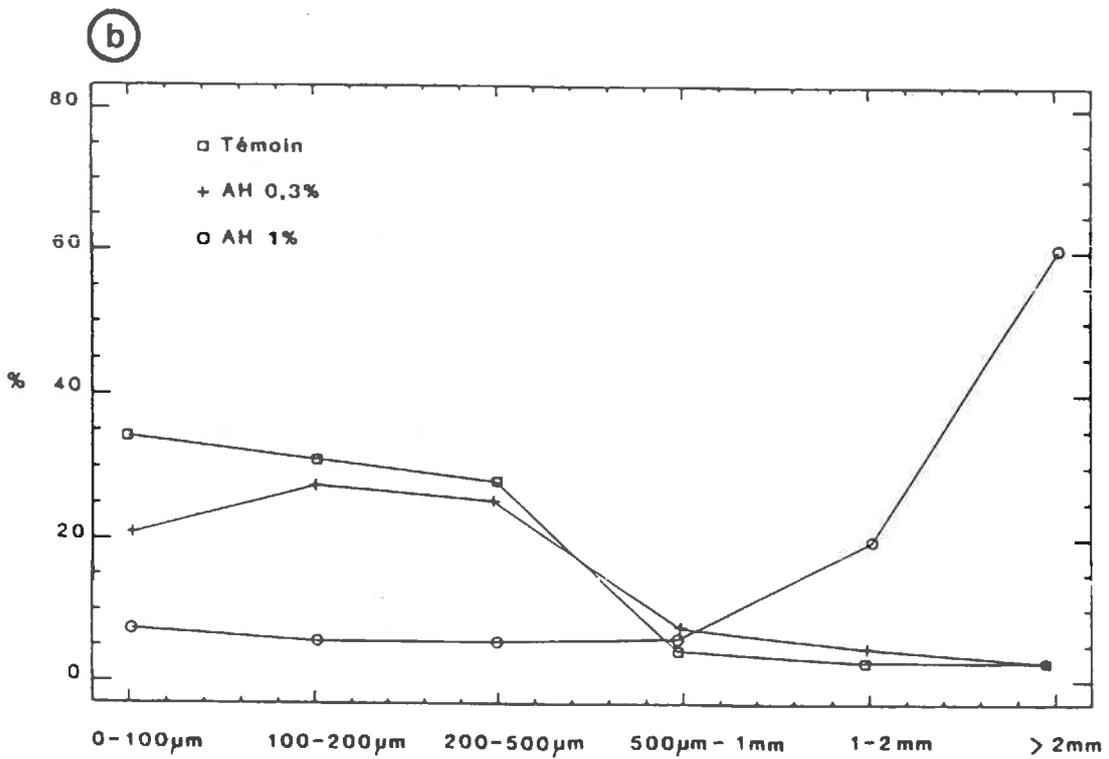
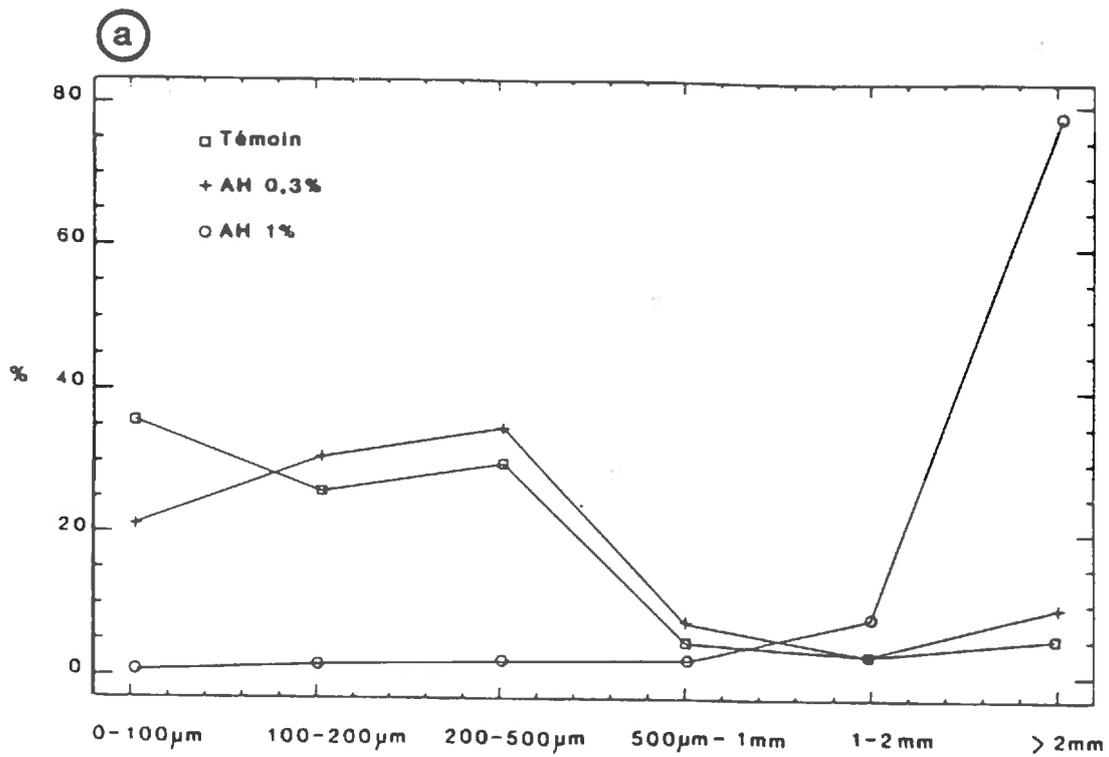


Figure 13: Comparaison des D.T.P.R. après éclatement, pour les agrégats traités avec des acides humiques et non-traités.  
a : Montluel, b : Palaiseau.

la quantité de particules inférieures à 2 mm est réduite des deux tiers et la D.T.P.R. très différente de celle du témoin dans le cas de la dose de 1 % (fig.13). Pour la dose inférieure l'effet est beaucoup moins net.

Ce résultat s'explique bien par la diminution de mouillabilité des agrégats, suite à la pulvérisation d'acides humiques. En effet, même si la dose la plus forte n'est pas trop élevée, le mode d'apport a favorisé une localisation périphérique préférentielle, ce qui a entraîné une concentration localement beaucoup plus importante.

On observe en effet que l'eau ne pénètre que très lentement à l'intérieur des agrégats traités, lors de leur immersion, et une part importante de l'air peut s'échapper.

Ainsi, la présence d'un taux élevé de matière organique à la périphérie des agrégats limite fortement leur désagrégation par éclatement. Certaines variations de stabilité des matériaux dans le temps, constatées par différents auteurs (MONNIER, 1965 ; HARTMANN & DE BOODT, 1974 ; BOIFFIN, 1976 ; UTOMO & DEXTER, 1982), pourraient s'expliquer par des modifications de concentration en matière organique, liées par exemple à des sécrétions microbiennes dont le régime peut dépendre des conditions climatiques.

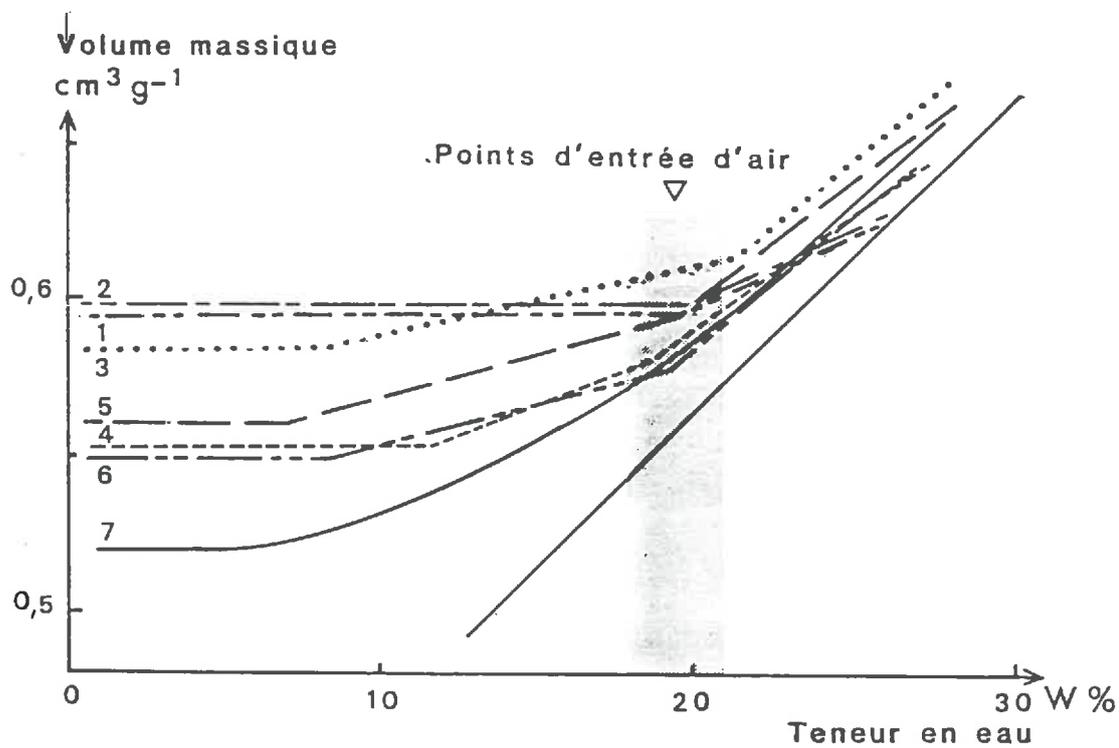
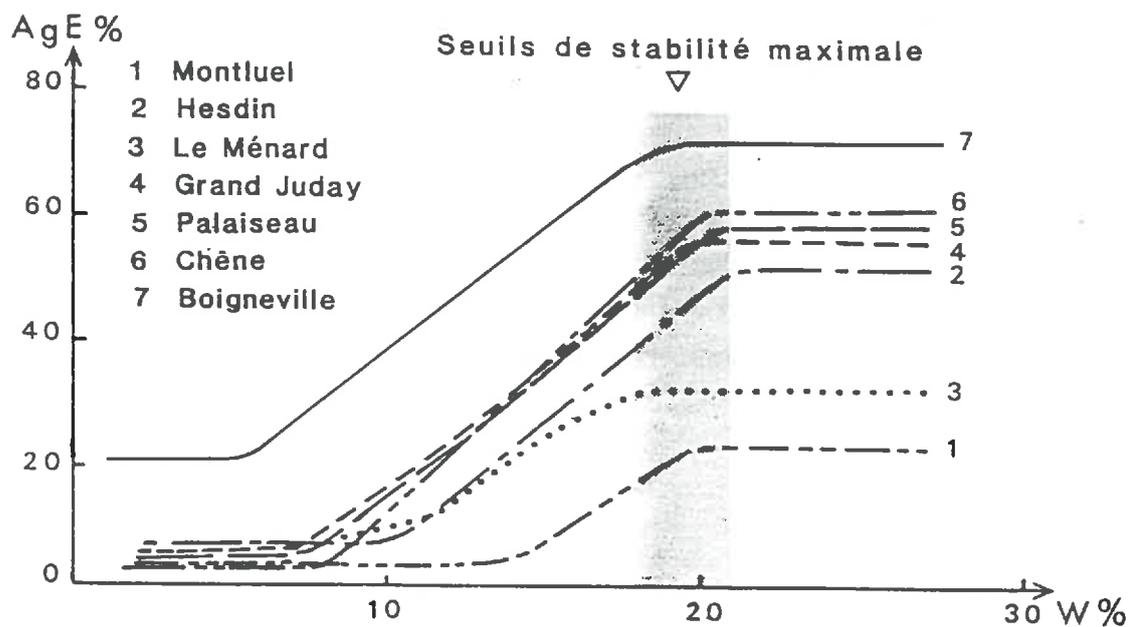


Figure 14: Comparaison des positions des points d'entrée d'air avec les seuils hydriques de stabilité maximale.

### o La division des agrégats dans le domaine de saturation.

Le domaine de stabilité maximale coïncide nettement avec le domaine de saturation des agrégats.

En effet, la position du point d'entrée d'air de chaque sol correspond à la position de son seuil de stabilité maximale. Il faut noter que la précision des valeurs d'humidité de ces points est faible, de l'ordre de plus ou moins 1 à 2 % de teneur en eau. Et d'autre part, dans notre gamme de matériaux on est toujours au voisinage de 20 % de teneur en eau (fig.14).

Cependant, ces points correspondent à des potentiels variables qui décroissent en valeur absolue avec la teneur en argile des matériaux.

Il s'agit donc ici de désagrégation mécanique sans éclatement, compte tenu de l'absence d'air au sein des agrégats dans tout ce domaine. Il faut noter la relation étroite entre ces valeurs de stabilité obtenues sur agrégats saturés, et les taux d'agrégats stables après prétraitement alcool (Aga) mesurés selon le même protocole, qui ont effectivement pour objet de caractériser la stabilité en l'absence d'éclatement (HENIN et MONNIER, 1956) (fig.15).

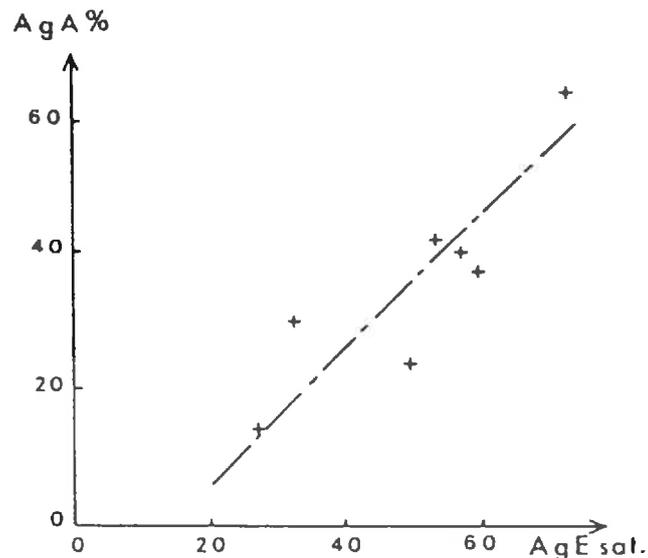


Figure 15: Relation entre les taux d'agrégats stables à l'alcool (Aga) et à l'eau après saturation (Age sat.).

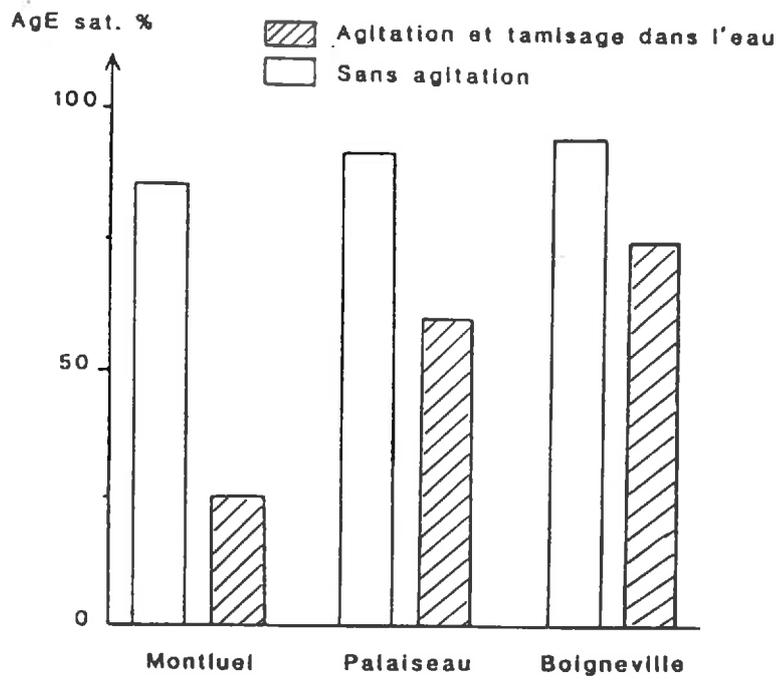


Figure 16: Comparaison des taux d'agrégats > 200 μm pour les tests avec et sans agitation.

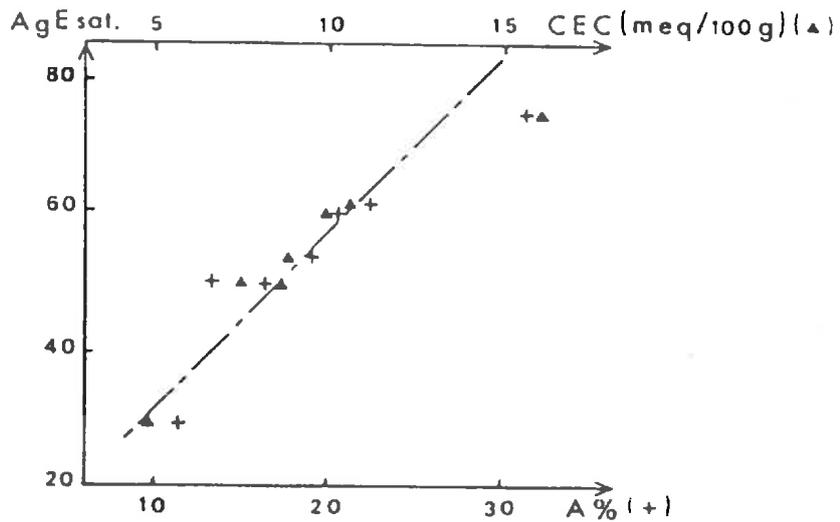


Figure 17: Relations entre les taux d'agrégats stables après saturation (AgE sat.), et la teneur en argile et la C.E.C. des matériaux.

Cette désagrégation est beaucoup moins poussée, et les particules produites sont très différentes du cas précédent : on obtient en fait une distribution bimodale de la taille des particules, avec un mode de particules très fines ( $< 100 \mu\text{m}$ ), et un mode des particules  $> 2\text{mm}$ , qui correspond aux agrégats résiduels.

L'importance relative de ces 2 modes varie avec la teneur en argile des matériaux, mais aussi en fonction de l'énergie appliquée à l'échantillon et de la durée d'application de cette énergie.

Ainsi, lorsque l'on considère uniquement la fraction  $> 200 \mu\text{m}$ , l'écart entre matériaux augmente quand on compare les valeurs du test sans agitation à celles du test standard, avec agitation et usure sur le tamis (fig.16).

Cette désagrégation correspond bien à une "usure" de la périphérie des agrégats comme le montre la distribution granulométrique résultante. De plus le comptage des agrégats indique qu'après le test on conserve plus de 95 % du nombre initial d'agrégats.

Il faut également noter qu'au sein de ce domaine de stabilité maximale, il ne semble pas y avoir de tendance à la décroissance aux très fortes humidités, alors que l'humidité augmentant, on pourrait s'attendre à une diminution de la cohésion des agrégats. En fait, comme on laisse les agrégats immergés dans l'eau avant l'agitation, ils se trouvent à la même humidité au moment où on applique l'énergie mécanique. On ne teste donc pas l'influence de la teneur en eau initiale dans le domaine de saturation.

Il reste que le niveau de ce palier est bien lié à la résistance mécanique des agrégats saturés, et donc à leur teneur en argile :

La figure 17 montre effectivement que les valeurs de stabilité à saturation sont bien reliées à la teneur en argile des matériaux. La relation  $\text{Age sat.} = f(A \%)$  n'est probablement linéaire que dans le domaine des matériaux testés, mais sa forme réelle ne pourrait être déterminée qu'avec une gamme plus large et un nombre de matériaux beaucoup plus élevé.

La prise en compte de la C.E.C. à la place de l'argile modifie assez peu cette relation.

o Si l'on s'intéresse maintenant aux matériaux traités, on s'aperçoit que pour l'échantillon sodique, c'est encore le mécanisme de dispersion qui intervient (fig.18), ce qui montre que même en l'absence d'éclatement on peut obtenir une désagrégation complète des agrégats par dispersion, lors d'une immersion dans l'eau.

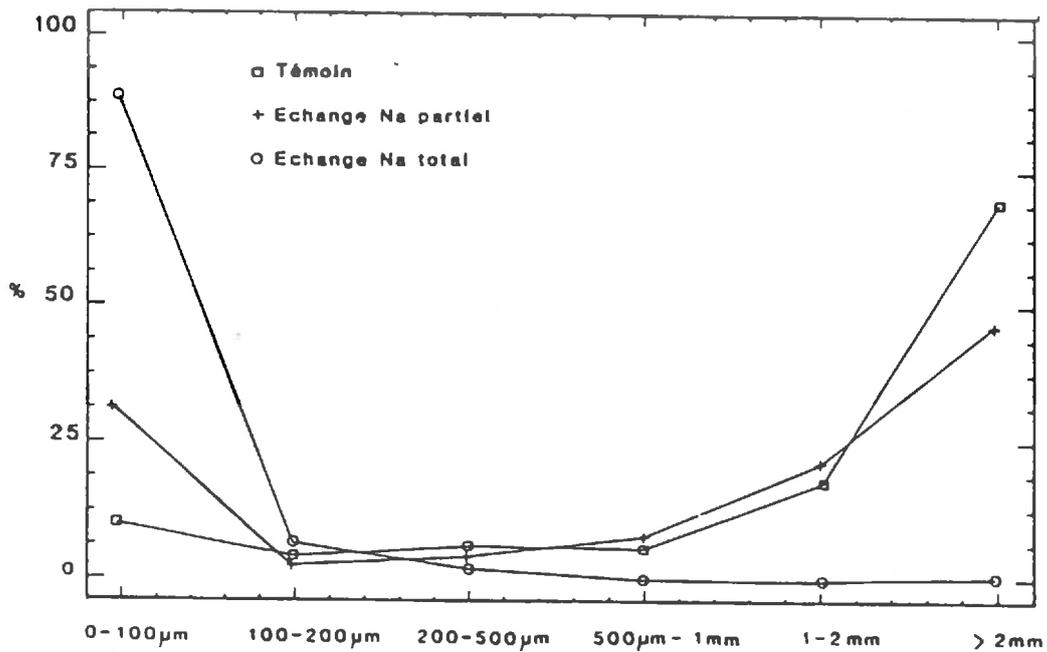


Figure 18: Influence du sodium sur la D.T.P.R. après désagrégation mécanique (Boigneville 3-4 mm).

Il s'agit donc bien d'un processus très différent. Par contre, les matériaux enrichis en matière organique ont un comportement analogue à celui des témoins dans le cas de la désagrégation mécanique (fig.19).

La comparaison de ce résultat avec celui concernant l'éclatement, (fig.13) montre que le rôle des matières organiques se situe, plus au niveau de la phase d'humectation que de la résistance à une action mécanique. Elles ont donc bien dans les conditions de l'expérimentation, un effet beaucoup plus important sur la mouillabilité et la vitesse d'imbibition, que sur la cohésion des agrégats.

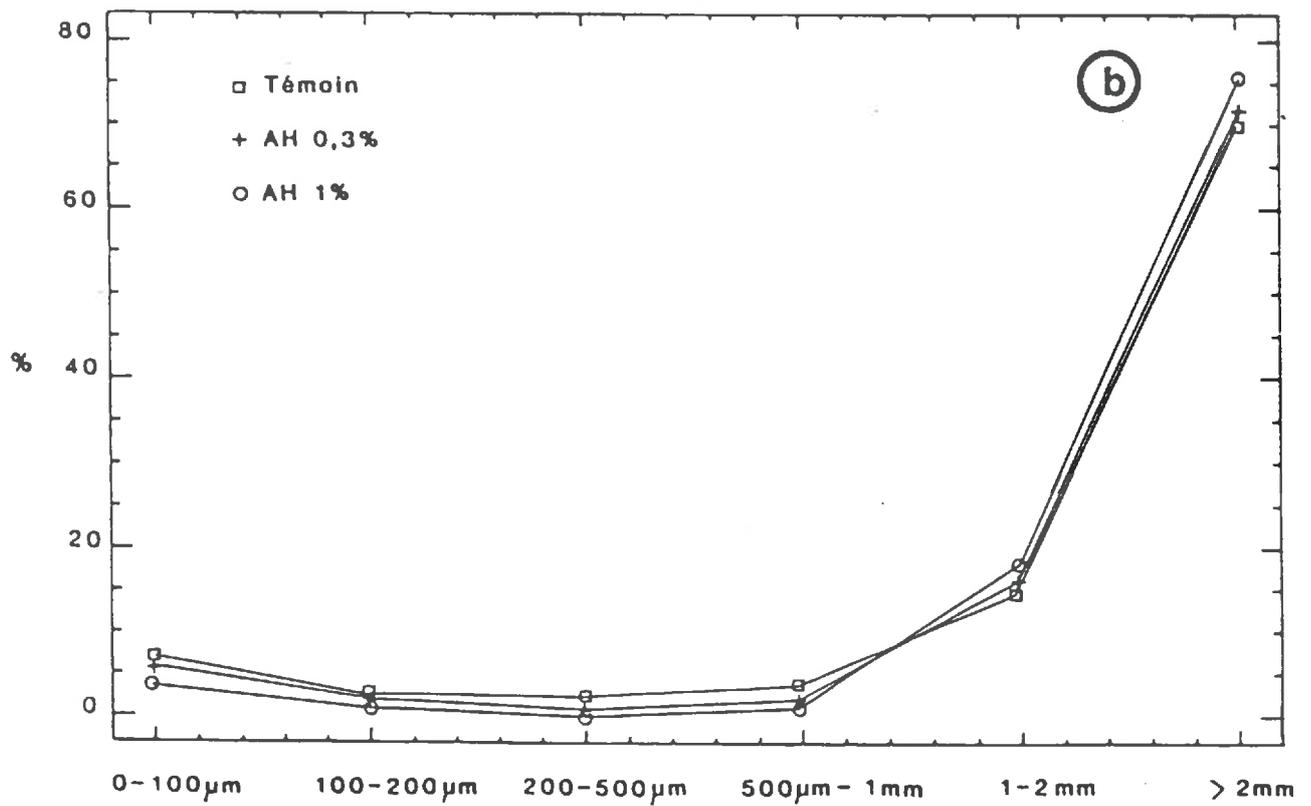
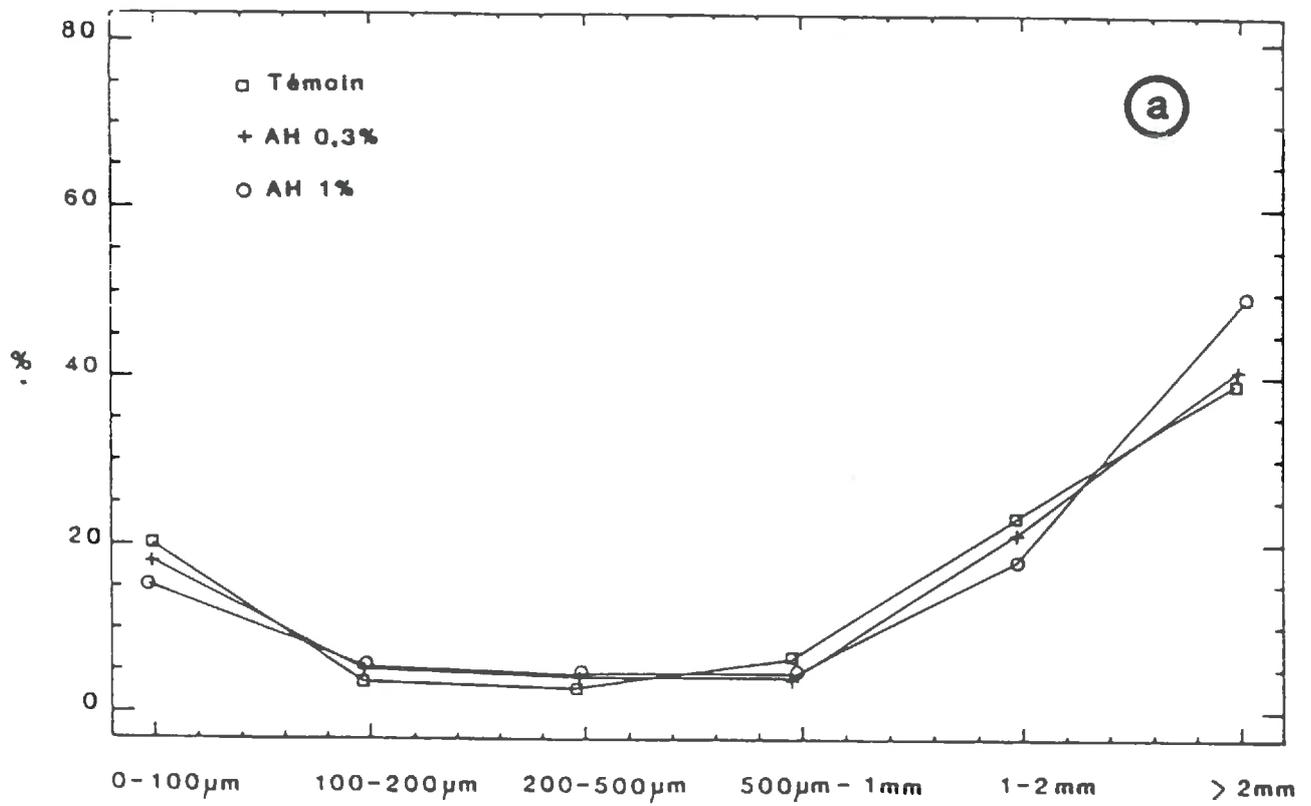


Figure 19: Influence des acides humiques sur la D.T.P.R. après désagrégation mécanique. a : Montlucl, b : Palaiseau.

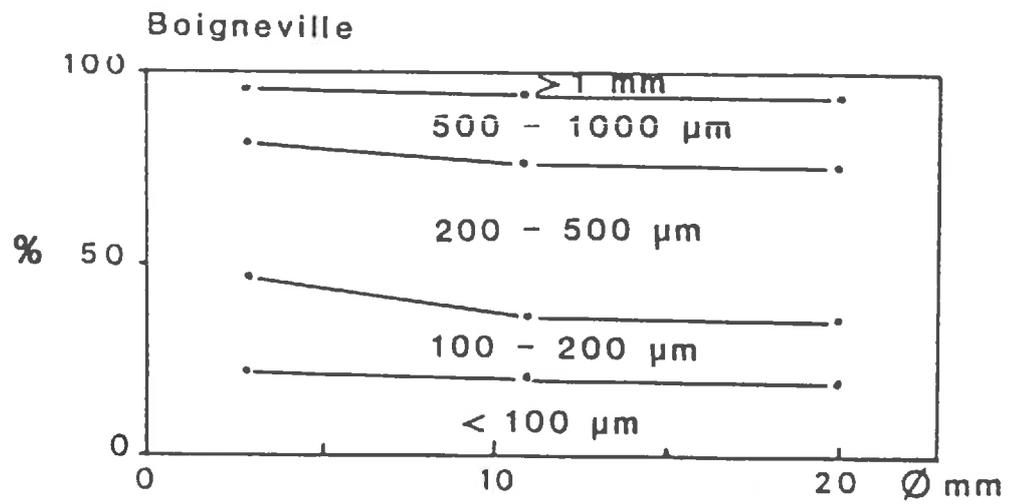
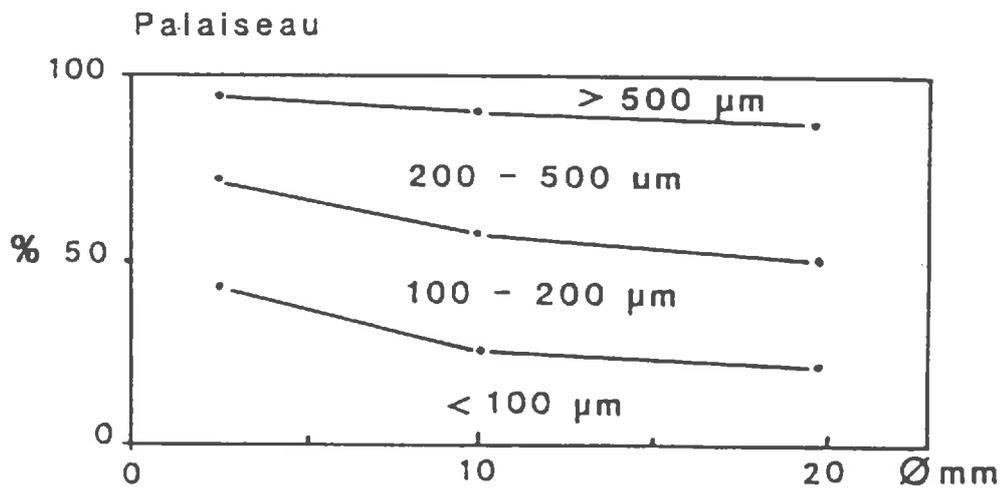
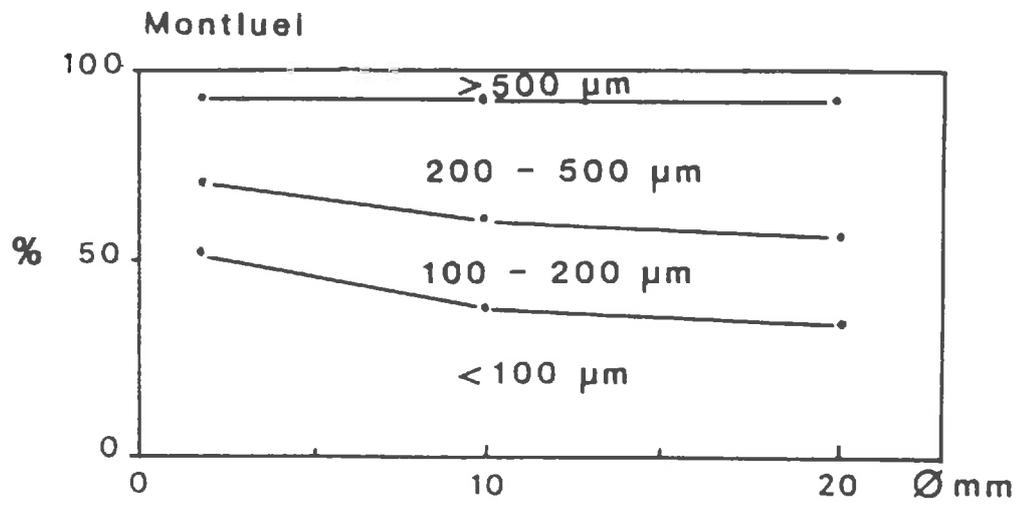


Figure 20: Influence du calibre initial d'agrégats secs sur la D.T.P. R. après immersion prolongée. a : Montluel, b : Palaiseau, c : Boigneville.

## **B- Généralisation des résultats à des agrégats de calibres différents**

Les résultats précédents ont été obtenus sur des agrégats de 2-3 ou 3-4 mm résultant du tri par tamisage après fragmentation manuelle de mottes de l'horizon de surface. Or, de même que l'humidité, la dimension des agrégats soumis à la pluie peut être très variable et pourrait avoir un effet sur les mécanismes de désagrégation.

Il est donc nécessaire de vérifier si ces résultats sont intrinsèques, ou bien dépendent du calibre initial des agrégats.

Dans le domaine de saturation, on a vu qu'il s'agissait d'une usure de la périphérie des agrégats. Il est donc probable que, du fait de la relation entre surface externe, volume et diamètre, l'intensité de l'usure mécanique varie avec ce diamètre. Mais le mécanisme reste certainement le même quelque soit le calibre des agrégats. Nous réexaminerons le problème de la désagrégation mécanique, à l'aide du goutteur dans la deuxième partie de ce mémoire.

On s'est donc plus particulièrement intéressé ici à l'influence de la taille des agrégats par rapport au mécanisme d'éclatement, c'est-à-dire lorsque les tests sont effectués sur des agrégats secs.

Pour l'analyser, nous avons comparé les D.T.P.R. obtenues à partir d'agrégats de différentes tailles ; on a également fait varier la durée de l'immersion dans l'eau.

### **o Résultats**

Les résultats de la figure 20 montrent que pour une immersion prolongée (30 mm), les distributions granulométriques évoluent peu : il y a un peu plus de particules plus grossières lorsque le calibre initial augmente. Mais la quantité de particules inférieures à 2 mm est toujours très élevée.

Si en revanche, on teste l'influence de la durée d'immersion (fig.21), on s'aperçoit que la désagrégation n'est pas instantanée, et qu'elle est réalisée pour des durées croissantes lorsque le calibre des agrégats augmente.

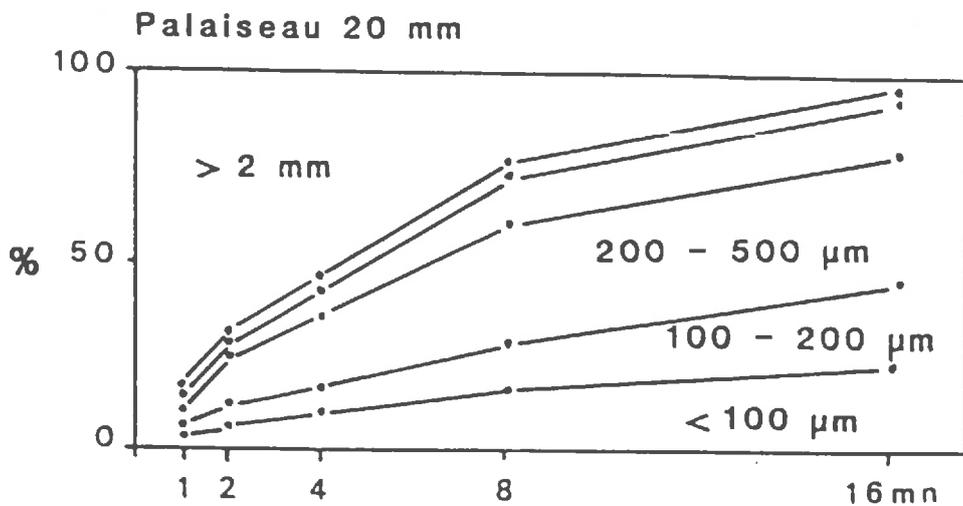
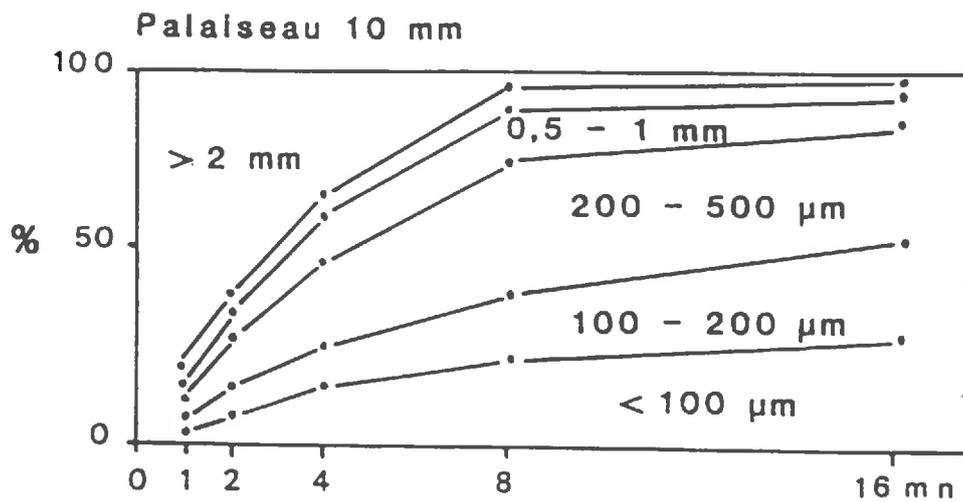
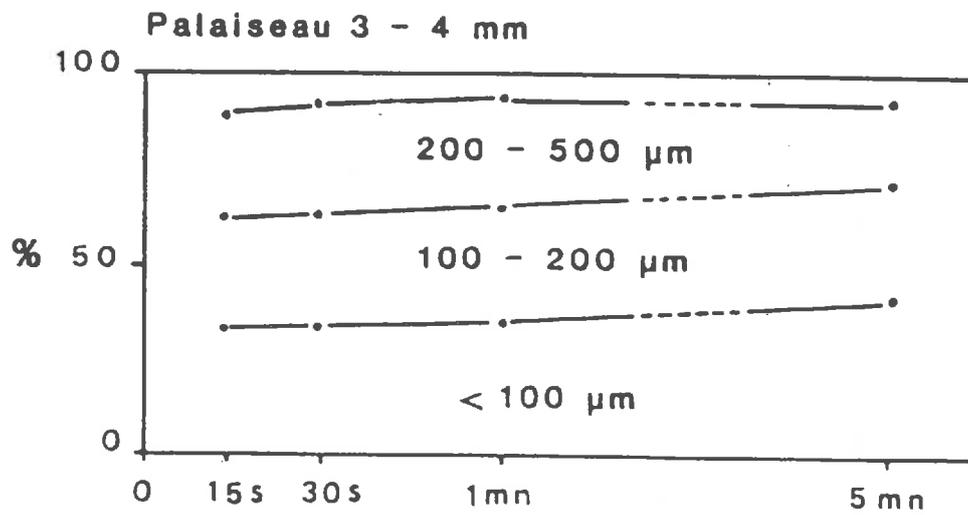


Figure 21: Influence de la durée d'immersion d'agrégats secs sur la D.T.P.R., pour différents calibres initiaux. a : 3-4 mm, b : 10 mm, c : 20 mm.

## o Discussion

L'observation visuelle montre que la désagrégation s'effectue progressivement de la périphérie vers le coeur de l'agrégat. Après désagrégation des couches successives, on atteint un état final proche, quelque soit le calibre de départ. Selon ces observations, la vitesse de progression du front de désagrégation est de l'ordre de quelques millimètres par minute. La quantité de particules produites est bien fonction de la durée d'immersion (fig.21b et c).

Il est clair que ce résultat est lié aux conditions de mise en contact terre-eau (immersion brutale des agrégats, qui sont donc sous charge hydraulique) : dans le cas d'une humectation progressive des mottes, par exemple par la pluie, l'air peut s'échapper, au moins en partie au cours de la réhumectation et des gradients de potentiel se mettent en place.

Ceci devrait avoir pour conséquence de diminuer l'importance de l'éclatement, d'autant plus que le rapport entre la taille des gouttes et celle des agrégats diminue.

Ainsi l'éclatement total ne risque d'affecter que les plus petits agrégats. Mais il est probable qu'une certaine épaisseur de la périphérie des plus grosses mottes, soit désagrégée de la même manière, entraînant ainsi une soudure de celle-ci entre elles et avec le reste de la surface du sol, ce que l'on observe couramment au champ. En effet, la distribution de la taille des particules résultantes est relativement indépendante du calibre initial et du stade de désagrégation. Elle est semblable à celle des petits agrégats dès le début de la désagrégation de la périphérie des plus gros (fig.22).

Il est probable que cette D.T.P.R. soit intrinsèque au matériau et qu'elle corresponde à un assemblage primaire des particules, lié aux proportions relatives des différentes fractions granulométriques des matériaux. Cette série de manipulations permet une généralisation des résultats précédents : en effet, de même que les mécanismes et les lois de comportement sont analogues pour tous les matériaux étudiés, on peut dire qu'ils sont indépendants du calibre des agrégats sur lesquels sont réalisés les tests.

Seul un aspect cinétique différencie le comportement des agrégats de tailles variables, lors de leur immersion dans l'eau, ce qui est important du point de vue de l'évolution structurale in-situ, mais ne remet pas en cause l'analyse des mécanismes, effectuée sur des plus petits agrégats.

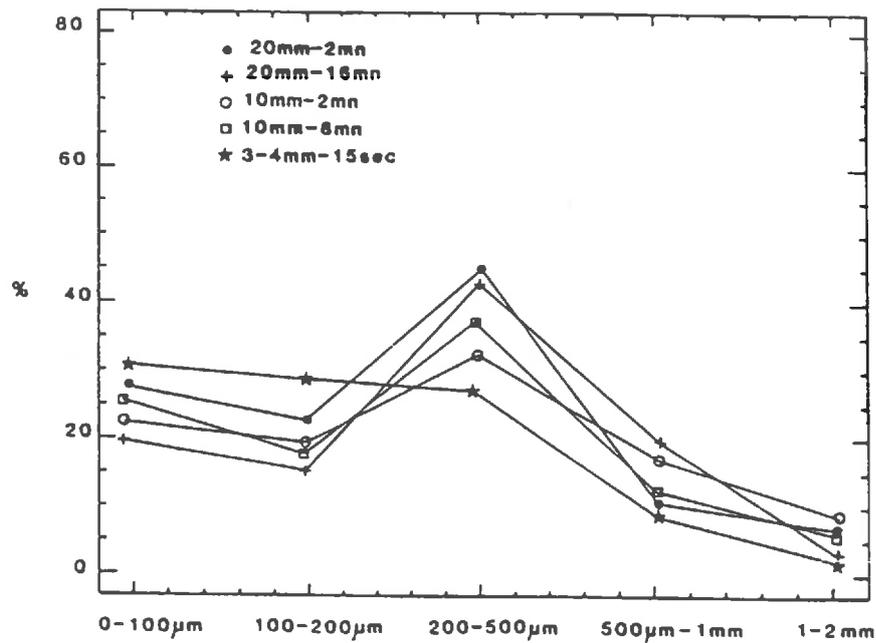


Figure 22: Comparaison des proportions relatives des particules produites par éclatement (< 2 mm), pour différents calibres d'agrégats et temps d'immersion (Palaiseau).

### 3) CONCLUSION

On a cherché dans ce chapitre, à mettre en évidence les mécanismes intervenant lors de l'immersion d'agrégats dans l'eau, et à étudier la nature des particules mobilisées.

Le rôle prédominant du mécanisme d'éclatement est confirmé, mais l'étude de l'influence de l'état hydrique initial montre que ce mécanisme n'intervient que dans un domaine d'état hydrique limité, et surtout variable selon les propriétés de rétention d'eau du matériau.

Ainsi, la limite pour laquelle l'éclatement est maximal varie entre pF 5 et 3 lorsque l'on passe de BOIGNEVILLE à MONTLUEL, c'est à dire que **pour un climat donné, la probabilité d'être en situation de risque d'éclatement est beaucoup plus faible pour BOIGNEVILLE que pour MONTLUEL.**

L'existence de ces domaines de comportement et la probabilité qu'un matériau s'y trouve, apparaissent donc au moins aussi importants que les valeurs de stabilité elles-mêmes.

Un autre point important mis en évidence concerne la quantité et la dimension des particules produites. En effet, cet éclatement lié au piégeage d'air, entraîne pour tous les matériaux, une destruction complète des agrégats, avec une individualisation de particules de taille inférieure à 500  $\mu\text{m}$ , mais dont le calibre moyen augmente avec la teneur en argile. Ces particules de petite taille ne sont cependant pas des particules élémentaires, et la dispersion des argiles, parfois considérée comme le moteur de la désagrégation, n'intervient quasiment pas dans cette désagrégation. Une disjonction de particules élémentaires peut intervenir mais elle résulte alors d'une agitation ultérieure en présence d'un excès d'eau. La dispersion physico-chimique n'intervient de manière prépondérante à l'origine de la désagrégation, que pour une teneur en sodium élevée.

D'autre part, on a montré que la présence de substances organiques localisées à la périphérie des agrégats pouvait jouer un rôle important en limitant la vitesse d'humectation et donc l'intensité de l'éclatement.

A ce pôle, correspondant à l'éclatement, s'oppose un pôle au niveau des fortes humidités, pour lequel intervient le phénomène de désagrégation mécanique, dont l'intensité est directement liée à l'énergie appliquée aux agrégats.

Ce second mécanisme correspond à une usure de la périphérie des agrégats, et la destruction résultante est beaucoup moins intense que lors de l'éclatement. La quantité de particules produites dans les conditions de l'expérience est faible, et est proportionnelle à la durée d'application de l'énergie mécanique, alors que l'éclatement intervient beaucoup plus rapidement lors de l'immersion. De plus les deux mécanismes mis en évidence produisent des distributions de la taille des particules résultantes différentes.

Ce dernier résultat devrait présenter un intérêt vis-à-vis de la caractérisation morphologique et fonctionnelle des organisations pelliculaires superficielles résultantes (VALENTIN, 1981) ; en effet la structure des O.P.S. est très liée à la dimension des particules qui les composent. Il pourrait également servir pour l'interprétation des turbidigrammes (COLLINET & VALENTIN, 1985 ; TREVISAN, 1986 ; JARRY, 1987)

Par ailleurs, on a constaté que dans le cas d'une immersion d'agrégats secs, le calibre initial des agrégats, n'influe pas sur les mécanismes et la taille des particules mobilisées, mais essentiellement sur la cinétique de désagrégation.

Ainsi, les résultats obtenus sont généralisables sur le plan des mécanismes, à l'ensemble des matériaux limoneux, dont la gamme étudiée est bien représentative, et également au sein de cette gamme, à des agrégats de tailles variables.

L'ensemble de ces résultats nous conduit à envisager sur de nouvelles bases l'appréciation de la sensibilité des matériaux à la désagrégation :

– l'ampleur des variations de stabilité liées à l'état hydrique est beaucoup plus forte que supposé jusqu'ici,

– le classement des matériaux est variable selon l'état hydrique auquel on se situe,

– l'intensité de la désagrégation au cours d'une période donnée, n'est donc pas seulement liée à la stabilité du sol pour un état hydrique donné, mais dépend fortement de la probabilité qu'il a d'être dans l'un ou l'autre des domaines de désagrégation mis en évidence ; cette probabilité étant liée aux propriétés de rétention d'eau du matériau, et donc essentiellement à sa teneur en argile,

– les mécanismes correspondant aux différents domaines, ainsi que les différents matériaux, se caractérisent par la quantité et la dimension des particules résultantes. L'évolution morphologique des croûtes est donc très liée à la nature des mécanismes intervenant lors de sa formation.

Il paraît donc maintenant nécessaire de tenir compte de l'ensemble de ces données pour analyser la sensibilité de la surface des sols à la dégradation structurale par l'eau.

Mais, il faut également envisager d'autres modalités de mise en contact de l'eau avec les agrégats.

En effet, l'immersion ne peut correspondre sur le terrain qu'à des situations très particulières, par exemple : des pluies de forte intensité, à grosses gouttes sur des agrégats de très petite taille (< 3 mm). Dans la majorité des cas, la réhumectation a lieu de manière beaucoup plus progressive avec possibilité d'échappement d'air, et il est probable que les mécanismes intervenants soient différents.

C'est l'objet du chapitre suivant de les étudier.

**CHAPITRE 4 :**  
**LE COMPORTEMENT D'AGREGATS REHUMECTES**  
**PAR CAPILLARITE**

**1) INTRODUCTION**

S'il est couramment admis que les phénomènes d'éclatement des agrégats et le choc des gouttes d'eau sur la surface sont largement responsables de la dégradation structurale superficielle (ELLISON, 1945 ; FARRES, 1980), on a également observé (BOIFFIN, 1984), que lors d'alternances hydriques humectation-dessiccation, les mottes et agrégats de surface se fragmentaient sur leur périphérie, ce qui entraîne l'individualisation des microagrégats et l'affinement progressif de la surface. Une diminution de la stabilité des agrégats, consécutive aux alternances hydriques a aussi été observée (UTOMO & DEXTER, 1982).

Ce processus est habituellement interprété comme étant la conséquence des phénomènes de gonflement-retrait, liés aux alternances hydriques (MONNIER et BOIFFIN, 1986). En effet, il est bien connu pour des matériaux argileux que la déformation par gonflement, si elle est localisée ou orientée, provoque des contraintes pouvant aller jusqu'à entraîner la rupture (KHEYRABI et MONNIER, 1968 ; STENGEL, 1982 ; SHIEL et al., 1988). Or cette néoformation de microagrégats existe pour des sols limoneux, même très pauvres en argile et ayant un gonflement potentiel réduit (BOIFFIN, 1984). Et il s'agit certainement de l'un des processus majeurs de l'évolution structurale au cours de la formation des croûtes de battance : il contribue à la mobilisation de petits agrégats millimétriques, particulièrement sensibles à l'action des gouttes de pluie.

Or, ni les différents tests de stabilité structurale, ni les observations de terrain ne semblent pouvoir rendre compte de ce processus, à cause des procédures trop agressives généralement utilisées dans les premiers, et des intervalles d'observation trop longs, par rapport à sa fugacité, dans les secondes.

Notre objectif est donc d'analyser les mécanismes et le déterminisme de cette fragmentation des matériaux limoneux.

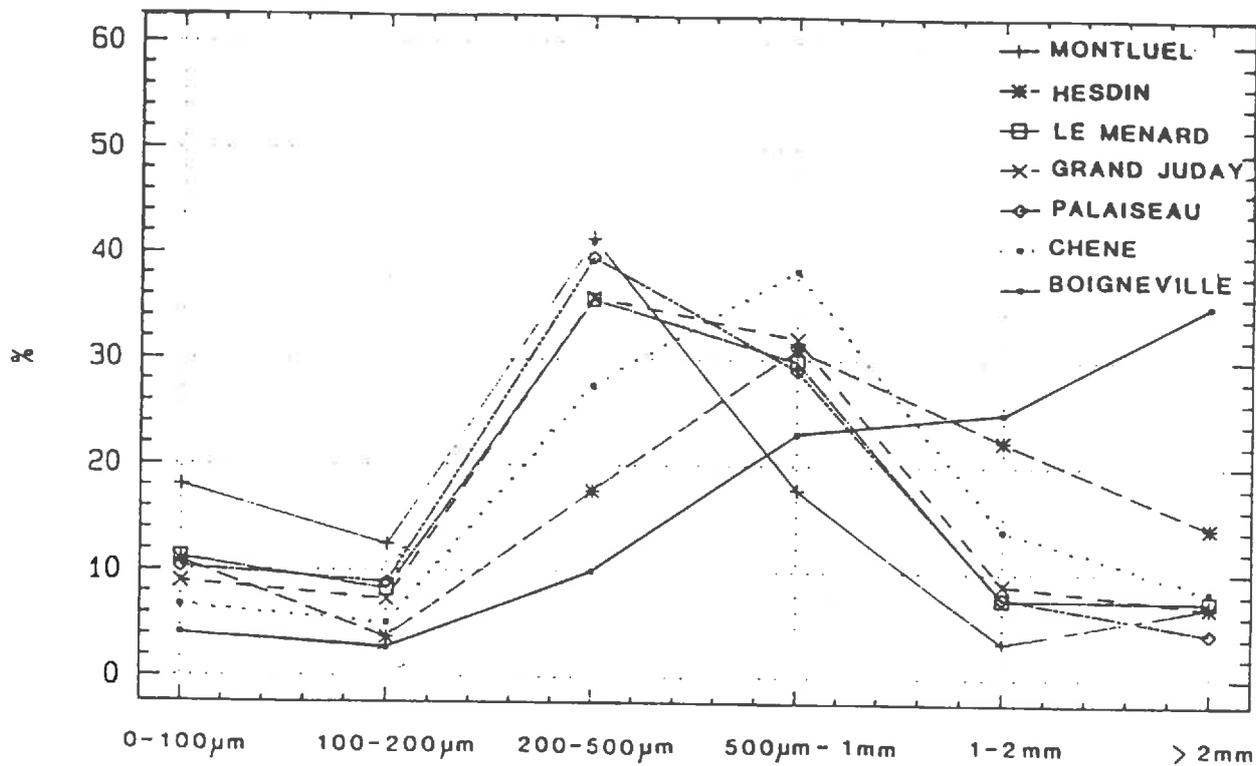


Figure 23: D.T.P.R. après réhumectation par capillarité d'agrégats de 3-4 mm des matériaux limoneux.

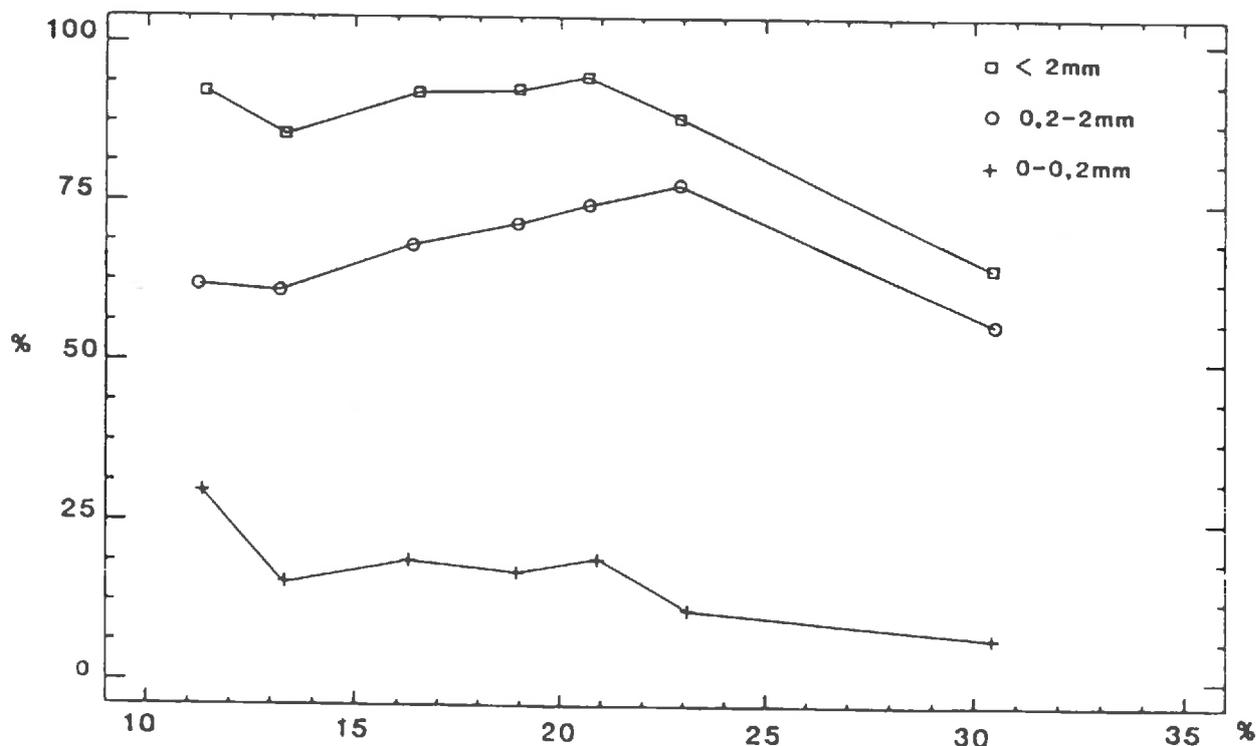


Figure 24: Relation entre la teneur en argile des matériaux et les proportions des différentes classes de particules après réhumectation par capillarité.

Pour cela, nous avons utilisé un protocole expérimental simulant un apport d'eau progressif (réhumectation par capillarité), puis nous avons étudié la dimension des fragments résultants en testant l'influence de différents paramètres, relatifs aux conditions d'humectation et à l'état initial des agrégats.

## **2) RESULTATS ET DISCUSSION**

### **A) Mise en évidence d'un processus de désagrégation lié à une réhumectation par capillarité**

#### **a) Résultats**

La figure 23 représente la distribution de taille des particules résultant de l'effet d'une réhumectation par capillarité d'agrégats de 3-4 mm initialement secs, réalisée selon la procédure décrite précédemment.

Les distributions obtenues présentent une allure commune pour tous les matériaux, de type unimodale, centrée sur les classes intermédiaires 200  $\mu\text{m}$  à 1 mm, avec une tendance à s'étaler vers les classes supérieures, en particulier pour Boigneville.

#### **b) Discussion**

Il s'agit d'un résultat très différent, du point de vue de la taille des particules mobilisées, de ceux obtenus par immersion d'agrégats secs ou saturés, et reliés aux processus d'éclatement et de désagrégation mécanique.

On est en présence d'un phénomène particulier, vis-à-vis duquel les matériaux présentent des réponses nuancées. La quantité totale de particules produites est élevée, mais contrairement au cas de l'immersion d'agrégats secs, où le résultat était le même pour tous les matériaux, elle diminue lorsque la teneur en argile des matériaux augmente (BOIGNEVILLE) (fig.24). Par rapport à l'éclatement, le calibre modal des particules produites augmente d'une à deux classes.

Sur cette même figure, on observe une tendance globale qui correspond à une diminution des classes les plus fines, au profit des classes supérieures, lorsque la teneur en argile augmente.

Cependant la relation n'est pas très étroite, en particulier pour les classes intermédiaires, HESDIN se comporte selon la tendance générale comme s'il avait 10 % d'argile en plus. La seule explication possible de cet écart à la tendance générale, est le taux élevé de matière organique de ce matériau.

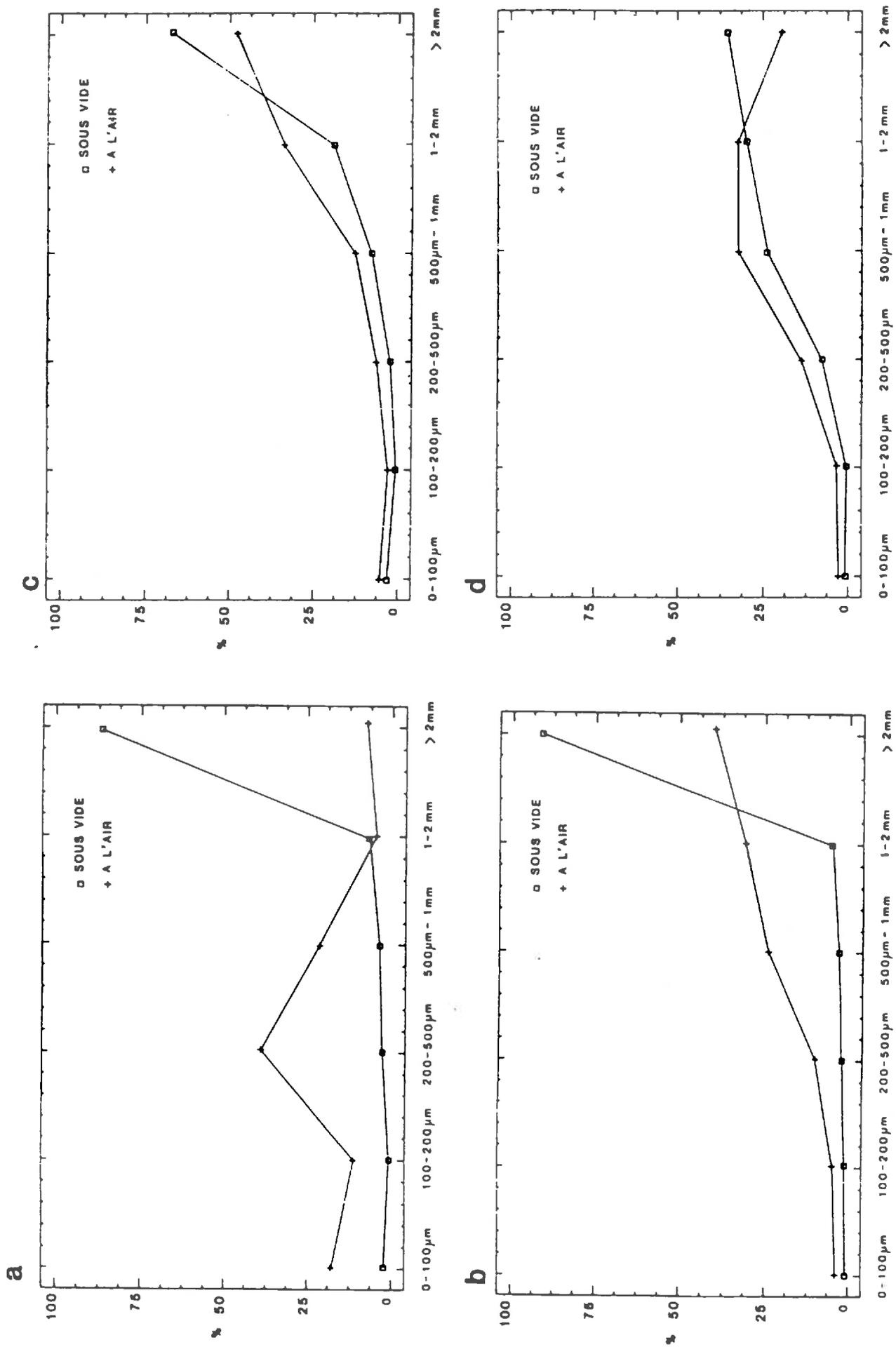


Figure 25: Comparaison des D.T.P.R. après réhumectation à l'air et sous vide. a : Montluel, b : Boigneville, c : Vignères, d : Lignère.

Cette évolution en fonction de la teneur en argile des matériaux pose problème quant à l'interprétation de ce mécanisme : en effet, il est admis que l'intensité de fissuration est proportionnelle au gonflement des matériaux et donc à leur teneur en argile. La tendance devrait donc être inverse à celle obtenue expérimentalement.

Nous avons donc cherché à expliquer les raisons de cette apparente contradiction en étudiant le déterminisme de ce type de désagrégation.

Pour cela, on a, d'une part, fait varier les conditions de réhumectation des agrégats, et d'autre part on a introduit deux autres matériaux plus argileux, afin d'en comparer le comportement à celui des échantillons limoneux (Les VIGNERES 55 %, et LIGNERES 95 % d'argile).

## **B) Analyse du mécanisme à l'origine de la microfissuration**

### **a) Rôle de la présence d'air**

#### **o Résultats**

Pour rechercher si la désagrégation obtenue n'était pas liée à un éclatement partiel des agrégats, on a réalisé les mêmes expériences que précédemment, mais sous vide. On a représenté les résultats concernant deux des matériaux limoneux et les 2 matériaux plus argileux, pour les réhumectations réalisées à l'air et sous vide (fig.25).

On constate une différence très marquée entre les deux résultats pour les matériaux limoneux : la désagrégation disparaît presque totalement sous vide, ce qui montre l'importance du rôle joué par l'air quand on est à la pression atmosphérique.

Au contraire pour les matériaux plus argileux, la fragmentation se produit même sous vide, bien que de manière atténuée.

#### **o Discussion**

Ce résultat fait bien ressortir l'existence de deux mécanismes différents à l'origine de la fragmentation observée : l'un lié au gonflement, qui est prédominant pour les matériaux les plus argileux, et l'autre lié directement à la phase d'humectation en présence d'air, d'autant plus intense que la porosité est élevée, et donc la teneur en argile faible.

KHEYRABI et MONNIER (1968) ont montré qu'une fragmentation à l'humectation se produisait indépendamment de l'éclatement, uniquement par des teneurs en argile dépassant 40 %.

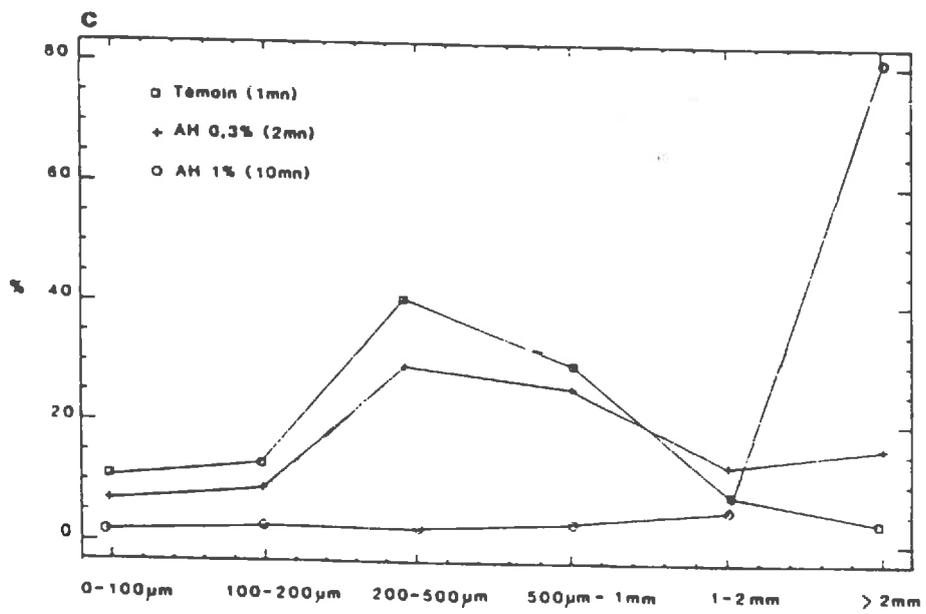
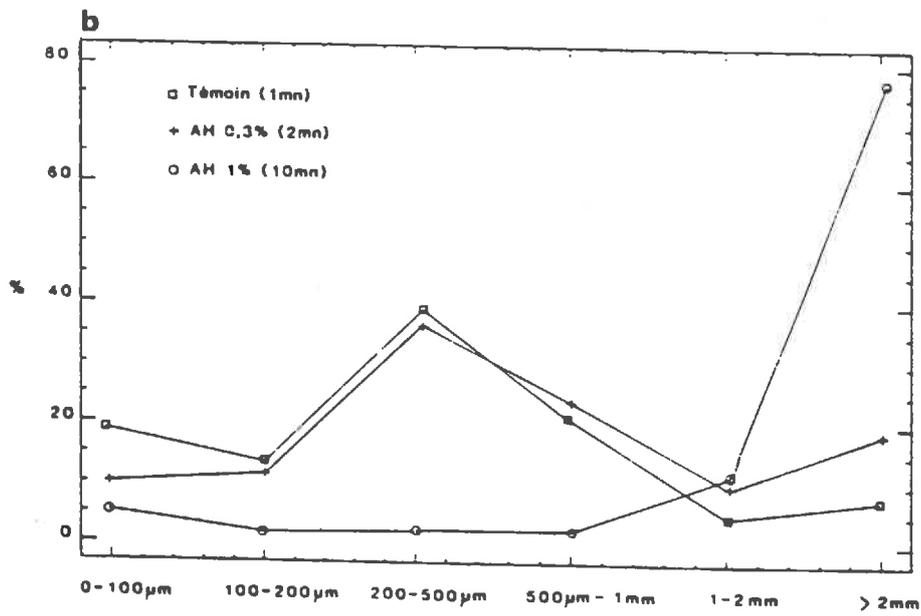
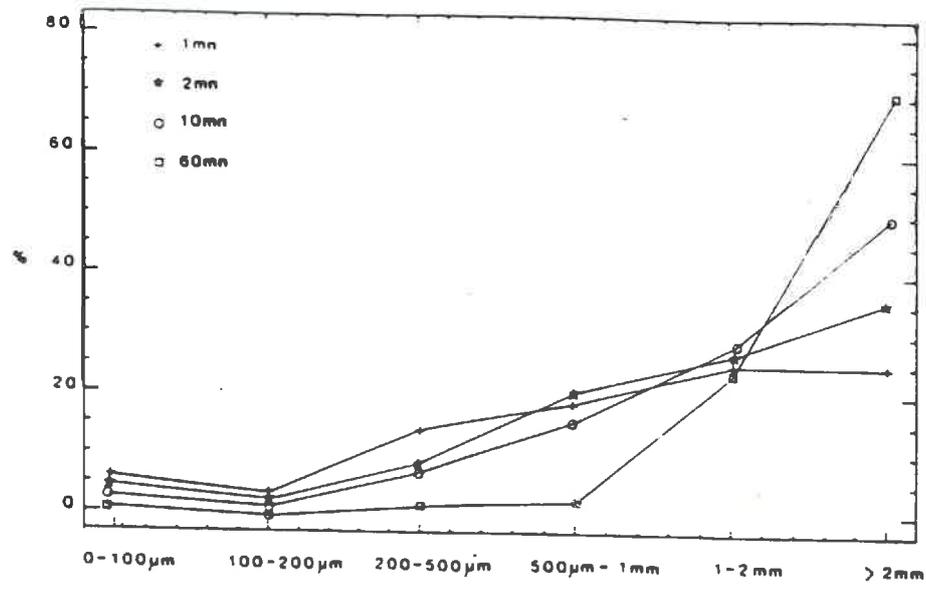


Figure 26: Influence du temps de réhumectation sur la D.T.P.R. a : Boigneville, b : Montluel, c : Palaiseau.

Ce taux critique correspond à la présence d'une phase continue d'argile quelque soit l'arrangement des constituants du squelette, c'est-à-dire à une porosité lacunaire nulle (FIES, 1984).

On peut donc penser qu'en dessous de ce seuil, c'est la présence de pores lacunaires qui permet un certain effet d'éclatement, probablement fonction de la vitesse d'humectation, conjointement à une fragilisation des assemblages, liée au faible taux d'argile ; ceci conduit à une désagrégation du même type que celle résultant des contraintes subies lors du gonflement pour des matériaux situés au delà du seuil.

Mais elle serait liée dans ce cas au calibre de la porosité lacunaire et aux possibilités de piégeage d'air lors de l'humectation.

La phase d'humectation des corps poreux a été étudiée par GRAS (1974) et CONCARET (1968).

Le premier s'est intéressé à l'emprisonnement d'air lors de l'humectation ; ce phénomène est lié à la différence de vitesse de pénétration des ménisques d'eau dans des pores de diamètres différents (loi de Poiseuille).

Or, si le risque de piégeage d'air et donc l'éclatement est maximal lors de l'immersion d'un agrégat, il n'est peut être pas négligeable lors d'une réhumectation par capillarité puisque l'eau peut pénétrer par plusieurs pores de calibres différents en même temps, d'autant plus que la porosité lacunaire est hétérogène.

Cependant, on peut penser que ce risque diminue d'autant plus que l'apport d'eau devient lent et la source ponctuelle. CONCARET (1968) a en effet montré, à propos de l'éclatement, et en jouant sur la viscosité des solutions, que l'intensité de la désagrégation d'agrégats initialement secs était directement liée à la vitesse de réhumectation. Nous avons donc cherché à faire varier cette vitesse d'humectation.

En modifiant la nature de la surface de réhumectation, on a pu moduler la surface de contact avec les agrégats, et donc la cinétique de réhumectation.

#### **b) Rôle de la vitesse de réhumectation**

La figure 26a montre les distributions de taille des particules mobilisées, pour des réhumectations plus ou moins rapides réalisées avec Boigneville.

On constate une diminution très rapide de l'intensité de la désagrégation lorsque le temps moyen de réhumectation augmente, et on tend vers le résultat d'une réhumectation sous vide. On aboutit donc à une situation analogue en chassant au préalable l'air des agrégats (réhumectation sous vide) (fig.25), et en limitant la vitesse de pénétration de l'eau : dans les deux cas on a diminué le risque d'emprisonnement d'air.

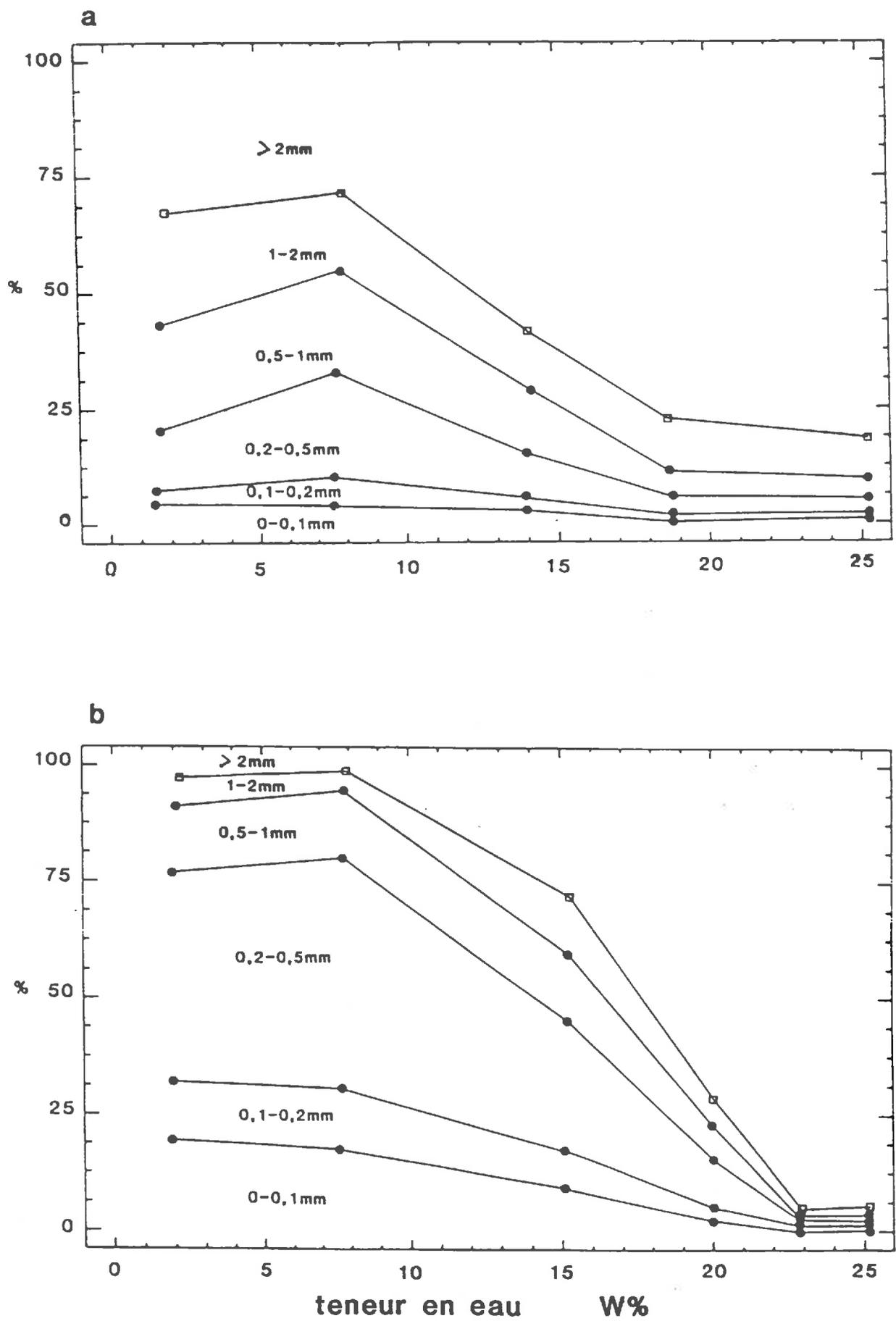


Figure 27: Relation entre l'état hydrique initial et la D.T.P.R. après réhumectation. a : Boigneville, b : Palaiseau.

Par ailleurs, les échantillons traités avec des acides humiques ont des temps de réhumectation beaucoup plus élevés que les témoins, et les D.T.P.R. évoluent dans le même sens que précédemment, en fonction du temps de réhumectation (temps moyen sur un échantillon de 5 grammes d'agrégats) (fig. 26b et c). Dans le cas de la dose la plus forte, la D.T.P.R. est proche de celle correspondant à une réhumectation sous vide (MONTLUEL, fig. 25)

Ce résultat confirme l'influence des matières organiques localisées à la périphérie des agrégats, sur la mouillabilité et la vitesse de réhumectation. Celle-ci est réduite indépendamment de la nature de la surface de réhumectation, et le résultat est analogue à celui obtenu en réduisant les points de contact entre les agrégats et le support.

L'ensemble des résultats précédents nous permet de préciser les modalités du processus de microfissuration (caractérisée par la dimension des particules résultantes), pour des matériaux limoneux à porosité lacunaire :

- ce ne sont pas les propriétés de gonflement qui déterminent la microfissuration,
- celle-ci est une conséquence directe de la phase de réhumectation (aucune fragmentation n'est observée lors du retrait, même rapide, des agrégats),
- il est nécessaire, pour que se réalise ce mécanisme, qu'il y ait d'une part de l'air au sein des agrégats, et d'autre part une géométrie de l'espace poral et une vitesse d'apport de l'eau telle que la réhumectation entraîne le piégeage d'au moins une partie de cet air,
- la quantité de particules produites et la D.T.P.R. dépendent de cette cinétique de réhumectation, et donc sur le terrain, de l'intensité initiale des pluies. Elles dépendent certainement également de l'état initial des agrégats.

### **C) Analyse de l'influence de l'état initial des agrégats**

Pour préciser le déterminisme de la microfissuration, on a étudié l'influence de l'état hydrique initial des agrégats ainsi que de leur calibre.

#### **Résultats**

##### **a) Influence de l'état hydrique initial**

La figure 27 représente l'évolution de la taille des particules mobilisées en fonction de l'humidité initiale des agrégats (préalablement amenés à saturation sous vide).

La microfissuration est minimale dans le domaine de saturation du matériau : le résultat est identique pour 25 % et 18 % d'humidité, alors qu'entre cette valeur et le potentiel auquel est amené l'agrégat, un important gonflement a lieu. Entre 18 et 8 % la

microfissuration augmente rapidement pour atteindre un comportement analogue à celui de l'état sec (BOIGNEVILLE).

Le même type de résultat est obtenu avec Palaiseau.

Cette relation fournit un argument supplémentaire pour montrer que le moteur principal de la désagrégation n'est pas le gonflement, mais la compression de l'air piégé lors de la réhumectation. Il s'agit bien d'un éclatement partiel.

La forme des courbes montre que l'influence de l'état de saturation est plus grande que celle du gonflement.

Mais la comparaison des résultats des deux matériaux pourrait indiquer qu'il existe une certaine microfissuration résiduelle à saturation pour BOIGNEVILLE (près de 20 % de particules < 2 mm), qui serait liée au gonflement.

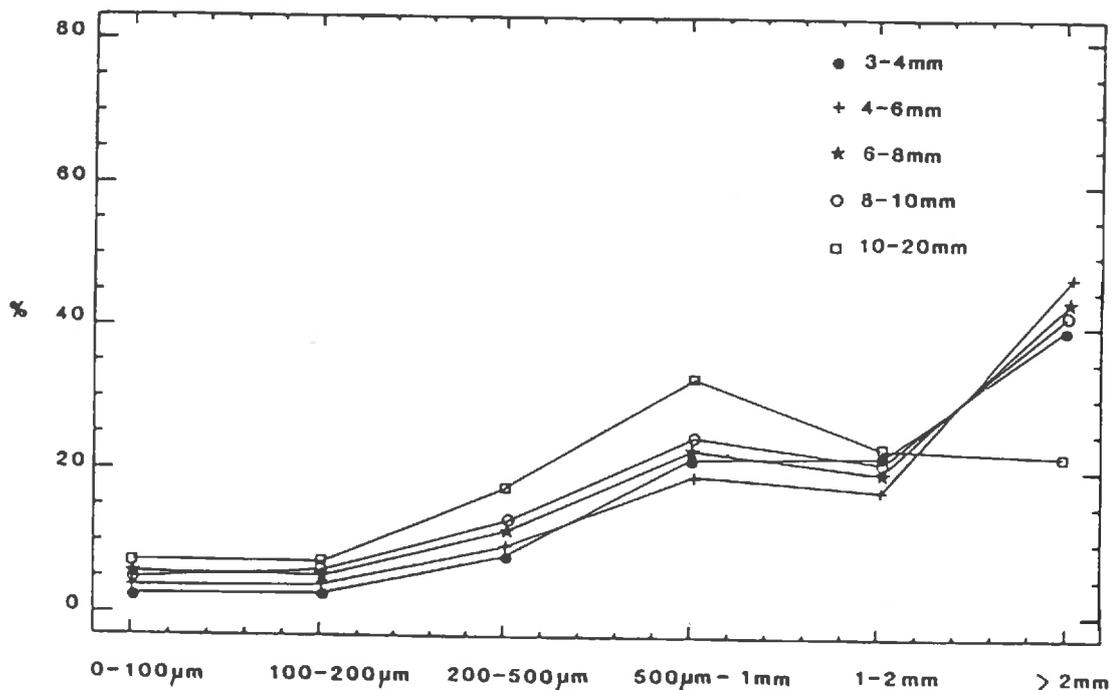


Figure 28: Relation entre le calibre initial des agrégats et la D.T. P.R. après réhumectation (Boigneville).

### b) Influence du calibre initial

La figure 28 montre que pour des tailles d'agrégats comprises entre 3 et 20 mm, la microfissuration a tendance à augmenter légèrement ; mais le type de distribution est le même sauf dans le cas du calibre le plus élevé pour lequel la proportion de particules > à 2 mm diminue un peu.

Il faut noter que ce résultat est en partie déterminé par le protocole utilisé, qui permet un apport d'eau illimité et réparti sur toute la base de l'agrégat.

Et il est clair qu'en cas d'apport ponctuel et limité (gouttes de pluie), les petites mottes sont les plus vulnérables car le rapport entre le volume d'eau apporté à chaque instant et le volume poral est plus élevé (éclatement plus important).

De plus, si le volume total d'eau apportée était limité et inférieur au volume poral de l'agrégat, la désagrégation n'affecterait qu'une partie de l'agrégat.

Des études sous pluie simulée devraient permettre de préciser cette interprétation.

### **c) Influence de l'état structural initial**

On a également soumis à la réhumectation, des agrégats de structures initiales différentes et connues, obtenus par compactage oedométrique de microagrégats de différentes tailles (0,5-1 mm et 1-2 mm) du même matériau.

Les agrégats restructurés ont été fabriqués de la manière suivante : on a réhumecté par capillarité sous vide, des agrégats de BOIGNEVILLE, calibrés respectivement entre 0,5 et 1 mm et entre 1 et 2 mm.

Ces agrégats ont été amenés par dessiccation jusqu'à une teneur en eau de 15 %, puis on a disposé une masse connue d'agrégats dans une cellule oedométrique et on a appliqué une pression mécanique, de manière à obtenir des éprouvettes d'une densité apparente égale à celle des agrégats de 3-4 mm naturels. Après séchage, on a fragmenté ces éprouvettes en agrégats de 3-4 mm.

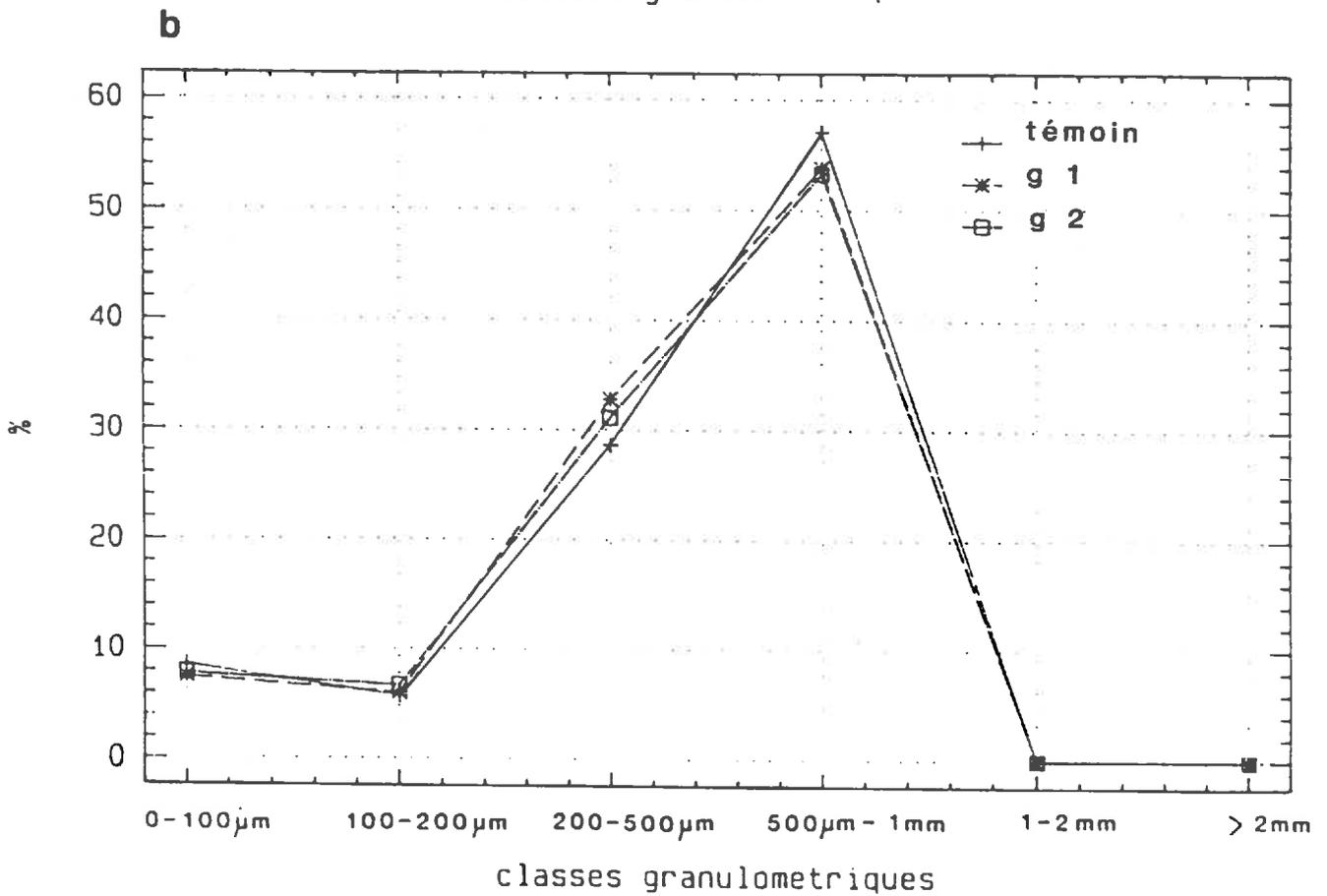
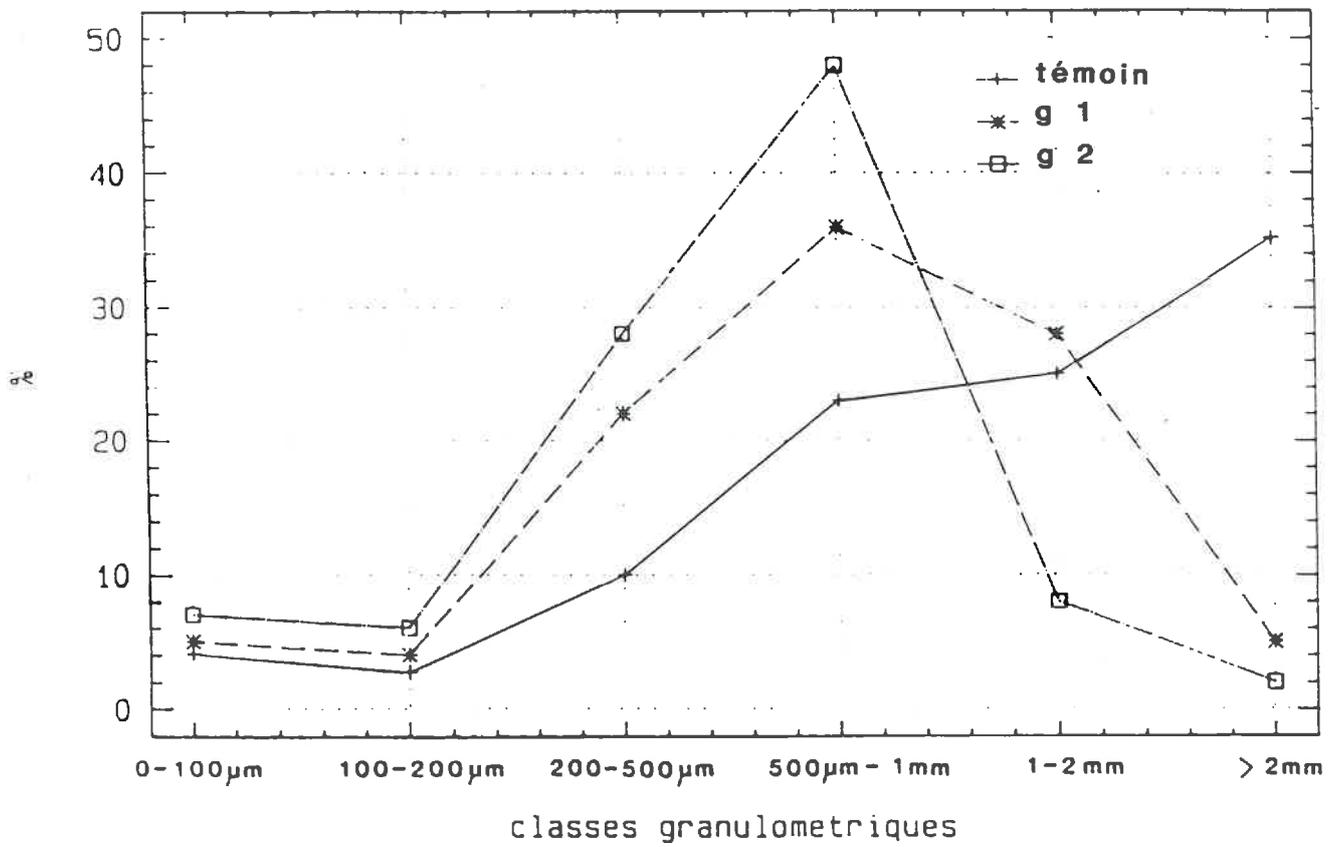


Figure 29: a : Relation entre la structure initiale des agrégats et la D.T.P.R. après réhumectation. b : proportions relatives des classes < 1 mm.

On a donc pu comparer les deux types d'agrégats (g 1 et g 2) fabriqués, aux agrégats naturels (témoin).

Les résultats (fig. 29), font ressortir l'existence de 2 niveaux de fragmentation lors de la microfissuration :

- . l'un lié à la structure initiale des agrégats, hérité,
- . l'autre qui paraît être intrinsèque au matériau, et doit donc être lié à sa constitution.

En effet, on constate que les classes  $> 2$  mm, et 1-2 mm, bien représentées lorsqu'ils s'agit des agrégats standards, disparaissent presque totalement, pour les agrégats fabriqués avec des fragments respectivement inférieurs à 2 mm (g 2), et 1 mm (g 1) (fig.29a).

Ainsi, bien que l'on soit parti d'agrégats de même calibre et de même densité dans les 3 cas, l'empreinte de l'origine structurale se révèle très clairement lors de la microfissuration, et il existe une échelle de fragilité "acquise" au cours de la genèse structurale.

En revanche, à un autre niveau, si l'on compare les proportions relatives des 4 classes les plus fines, pour les 3 types d'agrégats, on observe des résultats très proches, avec une très forte dominance des classes 0,5-1 mm et 0,2-0,5 mm (fig.29b).

Le niveau de fragmentation semble donc être indépendant de la structure des agrégats aux échelles inférieures, et la distribution de taille des particules résultantes pourrait être caractéristique du matériau.

### **Discussion**

Cet ensemble de résultats, concernant l'influence de quelques paramètres de l'état initial des agrégats vis-à-vis de la fragmentation à la réhumectation, éclaire plusieurs aspects de ce processus :

– l'influence de l'état hydrique est la même dans le cas de la réhumectation par capillarité et dans celui de l'immersion, bien que les D.T.P.R. soient très différentes dans les deux cas, ce qui montre que le déterminisme de la désagrégation est, au moins en partie, le même,

– le gonflement seul ne suffit pas, pour ces matériaux limoneux à entraîner de fragmentation. Et même pour des agrégats de plus gros calibres (20 mm), on a pu constater, lors d'expérimentations complémentaires, qu'aucune désagrégation n'intervenait à la suite d'une réhumectation sous vide,

– le calibre initial des agrégats a peu d'influence sur la dimension des particules produites, par contre la D.T.P.R. peut être influencée par la structure d'origine des agrégats : il peut exister des zones de faiblesse préexistantes, qui seront systématiquement rompues lors d'une humectation. Ainsi, deux niveaux de rupture se superposent : l'un lié à la texture du matériau, l'autre à sa structure.

Si l'on tente de transférer ces résultats au comportement de la surface du sol en conditions naturelles, on est amené à penser que les 3 paramètres étudiés sont interdépendants : les petits agrégats sèchent plus vite que les gros et sont donc plus rapidement vulnérables, et ce d'autant plus, que l'apport d'eau est limité. Mais il est probable que la périphérie des plus grosses mottes subit une évolution comparable, et cette microfissuration périphérique doit être favorisée par l'existence d'une porosité structurale importante.

Par ailleurs, la structure des agrégats résulte des antécédents culturaux (MANICHON, 1982 ; PAPY, 1984 ; STUTTARD, 1984 ; BULLOCK et al., 1988) ; la sensibilité à la microfissuration d'un matériau donné doit donc probablement varier en fonction de ces antécédents.

#### **D) Déplacement de particules et réversibilité de la microfissuration**

L'éclatement entraîne un effondrement en place du matériau par suite de la perte de cohésion interne. Il en résulte un aplanissement de la surface et une soudure des mottes, entre elles, et avec la surface.

On s'est posé la question des conséquences de la microfissuration, et du déplacement des particules produites. En effet, ce processus en lui-même n'implique pas de déplacement : il est même nécessaire d'immerger les agrégats dans l'alcool pour mettre en évidence la mobilisation des particules. Il s'agit donc en fait d'une désagrégation potentielle, qui nécessite une énergie supplémentaire pour se manifester sous forme d'un déplacement des microagrégats. Cette énergie peut être apportée par les gouttes de pluie qui atteignent les agrégats après la phase initiale de microfissuration. Mais dans le cas où l'apport d'eau cesse avant ce déplacement, on peut se poser la question de la réversibilité de cette microfissuration à la dessiccation.

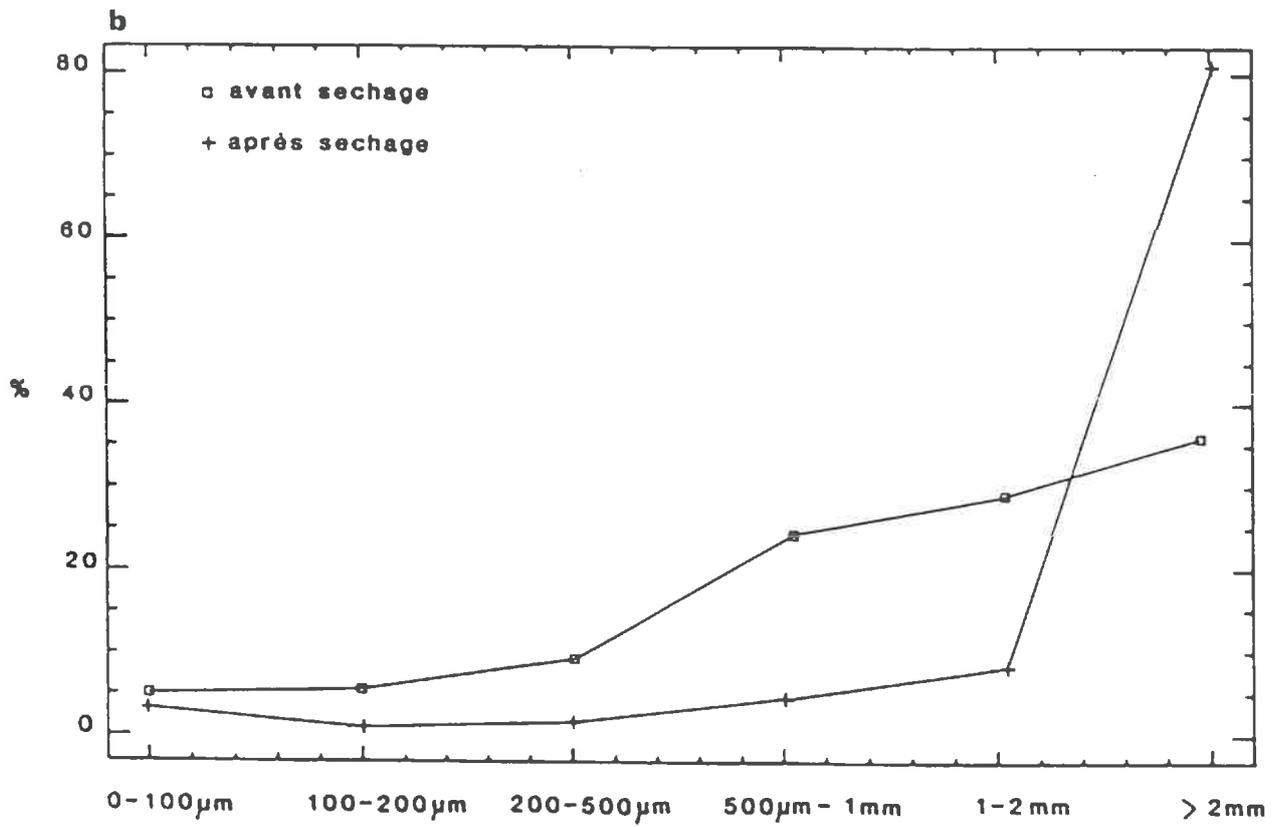
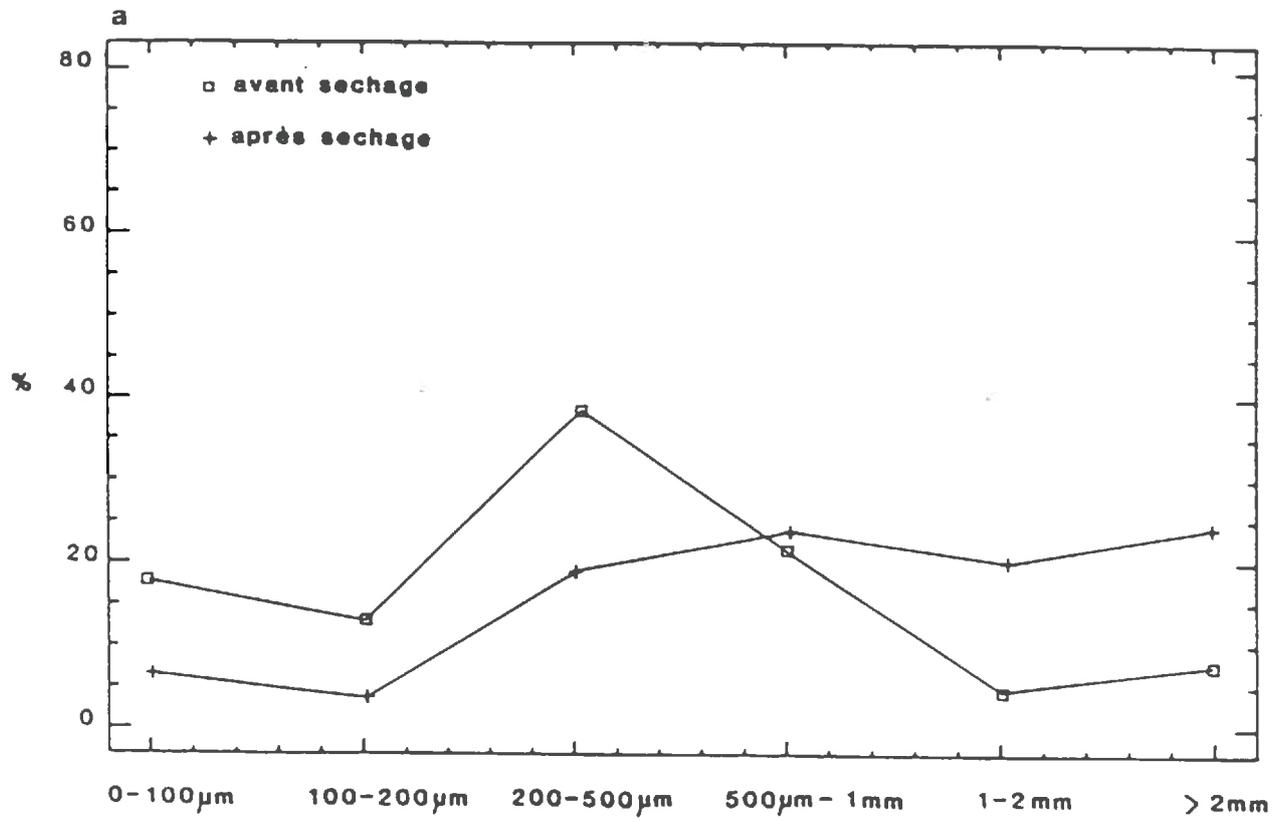
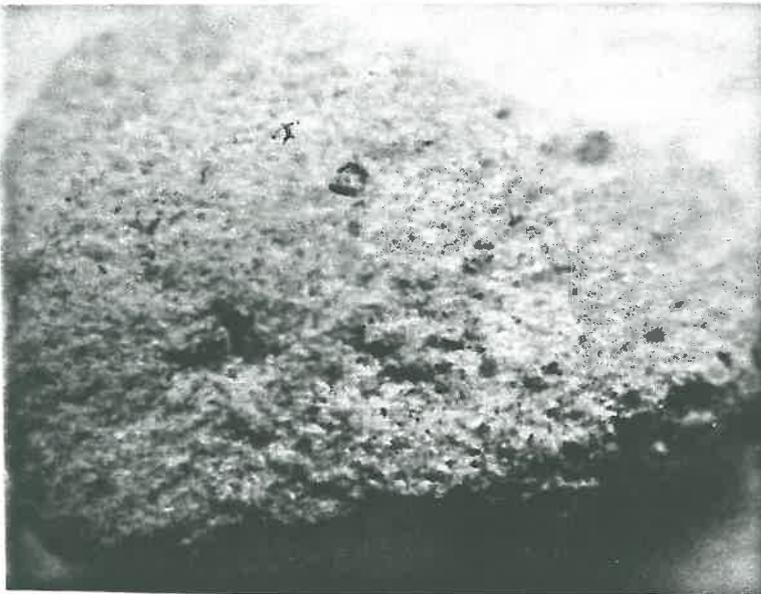


Figure 30: Comparaison des D.T.P.R. avant et après séchage des agrégats réhumectés. a : Montluel, b : Boigneville.



0 1 mm

Figure 31: Observation en microscopie optique de l'évolution structurale d'un agrégat de Montluel réhumecté par capillarité.

On a donc comparé les D.T.P.R. mesurées avant et après séchage des agrégats réhumectés.

Ces résultats montrent qu'il peut se produire une "réagrégation" importante au cours du séchage ; cependant une fraction au moins de l'échantillon reste mobilisable après séchage, et l'agrégat est définitivement fragilisé. C'est surtout le cas pour MONTLUEL (fig. 30).

La microfissuration semble donc partiellement réversible et il est nécessaire que d'autres processus interviennent pour entraîner une évolution structurale importante. Elle correspond en fait plutôt à un affinement progressif de la structure, ce qui augmente évidemment la sensibilité de la surface vis-à-vis d'une action ultérieure.

### **3) CONCLUSION : LA MICROFISSURATION DES AGREGATS A LA REHUMECTATION**

On appelle ainsi une évolution structurale correspondant à la formation d'agrégats millimétriques à partir d'éléments structuraux de plus grande taille (BOIFFIN, 1984). La figure 31, montrant l'évolution d'un agrégat de MONTLUEL réhumecté par capillarité, illustre bien ce type de comportement, par comparaison avec l'évolution observée sur le même matériau lors d'une immersion (fig.10).

Il apparaît que ce résultat est obtenu suivant la texture et la structure des matériaux par deux mécanismes différents :

- l'éclatement partiel pour les matériaux à porosité texturale (sols limoneux),
- le gonflement différentiel pour les matériaux plus argileux.

Dans le cas des matériaux à porosité lacunaire et à faible gonflement potentiel, le premier mécanisme semble prédominant. Mais les risques de fissuration des agrégats sont dans les deux cas liés au nombre et à l'amplitude des alternances hydriques, ainsi qu'à la cinétique de réhumectation : ce sont les mêmes facteurs qui ont une influence.

En revanche, les paramètres de constitution des matériaux jouent en sens inverse pour les deux processus :

- le risque de fissuration par éclatement partiel augmente lorsque la teneur en argile diminue, à cause de l'augmentation du volume et de la taille des lacunes et de la diminution de résistance mécanique,

- le risque de fissuration par gonflement augmente lorsque la teneur en argile augmente, à cause de l'augmentation du gonflement potentiel.

En ce qui concerne le rôle des matières organiques, les résultats montrent qu'ils ont une influence sur l'intensité de la microfissuration en limitant la vitesse de réhumectation.

Par rapport au cas de l'immersion, le protocole utilisé place les agrégats dans une situation d'éclatement modéré, et ce, d'autant plus que l'humectation est lente et que les possibilités d'échappement d'air sont élevées. Il existe donc probablement une continuité entre les deux types d'évolution structurale.

La microfissuration a une action très importante vis-à-vis de l'évolution structurale, qui est indépendante de l'énergie appliquée, mais qui est fortement liée à la vitesse d'apport de l'eau. La taille des particules mobilisées est intermédiaire (0,2 à 1 mm), quelle que soit la dimension initiale des mottes, et le volume de terre mobilisé est fonction de la quantité totale d'eau apportée. Il est clair que ces particules sont très vulnérables à une désagrégation mécanique et à un déplacement secondaire sous l'action des gouttes de pluies, étant donné leur dimension.

Il est probable, que ce mécanisme souvent passé inaperçu, à cause de sa situation transitoire dans l'évolution structurale de la surface, joue un rôle déterminant, aussi bien sur la dynamique de ce phénomène, que sur la structure des croûtes résultantes.

## **CHAPITRE 5 :**

### **SYNTHESE : LES MECANISMES DE DESAGREGATION PAR L'EAU ET LES DIFFERENTS SCENARIOS D'EVOLUTION STRUCTURALE**

#### **Introduction**

Dans le chapitre 1 nous avons recensé les différentes interprétations des phénomènes de désagrégation à partir de données bibliographiques ; dans les chapitres 2 et 3, nous avons étudié le comportement d'agrégats de sols limoneux lors de leur mise en contact avec l'eau, dans deux conditions très différentes : immersion et réhumectation par capillarité dont on peut admettre qu'elles correspondent à des cas modèles par rapport aux diverses conditions de réhumectation in-situ.

Nous pouvons donc maintenant tenter de faire la synthèse de ces données, afin de proposer différents scénarios de l'évolution structurale des agrégats, que nous chercherons à valider dans une seconde partie, à l'aide d'expériences simulant les situations de terrain.

#### **1) LES DIFFERENTES MODALITES DE DESAGREGATION D'UN MATERIAU DONNE**

Pour effectuer cette synthèse, nous allons commencer par représenter sur un schéma, toutes les modalités expérimentales réalisées, pour un matériau donné : PALAISEAU.

On peut décrire un certain nombre de situations expérimentales dont il faudra ensuite discuter la validité et la probabilité sur le terrain (fig. 32).

On peut donc arriver à représenter 7 scénarios différents pour Palaiseau, qui correspondent essentiellement à des conditions de mise en contact eau-agrégats, et à des états hydriques initiaux variables.



– Le chemin n° 1, qui correspond à l’immersion brutale d’agrégats secs, privilégie au maximum le mécanisme d’éclatement : porosité entièrement libre à l’air et entrée d’eau simultanée par toute la périphérie de l’agrégat.

On peut constater que malgré l’absence d’énergie mécanique, l’évolution structurale résultante est particulièrement importante, puisque quelque soit la taille des agrégats initiaux, il ne reste, après quelques minutes, pratiquement plus aucune particule de taille supérieure à 500  $\mu\text{m}$ .

De telles conditions sont assez peu fréquentes sur le terrain, sauf dans le cas de gros orages sur des petits agrégats secs, ainsi qu’en milieu méditerranéen ou tropical.

Il est à noter que ce scénario est probablement privilégié, par rapport à la grande variabilité des conditions possibles, dans de nombreux tests de stabilité structurale (HENIN et MONNIER, 1956 ; DE LEENHEER et DE BOODT, 1959 ; KEMPER, 1967).

– Le chemin n° 2, correspond aux mêmes conditions initiales mais, avec en plus une agitation mécanique.

Au résultat précédent s’ajoute une désagrégation mécanique qui a pour effet d’augmenter le taux de particules < 100  $\mu\text{m}$ . Par rapport à la situation précédente, ce cas peut correspondre à une pluie identique sur sol nu mais de plus longue durée, pour laquelle l’action mécanique des gouttes s’exerce effectivement sur la surface du sol une fois l’éclatement initial réalisé et la couche superficielle réhumectée.

– Dans les chemins n°3 et 4, les agrégats sont cette fois, non plus immergés, mais amenés à un potentiel quasi-nul, par une réhumectation par capillarité.

Cette modalité permet de limiter partiellement le piégeage de l’air, et donc le risque d’éclatement.

En fait, nous avons pu montrer dans le chapitre précédent que d’une part, le phénomène d’éclatement était encore largement responsable de la désagrégation observée (absence de désagrégation dans les mêmes conditions mais sous vide), et que d’autre part, la vitesse de réhumectation avait une influence déterminante sur l’intensité de la désagrégation : si la réhumectation est très rapide, le résultat tend vers celui de l’immersion (cas n°3), au contraire lorsque la vitesse de réhumectation diminue, la désagrégation est de moins en moins poussée (cas n°4). Ce type de situation peut correspondre, d’une part aux sols sous mulch, et d’autre part, à des pluies de faible intensité.

Cette évolution depuis l'éclatement total, lors de l'immersion, jusqu'à l'absence presque complète de désagrégation montre bien d'une part, le rôle du piégeage d'air et de la vitesse de réhumectation (CONCARET en 1967, l'avait montré en faisant varier la viscosité des solutions servant à la réhumectation), d'autre part, l'influence de l'intensité initiale des pluies sur une surface formée de petits agrégats secs.

En effet, l'éclatement intervient quasi-instantanément, et en tous cas, lors des premières secondes de l'immersion. Une fois la réhumectation effectuée, la désagrégation devient beaucoup plus lente (cas suivants).

– Les cas 5, 6 et 7 correspondent à différentes séquences ayant en commun une réhumectation initiale par capillarité sous vide, dont on a pu vérifier qu'elle n'était pas en elle-même destructrice. Elle permet de supprimer totalement ou partiellement la présence d'air dans les agrégats, et donc le phénomène d'éclatement, afin d'étudier le comportement des agrégats saturés.

On a vu (chapitres 3 et 4) que l'intensité de la désagrégation diminuait régulièrement lorsque la teneur en eau initiale des agrégats augmentait aussi bien lors de l'immersion, que lors de réhumectation par capillarité. L'influence de l'éclatement est donc partiellement (cas 5 et 6), ou totalement supprimée (cas 7), lorsque l'on réduit ou supprime la porosité libre à l'air des agrégats.

On peut d'ailleurs relever la convergence des distributions de taille des particules mobilisées dans les deux cas :

en immersion, lorsque la teneur en eau initiale est intermédiaire, et en réhumectation par capillarité, on a une prédominance des classes intermédiaires qui peut s'expliquer dans les deux cas par la diminution du piégeage d'air, en particulier dans les plus petits pores, soit à cause de la présence d'eau, soit parce que l'air a pu en être chassé en cours de réhumectation.

Dans le domaine de saturation, au delà du point d'entrée d'air, l'éclatement ne peut plus intervenir, et seule la désagrégation mécanique liée à l'agitation intervient.

Dans ce cas, la désagrégation est lente, mais elle produit des particules de petite taille, quasi-élémentaires, ce qui à la longue peut entraîner une désagrégation très poussée, et la formation de croûtes très compactes et bien triées.

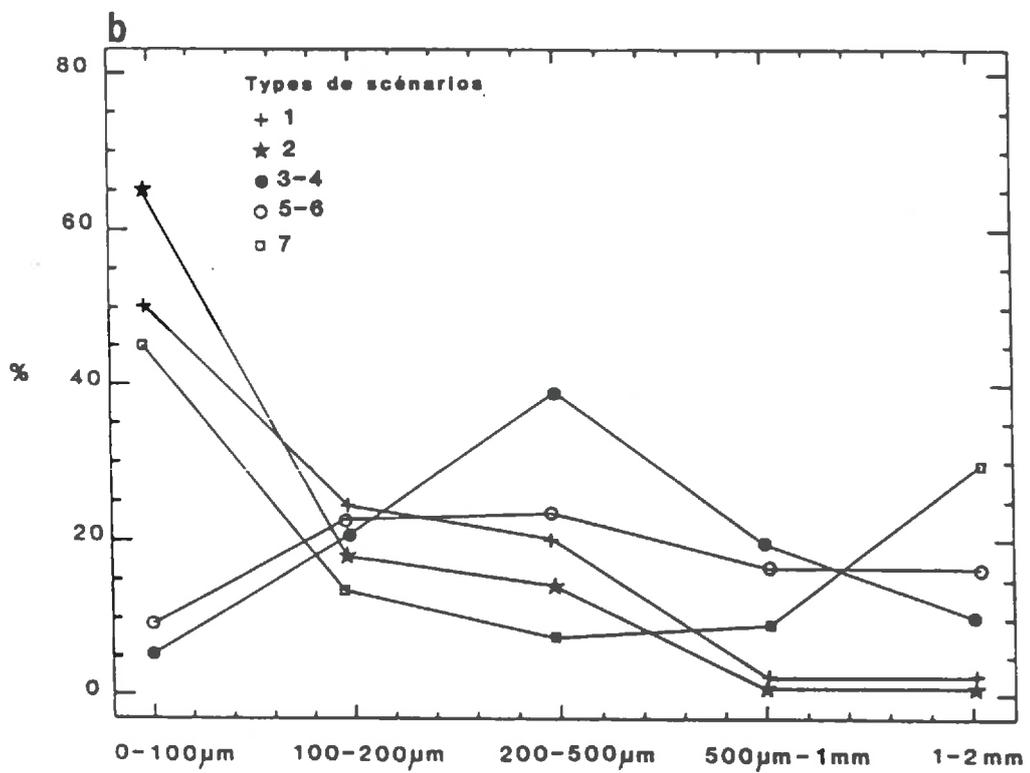
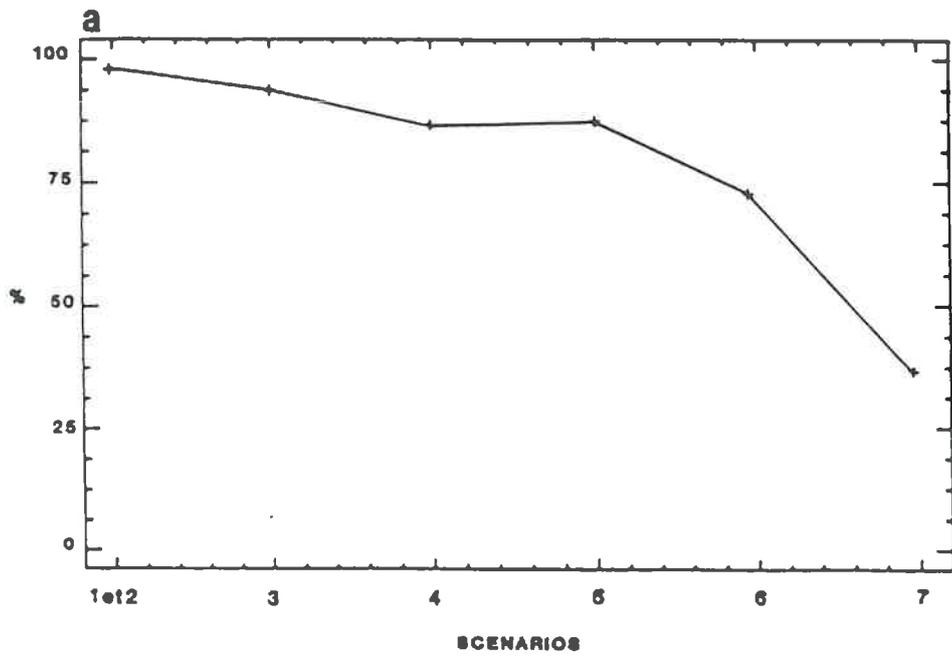


Figure 33: Les différents types d'évolutions structurales (Palaiseau). a : quantité de particules produites (< 2mm) pour les différents scénarios, b : proportions relatives des particules < 2 mm pour les différents scénarios.

L'énergie d'agitation joue aussi probablement un rôle important, dans la mesure où il pourrait exister des seuils de sensibilité à une action mécanique, en fonction de la cohésion à l'état humide des matériaux ; mais l'approche adoptée ici ne permet pas de tester correctement ce point. Il sera repris dans la deuxième partie.

L'ensemble de ces résultats montre :

- o qu'il existe de nombreuses voies pour passer d'un état initial agrégé à un état désagrégé ;

- o que la quantité de particules produites et la distribution de la taille de ces particules sont très différentes, selon le chemin suivi (fig. 33) ;

- o que pour un matériau donné, ce sont l'état hydrique initial et les conditions de mise en contact eau-agrégats qui déterminent le chemin suivi et donc l'évolution structurale.

## **2) LES DIFFERENTS DOMAINES HYDRIQUES DU COMPORTEMENT**

Nous avons donc vu que la désagrégation ne résultait pas de l'intervention d'un seul mécanisme mais de la combinaison de plusieurs, dont les facteurs ne sont pas indépendants, et qui peuvent se superposer ou se succéder dans le temps.

L'un de ces facteurs les plus importants est l'état hydrique initial des agrégats.

A partir des courbes des figures 6 et 7, on peut définir pour chaque matériau différents domaines hydriques de comportement.

Ces domaines pourraient servir à déterminer, en fonction de données climatiques et sur les propriétés hydriques des matériaux, la probabilité d'intervention des différents mécanismes de désagrégation, et donc les risques de dégradation structurale de la surface du sol (fig.34).

Les limites de ces domaines correspondent, pour les matériaux limoneux étudiés, d'une part au point d'entrée d'air, qui est le seuil de désagrégation par éclatement, et d'autre part à la limite de désagrégation maximale, qui est la valeur d'humidité en dessous de laquelle le niveau de désagrégation, tel que nous l'avons mesurée, reste constant.

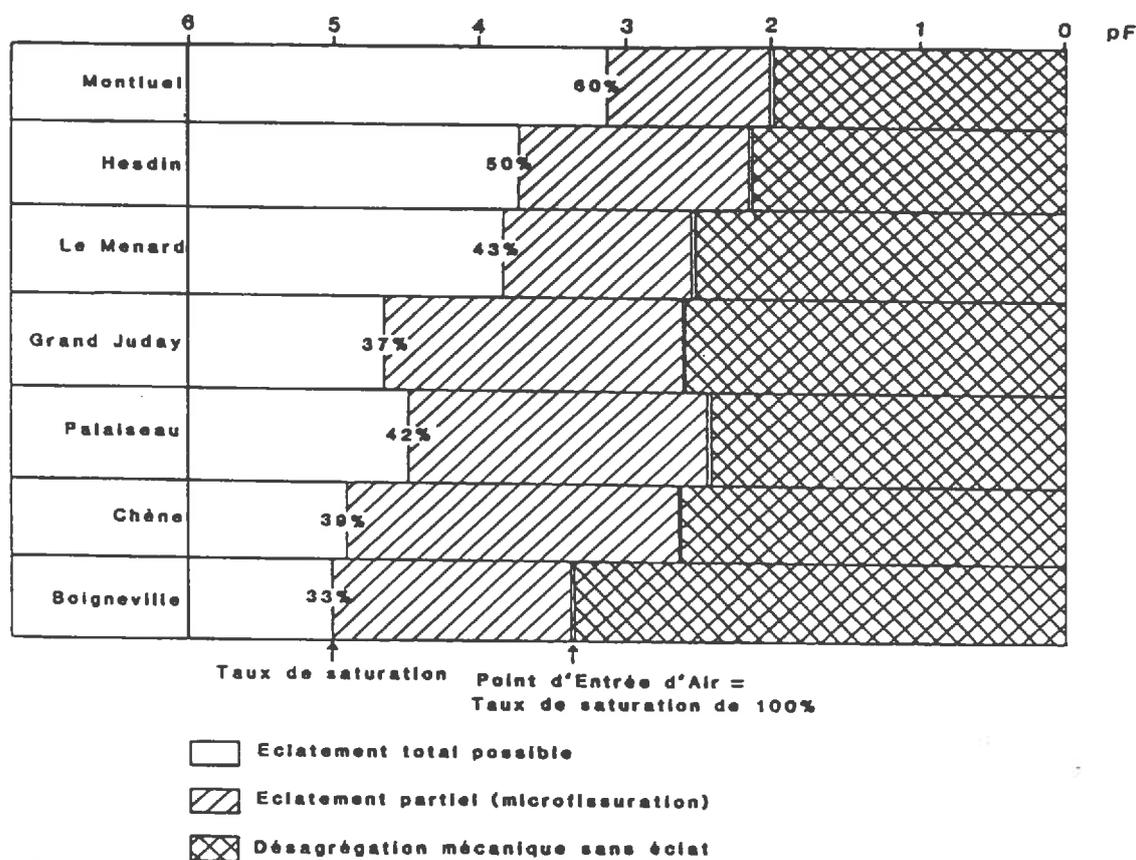


Figure 34: Les différents domaines hydriques de comportement des matériaux limoneux.

o Dans le premier domaine (faibles humidités), le risque de désagrégation est maximal : suivant la brutalité et la durée d'apport de l'eau, il peut s'agir d'éclatement total ou de microfissuration par éclatement partiel et donc de particules de tailles différentes ; à ces mécanismes initiaux, peut s'ajouter une désagrégation mécanique si la pluie se prolonge au-delà de la saturation de la surface.

o Le second domaine, qui correspond aux humidités intermédiaires, est celui où la combinaison des mécanismes est la plus forte. En effet, les différents mécanismes peuvent intervenir quasiment simultanément et très rapidement : il suffit d'une faible quantité d'eau pour resaturer les agrégats de surface, ce qui doit permettre à la fois à l'éclatement et à la désagrégation mécanique d'intervenir rapidement.

o Dans le domaine où les agrégats sont saturés, seule la désagrégation mécanique intervient. L'évolution structurale est alors beaucoup plus lente : seule une "abrasion" progressive de la périphérie des agrégats se produit, dont l'intensité doit dépendre de l'interaction entre l'agressivité des pluies et la résistance mécanique des agrégats à l'état humide.

### **3) INFLUENCE DES FACTEURS DE CONSTITUTION DES MATERIAUX SUR LES MECANISMES ET LES DOMAINES DE COMPORTEMENT**

Nous venons de discuter des différentes modalités et des domaines de comportement pour un matériau donné. Il reste à montrer que les schémas proposés s'appliquent à l'ensemble des matériaux limoneux que nous avons étudiés, et à déterminer l'influence de leur constitution granulométrique.

#### **a – Désagrégation par éclatement**

En ce qui concerne les phénomènes liés à l'éclatement, il apparaît que les principaux facteurs ayant une influence sont :

- 1 – le volume poral libre à l'air ;
- 2 – la vitesse de réhumectation ;
- 3 – la résistance mécanique des agrégats.

o Le premier point est étroitement lié à la texture et à la structure des agrégats, ainsi bien sur, qu'à leur état hydrique, comme nous l'avons signalé ci-dessus (FIES & STENGEL, 1984 ; BRUAND, 1986).

Si l'on admet que la porosité structurale des agrégats millimétriques sur lesquels nous avons travaillé est nulle et qu'ils présentent un arrangement textural (FIES, 1984), alors ce volume poral dépend de la distribution du squelette mais surtout de la teneur en argile du matériau, comme le montrent la morphologie des agrégats (fig.5) et les mesures de porosimétrie au mercure (annexes).

Dans notre gamme de matériaux, la distribution granulométrique du squelette varie peu, et la teneur en argile est comprise entre 10 et 32 %. Ce qui fait que l'arrangement est de type à porosité lacunaire, et que le volume de cette porosité et la taille des pores diminuent régulièrement lorsque la teneur en argile augmente.

Comme la résistance mécanique augmente avec la teneur en argile, ces deux facteurs s'ajoutent pour donner un poids important à ce paramètre vis-à-vis de l'éclatement. Cette argile a également indirectement un autre rôle très positif, dont nous venons de parler, en réduisant le domaine de potentiel hydrique, de risque d'éclatement maximum.

o La vitesse de réhumectation dépend bien sûr, des caractéristiques de l'apport d'eau, mais aussi beaucoup de la dimension des pores par lesquels l'eau pénètre dans l'agrégat (loi de POISEUILLE) et de la mouillabilité de leurs parois. Ce dernier point est

difficile à mesurer, mais différents auteurs ont montré (MONNIER, 1965 ; BOIFFIN, 1976) que la présence de matières organiques, combinée à des périodes de dessiccation et de séjour en conditions sèches diminuait cette mouillabilité et par conséquent la vitesse de pénétration de l'eau dans les pores et le risque d'éclatement (MONNIER & KONAN, 1968).

Les traitements d'agrégats avec des substances organiques hydrophobes de synthèse ont effectivement un rôle très favorable vis-à-vis de l'éclatement (LE BISSONNAIS, 1985).

Les résultats concernant les matériaux traités avec les acides humiques confirment ce rôle, et montrent que la quantité de particules produites est très fortement réduite.

En ce qui concerne la résistance mécanique des agrégats, il est établi qu'elle dépend de la quantité et de la nature des ciments présents, c'est-à-dire des argiles, des matières organiques liées et des oxydes et oxyhydroxydes de fer et d'aluminium (ROBERT et al., 1983). Cependant, elle diminue lors de l'humectation, mais de manière variable selon la nature de ces ciments, qui sont plus ou moins sensibles à l'eau.

#### **b – Microfissuration par éclatement modéré**

Nous avons vu que la microfissuration était liée essentiellement à un éclatement partiel, et qu'elle pouvait également dépendre du gonflement lorsque la teneur en argile devient supérieure à 40-50 % (KHEYRABI et MONNIER, 1968). Un effet du gonflement existe certainement aussi pour les limons moins argileux, mais il est insuffisant pour provoquer à lui seul une désagrégation importante, dans les conditions de réhumectation étudiées (fig. 25). Les paramètres qui ont une influence sur ce processus sont donc les mêmes que précédemment.

La mouillabilité des surfaces a aussi une influence importante sur ce type de désagrégation, puisque le principal facteur de variation est la vitesse de réhumectation (fig. 26).

#### **c – Désagrégation mécanique**

La désagrégation mécanique dépend de l'agressivité des gouttes de pluie et de la résistance à l'abrasion des agrégats, et en particulier de leur périphérie qui subit les impacts des gouttes. Cette résistance est directement fonction de la qualité des ciments à l'état humide, et donc essentiellement, pour les matériaux étudiés, de la teneur en argile (fig. 35c). Il ne semble pas que l'apport d'acides humiques augmente nettement la résistance mécanique à l'état humide des agrégats (fig. 19).

#### **d – dispersion**

Les résultats concernant les agrégats de BOIGNEVILLE rendus sodiques mettent bien en évidence le type de comportement lié à une dispersion physico-chimique. Il s'agit d'une production de particules élémentaires du simple fait d'une mise en contact avec l'eau des agrégats, aussi bien à sec qu'à saturation (fig. 12 et 18).

On ne trouve ce comportement pour aucun des limons de notre gamme, il semble donc qu'il ne corresponde qu'à des teneurs en sodium exceptionnelles.

La seule possibilité d'émission de particules fines correspond à l'agitation prolongée des agrégats dans l'eau, il s'agit en fait dans ce cas d'une disjonction mécanique de particules, qui est fonction de cet apport d'énergie.

#### **4) CARACTERISTIQUES DES PARTICULES PRODUITES**

On peut caractériser la production des particules au cours d'une désagrégation par le taux de particules < 2 mm produites, et par la distribution de la taille de ces particules (fig. 33).

Ces caractéristiques sont fonction à la fois de la nature des mécanismes intervenant (fig. 33), et des caractéristiques des matériaux (fig. 35) (tab. 6).

#### **5) CONCLUSION**

L'ensemble des expérimentations réalisées dans cette partie et les protocoles adoptés nous ont permis de bien séparer les différents mécanismes, et ainsi d'en analyser le déterminisme propre.

L'influence des différents types de facteurs : état initial, conditions d'apport d'eau, et caractéristiques des matériaux, a été clairement établie, mais ce point devra être complété par une étude de l'influence des caractéristiques des pluies.

o Contrairement à une approche de type test de stabilité structurale, les résultats obtenus ne conduisent pas à une caractérisation de la sensibilité intrinsèque des matériaux, dont nous avons montré qu'elle était contingente d'autres facteurs, mais plutôt à la description des différents types de comportements structuraux, à la mise en évidence des principaux facteurs de variation de ces comportements ainsi que de leurs conséquences en terme de quantité et dimension des particules produites.

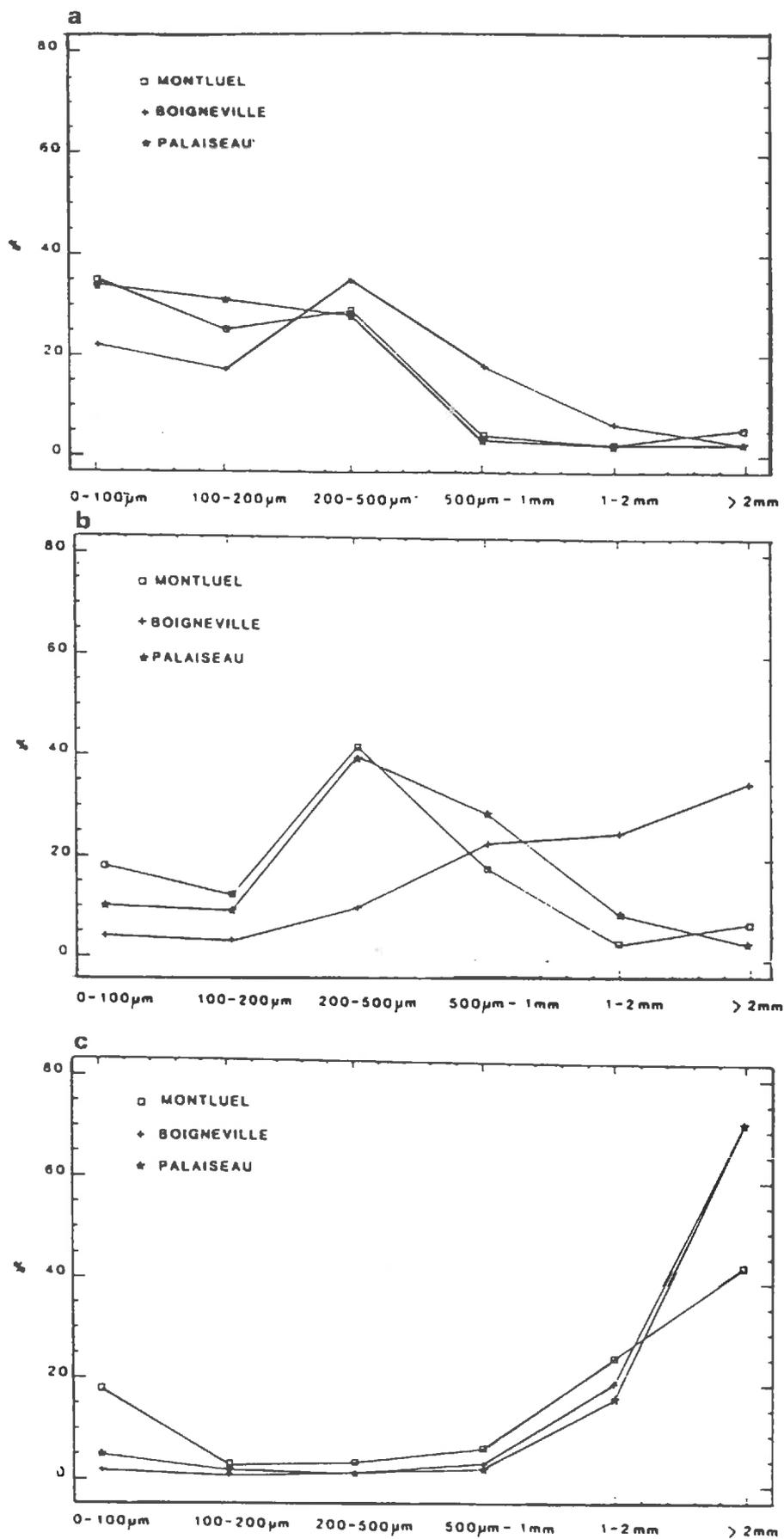


Figure 35: Comparaison des D.T.P.R. de différents matériaux pour les principaux types de comportement. a : éclatement total, b : microfissuration par éclatement partiel, c : désagrégation mécanique sans éclatement.

Mécanismes de désagrégation	Eclatement total	Microfissuration	Désagrégation mécanique	Dispersion
Conditions de réalisations	Réhumectations d'agrégats secs avec piégeage de l'air	Réhumectation d'agrégats non saturés avec échappement d'air	Energie mécanique sur agrégats saturés	Apport d'eau sur agrégats sodiques
Taux de particules < 2mm	> 95 %	> 80 % Fonction de l'état hydrique et de la vitesse d'humectation	Fonction du temps d'application de l'énergie mécanique et de la résistance mécanique des agrégats	100 %
D.T.P.R.	90 % < (0-500µm)	70 % < (0,2 - 1 mm)	Particules < 100 µm	Particules élémentaires
Influence des facteurs de constitution	Les particules produites sont d'autant plus fines que la teneur en argile est faible et que la mouillabilité est élevée		La quantité de particules produites est liée à la teneur en argile des matériaux	L'importance de ce mécanisme est liée au taux de Na éch.

Tableau 6: Caractéristiques des particules produites pour les différents mécanismes de désagrégation

En définitive, on peut dégager trois facteurs prépondérants, vis-à-vis de la désagrégation, dans la gamme des sols limoneux :

- leur teneur en argile,
- l'état hydrique des agrégats au moment de l'apport d'eau, qui est lui-même lié à leur teneur en argile,
- et les caractéristiques et conditions de l'apport d'eau.

Les autres facteurs importants étant :

- ceux qui peuvent entraîner une modification de la mouillabilité des agrégats et limiter ainsi la vitesse de pénétration de l'eau dans les pores ; c'est-à-dire d'une part, la présence de matières organiques hydrophobes en périphérie des agrégats, et d'autre part, une histoire hydrique sèche préalablement à l'humectation, qui favorise l'expression du caractère hydrophobe de ces substances organiques (BOIFFIN, 1976), ainsi que l'augmentation de la cohésion des agrégats (KEMPER et ROSENAU, 1984),

- la présence éventuelle d'autres ciments organiques ou minéraux améliorant la résistance mécanique ; et inversement la présence de cations monovalents (Na) favorisant la dispersion (HARTMANN & DE BOODT, 1974 ; SHAINBERG, 1985).

o Par ailleurs, les interactions entre ces différents paramètres permettent de définir pour chaque matériau des domaines hydriques de comportement vis-à-vis des mécanismes de désagrégation.

Les limites de ces domaines constituent alors des caractéristiques de la sensibilité des matériaux à la désagrégation par l'eau, complémentaires et indissociables des mesures de désagrégation elles-mêmes (fig. 34).

En outre, la quantité et la distribution dimensionnelle des particules produites sont caractéristiques des différents mécanismes (tab. 6).

Il semble que sur la base d'un tel schéma, dans la mesure où il est bien représentatif de situations réelles sur le terrain, il devrait être possible de décrire et de modéliser le comportement structural de la surface des sols. Il reste au préalable à valider ce schéma dans le cas d'un apport d'eau sous forme de gouttes, et à analyser l'influence des caractéristiques des pluies.

**– DEUXIEME PARTIE –**

**L'ACTION DES GOUTTES DE PLUIE A LA  
SURFACE DU SOL : DESAGREGATION,  
MOBILISATION ET DEPLACEMENT DES  
PARTICULES**

## INTRODUCTION

Avant d'étudier l'action des pluies sur les agrégats, il est nécessaire de les décrire et de les caractériser, afin d'une part, de comprendre comment un apport d'eau sous forme de gouttes, se différencie de l'immersion et de la réhumectation par capillarité ; et d'autre part de recenser les différents paramètres pluviométriques pouvant être déterminants dans les mécanismes de désagrégation.

Compte tenu de l'échelle à laquelle nous avons abordé cette étude, ce sont les caractéristiques des gouttes elles-mêmes qui nous intéressent, mais il est nécessaire de rappeler au préalable quelques notions sur les caractéristiques des pluies.

### 1) CARACTERISTIQUES GLOBALES DES PLUIES

On caractérise le plus souvent un épisode pluvieux par sa hauteur, qui correspond à la lame d'eau reçue par le sol au cours de la pluie (en mm). Les hauteurs de différents épisodes pluvieux peuvent être cumulées, pour obtenir les quantités d'eau reçues pour des périodes données : pluies journalières, mensuelles, annuelles, etc...

Ces calculs permettent d'effectuer des bilans hydriques, en particulier pour déterminer les besoins en eau des plantes. On peut également, à partir de ces données, calculer les volumes d'eau totaux reçus pour des surfaces données (impluviums) au cours d'une pluie. Ceci afin de prévoir, en fonction de coefficients de ruissellement connus ou estimés, les volumes écoulés à l'exutoire de bassins-versants (MICHEL, 1988).

Dans de nombreux cas, il est nécessaire de prendre en considération l'intensité de la pluie qui représente la quantité d'eau tombée pendant une durée donnée (ECKERN, 1954 ; FREE, 1960).

Cette notion d'intensité, apparemment assez simple, est pourtant imprécise, essentiellement à cause du fait que la durée choisie pour en faire le calcul, peut en faire varier complètement la signification : plus elle est longue, moins l'information apportée est précise. Et le pas de temps utilisé étant souvent celui du quart d'heure, voire plus, l'incertitude sur les intensités instantanées est très élevée.

% du volume total

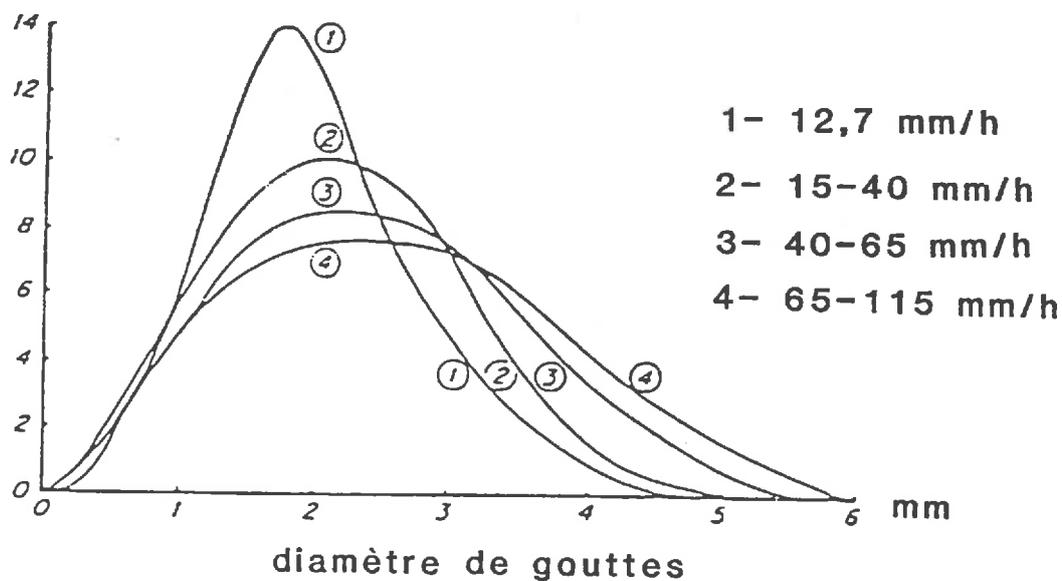


Figure 36: Distribution des tailles de gouttes pour des pluies naturelles de différentes intensités (d'après Hudson, 1971).

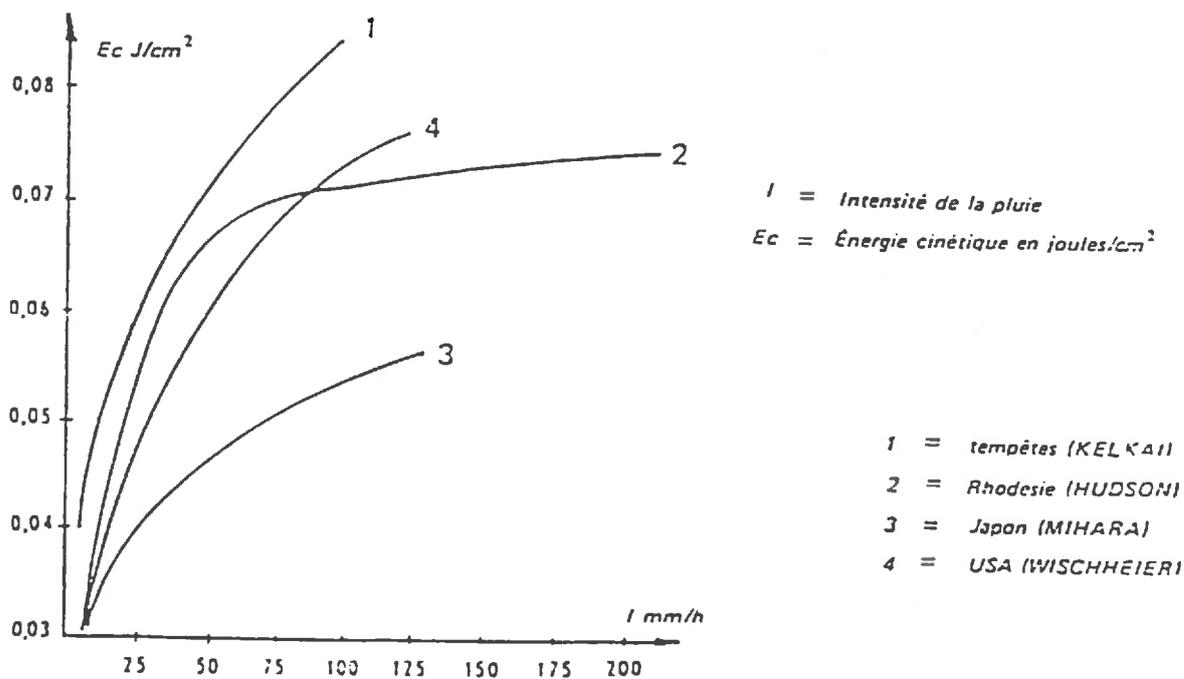


Figure 37: Relation intensité-énergie cinétique (pour 25 mm de pluie) suivant les climats et les auteurs (d'après Hudson, 1971).

Or, on a vu dans la première partie, que les processus déterminant l'évolution structurale pouvaient intervenir au cours de périodes très courtes, de l'ordre de la minute. Il y a donc un décalage entre l'information apportée issue des données des pluviographes classiques, et celle qui permettrait d'expliquer le phénomène. Il semble préférable de préciser le pas de temps pour lequel le calcul a été effectué, et de parler d'intensité moyenne sur un intervalle de temps donné (MICHEL, 1988).

A ces 2 caractéristiques essentielles des épisodes pluvieux, il faut ajouter le calcul de l'énergie cinétique, ou d'autres paramètres caractérisant l'agressivité des pluies (érosivité) (WISCHMEIER & SMITH, 1958 ; WISCHMEIER, 1959 ; FREE, 1960).

Ces paramètres sont liés à la masse et à la vitesse de chute des gouttes, dans la mesure où il existe des relations, d'une part entre la distribution de la taille des gouttes et l'intensité des pluies, et d'autre part, entre l'intensité des pluies et leur énergie cinétique (fig.36 et 37). Nous sommes donc amenés à nous intéresser aux caractéristiques individuelles des gouttes.

## 2) CARACTERISTIQUES ELEMENTAIRES DES GOUTTES

Deux paramètres suffisent à caractériser chaque goutte qui arrive au sol : ce sont sa **masse** (ou son volume) et sa **vitesse d'impact**.

Le second est d'ailleurs fonction du premier, en l'absence d'une perturbation par le vent ou d'une interception par un couvert végétal. Les gouttes sont en effet soumises aux seules forces de gravité et de frottement dans l'air.

On peut donc tracer la relation entre le diamètre des gouttes et leur vitesse limite qui est toujours théoriquement atteinte pour des pluies naturelles (LAWS, 1941 ; GUNN & KINZER, 1949 ; BEALS et al., 1983) (Tab.7).

Ces deux paramètres permettent de calculer l'énergie cinétique (KE) ou la quantité de mouvement (MV) des gouttes arrivant à la surface du sol (PALMER, 1965).

0 (mm)	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00
v limite (m/s)	3,06	4,03	5,42	6,49	7,42	8,06	8,52	8,83	9,01	9,09	9,15	9,18

Tableau 7: Vitesse limite des gouttes en fonction de leur diamètre (d'après GUNN & KINZER, 1949).

o NEARING et BRADFORD (1987) ont étudié expérimentalement les relations entre les caractéristiques des gouttes et leur force d'impact, en mesurant cette dernière à l'aide de capteurs. Ils montrent que la force d'impact des gouttes  $F$  est une fonction de  $(KE/D^2)$ , c'est-à-dire d'une expression où le diamètre est à la puissance 1 et la vitesse au carré. Or on utilise plus couramment l'énergie cinétique ou la quantité de mouvement, expressions dans lesquelles le diamètre est au cube et la vitesse, respectivement au carré et à la puissance 1.

Cependant, avant que ces relations n'aient été établies, l'utilisation de l'énergie cinétique comme paramètre de l'agressivité des pluies avait déjà été remise en question par différents auteurs (ROSE, 1960 ; STYCZEN et HOGH-SCHMITT, 1987), et en particulier dans le but d'obtenir des valeurs d'agressivité des pluies en présence d'un couvert végétal (MORGAN, 1985 ; BRANDT, 1988), cas dans lequel les gouttes ne sont plus à leur vitesse limite.

Mais contrairement à l'approche expérimentale de NEARING et BRADFORD, ces différents auteurs se sont appuyés pour valider les différents indices choisis, sur des mesures de déplacement de particules, qui sont souvent contingentes du protocole utilisé. Il paraît peu probable que la généralisation de tels indices soit possible.

Les résultats obtenus dans la première partie de notre travail, permettent de discuter certains aspects de ce problème : en effet, les mécanismes élémentaires mis en évidence peuvent se regrouper en 2 catégories : l'éclatement et la microfissuration sont essentiellement liés au volume d'eau mis en contact avec l'agrégat, et à la vitesse d'apport de cette eau. Les paramètres déterminants doivent donc être la masse des gouttes et l'intensité de la pluie, alors que l'usure mécanique dépend plus fortement des caractéristiques énergétiques des gouttes, c'est-à-dire d'un paramètre combinant masse et vitesse de chute. Celui établi par NEARING et BRADFORD paraît être le plus rigoureux, car fondé sur des mesures directes des forces d'impact.

La prise en compte de plusieurs mécanismes, dont le déterminisme dépend de paramètres d'agressivité des gouttes différents, permet de comprendre la variabilité des indices établis empiriquement avec des protocoles variés.

Cela revient également à dire, qu'il n'existe pas de paramètre d'agressivité des pluies unique et universel. Il paraît alors nécessaire d'en définir un pour chacun des mécanismes invoqués. Cependant, comme il s'agit dans tous les cas d'une combinaison de la dimension et de la vitesse des gouttes, on peut penser qu'il est possible d'établir un paramètre unique adapté aux différentes situations, en pondérant les paramètres élémentaires selon la fréquence probable de chaque processus.

D'autre part, l'agressivité d'un épisode pluvieux dépend non seulement des caractéristiques élémentaires des gouttes dont nous venons de discuter et de leur cumul, mais aussi des caractéristiques globales de cet épisode pluvieux, telles que nous les avons définies au paragraphe 1. C'est donc la **combinaison de ces deux types de caractéristiques** qui ne sont pas indépendantes les unes des autres (fig.36, 37, 38), qui doit permettre de définir un ou plusieurs indices d'agressivité vis-à-vis de l'évolution structurale superficielle.

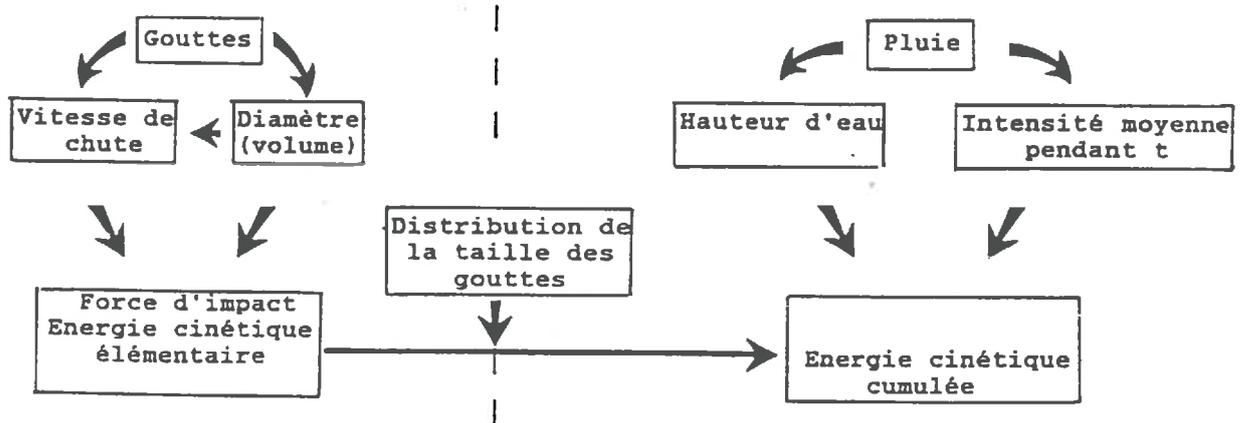


Figure 38: Relation entre les caractéristiques élémentaires des gouttes et les caractéristiques globales des pluies.

L'indice de WISCHMEIER  $R = E.I_{30}$ , qui est le produit de l'énergie cinétique par l'intensité maximale de la pluie durant 30 mn, est bien établi selon cette démarche.

Cependant deux problèmes se posent : celui du calcul de KE et celui du pas de temps choisi pour calculer l'intensité maximale.

Les indices KEx utilisés par BOIFFIN (1984), qui prennent en compte l'énergie cinétique cumulée au-dessus d'un seuil donné, relèvent également de cette démarche, compte tenu de l'existence de relations entre énergie cinétique et dimension des gouttes, mais là encore se pose le problème de la détermination du seuil d'intensité x.

Ces différents problèmes seront rediscutés dans un chapitre ultérieur à partir de quelques résultats expérimentaux sur l'action des pluies.

### **3) OBJECTIFS DE L'ETUDE DE L'ACTION DES GOUTTES SUR LES AGREGATS**

L'objectif de cette expérimentation est de placer des agrégats de sol, identiques à ceux utilisés dans la première partie, dans des conditions d'apport d'eau analogues à celles des pluies, afin d'en étudier le comportement et de le confronter à celui analysé précédemment.

Pour cela, nous avons choisi de travailler sur les mêmes quantités de petits agrégats calibrés entre 3 et 4 millimètres, et de les soumettre à l'impact de gouttes, dont les caractéristiques et les conditions d'application sont connues et maîtrisées.

Différents auteurs ont travaillé sur des agrégats individualisés, ou des petits échantillons remaniés soumis à des pluies. Pour cela, ils ont mis au point des goutteurs plus ou moins sophistiqués permettant de produire des gouttes de différents calibres, tombant de différentes hauteurs à des débits variables (MC INTYRE, 1958 ; AL DURRAH & BRADFORD, 1982a et b ; FARRES, 1982 ; FARRES & COUSEN, 1985 ; WUSTAMIDIN & DOUGLAS, 1985 ; GHADIRI & PAYNE, 1986).

Nous nous sommes inspirés des dispositifs utilisés par ces auteurs, mais nous n'avons pas cherché à utiliser un goutteur dans le but de tester les matériaux. Les différents objectifs de nos expérimentations sont les suivants :

1 : Vérifier l'existence sous pluie des mécanismes mis en évidence lors des manipulations précédentes, ceci en particulier à l'aide des comparaisons des distributions granulométriques ; et vérifier s'il y a analogie de l'influence des différents paramètres intrinsèques. C'est l'objet du chapitre 1.

2 : Etudier l'influence des paramètres externes (paramètres pluviométriques) sur des mécanismes afin de caractériser l'agressivité des pluies (chapitre 2).

3 : Approcher l'aspect dynamique de la désagrégation sous "pluie", et examiner l'évolution structurale de massifs d'agrégats (chapitre 3).

4 : Etudier les déplacements associés (rejaillissement) en terme de relations masse/distance, masse/taille de particules (chapitre 4).

**CHAPITRE 1 :**  
**LES DIFFERENTS MECANISMES DE DESAGREGATION LIES A L'ACTION  
DES GOUTTES DE PLUIE**

**1) CONDITIONS EXPERIMENTALES**

Pour répondre à ces objectifs, nous nous sommes inspirés des dispositifs utilisés pour produire des gouttes (AL DURRAH & BRADFORD, 1982 ; FARRES, 1988).

Cependant, cherchant à travailler non pas sur des agrégats individuels, mais sur des lots d'agrégats, nous avons été amenés à adapter le dispositif en multipliant le nombre de gouttes, pour arroser une surface élémentaire de 12 cm<sup>2</sup> sur laquelle on a réparti les agrégats en une simple couche, en les plaçant sur une grille de tamis de 1 mm d'ouverture lui-même placé dans un cristalliseur (figure 39). Ce tamis permet l'évacuation de l'eau libre en excès, et des petites particules produites, qui sont récupérées dans le cristalliseur au fond duquel se trouve une couche d'éthanol.

Après avoir déterminé le temps de pluie minimal affectant l'ensemble des agrégats, nous avons fixé la durée de cette première expérimentation à 1 mn. Ces conditions permettent une étude du comportement quasi-instantanée des agrégats sous pluie sans que le phénomène de rejaillissement ne vienne modifier l'échantillon (figure 40). Le diamètre des gouttes est de 4,5 mm et la hauteur de chute est de 1 m. Ces valeurs correspondent à un apport d'eau divisé, avec une certaine énergie cinétique ; elles permettent une réhumectation de l'ensemble des agrégats par une modalité proche de celle d'une pluie naturelle, mais dont l'intensité serait encore élevée (environ 100 mm/h).

Après la pluie, les particules se trouvant dans le cristalliseur et celles restant dans le tamis sont immergées sous alcool sur un tamis de 100 µm et triées en six classes, comme pour les expériences précédentes.

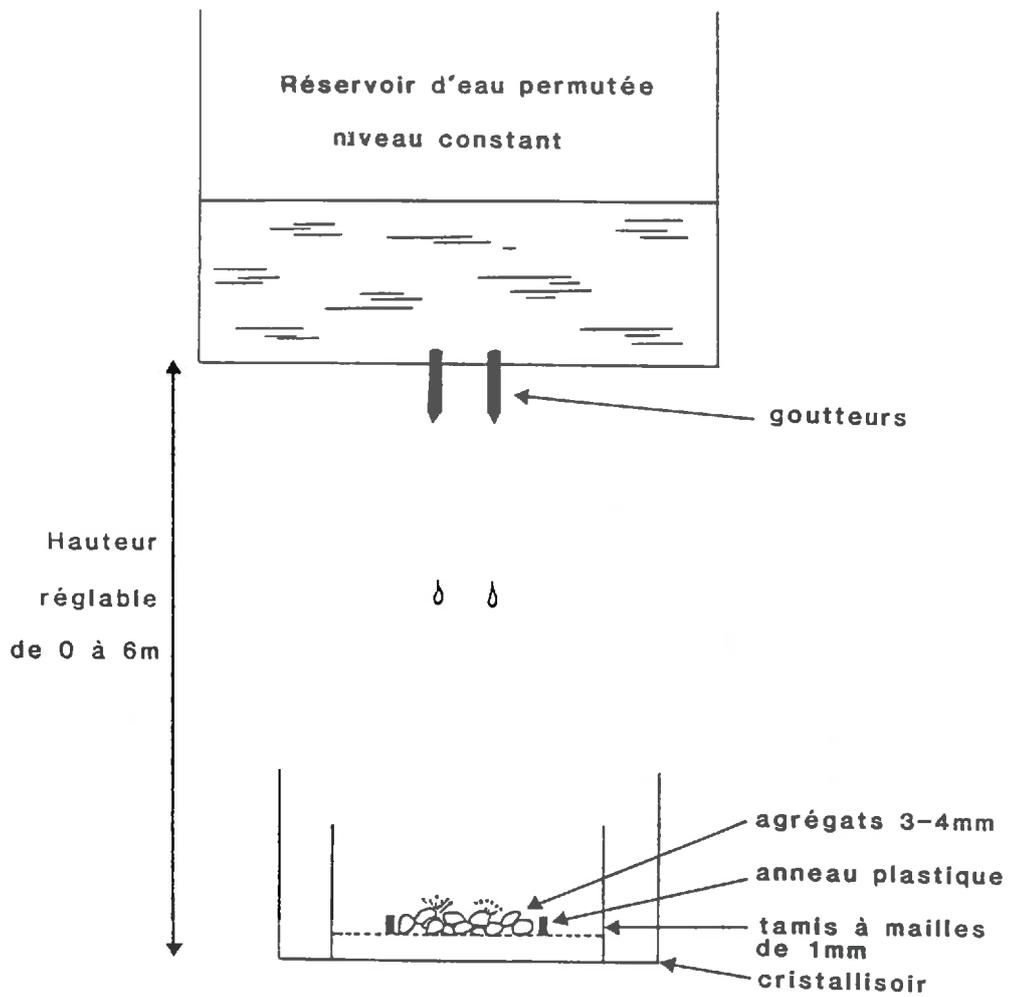


Figure 39: Schéma du dispositif utilisé pour étudier l'action des gouttes de pluie sur les agrégats.

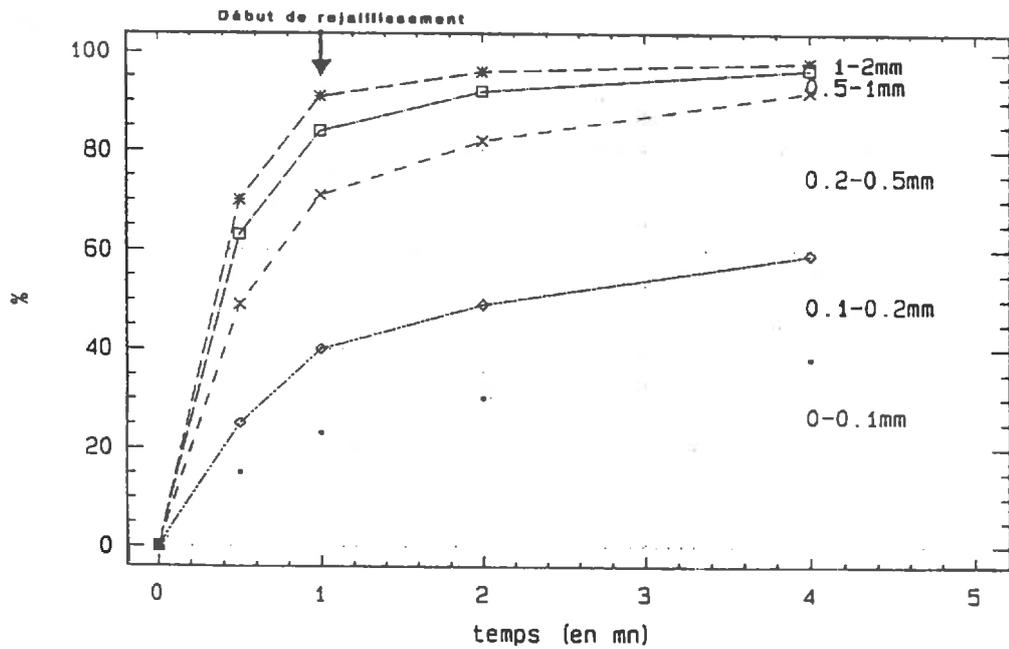


Figure 40: Influence de la durée de la pluie (gouttes de 4,5 mm de diamètre tombant de 1 m) sur la D.T.P.R. (Palaiseau).

## 2) RESULTATS

La manipulation a été réalisée sur trois matériaux, MONTLUEL, PALAISEAU et BOIGNEVILLE, et pour deux états hydriques initiaux : sec, et saturé sous vide par capillarité.

### A) L'action des gouttes de pluie sur des agrégats secs

#### a) Résultats

##### o Comparaison des différents modes de réhumectation

Nous pouvons à partir des mesures des D.T.P.R., comparer l'effet d'une pluie à celui des différents traitements réalisés dans la première partie (fig.41).

Le taux de particules  $< 2 \text{ mm}$  est voisin de celui résultant de la réhumectation par capillarité.

La D.T.P.R. est, pour les trois matériaux étudiés, intermédiaire entre celles obtenues précédemment dans les différentes conditions (immersion et réhumectation par capillarité) : la proportion des deux classes inférieures est plus faible que dans le cas de l'immersion (éclatement total), mais plus forte que dans le cas de la réhumectation par capillarité. D'autre part, les classes les plus grossières sont beaucoup moins représentées que dans le cas de l'usure mécanique pure.

En définitive, les proportions relatives des classes  $> 100 \mu\text{m}$  sont assez proches de celles obtenues lors de la réhumectation par capillarité, c'est essentiellement par les taux plus élevés de particules  $< 100 \mu\text{m}$  que les résultats en diffèrent.

##### o Influence des caractéristiques des matériaux :

Si l'on reprend les résultats obtenus sous pluies pour les trois matériaux, les différences entre les trois matériaux apparaissent très nettement : elles correspondent à une diminution progressive de la classe  $< 100 \mu\text{m}$  lorsque la teneur en argile augmente. La répartition des classes supérieures est assez proche pour Montluel et Palaiseau, centrée sur la fraction 200-500  $\mu\text{m}$ , alors que pour Boigneville il s'agit essentiellement de particules  $> 500 \mu\text{m}$  (fig.42).

On a donc un contraste très important entre matériaux avec 50 % de particules  $< 200 \mu\text{m}$  pour MONTLUEL contre moins de 20 % pour BOIGNEVILLE.

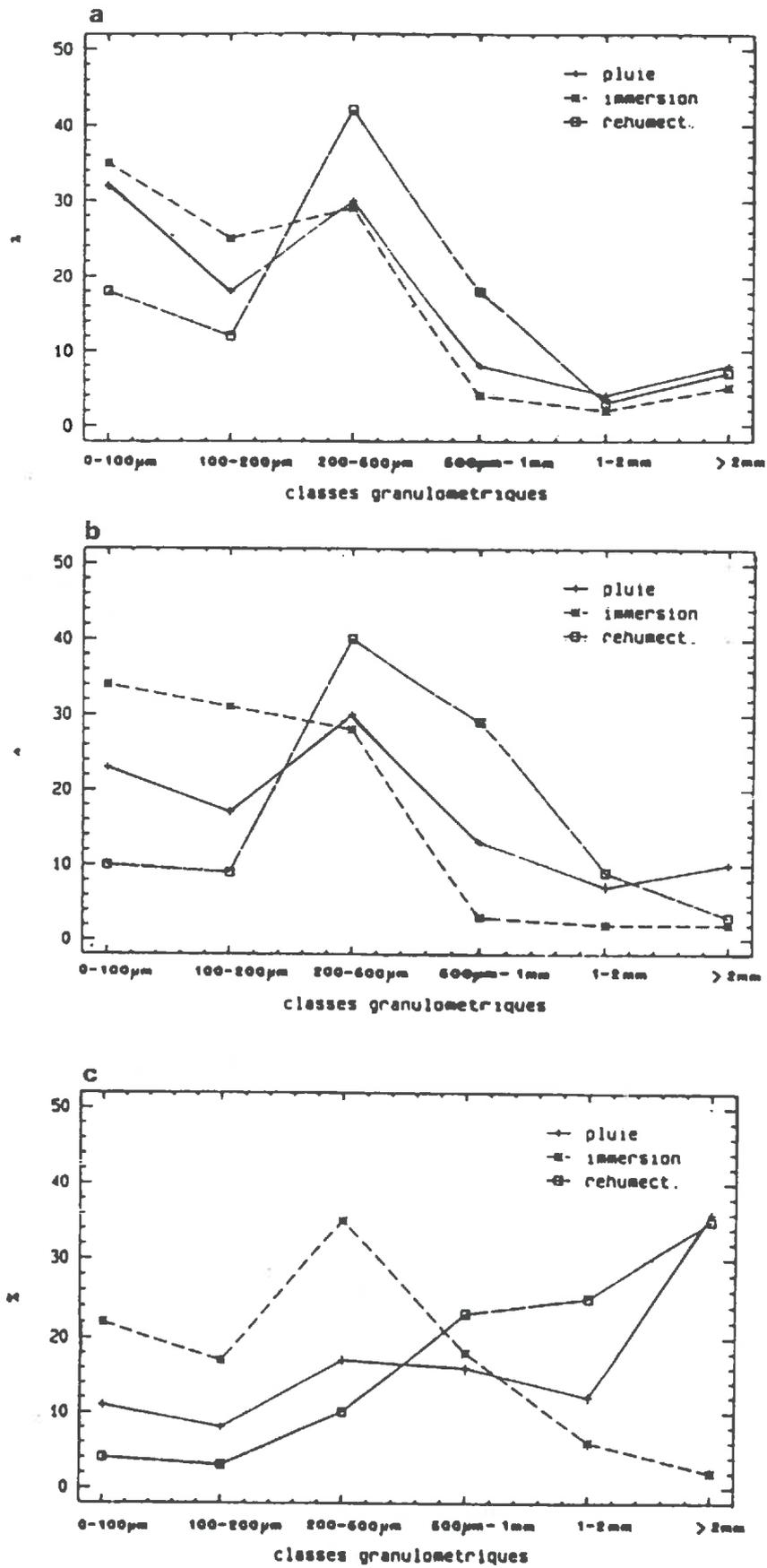


Figure 41: Comparaison des D.T.P.R. sous pluie avec celles obtenues après immersion ou réhumectation par capillarité (agrégats initialement secs). a : Montluel, b : Palaiseau, c : Boigneville.

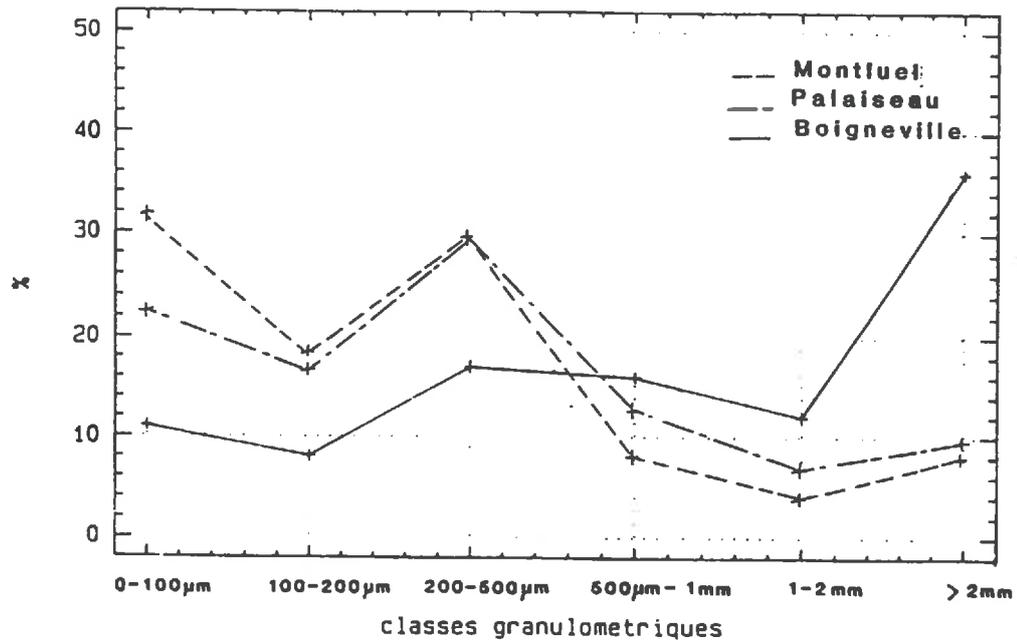


Figure 42: Influence de la nature des matériaux sur la D.T.P.R. sous pluie.

## b) Discussion

Ces résultats sont cohérents avec le fait que l'expérimentation effectuée implique une combinaison des différents mécanismes : l'apport d'eau est fragmenté, et la dimension des gouttes correspond à une action intermédiaire entre l'immersion brutale et la réhumectation progressive, avec en plus intervention d'une certaine énergie des gouttes.

On peut tenter d'interpréter plus précisément ces résultats :

On obtient en fait, dans cette expérimentation sous gouttes, des proportions relatives des classes intermédiaires proches de celles obtenues en réhumectation par capillarité, mais combinées à des taux de particules fines plus importants. Or, on a effectivement apporté une quantité d'eau suffisante pour resaturer les agrégats, et dans un intervalle de temps du même ordre de grandeur que celui nécessaire à la réhumectation par capillarité. Les différences entre les deux modes d'apport de l'eau se situent d'une part, au niveau de la possibilité de piégeage d'air par les gouttes (éclatement), et d'autre part, au niveau de l'énergie mécanique des gouttes.

Mais, les deux mécanismes, éclatement et usure mécanique, sont susceptibles d'être à l'origine du taux élevé de particules inférieures à 100 µm. Nous chercherons à faire la part de leurs rôles respectifs, dans les expérimentations des chapitres suivants.

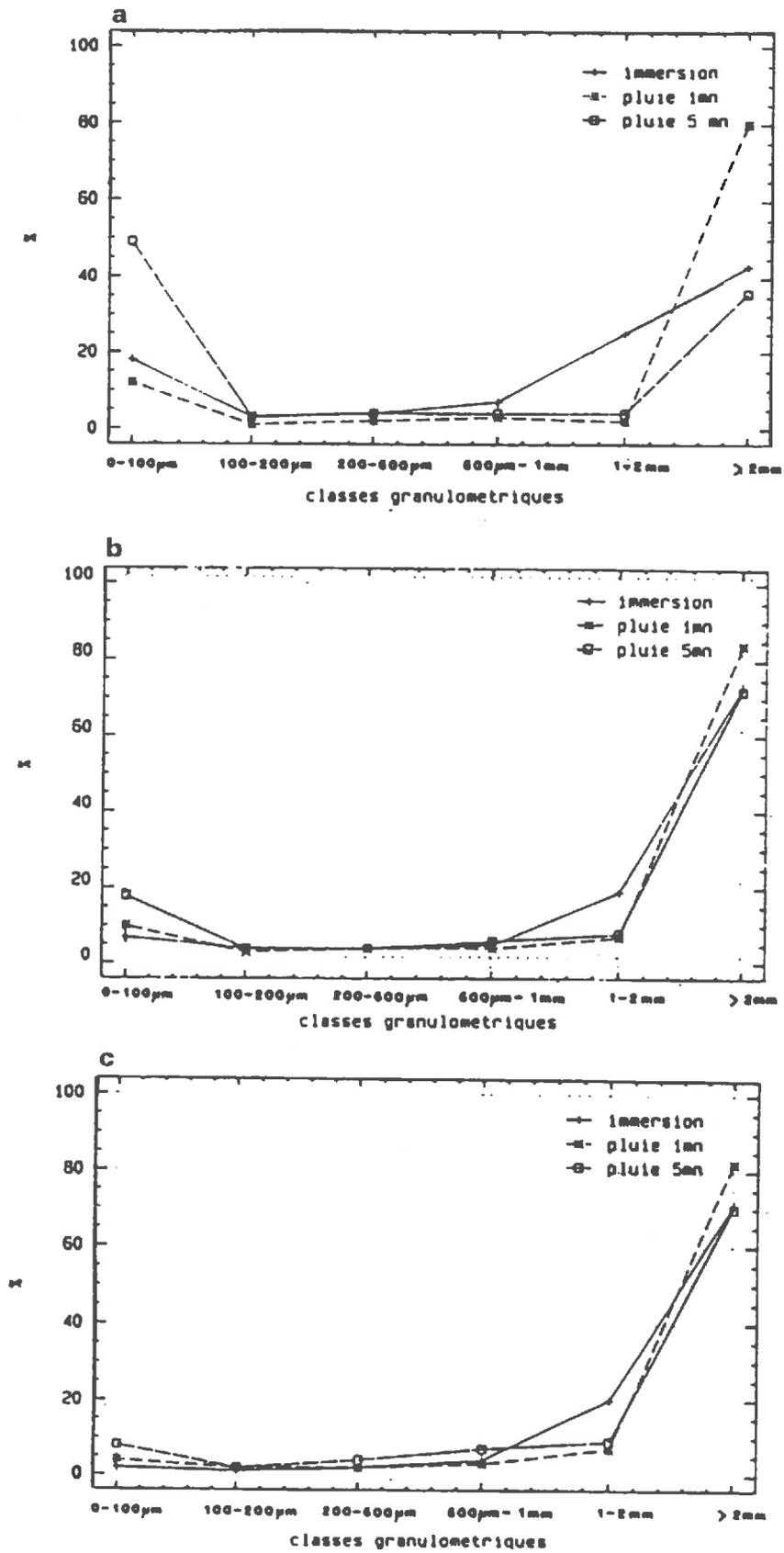


Figure 43: Comparaison des D.T.P.R. après des pluies de différentes durées et après immersion (agrégats initialement saturés). a : Montluel, b : Palaiseau, c : Boigneville.

On peut cependant dire, que ce résultat qui correspond à un premier stade de "passage à la pluie", apporte des éléments permettant un début de validation du schéma proposé à la fin de la première partie.

## **B) L'action des gouttes de pluie sur des agrégats initialement saturés**

### **a) Résultats**

Les résultats obtenus sous pluie avec ces conditions initiales sont qualitativement comparables à ceux résultant de l'immersion et de l'agitation d'agrégats saturés dans l'eau (fig.43), il y a en effet dans les deux cas, apport d'eau et d'énergie mécanique, sur des agrégats saturés.

L'effet de la pluie durant une minute, correspondant à l'application de près de 2 mm de hauteur d'eau, est donc très réduit par rapport à celui de la même pluie appliquée sur les agrégats secs : il reste plus de 80 % d'agrégats > 2 mm pour les trois matériaux. Ce taux diminue, lorsque l'on prolonge la pluie, au profit de la plus petite classe de particules.

### **b) Discussion**

Ce résultat permet de confirmer l'existence du processus d'usure mécanique des agrégats sous pluie, et d'en préciser la nature : il s'agit bien d'une sorte d'abrasion de la périphérie des agrégats sous l'action des impacts des gouttes, qui n'entraîne donc pas de rupture de l'agrégat lui-même, mais plutôt des micro-ruptures individualisant des particules de taille < 100  $\mu\text{m}$  situées à la surface de l'agrégat, ce qui donne une D.T.P.R. bimodale caractéristique, avec un mode correspondant aux agrégats initiaux, dont le calibre diminue progressivement au cours de la pluie, et un mode correspondant à ces particules d'abrasion < à 100  $\mu\text{m}$ .

Il y a une grosse différence, par rapport au cas des agrégats initialement secs, en ce qui concerne la quantité de particules produites et la cinétique de la désagrégation : alors que la quasi-totalité de l'échantillon se trouve fragmentée en particules inférieures à 2 mm au bout d'une minute de pluie lorsque les agrégats sont initialement secs, l'évolution est ici beaucoup plus lente et progressive. En revanche, comme les particules produites sont de petite taille, et que le processus est cumulatif, on peut imaginer qu'en cas de pluie prolongée, on arrive à une désagrégation complète en ne produisant que des particules inférieures à 100  $\mu\text{m}$ .

D'autre part, ces résultats montrent que les différences entre matériaux ne concernent que les quantités de particules produites, il s'agit toujours du même type de

particules. La cinétique de ce processus est par contre fonction de la nature des matériaux (fig.44).

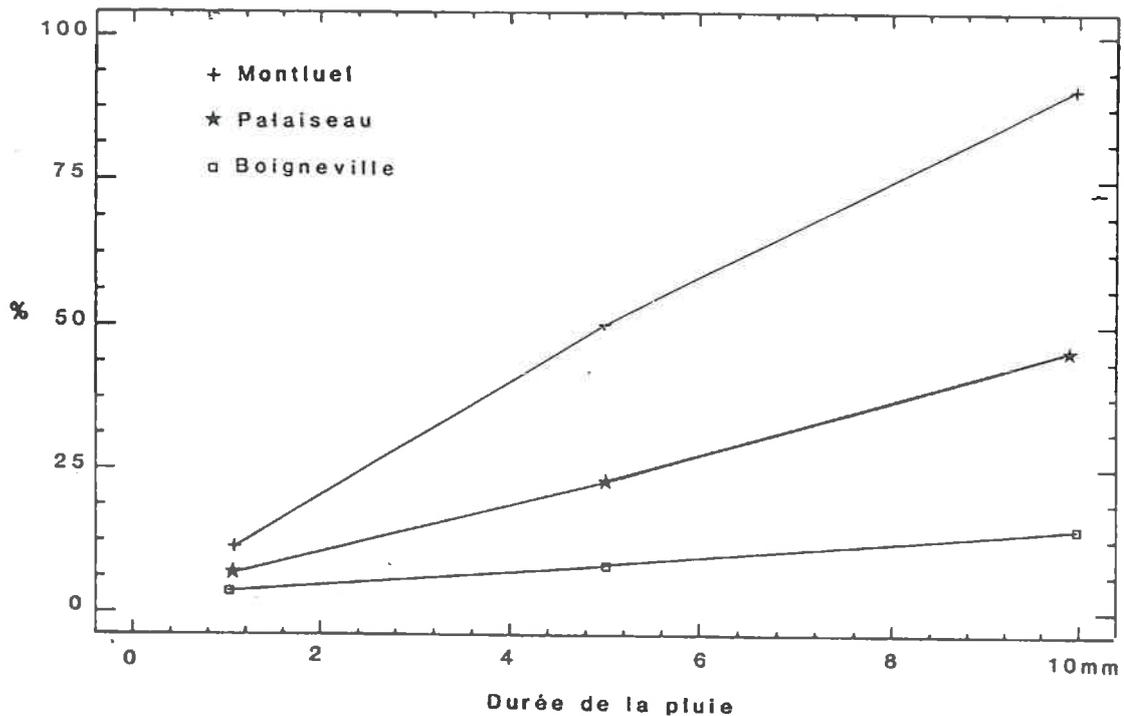


Figure 44: Evolution des taux de particules < 100 µm en fonction de la durée des pluies.

La pente des courbes correspondant aux différents matériaux, pourrait être un bon indicateur de la sensibilité à la désagrégation mécanique. Ces résultats sont à rapprocher de ceux obtenus lors d'une immersion d'agrégats saturés (fig. 16).

### 3) CONCLUSION

Ces premiers résultats sur l'action des gouttes constituent donc une bonne vérification de l'existence sous pluie des mécanismes analysés précédemment.

L'effet des quelques paramètres testés (nature des matériaux et état hydrique initial), semble également correspondre à celui mis en évidence (fig.41 et 43).

Il reste à compléter ces résultats par des expériences complémentaires, en particulier pour discuter de l'importance relative des différents mécanismes élémentaires sous les pluies, ainsi qu'à préciser certains aspects, comme celui de l'influence des caractéristiques de la pluie appliquée, celui de la dynamique de la désagrégation, ou celui des déplacements de particules (BUBENZER & JONES, 1971 ; COUSEN & FARRIS, 1984). C'est l'objectif des chapitres suivants.

## CHAPITRE 2 :

### **INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES DES PLUIES SUR LA DESAGREGATION**

Nous avons cherché, dans cette série d'expérimentations, à faire varier différentes caractéristiques de la pluie pour en tester l'influence sur la désagrégation. En effet, les résultats de la première partie permettent de formuler des hypothèses sur les facteurs influençant la désagrégation (flux d'apport d'eau, énergie mécanique ...)

Nous avons utilisé le dispositif décrit précédemment ("goutteur"), et provoqué selon les cas des variations : du diamètre, de la hauteur de chute ou du débit d'émission des gouttes.

#### **1) CARACTERISTIQUES DES PLUIES UTILISEES**

On a fait varier les différentes caractéristiques des gouttes et des pluies. Le tableau 8 regroupe les données relatives aux différents traitements appliqués, ainsi que les valeurs calculées des divers indices d'agressivité correspondants. La hauteur d'eau apportée est d'environ 1,7 mm, et les intensités sont comprises entre 25 et 100 mm/h. Les valeurs d'énergie cinétique présentées dans le tableau 8 doivent être rapportées à la surface exposée aux pluies (12 cm<sup>2</sup>), pour obtenir les données surfaciques.

Dans un premier temps, on a étudié l'influence des caractéristiques nominales des gouttes de pluie, hauteur de chute et diamètre, et de leur fréquence, puis on a cherché à faire la synthèse des résultats obtenus dans le but de caractériser l'effet des pluies sur les différents mécanismes de désagrégation.

#### **2) INFLUENCE DE LA HAUTEUR DE CHUTE DES GOUTTES**

On a appliqué des pluies dont la hauteur de chute des gouttes était comprise entre 0 et 6 m, ce qui correspond à des variations de vitesse terminale et donc d'agressivité très importante, en terme d'énergie cinétique (tab.8).

hauteur m	diamètre mm	vitesse ms <sup>-1</sup>	Ec x10 <sup>-3</sup> J	MV x10 <sup>-3</sup> kgms <sup>-1</sup>	durée mn	KEc=εl/2mv <sup>2</sup> x10 <sup>-3</sup> J	KMV x10 <sup>-3</sup> kgms <sup>-1</sup>
0.1	3.3	1	0.01	0.02	1	1	2
					5	5	10
	4.5	1	0.025	0.05	1	1	2
					5	5	10
1	3.3	4.25	0.18	0.085	1	18.06	8.5
					5	90.3	42.5
	4.5	4.5	0.51	0.225	1	20.25	9
					5	101.25	45
3	3.3	6.3	0.4	0.13	1	39.7	12.6
					5	198.5	63
	4.5	6.65	1.1	0.33	1	44.1	13.3
					5	220.5	66.5
6	3.3	7.70	0.6	0.15	1	59.3	15.4
					5	296.5	77
	4.5	8.5	1.8	0.42	1	72.2	17
					5	361.0	85

Tableau 8: Caractéristiques des différentes pluies utilisées avec le goutteur (à intensité constante).

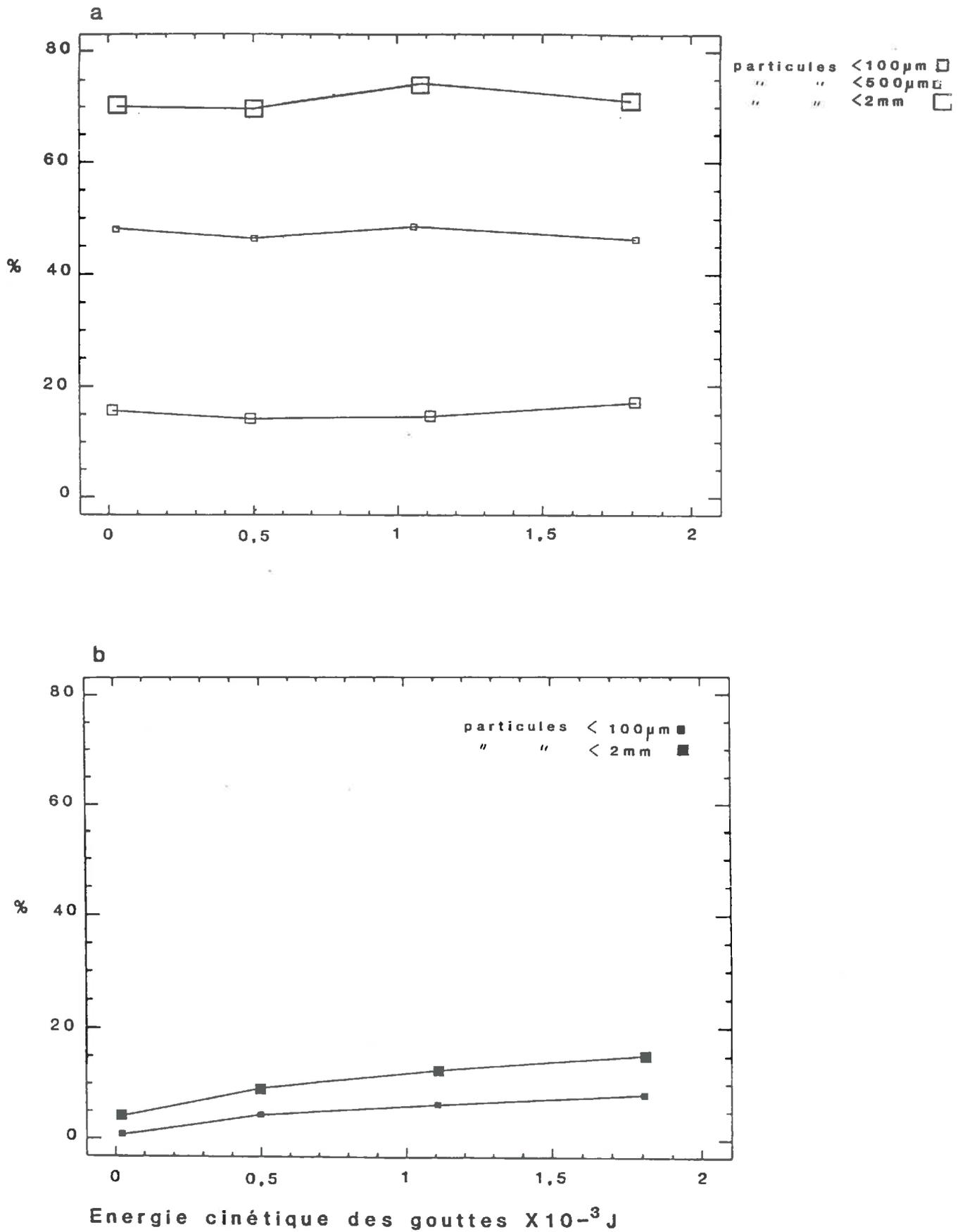


Figure 45: Influence de l'énergie cinétique des gouttes sur la désagrégation (Palaiseau). a : agrégats secs, b : agrégats saturés.

## a) Résultats

Les résultats sont représentés sur la figure 45. Ils montrent que l'influence de la hauteur de chute des gouttes est très différente pour les deux états initiaux :

o Pour des agrégats de 3-4 mm de Palaiseau initialement secs, les particules réduites après 1 mn de pluie, c'est-à-dire après réhumectation de tous les agrégats, sont quasiment les mêmes pour les quatre hauteurs de chute testées.

o Pour les mêmes agrégats préalablement saturés, au contraire, la désagrégation augmente progressivement avec l'énergie cinétique des gouttes ; mais elle reste cependant toujours beaucoup plus faible que dans le cas précédent.

## b) Discussion

Ce premier résultat apporte plusieurs informations :

1 – En ce qui concerne l'état initialement sec, on est bien uniquement en présence d'une combinaison des mécanismes de désagrégation totale et de microfissuration, avec une intervention négligeable de la désagrégation mécanique, au moins dans cette phase qui correspond à la première minute de pluie, puisque le résultat est le même quelle que soit l'énergie appliquée. On peut donc répondre à une des questions posées dans le chapitre précédent : la présence de particules  $< 100 \mu\text{m}$  en proportion supérieure à celle obtenue par réhumectation, est bien due, dans les conditions de l'expérimentation, à l'intervention partielle du mécanisme d'éclatement, et non pas à l'énergie cinétique des gouttes, car on trouve le même résultat pour une énergie cinétique nulle.

2 – Pour l'état initialement saturé, on obtient confirmation du rôle quasi-exclusif joué par l'énergie des gouttes : pour une force d'impact quasi-nulle, il n'y a aucune désagrégation. Celle-ci apparaît pour une hauteur de chute de 1 m et augmente progressivement.

L'étude de ce premier paramètre montre déjà le caractère relatif de la notion d'agressivité des pluies et son interaction avec les conditions locales au moment de la pluie.

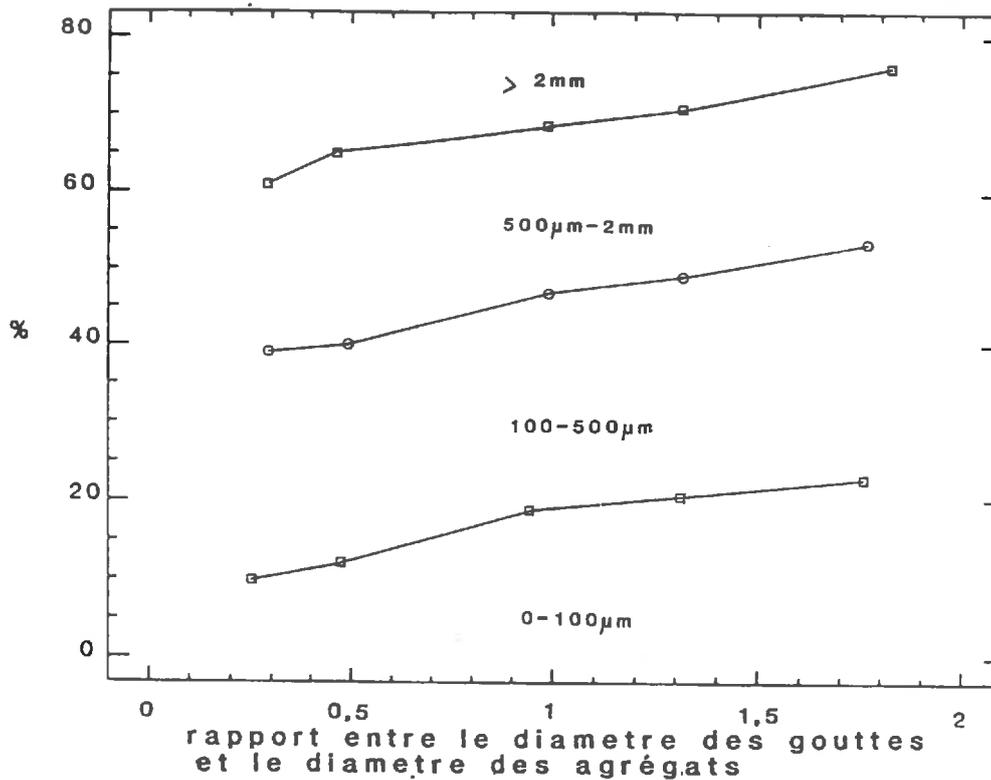


Figure 46: Influence du rapport entre le diamètre des gouttes et le diamètre des agrégats sur la D.T.P.R. (Palaiseau)

### 3) INFLUENCE DU RAPPORT ENTRE LA TAILLE DES GOUTTES ET LA TAILLE DES AGREGATS

On peut également modifier l'agressivité des gouttes de pluie en faisant varier leur taille. Mais on a vu dans les différents chapitres précédents que ce paramètre avait une influence non seulement sur l'agressivité "mécanique" des gouttes, mais aussi sur leur agressivité "potentielle" vis-à-vis du mécanisme d'éclatement. Sur ce dernier point, c'est plutôt le rapport entre la dimension des gouttes et celle des agrégats qui est important. En effet, le risque de piégeage d'air dans l'agrégat est lié à ce rapport, et c'est bien cela qui détermine l'intensité de l'éclatement.

On a donc pu élargir la gamme de variation de ce rapport, tout en n'ayant que deux tailles de gouttes (de diamètres respectifs : 3,3 mm et 4,5 mm), en utilisant des agrégats de calibres différents.

Les résultats présentés figure 46 montrent bien l'influence du rapport entre le diamètre des gouttes et celui des agrégats pour des agrégats initialement secs. Pour un même poids de terre et une même quantité d'eau apportée durant une minute, l'intensité de l'éclatement diminue lorsque ce rapport diminue.

La D.T.P.R. moyenne est du type de celle obtenue en réhumectation par capillarité. Si l'on prolongeait les courbes correspondant aux différentes fractions, on arriverait à une distribution du type éclatement total, pour un rapport des diamètres de l'ordre de 4, ce qui correspondrait, pour un orage où les gouttes peuvent atteindre 4 à 5 mm, à des agrégats d'environ 1 mm de diamètre. Or c'est fréquemment la dimension des fragments des zones les plus affinées des lits de semences.

Ainsi il est probable que les conditions d'un éclatement total se rencontrent sur le terrain, en particulier en contexte d'orage sur des semis bien affinés par la préparation ou par une microfissuration préalable.

Cet éclatement total serait alors couplé à une microfissuration par éclatement partiel qui affecterait les agrégats de plus-grosse taille (2 à 10 mm de diamètre).

Dans le domaine des rapports plus faibles ( $< 0,5$ ), il semble probable que l'on atteigne un palier : dans la mesure où la dimension de l'agrégat est nettement plus élevée que celle des gouttes, son influence sur le mécanisme de désagrégation devient faible. On se rapproche du domaine de la réhumectation par capillarité étudié précédemment, et à ce niveau c'est certainement l'intensité de la pluie qui joue un rôle déterminant, de manière analogue à la vitesse de réhumectation.

En définitive, il semble que l'influence de la variable taille de goutte s'exerce, dans le cas d'agrégats secs, en modifiant l'intensité de l'éclatement. La taille des gouttes est en très forte interaction avec l'intensité instantanée; en effet le facteur déterminant, est probablement le volume d'eau apportée par unité de temps et de surface (flux), aux échelles qui sont celles du mécanisme, c'est-à-dire respectivement de la dizaine de seconde et du  $\text{cm}^2$  (agrégats).

Nous allons donc maintenant examiner l'influence propre de l'intensité, avant de tenter de faire la synthèse de l'influence des différentes caractéristiques des pluies.

#### **4) INFLUENCE DE LA FREQUENCE DES GOUTTES**

Il existe plusieurs manières de faire varier l'intensité de la pluie : ce peut être la taille des gouttes, leur densité à la surface du sol, leur fréquence qui change. Et compte tenu des résultats que nous avons déjà obtenus, on peut imaginer que les conséquences sur la désagrégation n'en soient pas forcément les mêmes.

L'influence de la taille des gouttes vient d'être étudiée pour une intensité de pluie constante. Il est clair que si une modification d'intensité s'ajoute à la modification de taille des gouttes, ce qui est normalement le cas des plus naturelles, les effets seront cumulés.

En ce qui concerne les effets liés à la fréquence des gouttes et à leur densité surfacique pour une même taille de gouttes, on peut penser qu'ils sont relativement analogues, dans la mesure où cela revient dans les deux cas à diminuer le temps de retour d'une goutte en un endroit donné (la distinction entre ces deux paramètres est d'ailleurs probablement artificielle et liée au dispositif de simulation de pluie qui permet effectivement de les contrôler tous les deux. Sous une pluie naturelle, ces deux aspects sont confondus, étant donné la distribution aléatoire des gouttes).

On a donc testé avec notre dispositif, l'influence de l'intensité de la pluie en modifiant la fréquence des gouttes.

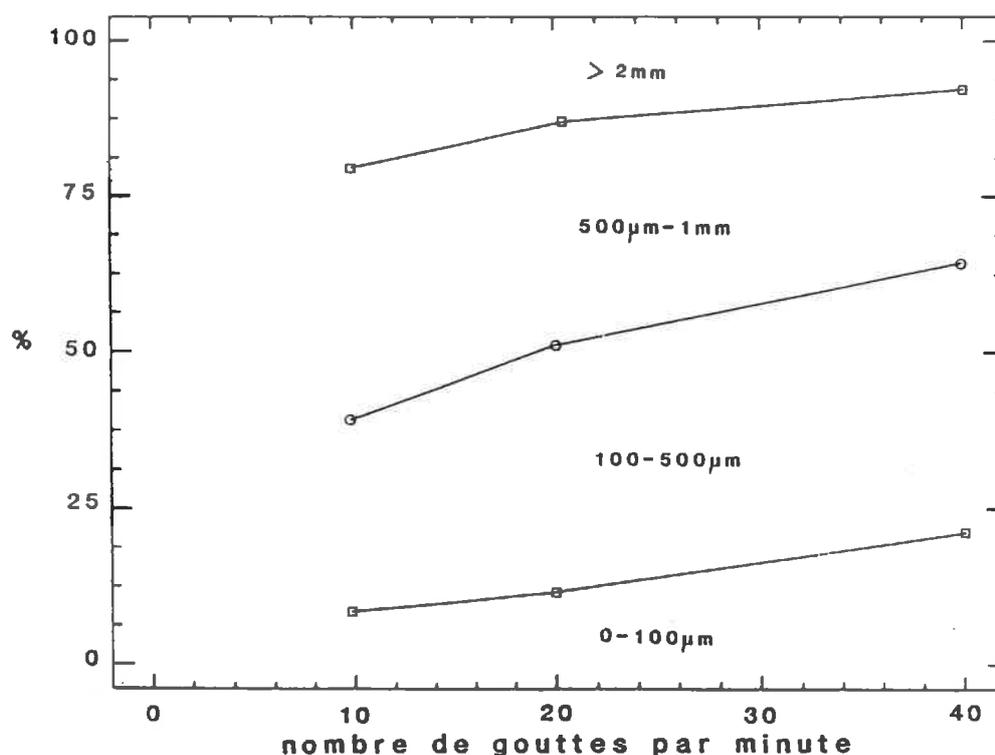


Figure 47: Influence de la fréquence des gouttes (intensité) sur la D.T.P.R. (Palaiseau).

#### o Résultats

La figure 47 montre les résultats obtenus pour trois intensités différentes sur des agrégats de Palaiseau de 3-4 mm secs, et pour des gouttes de 4,5 mm de diamètre.

Cela revient en fait à appliquer la même pluie, c'est-à-dire la même énergie et la même quantité d'eau, en des temps croissants.

Il semble y avoir une influence de ce paramètre, dans le sens d'une augmentation de la désagrégation avec l'augmentation de l'intensité. C'est essentiellement le taux de particules  $< 100 \mu\text{m}$  qui s'accroît. L'éclatement est lié ici à l'intensité de la pluie.

#### o Discussion

Les agrégats ont reçu dans les trois cas la même quantité d'eau, la même énergie et avec des gouttes identiques, seul l'intervalle de temps entre deux gouttes a varié.

On peut invoquer un effet de relaxation lié probablement à la cinétique d'évacuation de l'eau entre deux gouttes : l'action d'une goutte dépend de l'état hydrique de l'agrégat au moment où elle arrive dessus, et il est logique que l'effet soit différent suivant que le volume d'eau apporté en surface par les gouttes précédentes a ou non été évacué au moment de l'impact.

A ce titre, il est probable que de nombreux paramètres jouant sur la conductivité hydraulique de la surface (gradient de potentiel, continuité des phases solides et liquides) agissent en interaction avec l'intensité pluviale pour moduler l'effet de l'impact des gouttes (FRANCIS & CRUSE, 1983). Nous reviendrons sur quelques uns de ces aspects dans l'étude des déplacements de particules (rejaillissement).

### **5) SYNTHÈSE SUR L'INFLUENCE DES CARACTÉRISTIQUES DES PLUIES : NOTION D'AGRESSIVITÉ DES PLUIES**

Après avoir défini, les caractéristiques de l'agressivité des pluies et étudié indépendamment l'influence de quelques unes de celles-ci sur la désagrégation, on peut tenter de faire une synthèse des résultats obtenus afin de discuter de l'influence des caractéristiques des épisodes pluvieux sur l'évolution structurale superficielle, et de tenter de définir la notion d'agressivité des pluies.

#### **a) Les deux composantes de l'action des pluies**

Les résultats obtenus dans ce chapitre confirment largement les hypothèses émises dans la première partie de ce mémoire, à savoir l'existence de deux composantes de nature très différente, dans l'action de l'eau sur les éléments structuraux de la surface du sol (fig.48) :

1 – D'une part l'eau peut intervenir par le fait de sa seule présence au contact d'agrégats, indépendamment de toute énergie mécanique, à cause de son énergie libre.

Ce sont les phénomènes liés au piégeage d'air au sein des agrégats : éclatement total et microfissuration par éclatement partiel, pour lesquels le facteur principal d'agressivité est la vitesse d'apport de l'eau dans la phase initiale d'humectation.

Le paramètre d'agressivité correspondant peut être exprimé à partir du calibre des plus grosses gouttes et de l'intensité de la pluie au cours des premières minutes. Mais sa valeur est très relative, puisque l'intervention de ces phénomènes est liée à l'état hydrique, à la distribution dimensionnelle des agrégats de surface et à la texture.

Le phénomène de dispersion physico-chimique peut également intervenir en présence d'un excès d'eau libre au contact des agrégats, mais essentiellement pour des matériaux, dont une forte proportion de la capacité d'échange est occupée par le sodium, ce qui n'est pas le cas pour les sols limoneux que nous avons étudiés. Pour ces derniers la dispersion est plus faible et elle n'intervient que dans le cas d'une agitation en présence d'un excès d'eau.

2 – D'autre part, l'eau intervient dans les phénomènes de désagrégation par l'intermédiaire de l'énergie mécanique associée à son apport. C'est la désagrégation mécanique, qui se produit soit seule si les agrégats sont initialement saturés, soit en complément des autres mécanismes.

Dans ce cas, l'agressivité d'une pluie est fortement liée à son énergie cinétique totale, c'est-à-dire à la somme des énergies élémentaires des gouttes qui la composent, mais elle dépend aussi éventuellement des valeurs de ces énergies élémentaires, à cause d'un effet de seuil. La valeur d'énergie cinétique correspondant à ce seuil, est fonction de la résistance mécanique des agrégats à l'état humide, et doit être reliée à leur teneur en argile. La mise en évidence de tels seuils nécessiterait des expérimentations complémentaires.

3 – Enfin les gouttes interviennent dans le phénomène de déplacement des particules, soit simultanément à leur mobilisation (désagrégation mécanique), soit ultérieurement (éclatement et microfissuration) (voir chapitre 4). Et les paramètres d'agressivité sont les mêmes que pour la désagrégation mécanique.

Le schéma suivant illustre ces différentes composantes (fig.48).

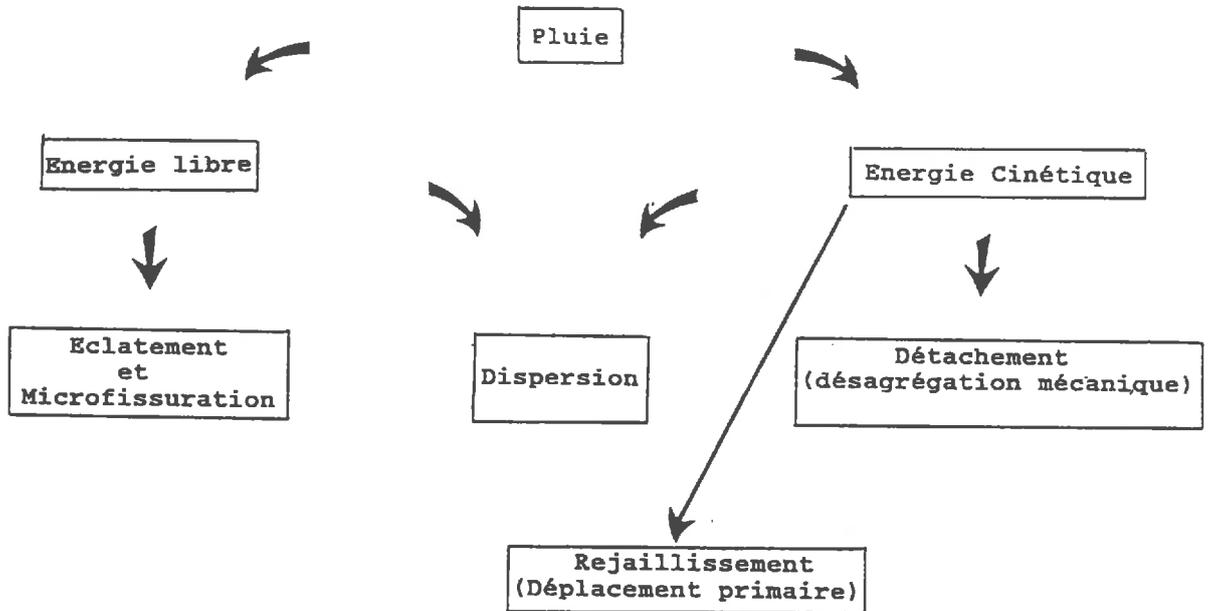


Figure 48: Les différentes composantes de l'action des pluies sur l'évolution structurale.

### b) Les différents paramètres d'agressivité pour les deux modes d'action des pluies

Si l'on regroupe les différents résultats obtenus au début de ce chapitre, on peut tenter d'établir des relations entre l'intensité de la désagrégation et les divers paramètres d'agressivité évoqués ci-dessus (fig. 49).

Les relations entre la désagrégation et les différents paramètres d'agressivité montrent qu'il y a bien deux types d'interaction en fonction de l'état initial. Quel que soit le paramètre retenu, la désagrégation augmente avec l'agressivité pour les agrégats saturés, (fig.49) alors qu'elle reste voisine d'une même valeur pour les agrégats initialement secs (fig.45a).

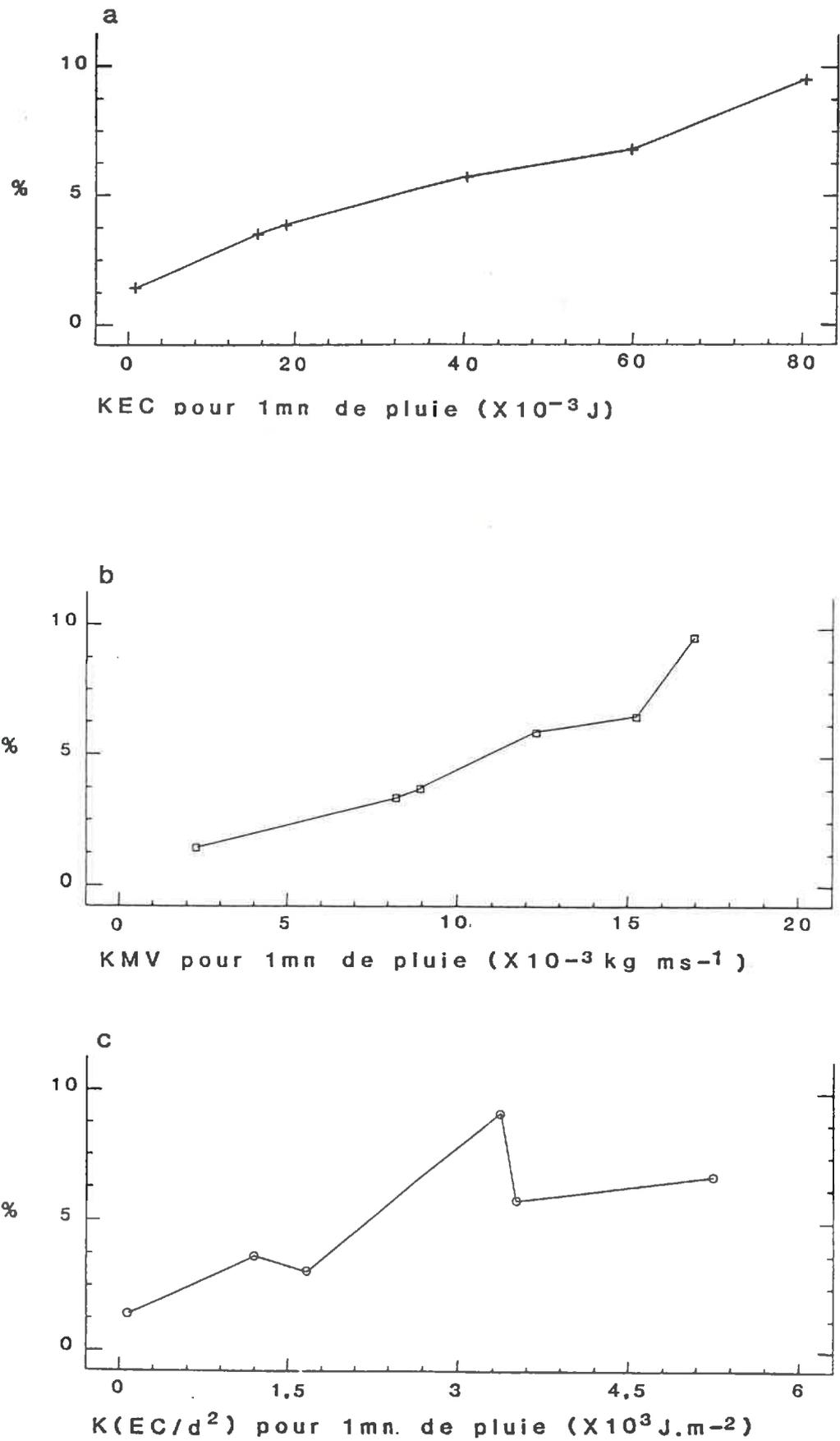


Figure 49: Relation entre le taux de particules  $< 100 \mu\text{m}$  (1 mn de pluie) et différents indices d'agressivité de la pluie (agrégats de palaiseau saturés) a : KEC, b : KMV, c :  $K(EC/d^2)$ .

Parmi les trois critères représentés, il semble que la meilleure relation soit obtenue avec KEC, mais les différences ne sont pas très marquées (cas où le mécanisme est la désagrégation mécanique).

Lorsque les agrégats sont secs au départ, c'est plus l'intensité initiale, ou le calibre des gouttes qui serait un critère d'agressivité de la pluie (fig.46 et 47).

Il s'agit donc d'arriver à une définition de l'agressivité des pluies vis-à-vis de la dégradation structurale superficielle.

### **c) Réflexion sur la notion d'agressivité des pluies**

Les résultats des paragraphes précédents nous conduisent à discuter de la notion d'agressivité des pluies vis-à-vis des phénomènes de dégradation structurale superficielle.

o Le point le plus important, est qu'il n'existe pas un critère d'agressivité unique valable dans tous les cas de figures. Ce point est clairement démontré par la mise en évidence du déterminisme de chacun des mécanismes de désagrégation.

D'autre part, ces résultats permettent d'expliquer les divergences entre auteurs, quant à la définition des critères d'érosivité : si les conditions dans lesquelles ont été établis ces critères sont différentes, en particulier du point de vue de l'état initial des matériaux, il est normal que les critères eux-mêmes soient aussi différents.

o L'agressivité "effective" d'une pluie, résulte donc de l'interaction entre certaines caractéristiques de la pluie ou des gouttes qui la constituent, l'état initial des agrégats, et certaines caractéristiques de constitution du matériau.

Il s'agit donc de définir les conditions dans lesquelles ces caractéristiques sont déterminantes, afin d'établir une "grille" des critères d'agressivité à appliquer en fonction des situations rencontrées. En outre, il faut tenir compte du caractère dynamique des interactions entre la pluie et la surface du sol.

Au cours d'un épisode pluvieux, les conditions initiales, l'état hydrique et structural, les caractéristiques hydrodynamiques, sont modifiées à chaque instant, et l'effet d'un épisode au sein d'une séquence pluvieuse, n'est pas forcément le même selon qu'il intervient au début ou à la fin de la séquence. On en arrive donc à la notion de structure des pluies, c'est-à-dire à la répartition des hauteurs et des intensités au cours de la séquence considérée (CTGREF, 1977). Il s'agit bien en effet, d'un paramètre déterminant, qu'il paraît nécessaire de prendre en compte afin de définir leur agressivité. Cette agressivité serait cependant toujours une agressivité potentielle, car l'agressivité effective est de toute façon, fonction de la nature et de l'état initial des matériaux de surface.

On peut donc tenter d'établir une esquisse de typologie de l'agressivité des pluies, en s'appuyant sur quelques uns de nos résultats.

Les paramètres qui interviennent sont :

1 – L'intensité initiale et les caractéristiques des gouttes au cours des premières minutes de la pluie, ou plus exactement au cours de la phase d'humectation des agrégats de surface, c'est-à-dire correspondant aux 2 ou 3 premiers millimètres de pluie.

S'il était établi qu'il existe une relation significative et générale entre intensité des pluies et distribution de la taille des gouttes, au moins pour un régime climatique donné, ce paramètre serait alors assez facile à obtenir : il suffirait de mesurer l'intensité moyenne correspondant par exemple aux 3 premiers millimètres de la séquence pluvieuse ( $I_3$ ).

L'amélioration des connaissances dans ce domaine passe donc par la mesure des intensités des pluies à des pas de temps réduits (de l'ordre de la minute) (VALENTIN et RUIZ- FIGUEROA, 1987), ainsi que par l'établissement de relations entre cette intensité et l'énergie des pluies, et la distribution de la taille des gouttes correspondantes ; et ceci pour différentes régions climatiques et périodes de l'année (HUDSON, 1981).

2 – Le second paramètre à considérer est relatif à l'énergie totale de la séquence pluvieuse, éventuellement en prenant en compte d'une manière ou d'une autre, l'intensité au cours de la pluie ; par exemple avec l'indice de WISCHMEIER, E.I.30, qui pondère l'énergie totale par l'intensité maximale durant 30 mn, ou bien avec les indices KEx utilisés par BOIFFIN, où x correspond à un seuil d'intensité minimale à prendre en compte pour le cumul de l'énergie cinétique.

En effet, nous avons montré qu'à partir du moment où les agrégats sont saturés, c'est bien un critère de type énergétique qui rend le mieux compte de l'évolution structurale. Le poids relatif et les valeurs seuils de ces deux paramètres devraient ensuite être définis en fonction de l'état initial et des caractéristiques des matériaux.

Avant de tenter de construire cette typologie, on peut faire deux remarques :

o Il faudrait tenir compte d'un paramètre complémentaire, qui présente un caractère ambivalent vis-à-vis des deux paramètres précédents, c'est le couvert végétal (ROOSE & LELONG, 1976 ; WISCHMEIER, 1976).

On considère en effet classiquement, qu'il a un effet positif en interceptant les gouttes et donc en diminuant l'énergie cinétique, mais il a été récemment montré (BRANDT, 1987 ; STYCZEN et HOGT-SCHMITT, 1987), qu'il pouvait avoir un effet contraire, par concentration de l'eau sur les feuilles et formation de plus grosses gouttes.

Ces derniers résultats sont tout à fait cohérents avec notre analyse. Il est clair qu'ils correspondent en particulier à la phase initiale de réhumectation et au risque d'éclatement.

o Une seconde remarque concerne la relation entre la notion d'agressivité des pluies, telle que nous venons de la définir, et l'érosivité des pluies ; la première est relative à l'évolution structurale superficielle, alors que la seconde est relative au risque de ruissellement et d'érosion. S'il peut dans certains cas y avoir coïncidence entre les deux, ce n'est pas la règle. En particulier, dans les premiers stades d'évolution structurale, les pluies même très agressives n'entraînent pas de ruissellement, parce que l'infiltrabilité et la détention superficielle sont encore élevées ; au contraire, lorsque les croûtes sont déjà bien formées, des pluies très peu agressives peuvent être érosives, car toute l'eau ruisselle (TORRI, 1986 ; EIMBERCK, 1988).

On peut maintenant proposer un schéma typologique de l'agressivité des pluies vis-à-vis de l'évolution structurale superficielle (tab.9).

Etat hydrique initial	Paramètre d'agressivité	Influence du calibre initial des agrégats	Influence des caractéristiques des matériaux	Influence du couvert végétal
Saturé	KEx	x augmente lorsque le calibre des agrégats augmente	x augmente avec la teneur en argile ( $0 < x < 20$ ) quand $10 \% < A < 30 \%$	L'agressivité effective est inversement proportionnelle au taux de couverture
Non saturé	In KEx	n augmente avec le calibre initial moyen des agrégats ( $n \propto d/2$ )	Le poids de In diminue par rapport à celui de KEx quand la teneur en matière organique augmente	Le poids de In augmente par rapport à celui de KEx lorsque le taux de couverture augmente

KEx : Energie cinétique cumulée de la pluie pour une intensité supérieure à x mm/h.

In : Intensité moyenne des n premiers mm de la séquence pluvieuse.

Tableau 9: Influence de l'état initial, des caractéristiques des matériaux et du couvert végétal sur la caractérisation de l'agressivité des pluies.

## CHAPITRE 3 :

### L'EVOLUTION STRUCTURALE D'UN MASSIF D'AGREGATS SOUS L'ACTION D'UNE PLUIE

#### 1) INTRODUCTION

Après avoir étudié l'action des gouttes sur des agrégats, nous allons maintenant chercher à décrire l'évolution structurale de massifs d'agrégats sous l'action d'une pluie simulée, jusqu'à la formation d'une croûte.

Ceci afin de vérifier que l'analyse précédente du comportement d'agrégats isolés s'applique bien à des volumes d'agrégats, et d'étudier les relations entre les processus de désagrégation et la structure des croûtes.

De nombreux auteurs ont décrit l'évolution structurale de la surface des sols sous l'action des pluies (ELLISON, 1947 ; Mc INTYRE, 1958 ; MORIN et al., 1981 ; HELALIA et al., 1988).

BOIFFIN (1984), et BOIFFIN et MONNIER (1985), ont montré que la formation des croûtes en sols limoneux résultait d'une série de processus :

- détachement des particules,
- déplacement et colmatage intersticiel,
- compactage par le choc des gouttes.

Les différents processus de division et de détachement ont été identifiés et analysés

- :
- l'éclatement qui résulte de la compression de l'air dans la porosité des agrégats lors de l'humectation,
  - la désagrégation mécanique due à l'impact des gouttes de pluie sur les agrégats,
  - la microfissuration liée aux cycles d'humectation/dessiccation, et à un éclatement partiel.

Dans l'étude expérimentale détaillée de la désagrégation (première partie), nous avons montré que le type de mécanisme de désagrégation intervenant était très lié à l'état hydrique initial et au mode de réhumectation des agrégats.

Nous avons également mis en évidence que les différents mécanismes correspondaient à des quantités et à des distributions de taille des particules différentes.

Il s'agit maintenant de passer à l'analyse du comportement de massifs d'agrégats, pour lesquels vont intervenir des aspects nouveaux : évacuation de l'eau, relations entre les couches superficielles et les couches sous-jacentes...

## 2) MATERIEL ET METHODES

### A – Description des échantillons

On a utilisé pour ces expériences le matériau de Palaiseau, qui est au centre de notre gamme de matériaux et pour lequel il existe des références de terrain (BOIFFIN, 1984 ; BOIFFIN & BRESSON, 1987).

Les agrégats de 3-4 mm ont été disposés dans des anneaux de 14 cm de diamètre et dans des boîtes de Kubierna afin de réaliser des lames minces ; la couche d'agrégats est de 3 cm ; une couche de sable grossier de 1 cm est disposée à la base de l'échantillon pour permettre le drainage de l'eau infiltrée (fig. 50).

Dans un cas, on a utilisé des agrégats séchés à l'air, dans l'autre, ils ont été réhumectés sous vide jusqu'à saturation.

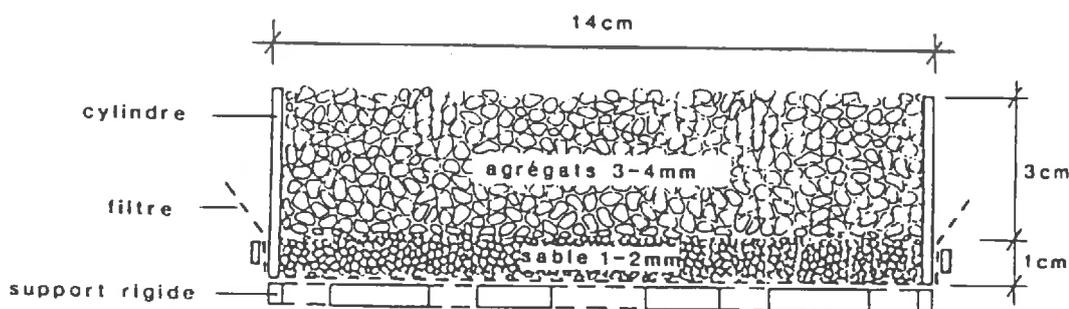


Figure 50: Schéma d'un anneau rempli avec les agrégats.

### B – Simulation de pluie

On a utilisé un simulateur de pluie formé d'un réservoir à niveau constant, avec des capillaires en silicone à la densité de 5.6 par  $\text{dm}^2$ . Les gouttes formées tombent de 6 m sur les échantillons en passant à travers un fin grillage situé 1 m sous le réservoir, qui permet une bonne répartition dans l'espace des gouttes et une distribution de taille de gouttes proche de celle des pluies naturelles (VALENTIN, 1978 ; ZANCHI, 1979 ; FARRÉS, 1987 ; GOVERS et al., 1988).

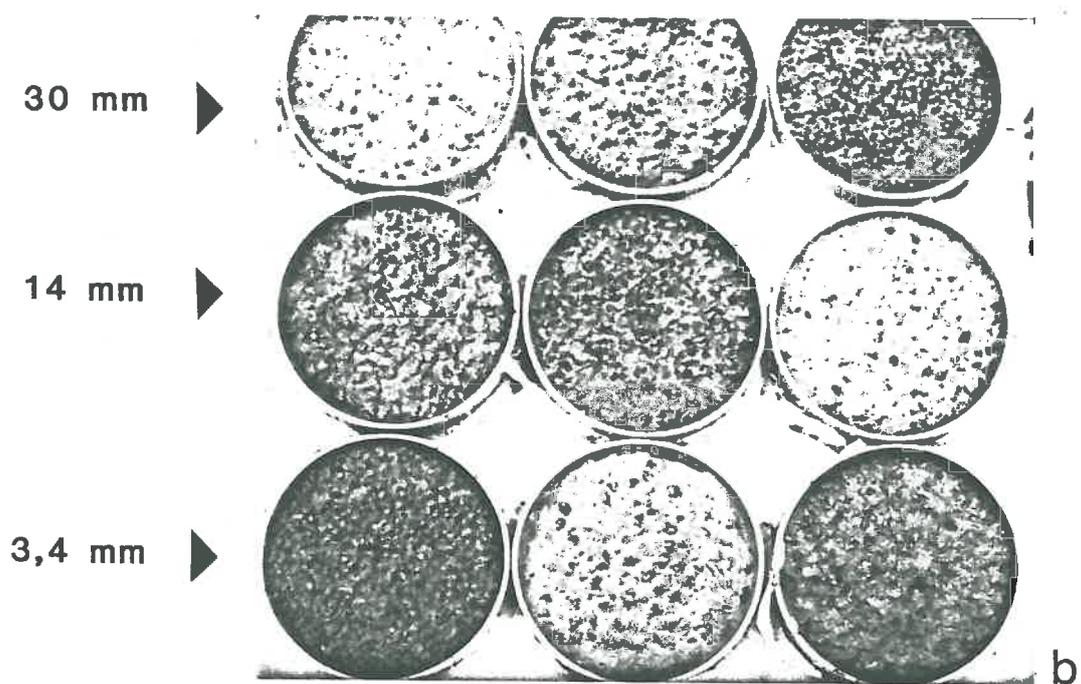
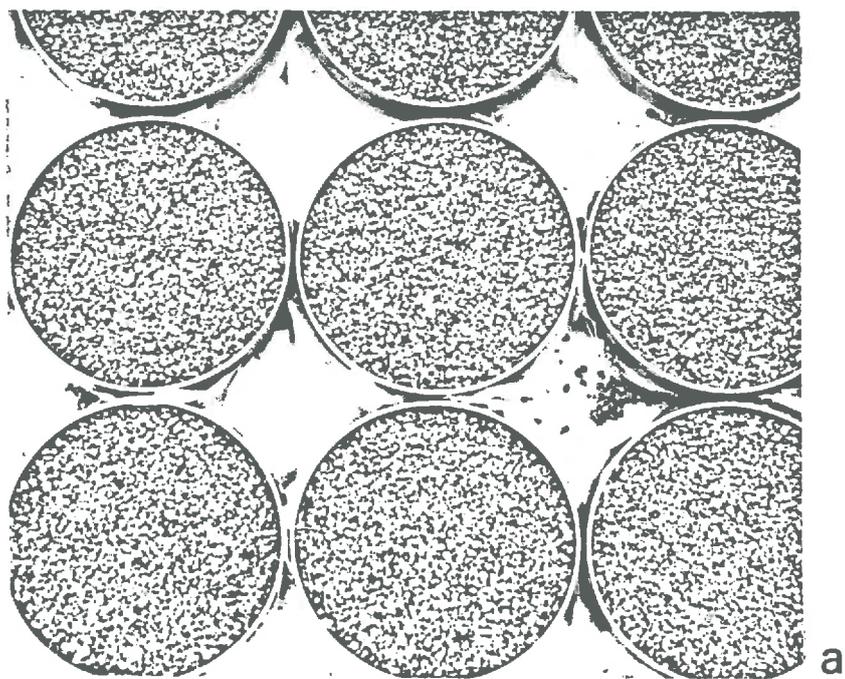


Figure 51: Observation de la surface des anneaux (agrégats initialement secs). a : état initial, b : différents stades de prélèvement au cours de la pluie.

L'intensité de la pluie est 20 mm/h, et son énergie cinétique est d'environ 80 % de celle d'une pluie naturelle de même intensité.

Les cylindres et les boîtes de prélèvement pour la confection des lames minces ont été placés en même temps sous le simulateur. On en a retiré à chaque stade d'évolution morphologique pour les observer et analyser la taille des particules et des pores (fig.51).

La durée maximale de la pluie a été de 90 mn, les cylindres et les boîtes ont été prélevés après 5, 10, 20, 40 et 90 mn de pluie pour les agrégats initialement secs, soit respectivement environ 1,7, 3,4, 7, 14 et 30 mm de lame d'eau, et seulement après 40 et 90 mn pour les agrégats réhumectés.

### **C – Observations de surface**

La surface des échantillons a été examinée avec un microscope binoculaire après leur dessiccation, afin de décrire leur évolution structurale et la diminution de la rugosité de surface.

### **D – Lames minces**

Les croûtes formées dans les boîtes de Kubiena ont été séchées à l'air, puis à 40°C, pendant 24 h. Elles ont ensuite été imprégnées avec une résine polyester diluée à 30 % par du styrène. La structure en coupe des croûtes a ainsi pu être examinée.

### **E – Analyse de la taille des particules**

A chaque stade de développement des croûtes, on a prélevé des échantillons de la croûte et des couches sous-jacentes dans les cylindres, afin d'étudier l'évolution de la distribution de la taille des particules mobilisées. On a effectué 5 répétitions pour chaque mesure.

Nous avons utilisé la méthode mise au point et précédemment décrite qui consiste en :

- une immersion et un tamisage à 100  $\mu\text{m}$  dans l'éthanol,
- un séchage à 105°C du refus,
- un tamisage sans agitation à sec à 0,1, 0,2, 0,5, 1 et 2 mm, qui permet d'obtenir une distribution de la taille des particules produites en 6 classes.

Pour chaque échantillon on a également déterminé la teneur en eau au moment du prélèvement.

## F – Porosimètre au mercure

Cette méthode consiste à mesurer la pression nécessaire pour faire pénétrer du mercure dans les pores d'un échantillon sec, et à mesurer le volume de mercure intrudé à chaque pression (LAWRENCE, 1977). La relation entre le diamètre des pores et la pression est donnée par la relation :

$$P = (-2 \gamma \cos\Theta) / D$$

pour des pores cylindriques, avec  $P$ , la pression, et  $\Theta$  respectivement la tension superficielle du mercure et son angle de contact avec l'échantillon, et  $D$  le diamètre des plus petits pores dans lesquels le mercure a pénétré.

On a utilisé un porosimètre Micromeretics 9320 qui permet d'atteindre une pression maxi de 200 M Pa. Les valeurs de  $\gamma$  et  $\Theta$  ont été prise égales à 0.484 Mm-1 et 130° (FIES, 1984). Avec ces valeurs, ce matériel permet de décrire des pores de diamètre équivalent compris entre 300  $\mu\text{m}$  et 6.10<sup>-3</sup>  $\mu\text{m}$ .

Les échantillons ont été séchés à l'air puis à 105°C pendant 24 h. Les fragments de croûte ont été inclus dans la résine en ne laissant que la surface libre, et en créant un volume d'air dessous, afin de mesurer la pression pour laquelle le mercure remplit ce volume en pénétrant à travers la croûte (figure 52).

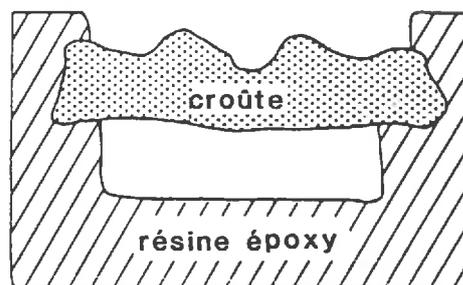
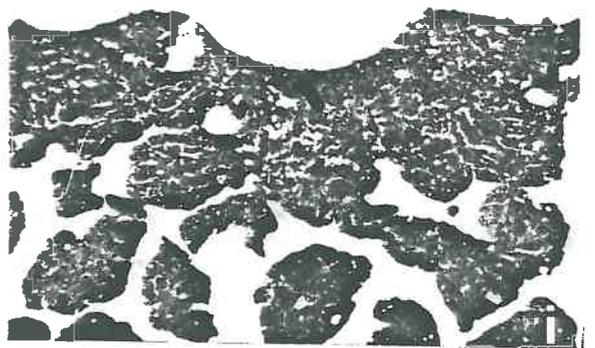
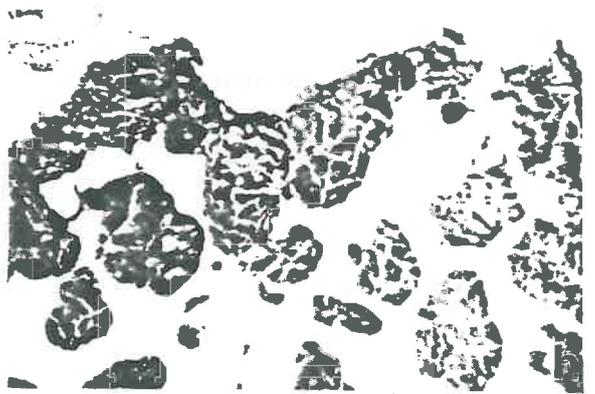
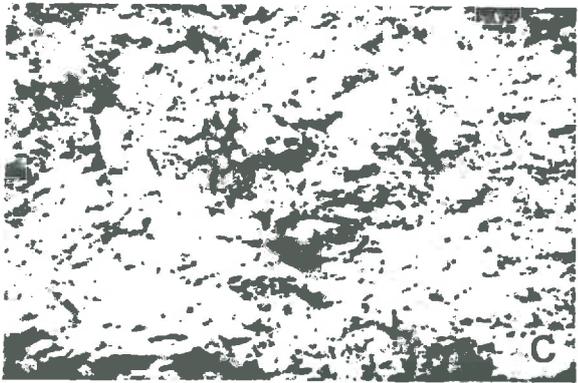
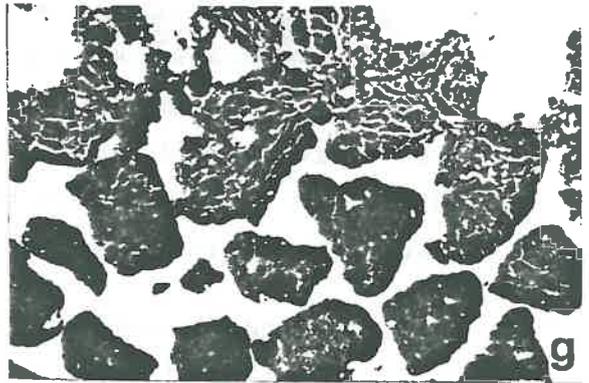
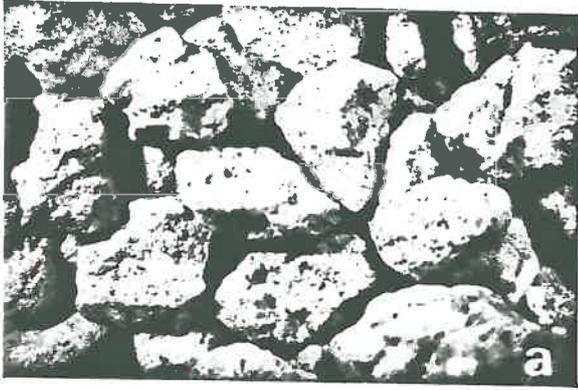


Figure 52: Schéma d'un fragment de croûte inclus dans la résine.

0 1cm



0 1cm

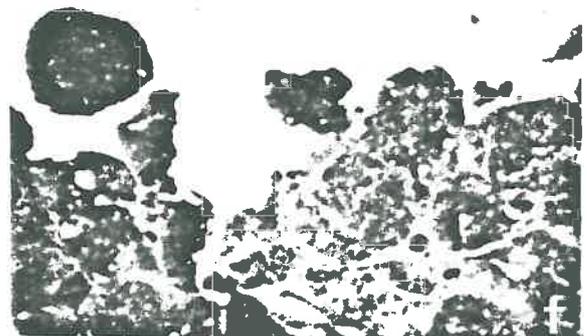
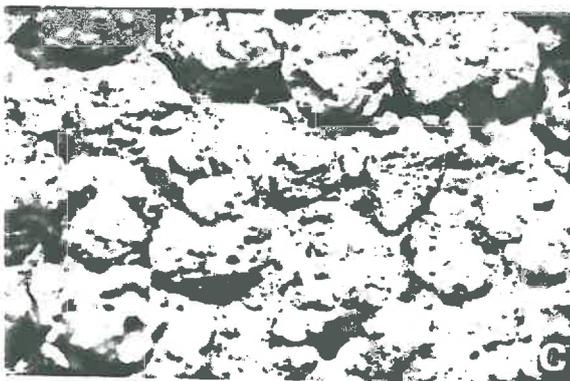
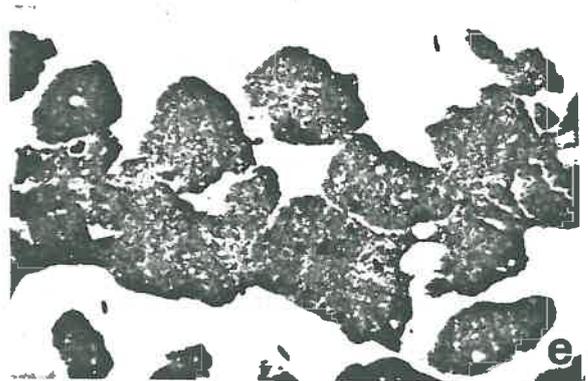
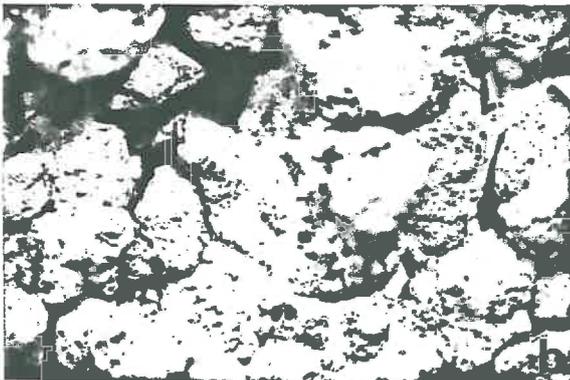
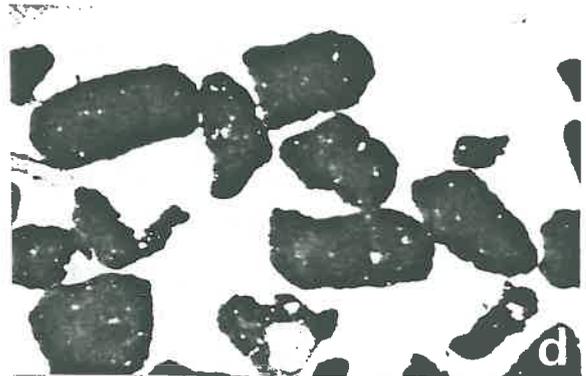
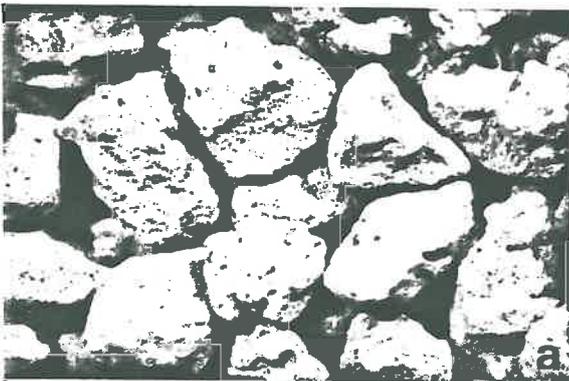


Figure 54 : Observations à la loupe binoculaire de la surface des croûtes et de leur structure en lame mince : agrégats initialement saturés.

a et d : état initial

b et e : après 14 mm de pluie (40 mn)

c et f : après 30 mm de pluie (90 mn)

Figure 53 : Observations à la loupe binoculaire de la surface des croûtes et de leur structure en lame mince : agrégats initialement secs.

a et f : état initial

b et g : après 1,7 mm de pluie (5 mn)

c et h : " 7 mm " (20 mn)

d et i : " 14 mm " (40 mn)

e et j : " 30 mm " (90 mn)



### **3) RESULTATS**

#### **A – Description de la surface des croûtes**

L'observation de la surface des croûtes montre qu'une évolution rapide intervient avec les agrégats initialement secs (fig. 53). 5 mn après le début de la pluie, les agrégats de surface sont déjà très divisés (fig. 53b), bien qu'ils n'aient reçu que 1,7 mm d'eau.

La division qui a lieu n'entraîne qu'un déplacement à faible distance des particules précédemment mobilisées (fig. 53c). L'apparition d'un excès d'eau en surface après environ 10 mm de pluie, correspond à l'individualisation de particules plus fines que précédemment (fig. 53d). Ensuite après 30 mm, la surface devient lisse et le taux de particules fines augmente (fig. 53e).

Avec les agrégats initialement saturés, 14 mm de pluie sont nécessaires pour que l'on puisse noter une évolution de la surface (fig. 53g). Les agrégats restent individualisés, mais semblent émoussés. De plus, les pores interagrégats sont partiellement colmatés par de fines particules.

A la fin de l'expérience (90 mn, 30 mm de pluie), la morphologie de surface est analogue à celle du stade précédent, à part un colmatage interstitiel plus important. Il n'y a pas d'excès d'eau en surface.

#### **B – Description des lames minces**

Avec les agrégats secs, les 2 premières couches d'agrégats sont affectées par la réhumectation après 1,7 mm : un réseau de fissures apparaît, et les agrégats sont partiellement soudés.

Ensuite, après 7 mm de pluie, la microfissuration affecte tous les agrégats, mais la croûte n'est toujours pas complètement continue (fig. 53h). Elle le devient après 14 mm et son épaisseur est alors d'environ 5 mm. Il s'agit encore d'une croûte structurale sans séparation des particules élémentaires. Au dernier stade (30 mm), on peut observer le début de la séparation et le dépôt des particules.

Dans le cas des agrégats saturés, les agrégats sont toujours distincts après 14 et 30 mm (fig. 54e et 54f). On observe des ponts entre les agrégats, formés essentiellement de grains de limon.

#### **C – Quantité et dimension des particules produites**

La figure 55a montre l'évolution des quantités et de la distribution de taille des particules produites au niveau de la croûte pour les agrégats initialement secs. Le taux de particules  $>$  à 2 mm diminue très vite au cours de la première phase et les particules résultantes sont comprises entre 200  $\mu$ m et 1 mm.

Durant les phases suivantes cette classe diminue au profit de la classe  $< 100 \mu\text{m}$ .

Sous la croûte, l'évolution ne démarre qu'après 20 mn (fig. 56b) et la distribution est alors analogue à celle de la croûte après 10 mn ; mais ensuite on n'observe pas l'augmentation de la classe la plus fine.

Avec les agrégats saturés, l'évolution de la taille des particules est beaucoup plus limitée (fig. 55c). Le taux de particules  $> 2 \text{ mm}$  reste supérieur à 75 % durant toute la durée de la pluie. La seule évolution significative est une légère augmentation de la classe  $< 100 \mu\text{m}$ .

Sous la croûte, l'évolution est encore plus limitée.

#### **D – Evolution de la teneur en eau**

La figure 56 montre que la teneur en eau des agrégats initialement secs, augmente rapidement jusqu'à 39 cc/g. Pour les agrégats saturés sous vide, la teneur en eau d'environ 30 cc/g, n'évolue quasiment pas durant toute l'expérience.

#### **E – Taille des plus gros pores de la croûte**

Les deux types de croûtes ont été étudiés après 30 mm de pluie. Le diamètre des pores à travers lesquels le mercure commence à pénétrer, est respectivement d'environ 10  $\mu\text{m}$  et 25  $\mu\text{m}$  pour les agrégats secs, et saturés (fig.57). Plusieurs répétitions donnant des résultats analogues ont été réalisées.

#### **F – Taille des pores des agrégats sous la croûte**

Les mesures ont été effectuées sur des agrégats prélevés sous les croûtes après 30 mm de pluie (fig.58).

Le volume total des pores est un peu supérieur avec les agrégats initialement secs qu'avec les agrégats saturés ou les agrégats de départ (tableau 10). Il n'y a pas de différence significative entre ces 2 derniers résultats. Les valeurs de diamètre correspondant au maximum des courbes dérivées ne sont pas significativement différentes dans les 3 cas (fig.58, tableau 10).

On peut simplement noter que le volume poral, pour les pores plus grands que 4  $\mu\text{m}$  de diamètre, est plus élevé pour les agrégats initialement secs.

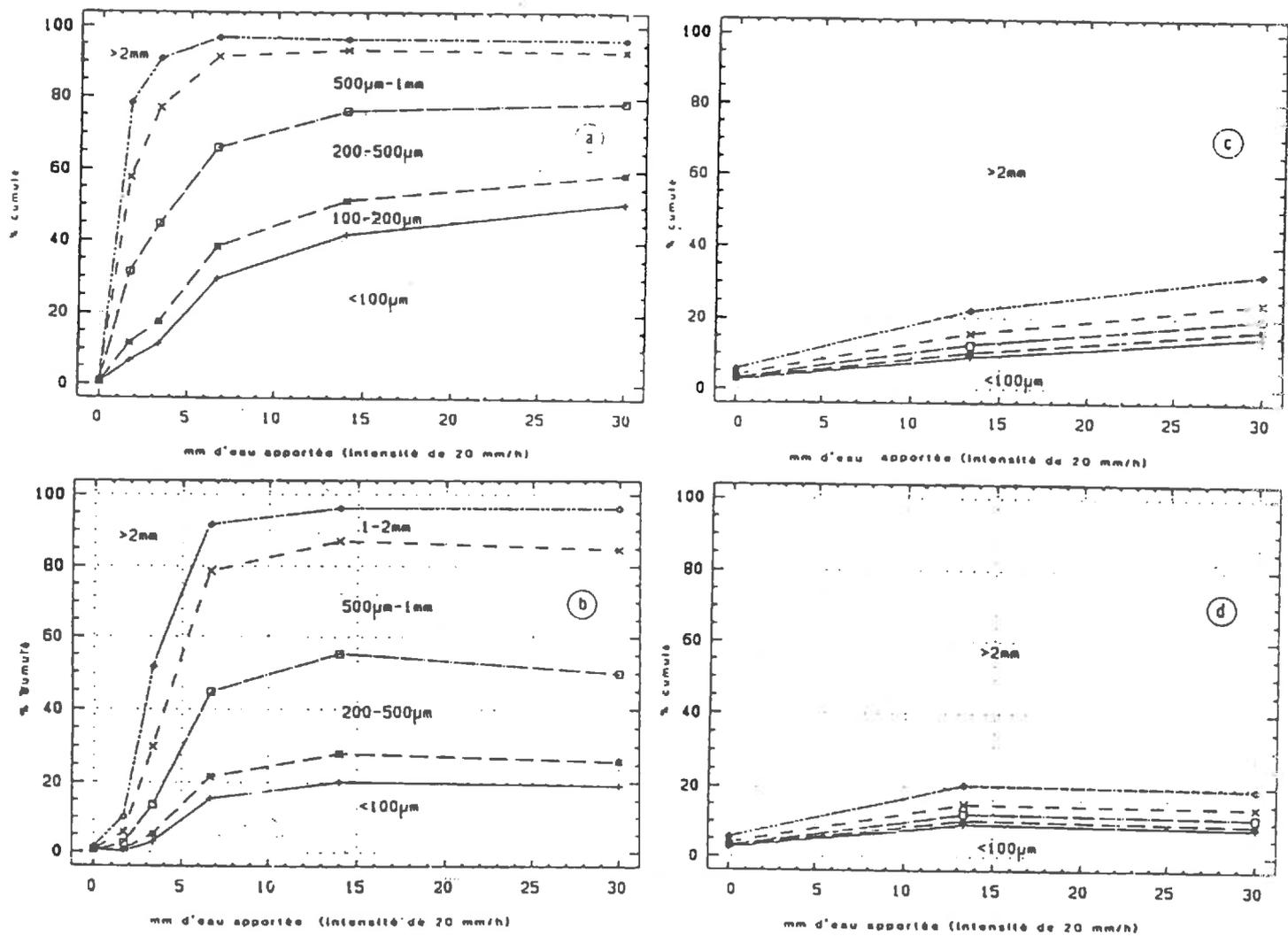


Figure 55: Evolution des D.T.P.R. sous pluie. agrégats initialement secs (a & b) ou saturés (c & d) respectivement dans la croûte et sous la croûte.

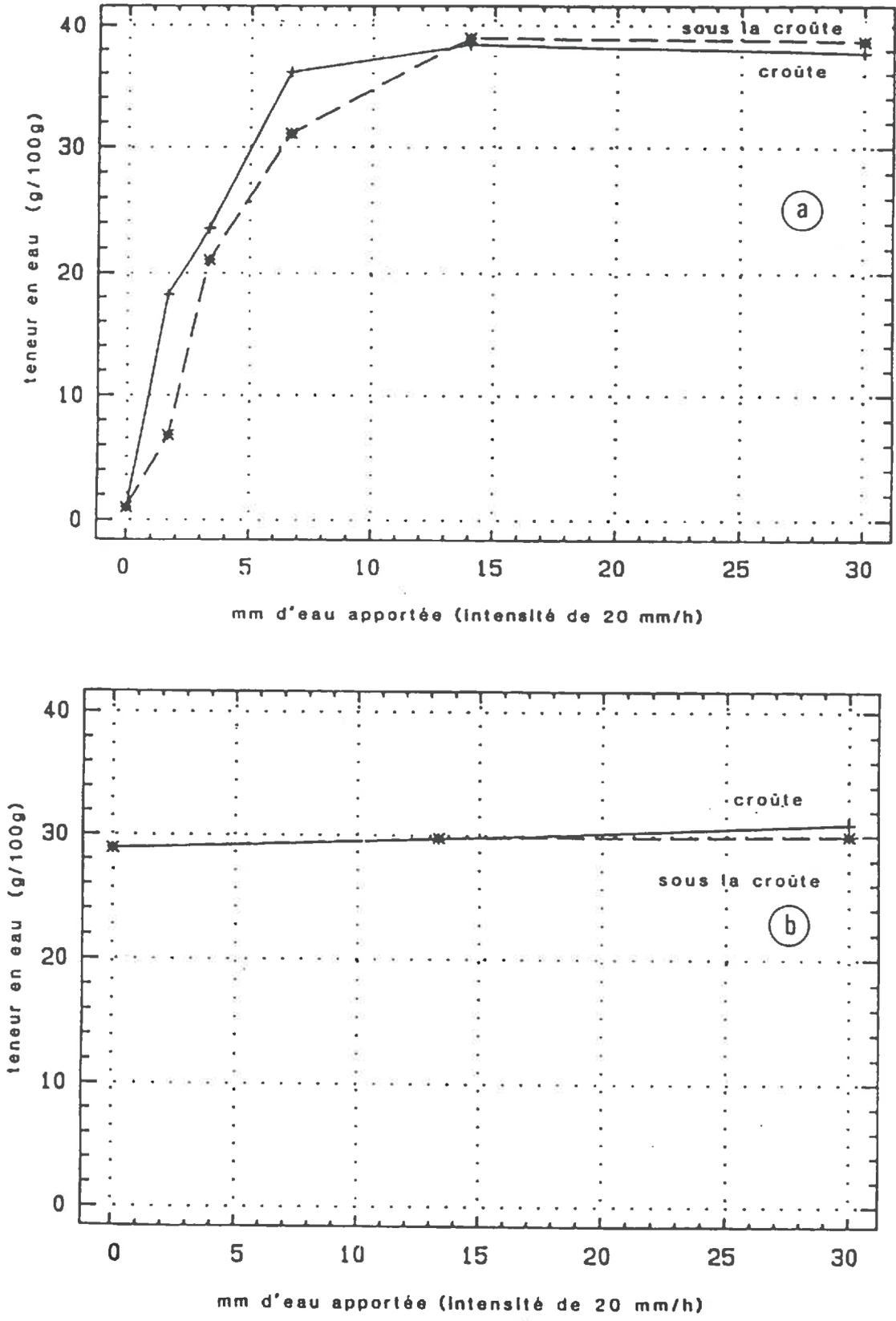


Figure 56: Evolution de la teneur en eau au cours de la pluie pour les agrégats initialement secs (a), et saturés (b).

	Volume poral total cc/g	Valeur du diamètre pour le maximum des courbes dérivés µm
Agrégats initiaux	0.202	2.8
Agrégats initialement secs	0.211	2.2
Agrégats réhumectés sous vide	0.200	2.5

Tableau 10: Valeurs caractéristiques des courbes de porosimétrie au mercure.

#### 4) DISCUSSION

##### A – La formation des croûtes à partir d'agrégats initialement secs

On peut distinguer à partir de ces résultats, différentes étapes successives de l'évolution structurale durant la séquence étudiée :

a – La première étape correspond à l'humectation des agrégats de la surface (1,7 mm). Ces agrégats sont microfissurés par éclatement partiel, et la taille des particules mobilisées est intermédiaire (70 % entre 0,2 et 2 mm).

On peut comparer cette taille à celle, directement observée, des mailles du réseau de fissures, qui est effectivement analogue (fig.53). Ces agrégats sont partiellement soudés, mais il reste une forte porosité entre eux, et les particules ne sont pas déplacées. L'eau continue à s'infiltrer.

b – Durant la seconde étape (entre 1,7 et 7 mm), la couche supérieure d'agrégats est saturée, mais il n'y a pas encore d'excès d'eau en surface. On assiste à un effondrement de la structure.

Les particules mobilisées durant l'étape précédente sont déplacées par les gouttes de pluie et colmatent progressivement la porosité inter-agrégats. Environ 60 % des particules restent entre 0,2 et 2 mm (fig. 55). Cependant la classe < 100 µm augmente (30 % après 7 mm).

Ces particules forment une croûte structurale. Sous cette croûte, les agrégats sont progressivement réhumectés entre 1,7 et 3,4 mm (fig.53), et ils sont tous microfissurés après 7 mm de pluie (fig.4c) et à ce moment, la distribution de la taille des particules est analogue à celle de la surface après 3,4 mm (fig. 55).

c – La 3ème étape démarre avec l'apparition d'un excès d'eau en surface après 7 mm de pluie. Le déplacement et la désagrégation mécanique des particules résultant de la microfissuration initiale, ont fermé la surface (fig.53d), et l'infiltrabilité est devenue inférieure à l'intensité de la pluie. Durant cette étape, il ne reste plus d'agrégats > à 1 mm, et la classe < 100 µm continue d'augmenter (fig.55).

A la fin de l'expérimentation (30 mm), une croûte de dépôt apparaît dans les microdépressions. Elle est due à la mise en suspension et à la disjonction des particules dans la lame d'eau superficielle. La croûte atteint une épaisseur de 5 mm et la rugosité est très faible.

La porosimétrie au mercure montre que la taille des plus gros pores de cette croûte est de l'ordre de 10 µm, c'est-à-dire légèrement plus élevée que pour les pores internes des agrégats de départ (fig. 57a et 58a), mais plus faible que celle des agrégats après microfissuration. La désagrégation, puis le développement de la croûte ont donc entraîné la formation d'une structure à porosité assez proche de celle des agrégats de départ.

Sous la croûte, la taille des particules n'est pas modifiée par rapport au stade 7 mm (fig. 55). Cette zone n'est pas affectée par l'impact des gouttes de pluie, et les agrégats ne sont donc plus modifiés au cours de cette étape grâce à la protection par la croûte. Leur seule évolution a été la microfissuration. Le volume de pore dû aux microfissures, peut être évalué à environ 0,01 cc/g (tableau 10). La présence de ces fissures permet au mercure de pénétrer plus facilement dans la porosité des agrégats.

La teneur en eau, qui évolue de manière analogue dans les couches superficielles et sous-jacentes, atteint sa valeur maximale (38 cc/100 g).

Dans ce dernier cas, la détermination a été effectuée après séchage des agrégats. Le retrait des agrégats, durant leur séchage à l'air, est probablement responsable de la fermeture partielle des fissures.

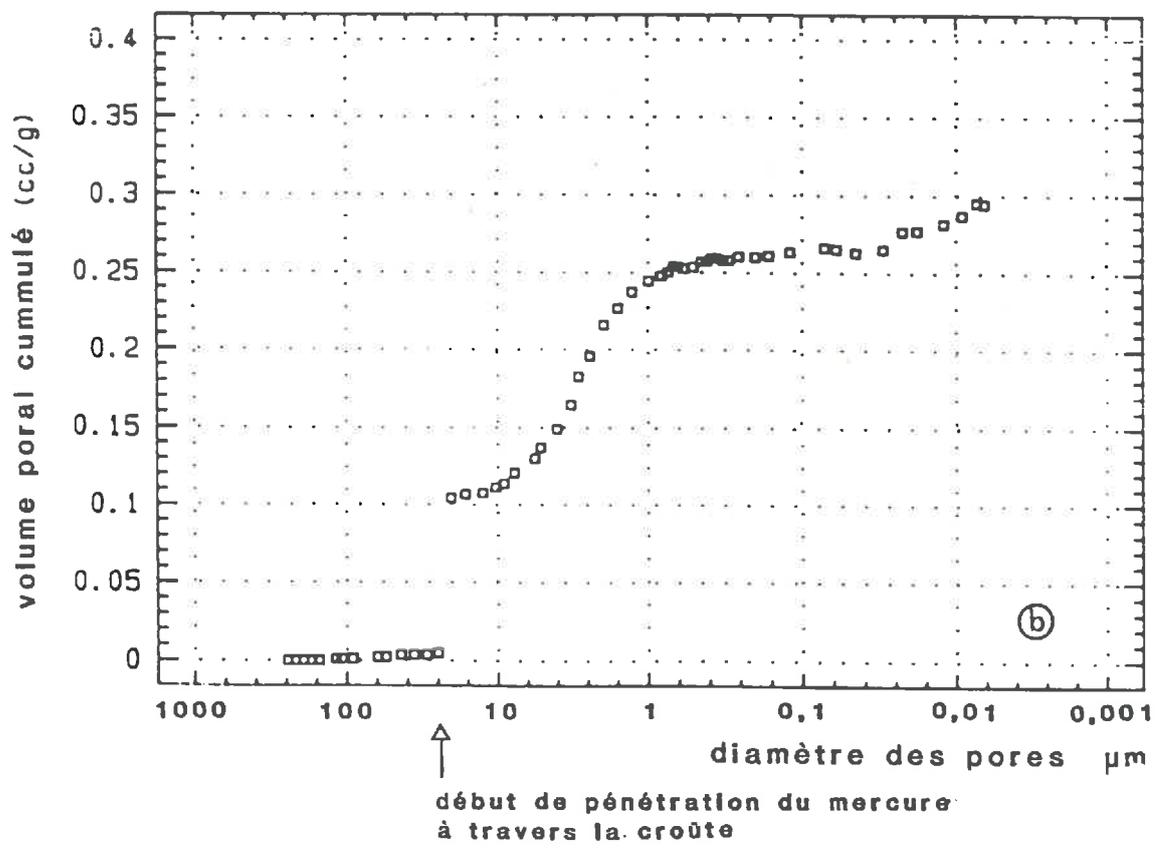
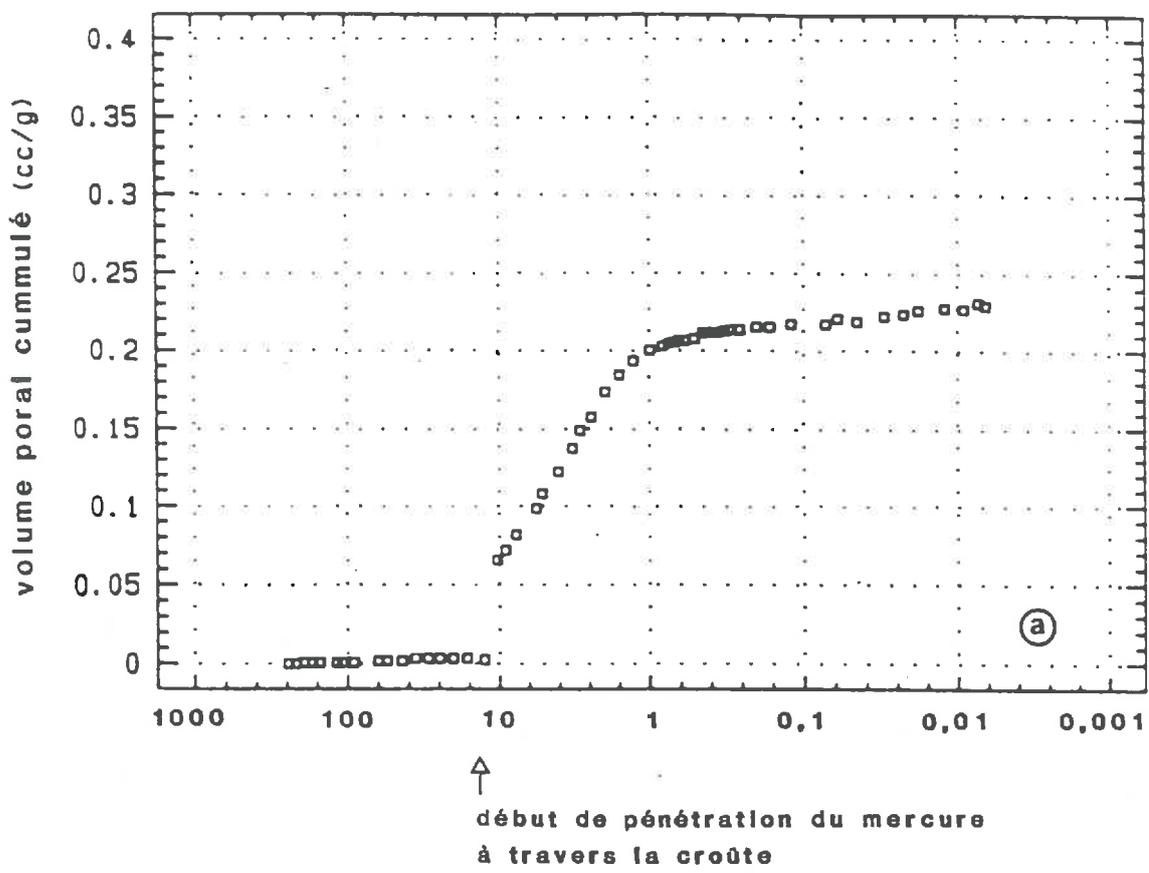


Figure 57: Courbes porosimétriques de fragments de croûtes obtenues après 30 mm de pluie pour des agrégats initialement secs (a) et saturés (b).

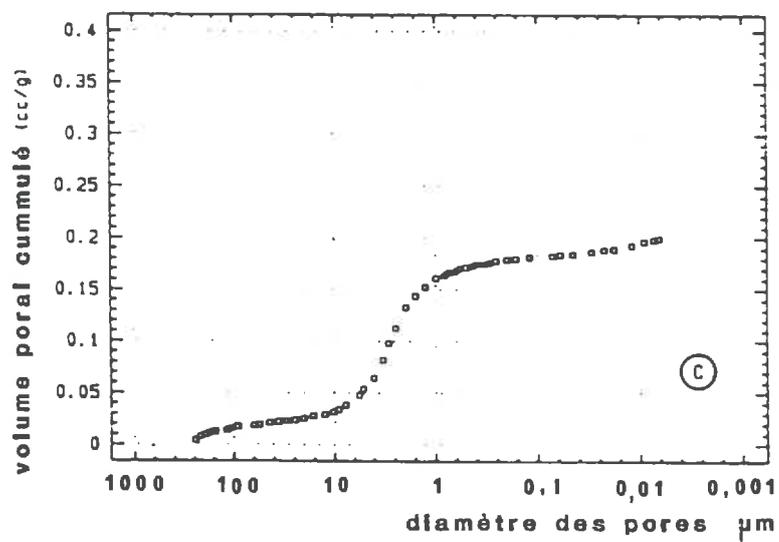
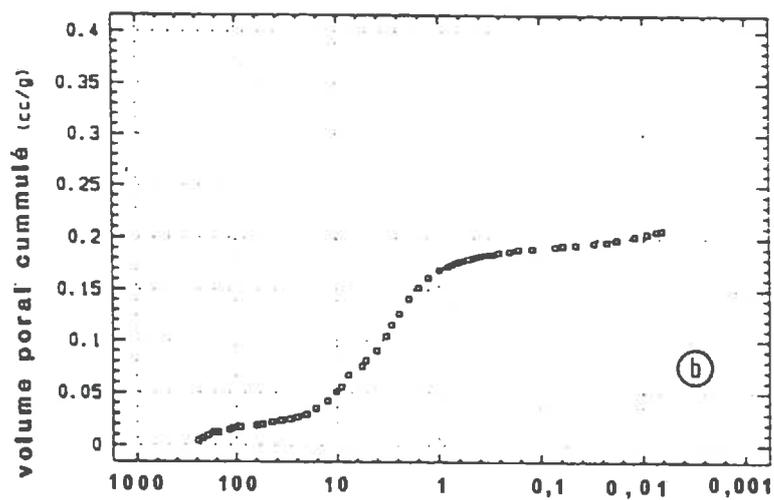
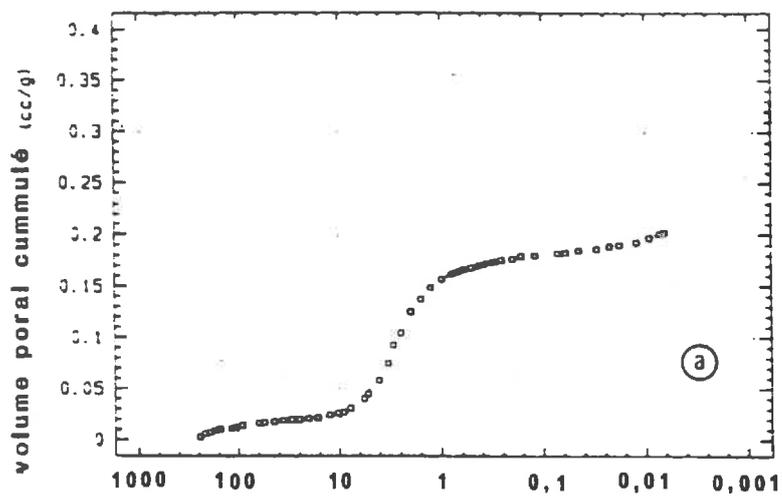


Figure 58: Courbes porosimétriques d'agrégats de 3-4 mm. a : agrégats initiaux, b & c : agrégats prélevés sous la croûte après 30 mm de pluie respectivement dans les cas initialement secs et saturés.

## B – Formation de la croûte à partir d'agrégats initialement saturés

Il est plus difficile de distinguer différentes étapes de formation des croûtes, à cause de l'évolution très lente durant l'expérimentation.

Les agrégats ne sont pas détruits, et la rugosité ne diminue pas (fig. 54). Les lames minces montrent que des particules sont accumulées entre les agrégats, juste dessous la première couche (fig. 54g). La taille de ces particules, dont la quantité augmente au cours de la pluie, est inférieure 100  $\mu\text{m}$  (fig. 55c). Les autres classes de particules entre 100  $\mu\text{m}$  et 2 mm, sont quasiment inexistantes. Il apparaît cependant un petit pourcentage de particules de 1-2 mm, qui résultent de l'abrasion des plus petits agrégats initiaux. La teneur en eau n'évolue quasiment pas durant toute la pluie (fig. 56).

Au stade final, la surface n'a pas une morphologie de croûte, la porosité inter-agrégats reste en partie ouverte (fig. 54c).

Les particules accumulées entre les agrégats semblent avoir une teneur en limon plus élevée que celle des agrégats initiaux (fig. 54f). Ces zones ont une porosité maximale comprise entre 20 et 30  $\mu\text{m}$  (fig. 57b). Cette valeur, plus élevée que pour celle des croûtes formées à partir des agrégats secs, est probablement liée à ce taux granulométrique.

Il n'y a pas de différence de porosité entre ces agrégats et les agrégats initiaux (fig. 58). Ceci concorde avec la stabilité de la teneur en eau au cours de la pluie.

La comparaison de la structure observée sur nos lames, avec celle observée par BOIFFIN (1984) et BOIFFIN & BRESSON (1987), sur des lames obtenues in-situ sur le même matériau, montre que le système expérimental étudié est assez peu différent d'un lit de semence.

Si on utilise la terminologie de ces auteurs, les deux types de croûtes obtenues expérimentalement correspondent respectivement :

\_ à un début de faciès F1, sans plaque continue, pour la croûte formée à partir d'agrégats saturés ; c'est-à-dire à une structure fragmentaire, avec accumulation de limon entre les agrégats ;

\_ à un faciès de transition F1/F2 pour la croûte formée à partir d'agrégats secs ; c'est-à-dire, à une juxtaposition de zones à structure continue et de zones à début de litage.

L'interprétation de cette micromorphologie, du point de vue des conséquences de la formation des croûtes sur l'infiltrabilité coïncide avec les observations effectuées sous pluie simulée.

## 5) CONCLUSION

Ces résultats montrent que le développement des croûtes est très largement dépendant de l'état hydrique initial des agrégats.

Plus que la teneur en eau, ce sont les conditions de la réhumectation initiale qui déterminent le comportement des agrégats soumis à la pluie : si la réhumectation avait été réalisée à l'air, une microfissuration se serait produite au cours de cette phase préalable à la pluie, plus ou moins forte selon la vitesse de réhumectation, et le développement de la croûte aurait finalement été similaire dans les 2 cas.

Cette expérience confirme l'influence du type de mécanisme de désagrégation sur la taille des particules produites (BOIFFIN 1984), mais aussi sur la cinétique de la formation des croûtes, et sur leur structure (CHEN et al., 1980 ; VALENTIN, 1981 ; ONOFIOK & SINGER, 1984 ; NORTON, 1987).

Les comportements hydrodynamiques résultants sont très différents dans les deux cas :

- avec les agrégats initialement secs, la fermeture de la surface est très rapide et le ruissellement pourrait apparaître sur des surfaces de ce type pour des pluies courtes et de faible intensité,

- avec les agrégats saturés sous vide, au contraire, l'infiltrabilité reste très élevée même après une longue pluie, elle ne diminue pas suffisamment rapidement pour entraîner un excès d'eau, même avec l'intensité assez forte appliquée.

Ce résultat confirme tout à fait les résultats précédemment obtenus sur des agrégats isolés. Il semble donc, que l'analyse des mécanismes élémentaires de désagrégation s'applique de manière satisfaisante au comportement de ces massifs d'agrégats, compte-tenu en particulier de la relation entre les cinétiques d'évolution de l'état hydrique et des D.T.P.R.

Il faut également noter que la structure des croûtes formées semble assez proche de celle des agrégats initiaux, au moins du point de vue de l'espace poral (figures 57 et 58).

Ceci est confirmé par l'analyse micromorphologique qui montre que l'on n'a pas atteint un stade d'évolution très poussé, par rapport aux croûtes que l'on peut observer in-situ.

Ce résultat s'explique très bien par le protocole utilisé pour obtenir ces croûtes : il s'agit encore ici de conditions expérimentales très éloignées des conditions naturelles, aussi bien du point de vue de l'état initial du matériau et de la dimension des surfaces

étudiées, que de celui des caractéristiques de la séquence pluvieuse utilisée : agrégats calibrés, surface trop petite et sans relief, peu propice aux déplacements de particules, pluies continues et d'intensité constante.

Pour permettre une validation plus complète de notre analyse, ce travail devrait être complété par un suivi analogue en conditions naturelles, dans lequel les observations seraient effectuées sur des aires échantillons représentatives.

## CHAPITRE 4 :

### LE DEPLACEMENT DES PARTICULES SOUS L'IMPACT DES GOUTTES DE PLUIE

#### 1) INTRODUCTION

On s'est jusqu'ici uniquement intéressé à la dimension des particules produites, indépendamment de leur mobilité. Mais la question se pose de savoir si ces particules sont déplacées par les gouttes de pluie.

Si oui, il s'agit de quantifier ces déplacements et d'en discuter l'importance, vis-à-vis de l'évolution structurale superficielle et par rapport à la désagrégation elle-même.

En effet, ce déplacement de particules par rejaillissement des gouttes, ou "splash" a souvent été considéré implicitement ou explicitement comme le principal résultat de l'action des pluies à la surface du sol (ELLISON, 1947 ; MC INTYRE, 1958 ; SAVAT et POESEN, 1981 ; GHADIRI et PAYNE, 1986 ; WRIGHT, 1986 ; FARRES, 1987).

La mesure du rejaillissement, c'est-à-dire du poids de terre recueillie dans des récipients placés à la surface du sol, ou inversement, du poids de terre évacuée d'un récipient, a été effectuée dans le but de quantifier l'érosion (BOLLINNE, 1984) ou de déterminer l'érodibilité d'un matériau donné (Mc INTYRE, 1958 ; AL DURRAH et BRADFORD, 1982a ; FARRES, 1987). Le problème le plus souvent évoqué par ces auteurs est celui de la détermination de la dimension optimale des récipients à utiliser ("splashcup"), corollaire de l'estimation des distances de projection (BOIFFIN, 1984).

Il est donc nécessaire de chercher à mesurer les distances de projections dans différentes conditions, et surtout d'établir les relations masse-distance de déplacement, afin d'une part, de discuter de la signification de ces mesures de déplacement de particules, et d'autre part, d'analyser les relations entre le rejaillissement et l'évolution structurale superficielle.

Nous avons également cherché à étudier la dynamique de ces déplacements de particules dans les différents cas.

## 2) METHODE

Pour réaliser ces mesures de splash, nous avons utilisé le goutteur décrit dans le chapitre 2, et un dispositif permettant de recueillir les projections, formé de rigoles concentriques de largeurs croissantes, au milieu desquelles est placé l'échantillon d'agrégats soumis à la pluie.

Le petit anneau dans lequel sont placés les agrégats est disposé sur une petite table à succion, de niveau avec les crêtes limitant les rigoles. Ce système permet une bonne évacuation de l'eau durant l'expérimentation, et permet également de contrôler la succion appliquée à la base des agrégats (la valeur standard a été fixée à  $-20$  mbars).

Les particules recueillies dans chaque rigole sont récupérées par lavage à l'éthanol du dispositif, puis pesées après séchage à  $105^{\circ}\text{C}$ . On a également réalisé des mesures de distribution de la taille des particules résultantes, afin de vérifier leur concordance avec celle des expériences précédentes. Les mesures ont été réalisées avec des agrégats de 3-4 mm de MONTLUEL, PALAISEAU et BOIGNEVILLE.

Le dispositif utilisé et les mesures effectuées permettent de décrire le déplacement des particules sous forme d'une relation entre les distances de projection et les masses de terre recueillie dans chaque couronne du dispositif.

Chaque point représenté sur les courbes correspond, en abscisse à la distance entre le centre du dispositif et le milieu d'une rigole, et en ordonnée à la masse de terre déplacée par couronne d'un centimètre de large. En effet, les rigoles étant de largeurs croissantes lorsqu'on s'éloigne du centre, à cause des faibles quantités de terre recueillie, il a été nécessaire d'indexer les mesures réalisées. Les mesures ont été effectuées après 10 mn de pluie, et chaque courbe est tracée à partir des valeurs moyennes de 2 à 4 répétitions.

On peut estimer la masse totale de terre déplacée, à partir de ces courbes masse-distance : elle correspond à l'aire sous les courbes.

Il faut cependant noter que l'on n'a pas mesuré les déplacements à très faible distance ( $< 2$  cm), qui peuvent se produire à l'intérieur des anneaux, et qui constituent probablement la plus grosse partie des déplacements de particules.

Par ailleurs, les mesures réalisées présentent forcément un biais, lié à la dynamique du phénomène et au dispositif expérimental : en effet, les départs de particules hors de l'anneau n'étant pas compensés par des apports extérieurs, la quantité de terre diminue au cours de l'expérimentation et l'état structural de l'échantillon évolue. La mesure correspond donc à une situation moyenne entre le début et la fin de l'expérimentation (10 mn).

De plus, dans le cas d'agrégats initialement secs, une réhumectation par capillarité peut intervenir conjointement à l'apport d'eau par les gouttes. Cette réhumectation liée au

gradient de potentiel à la base des agrégats, est lente, mais elle influe certainement sur le comportement des agrégats.

### 3) RESULTATS

#### a – Influence de l'état hydrique initial

La figure 59 représente les relations masse-distance obtenues avec Boigneville pour 3 états hydriques initiaux différents : sec à l'air, 15 % d'humidité pondérale et saturé.

On constate que c'est surtout pour les faibles distances de déplacement que les courbes se différencient, et la plus grande partie du rejaillissement se fait à des distances inférieures à 8 cm, cependant une petite proportion de particules est projetée au-delà de 20 cm.

En fait, la différence observée est liée au fait que dans le cas des agrégats saturés ou humides, ce sont les agrégats eux-mêmes ou des fragments qui sont déplacés, ce qui est possible grâce à l'énergie importante des gouttes (diamètre de 4,5 mm et hauteur de chute de 6 m), alors que dans le cas des agrégats secs, ce sont des petites particules résultant de l'éclatement qui sont déplacées, d'où des masses faibles. Le même type de résultat a été observé avec les autres matériaux.

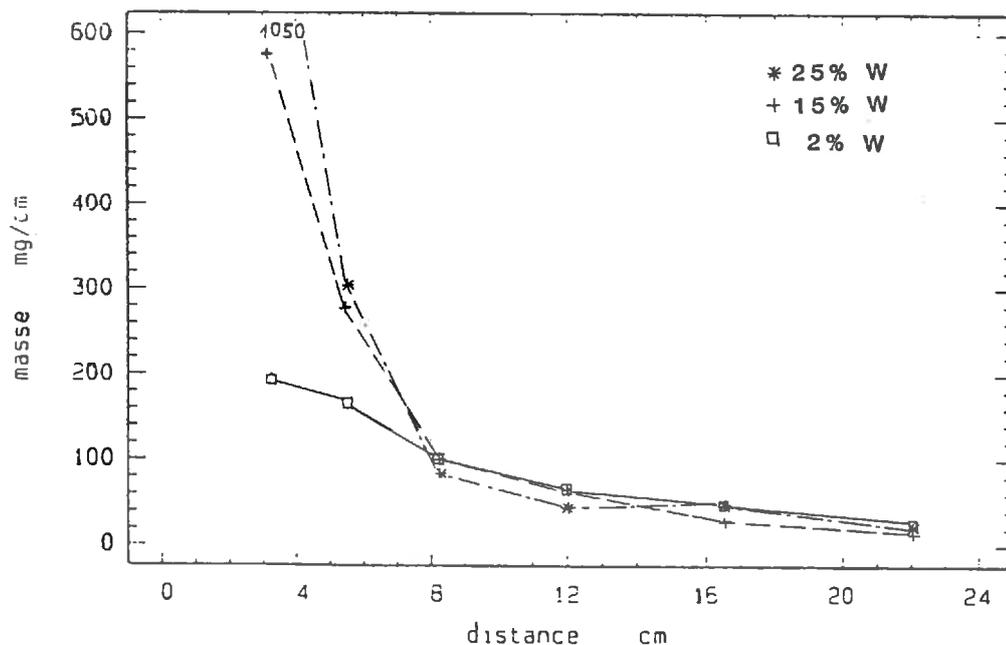


Figure 59: Influence de l'état hydrique initial sur les relations masse/distance (Boigneville) (gouttes de 4,5 mm de diamètre tombant de 6 m).

## b – Influence des caractéristiques des pluies

Les figures 60 et 61 montrent respectivement l'influence de la hauteur de chute des gouttes avec Montluel à sec (gouttes de 3,3 mm), et celle du diamètre des gouttes avec le même matériau à saturation (hauteur de chute de 1 m).

Dans les deux cas on peut constater que les masses totales de terre déplacée et les distances maximales de déplacement sont plus faibles que pour Boigneville, qui est pourtant un matériau beaucoup plus stable.

La hauteur de chute des gouttes ne modifie pas la forme des courbes obtenues pour des agrégats secs, c'est-à-dire la répartition des distances de projection, mais plutôt la quantité totale de terre déplacée (surface sous la courbe).

En revanche, dans le cas des agrégats saturés, la forme des courbes est très différente pour les deux tailles de goutte utilisées.

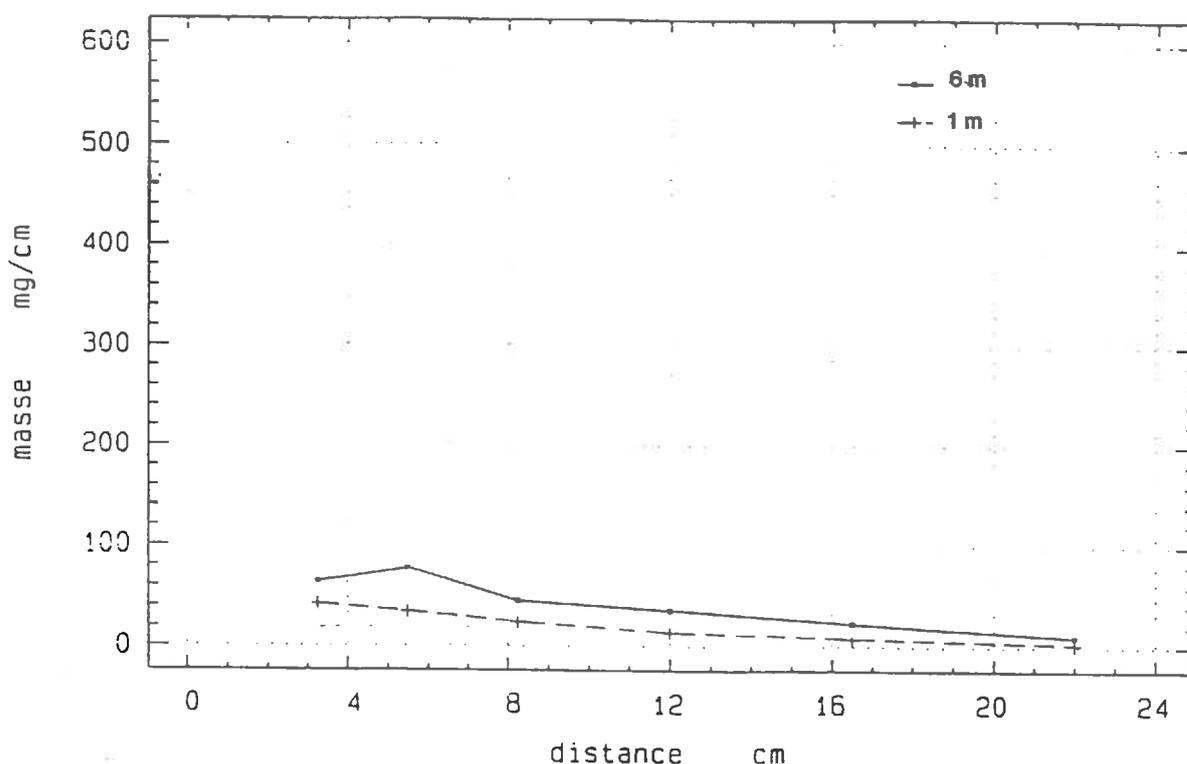


Figure 60: Influence de la hauteur de chute des gouttes sur les relations masse/distance (agrégats de Montluel secs).

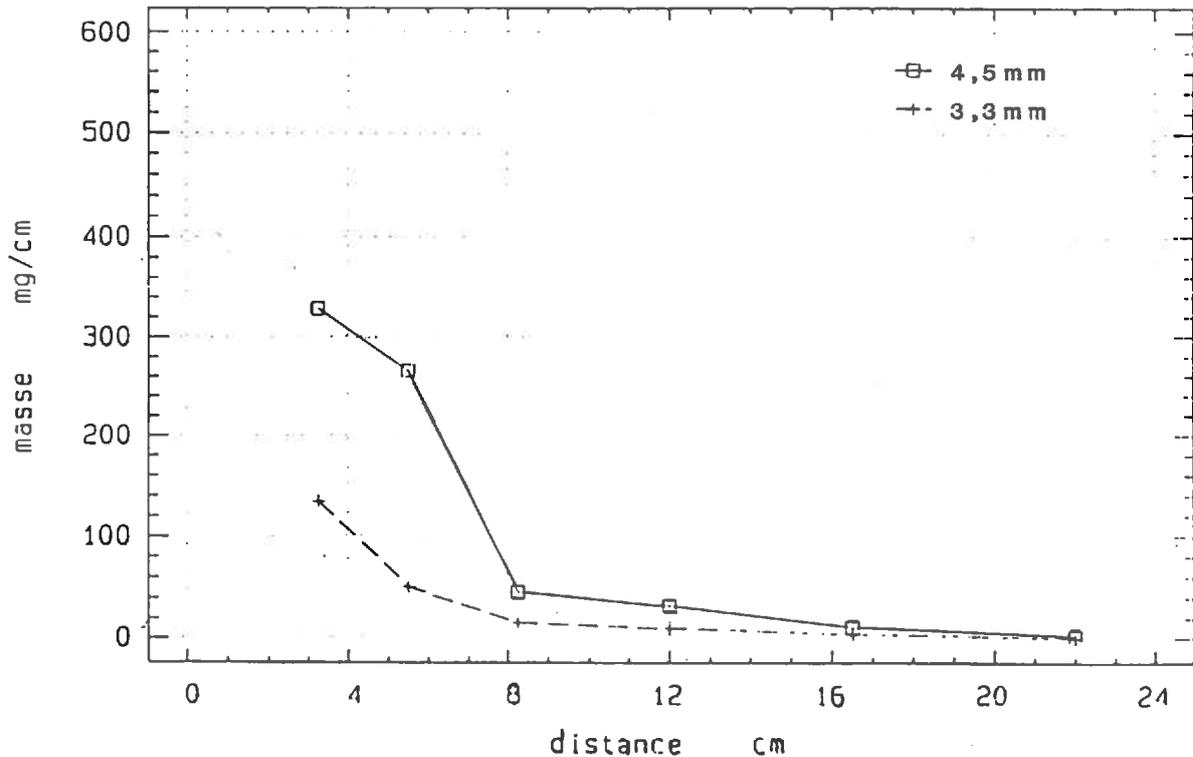


Figure 61: Influence du calibre des gouttes sur les relations masse/distance (agrégats de Montluel saturés).

### c – Influence de la succion exercée sur les agrégats

Dans l'ensemble des manipulations, on a maintenu à la base des agrégats une succion de  $-20$  mbars, afin de permettre une bonne évacuation de l'eau libre en excès.

Ici on a diminué cette succion pour tester l'influence de ce paramètre dans deux cas : agrégats de Montluel, initialement secs ou saturés (fig.62), et avec des gouttes de 4,5 mm tombant de 1 mètre.

Dans les deux cas, l'influence de la succion joue dans le même sens : augmentation du rejaillissement lorsqu'elle diminue ; cependant l'effet est plus marqué dans le cas des agrégats saturés. Les différences interviennent surtout pour les faibles distances de déplacement.

## 4) DISCUSSION

La discussion peut être faite en deux temps : d'une part en analysant les résultats présentés, et d'autre part en discutant à partir de ces résultats, différents aspects de la notion de rejaillissement.

### a) Discussion sur les mesures réalisées

Il faut tout d'abord préciser, que parallèlement à l'établissement des courbes masse-distance, on a vérifié que les distributions de la taille des particules résultantes, dans les différentes conditions expérimentales, correspondaient bien à celles obtenues au cours des manipulations précédentes. Cet aspect est important pour l'interprétation des résultats.

o En ce qui concerne l'influence de l'état hydrique initial, on est en présence, respectivement pour les trois humidités : d'un éclatement poussé, d'un éclatement ménagé et d'une usure mécanique ; ce qui implique des particules mobilisables par les gouttes, de tailles très différentes.

Par ailleurs, on a constaté que le rejaillissement démarrait plus ou moins vite après le début de la pluie, selon l'état hydrique initial :

dans le cas d'agrégats humides, les déplacements démarrent dès les premières gouttes, alors que si les agrégats sont secs au départ, le rejaillissement ne débute qu'au bout de quelques minutes, lorsque l'ensemble de l'échantillon a été resaturé.

Ceci peut s'expliquer par une différence dans la nature physique des chocs intervenants : chocs mous et inélastiques lorsque les agrégats sont secs, et chocs élastiques en présence d'eau. C'est ce deuxième type de choc qui entraîne des projections.

On peut donc décrire ainsi les différents cas observés :

– Lorsque les agrégats sont initialement secs, on a une première phase de réhumectation, sans déplacements de particules hors des anneaux, mais avec éclatement des agrégats, les petites particules produites au cours de cette phase, sont déplacées par les gouttes suivantes à des distances variables, déterminées par l'énergie initiale des gouttes, et peu limitées par la masse des particules à déplacer.

– Lorsque l'humidité initiale des agrégats est intermédiaire, le rejaillissement démarre plus vite, simultanément à la désagrégation modérée par éclatement ; ce sont des particules de toutes les tailles qui sont déplacées, et les plus grosses sont projetées à faible distance ; mais elles constituent des masses plus importantes que précédemment.

– Lorsque les agrégats sont saturés, il n'y a plus d'éclatement, seule l'usure mécanique intervient. On est alors en présence de deux types de déplacements : d'une part les particules fines mobilisées par l'usure mécanique liée au choc des gouttes, qui peuvent être projetées à toutes distances ; et d'autre part les agrégats eux-mêmes, dont la masse importante limite le déplacement aux distances les plus faibles.

Les différences de masse totale de terre déplacée sont donc probablement liées à la fois aux mécanismes de désagrégation et à la cinétique du rejaillissement.

Ces résultats sont en accord avec les observations de FARRES (1987) sur la dynamique du rejaillissement. Les trois situations que nous venons de décrire, correspondent aux trois types de comportement décrits par cet auteur (fig.63).

o Les résultats concernant l'influence des caractéristiques des pluies nous apportent plusieurs informations : il faut rappeler que la mesure correspond à une durée de pluie de 10 mn, c'est-à-dire, compte tenu de la forte intensité produite par le gouteur, à une hauteur d'eau de près de 15 mm. Ceci implique que dans le cas des agrégats secs, elle intègre à la fois la phase initiale d'éclatement, et les phases ultérieures de rejaillissement ; or on a vu dans le chapitre 2 que la hauteur de chute ne modifiait pas la D.T.P.R., d'où une faible différence dans la nature des projections, lorsque la hauteur de chute des gouttes passe de 1 à 6 mètres.

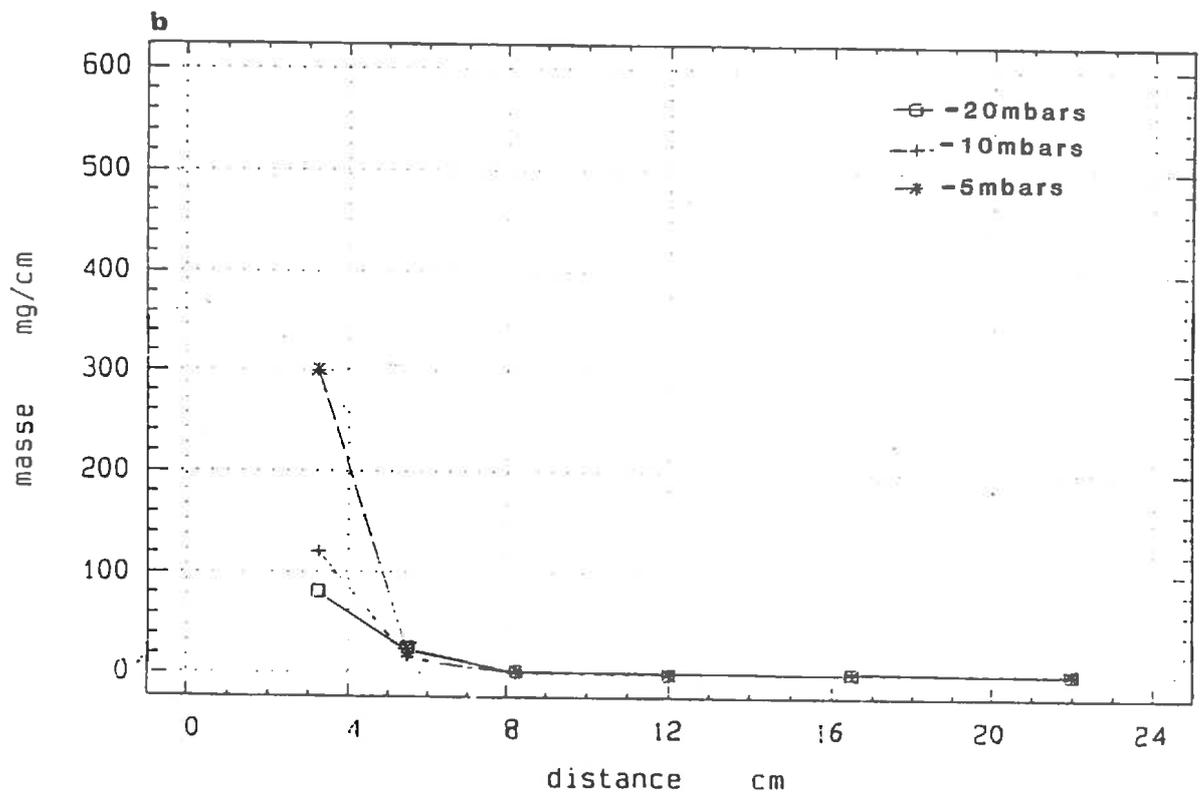
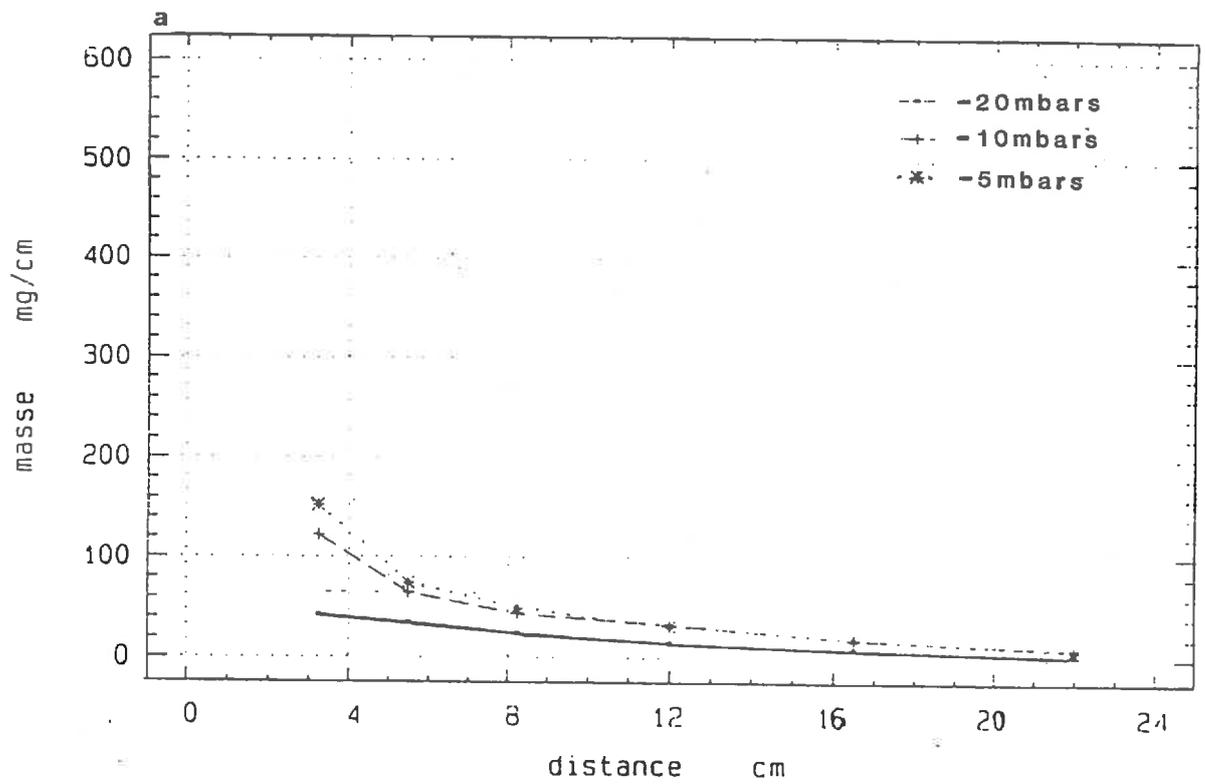
Si l'on avait fait varier la dimension des gouttes et celle des agrégats, la forme des courbes aurait certainement été modifiée, en fonction des D.T.P.R. à l'issue de la phase d'éclatement.

Dans le cas des agrégats saturés, pour lesquels on a testé les deux tailles de goutte, la différence porte à la fois sur la masse de terre totale déplacée et sur sa répartition en fonction des distances : une masse importante de particules se retrouve à faible distance. C'est le même type de résultat qu'avec les agrégats de Boigneville saturés : il s'agit d'un déplacement des agrégats eux-mêmes, qui est possible avec les gouttes de 4.5 mm de diamètre, mais l'est beaucoup moins avec les plus petites gouttes. On peut parler de "compétence" des gouttes vis-à-vis du rejaillissement, par analogie avec la compétence d'un ruissellement.

Dans les deux cas, la masse et la répartition de la terre projetée sont liées à la nature des particules produites par la désagrégation.

o En ce qui concerne l'influence de la succion exercée à la base des agrégats, c'est, à cause des difficultés expérimentales, la seule expérience dans laquelle ce facteur est testé.

La succion a un effet sur la vitesse d'évacuation de l'eau au cours de l'expérience, et donc à la fois sur la nature des mécanismes de désagrégation (surtout dans le cas des agrégats initialement secs), et sur la nature des chocs entre gouttes et agrégats (qui sont plus ou moins amortis ou élastiques) (AL-DURRAH & BRADFORD, 1981 ; FRANCIS & CRUSE, 1983).



**Figure 62:** Influence de la succion exercée sur les agrégats sur les relations masse/distance (gouttes de 4,5 mm de diamètre tombant de 1m). agrégats de Montluel respectivement initialement secs (a) et saturés (b).

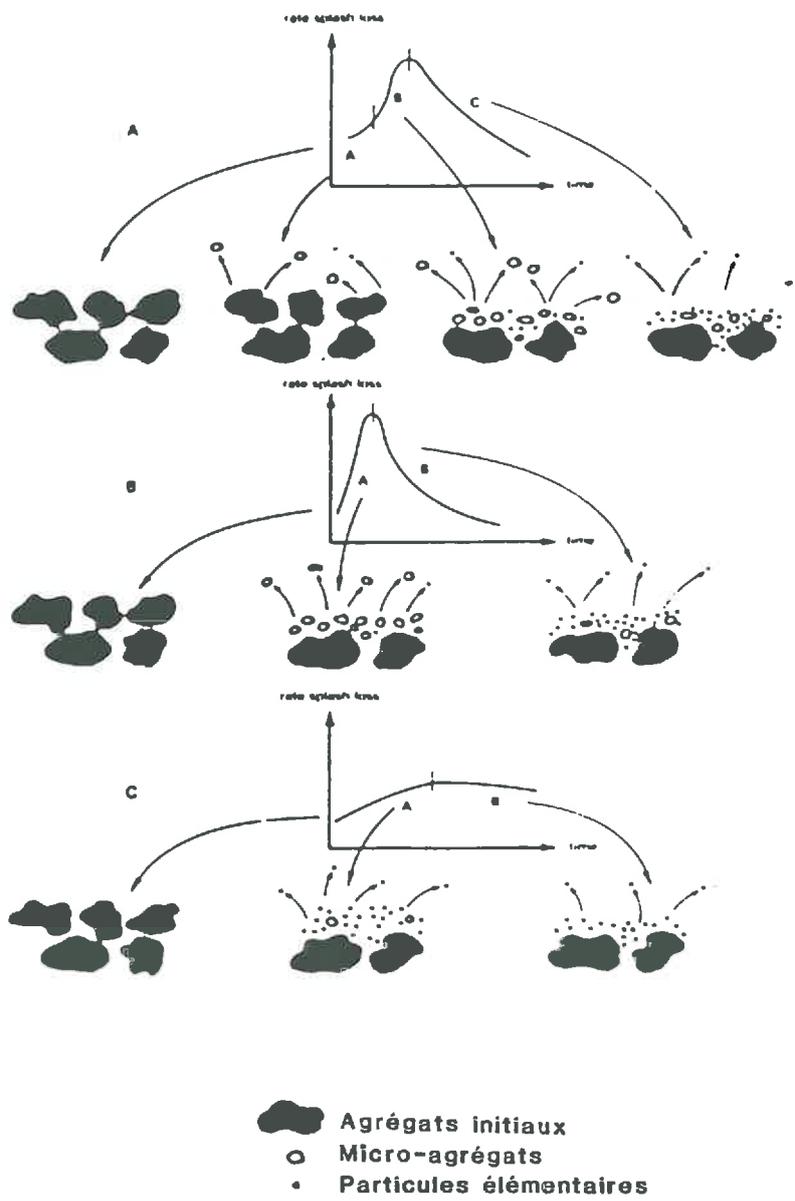


Figure 63: Modèles schématiques de rejaillissement d'après FARRES (1987).

Ainsi, à sec, la désagrégation est d'autant plus rapide que la succion est faible, le rejaillissement démarre plus vite, car l'eau étant éliminée moins vite par la base, on est plus rapidement en situation favorable au déplacement.

A saturation, on a la même relation entre rejaillissement et succion, mais les masses et distances de projection sont réduites à cause de la faible hauteur de chute des gouttes avec laquelle ces manipulations ont été réalisées.

On peut penser que dans ce cas, la force de succion peut être du même ordre de grandeur que la force d'impact des gouttes, et peut exercer une résistance au déplacement des particules par le splash (GHADIRI et PAYNE, 1986).

Ces résultats, très partiels, sur l'influence de la succion, mettent cependant en évidence les aspects principaux par lesquels elle s'exerce : d'une part, elle a évidemment une influence directe sur l'infiltrabilité du sol, ce qui peut, en retardant l'apparition d'un excès d'eau en surface, limiter le déclenchement de la phase 2 de la battance (phase de dépôt et sédimentation) (BOIFFIN, 1984 ; TREVISAN, 1986), d'autre part, en modifiant la vitesse d'élimination de l'eau libre, elle joue sur les mécanismes de désagrégation eux-mêmes et elle entraîne des différences de résistance au déplacement, par l'intermédiaire des forces capillaires.

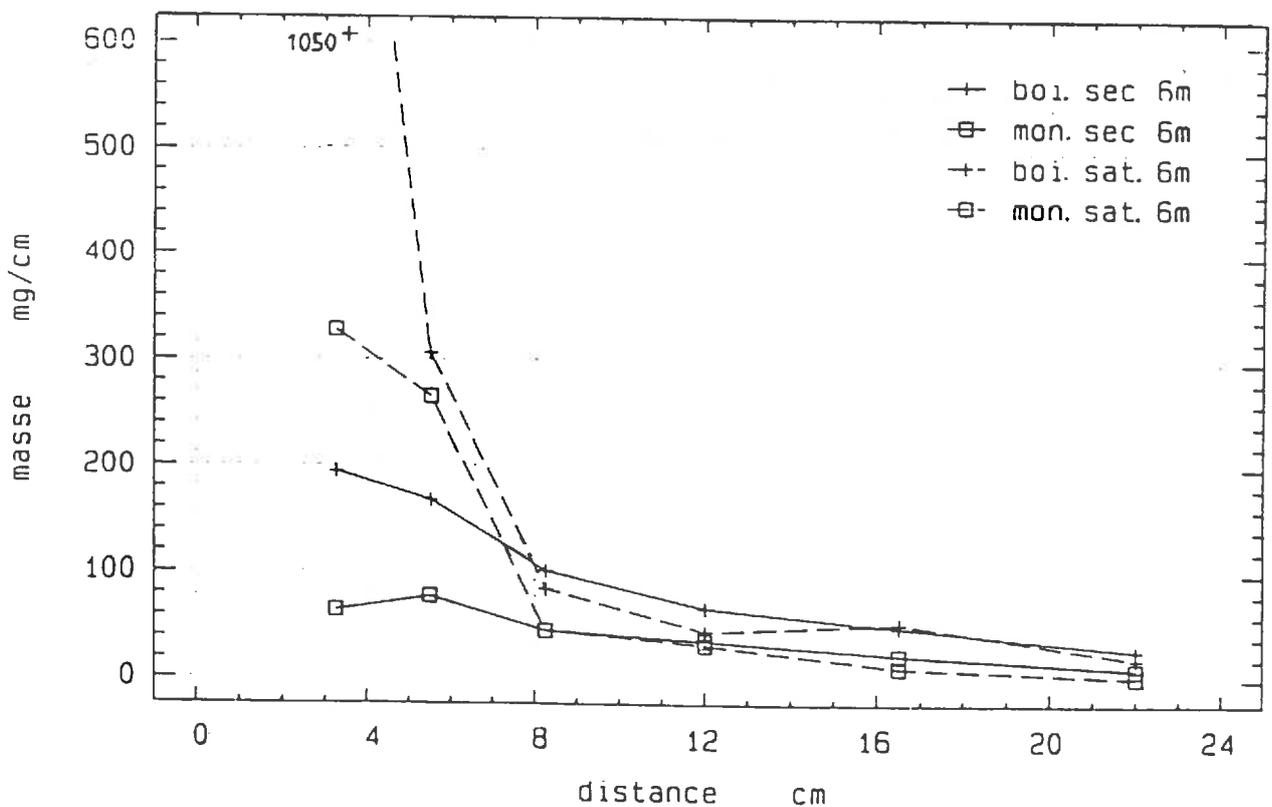


Figure 64: Influence de la granulométrie des matériaux sur les relations masse/distance pour deux états hydriques initiaux (gouttes de 4,5 mm de diamètre tombant de 6m)

o Si l'on cherche maintenant à comparer les résultats obtenus dans les mêmes conditions avec les deux matériaux, MONTLUEL et BOIGNEVILLE, qui correspondent aux extrêmes de notre gamme, on s'aperçoit que dans tous les cas le sol le plus stable est celui pour lequel les déplacements de particules à distance > 2 cm, sont les plus importants, ce qui s'explique très bien par le fait que les fragments issus de la désagrégation sont plus gros dans le cas de BOIGNEVILLE, et que la compétence des gouttes étant suffisante, le déplacement de ces fragments correspond à une masse plus élevée (fig.64).

Cependant de nombreuses précautions sont à prendre pour l'interprétation des résultats tels que nous les avons obtenus ; en particulier à cause de la durée des manipulations, elles intègrent différentes phases de comportement ; et également en raison du fait que l'on est quasiment jamais en régime stationnaire, c'est-à-dire que l'état de l'échantillon évolue au cours du test : dans certains cas où le déplacement est important, il y a beaucoup moins de terre sous les gouttes à la fin des 10 mn.

En outre, une part importante des déplacements, ceux à distance inférieure à 2 cm, n'est pas prise en compte dans les mesures effectuées.

#### **b) Signification et intérêt de la notion et des mesures du rejaillissement**

On peut maintenant aborder une discussion plus générale sur la signification de la notion de rejaillissement et des mesures de déplacements de particules qui peuvent être réalisées.

D'une manière générale on peut dire que les déplacements de particules sur une surface horizontale, sous l'action de gouttes tombant verticalement, sont isotropes, et que les distances de déplacement sont toujours inférieures à 30 cm. Le rejaillissement ne peut contribuer à l'érosion que dans certaines conditions : il faut une pente, ou un vent important à orientation privilégiée pour entraîner des déplacements de particules significatifs à l'échelle métrique (POESEN, 1985 et 1986 ; WRIGHT, 1986).

Ces situations ne sont pas à exclure, mais elles dépendent de facteurs topographiques et climatiques qui sortent du contexte de ce travail.

Le rejaillissement est surtout un bon indicateur de la quantité de particules détachées et éventuellement transportables par un ruissellement diffus ou en rigole (ROOSE, 1973 ; POESEN & SAVAT, 1981 ; SAVAT & POESEN, 1981 ; BOLLINNE, 1982 ; GOVERS, 1985 ; FARRÉS, 1987) .

Par ailleurs, deux points ressortent clairement de nos résultats :

1 – Les relations masse – distance dépendent étroitement de la taille des particules mobilisées par la désagrégation intervenant préalablement à la phase active de déplacement. Mais ce dernier ne modifie pas les D.T.P.R.

Or, nous avons montré que ces tailles dépendaient du mécanisme de désagrégation ; les valeurs de rejaillissement sont donc très dépendantes du contexte dans lequel on se trouve, et on ne peut pas considérer qu'elle soient caractéristiques d'un matériau donné.

Ces relations masse-distance introduisent donc un biais systématique et variable dans les mesures de rejaillissement.

2 – Il n'existe pas de relations univoques entre les déplacements de particules et la sensibilité à la désagrégation des matériaux. Des interactions complexes existent entre l'état initial des agrégats, les caractéristiques des pluies, et la phase dans laquelle on se trouve.

On comprend donc que des mesures effectuées à un pas de temps important, et pour lesquels on ne dispose que d'une masse totale de terre, soient difficiles à interpréter (WUSTAMDIN et al., 1983 ; RIEZEBOS & EPEMA, 1985).

En revanche, ces mesures sont bien représentatives de l'évolution structurale générale de la surface au cours de la période considérée, dans la mesure où on dispose de la distribution de la taille des particules déplacées (RHOTON et al., 1982), et de la cinétique du processus.

On en arrive donc à la conclusion que la simple mesure du déplacement des particules sous l'impact des gouttes n'apporte pas d'informations pour prévoir ou mesurer l'état d'évolution structurale d'un sol donnée. Elle renseigne en revanche sur l'ordre de grandeur de la quantité de particules disponibles pour migrer, et donc sur les pertes en terre potentielles.

En outre, les mesures de déplacements de particules que nous avons réalisées nous ont permis de mettre en évidence la cinétique du rejaillissement et les différentes phases successives de comportement sous la pluie (Mc INTYRE, 1958 ; VALENTIN, 1981 ; BOIFFIN, 1984 ; FARRES, 1987).

## CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

Après avoir rappelé quelques définitions relatives aux caractéristiques des pluies, nous avons pu dans cette partie, répondre aux différentes questions qui nous étaient posées en utilisant, soit un goutteur sur des petits lots d'agrégats, soit un simulateur sur des massifs d'agrégats calibrés.

o Les premiers résultats montrent que les mécanismes analysés dans la première partie interviennent bien sous l'action des pluies, de manière plus ou moins simultanée. Ils confirment également les hypothèses avancées, quant au déterminisme de ces mécanismes, à savoir, l'influence de l'état hydrique initial et celle de la composition granulométrique des matériaux ; la dimension et la quantité de particules produites sont également conformes à ce qui était prévu.

o Dans le chapitre suivant, nous avons étudié l'influence de quelques paramètres pluviométriques sur ces mécanismes de désagrégation. Les résultats font clairement ressortir l'existence de deux composantes dans l'action des pluies : l'eau intervient d'une part, du fait de sa seule présence par l'intermédiaire des phénomènes liés à la réhumectation, et d'autre part, en relation avec l'énergie mécanique des gouttes.

La part relative de ces deux composantes est variable selon l'état hydrique des agrégats, et il est donc nécessaire de définir différents critères d'agressivité des pluies correspondant à l'une ou l'autre de ces composantes.

Dans le premier cas, c'est la vitesse de réhumectation des agrégats qui est le paramètre déterminant, alors que dans le second, c'est bien l'énergie cinétique cumulée.

o Nous avons ensuite abordé l'aspect dynamique et morphologique de la dégradation structurale superficielle. Différentes étapes du développement des croûtes ont été identifiées, la cinétique de formation et la structure résultante des croûtes ont pu être analysées, et deux situations hydriques différentes ont été comparées ; enfin, quelques données sur le comportement hydrodynamique des croûtes dans les deux cas ont été présentées.

Les résultats de cette expérience sont en accord avec l'analyse précédente et les hypothèses proposées. Ceci montre, qu'à partir de cette analyse, il doit être possible de modéliser le comportement structural superficiel des sols limoneux sous l'action des pluies. Notre expérimentation ne constitue cependant qu'une étape intermédiaire pour le passage aux conditions naturelles : il ne s'agit encore que d'une situation bien particulière, aussi bien en ce qui concerne la structure initiale que l'épisode pluvieux.

o Nous avons ensuite cherché à mesurer les déplacements de particules sous l'impact des gouttes. Il en ressort que ceux-ci sont très liés à la dimension des particules mobilisées, et donc aux mécanismes de désagrégation. D'autre part, bien que ce déplacement intervienne bien évidemment dans l'évolution structurale superficielle, il n'existe pas de relations univoques entre la sensibilité à la désagrégation des matériaux et les masses déplacées, ni entre ces dernières et les caractéristiques des croûtes formées.

Des interactions complexes entre les paramètres climatiques, les conditions initiales, et la nature des matériaux existent.

L'ensemble des résultats de cette partie permet à la fois de valider et de compléter l'analyse effectuée dans la première partie du travail. Les relations entre caractéristiques des pluies, mécanismes de désagrégation et évolution structurale superficielle ont pu être établies. Elles devraient permettre de construire une première esquisse de modélisation de cette évolution structurale sous l'action des pluies.

## **SYNTHESE ET CONCLUSION GENERALE**

## **SYNTHESE ET CONCLUSION GENERALE**

Nous rappellerons dans un premier temps les résultats relatifs aux processus élémentaires, en précisant à chaque fois les conditions de réalisation, les types de particules produites et les principaux facteurs de variation.

Puis nous chercherons à construire, à partir de ces données, un modèle de comportement structural de la surface du sol sous l'action des pluies.

### **1 – LES DIFFERENTS PROCESSUS ELEMENTAIRES DE LA DESAGREGATION**

#### **a) La désagrégation totale par éclatement**

Elle intervient lorsque des agrégats secs sont mis au contact avec un volume d'eau suffisamment important pour entraîner un piégeage de leur atmosphère interne.

Cela correspond donc à des conditions d'état initial et de climat bien particulières.

Sur le terrain ce processus ne peut intervenir que lors d'un apport d'eau brutal sur une surface sèche et suffisamment affinée : c'est à dire essentiellement en cas d'orages d'été, pour lesquels l'intensité initiale et la taille des gouttes sont suffisantes. C'est aussi le cas des irrigations par submersion. Dans le cas d'une pluie moins agressive, on peut également se trouver dans des conditions favorables à ce mécanisme, lorsqu'il existe un couvert végétal assurant une concentration de la pluie pouvant entraîner la formation de grosses gouttes.

Cette désagrégation par éclatement entraîne la production de petites particules dont la dimension est, pour tous les matériaux étudiés, inférieure à 500  $\mu\text{m}$ . La totalité des premiers millimètres de sol peut ainsi être mobilisée par seulement quelques millimètres de hauteur de pluie. Cela conduit donc très rapidement à la formation d'une croûte structurale continue, qui à son tour limite l'infiltrabilité et peut déclencher une seconde phase d'évolution structurale liée à l'apparition d'un excès d'eau superficiel si l'intensité de la pluie est supérieure à l'infiltrabilité (croûtes de dépôt).

Cette diminution d'infiltrabilité est cependant variable en fonction de l'organisation des croûtes structurales, et donc de la dimension des particules produites par la désagrégation.

Or nous avons vu que cette dimension était liée à différents paramètres, dont la teneur en argile des matériaux, la vitesse d'imbibition des agrégats (qui dépend de la présence de matières organiques), les possibilités d'échappement de l'air interne des agrégats, l'état hydrique initial et la vitesse d'apport de l'eau...

le résultat de cet éclatement peut donc en fait être très variable en fonction des caractéristiques des matériaux mais aussi des conditions locales au moment de la pluie.

L'aspect le plus important de ce processus est lié à la dynamique de l'évolution structurale associée : lorsque les conditions sont réunies (état initial sec et affiné, et intensité initiale de la pluie élevée), la fermeture de la surface peut intervenir après seulement quelques mm de pluie.

#### **b) La microfissuration**

Nous avons vu que pour des matériaux limoneux ce processus ne se distinguait pas du précédent par la nature du mécanisme intervenant, qui est toujours l'éclatement, mais par l'intensité de son action et donc la nature des particules résultantes ; en effet celles ci sont alors beaucoup plus grossières (200  $\mu\text{m}$  à 1 ou 2 mm). C'est cet aspect qualitatif qui justifie la dénomination de microfissuration de ce processus, par analogie avec la microfissuration par gonflement que l'on observe sur les matériaux argileux.

La microfissuration par éclatement partiel intervient donc en continuité avec la désagrégation totale par éclatement : l'intensité de la fragmentation diminue régulièrement lorsque le volume poral libre à l'air décroît, jusqu'au point d'entrée d'air. Cela correspond à une intensité moins importante de l'éclatement et à une dimension plus grossière des particules produites. Ceci peut être lié à différentes causes :

– les caractéristiques de l'apport d'eau sont telles que l'air n'est pas piégé au sein des agrégats (faible intensité de la pluie, dimension des gouttes réduite par rapport au calibre des agrégats),

– l'état hydrique initial des agrégats est tel que seule la porosité lacunaire la plus grossière est libre à l'air, ce qui augmente la dimension de la maille de fragmentation ;

– la teneur en argile des matériaux est telle que la densité du réseau de porosité lacunaire est réduite, ce qui entraîne une augmentation de la dimension des particules produites, même dans le cas d'un apport d'eau brutal. Il est probable que dans ce cas, il y

ait conjointement une augmentation de l'importance du mécanisme de microfissuration par gonflement.

Ces différents points font que la microfissuration par éclatement partiel est probablement le processus le plus fréquent à la surface des sols cultivés, en climat tempérés :

- o les intensités des pluies sont souvent moyennes (2 à 15 mm/h),

- o les fréquentes alternances de pluies et d'éclaircies entraînent des variations importantes de l'état hydrique de la surface des sols,

- o la dimension des éléments structuraux constituant la couche superficielle est le plus souvent supérieure à celle des plus grosses gouttes, ce qui limite le piégeage d'air et l'éclatement total.

Le résultat de cette microfissuration consiste donc en un affinement de la surface. Il peut se développer une croûte structurale, mais dont la porosité et donc l'infiltrabilité restent élevées. Cependant, la surface est ainsi rendue plus vulnérable aux agressions hydriques ultérieures.

l'influence des facteurs de constitution est de même nature que vis-à-vis de l'éclatement total : les particules produites sont d'autant plus grosses que la teneur en argile est élevée et que la mouillabilité est faible, mais il s'agit le plus souvent de fragments millimétriques.

Pour des matériaux à porosité lacunaire réduite et à gonflement potentiel important, une microfissuration analogue peut intervenir, mais elle est alors liée au gonflement des matériaux lors de l'humectation.

### **c) La désagrégation mécanique**

Elle est liée à la force d'impact des gouttes de pluie, qui dépend de leur masse et de leur vitesse de chute.

Elle intervient essentiellement lorsque les agrégats sont saturés. En effet, avant saturation, le choc peut être amorti par l'air présent. Elle peut donc venir soit de manière immédiatement consécutive à l'éclatement total ou à la microfissuration, soit dès le début de la pluie, si les agrégats sont déjà saturés.

Les situations correspondantes sont donc celles où l'humidité de surface reste constamment élevée, c'est-à-dire les périodes pluvieuses prolongées, les situations hivernales. ..

Les particules produites sont toujours très fines ( $< 100 \mu\text{m}$ ), c'est-à-dire qu'il s'agit de particules quasi-élémentaires, au moins au niveau de la fraction limoneuse, mais pas forcément en ce qui concerne les argiles.

Ce processus se différencie nettement des précédents, par le fait que la quantité de particules produites par unité de temps ou de hauteur de pluie est beaucoup plus faible : il s'agit d'un processus d'évolution structurale lent, mais cumulatif.

Etant donné la nature des particules produites, cela peut conduire à terme, à une désagrégation totale de la couche superficielle des sols.

Cependant, ce mécanisme peut être rapidement neutralisé par le couvert végétal qui interrompt la chute des gouttes et limite leur force d'impact.

L'importance de ce processus, en terme de quantité de particules mobilisée, est relativement indépendant du calibre initial des agrégats. Par ailleurs, en fonction des caractéristiques de constitution des matériaux (résistance mécanique à l'état humide), ce processus intervient probablement pour des seuils de force d'impact des pluies différents, et la quantité de particules produites peut donc être très variable.

#### d) Dispersion

En plus des trois principaux mécanismes dont nous venons de parler, nous avons montré qu'une dispersion pouvait intervenir dans certains cas, mais pour des matériaux à teneurs en sodium nettement supérieures à celles couramment rencontrées dans les sols limoneux cultivés.

Lorsque c'est le cas, il y a désagrégation totale des fragments en particules élémentaires, quelque soit l'état initial, pour toute mise en contact avec un excès d'eau. Cette désagrégation est facilitée si une énergie mécanique intervient conjointement à l'apport d'eau.

Cependant une dispersion partielle, liée à cette énergie mécanique en présence d'un excès d'eau, peut également intervenir pour des matériaux non sodiques.

Ces résultats illustrent bien la diversité de la notion de désagrégation. Ce terme général correspond en fait à la fois à des phénomènes de fragmentation plus ou moins fine, mais n'impliquant pas de réarrangement des constituants élémentaires, et à des phénomènes d'individualisation, partielle ou totale, de particules élémentaires ou quasi-élémentaires.

L'analyse du déterminisme de ces différents processus nous permet de proposer un premier schéma du comportement instantané de la surface d'un sol sous l'action d'une

pluie (figure 65). La signification de chacun des termes de ce schéma peut être précisée, à partir des différents résultats présentés dans ce travail.

## **2 – ESQUISSE DE MODELISATION DU COMPORTEMENT INSTANTANE DE LA SURFACE SOUS L’ACTION D’UNE PLUIE**

Un premier schéma peut être construit en intégrant les différents processus élémentaires que nous venons de décrire. Il doit donc prendre en compte :

– l’état hydrique et structural initial de la surface du sol, qui est lui-même fonction, du contexte climatique et cultural, et des caractéristiques des matériaux de surface et de l’ensemble du profil du sol ;

– les caractéristiques de l’épisode pluvieux considéré, telles que nous avons pu les définir;

– les caractéristiques des matériaux les plus déterminantes vis-à-vis des processus de désagrégation et des particules produites.

### **a) L’état hydrique et structural initial**

L’état hydrique initial est un paramètre essentiel du déterminisme de la désagrégation. Les possibilités d’intervention des différents mécanismes sont liées au domaine hydrique dans lequel se trouvent les agrégats. L’importance relative des trois domaines que nous avons définis est très variable selon la nature des matériaux. Ils sont limités, d’une part, par le point d’entrée d’air des agrégats, qui correspond à un taux de saturation de 100 % soit des pF compris entre 2 et 3, et d’autre part, par l’état hydrique correspondant à la possibilité d’éclatement total lors d’une immersion, soit un taux de saturation compris entre 0.3 et 0.6 selon la teneur en argile des matériaux, c’est-à-dire pour des pF allant de 3 à 5.

Cependant l’état hydrique des agrégats de surface est également lié aux échanges hydriques avec les couches inférieures du sol qui sont fonction de la continuité et des caractéristiques de l’espace poral de ces couches. Cet aspect est assez mal connu et demanderait à être approfondi.

La structure initiale, c’est-à-dire essentiellement le calibre des agrégats et la porosité structurale de la surface, joue un rôle, essentiellement vis-à-vis des possibilités d’éclatement total. Compte-tenu du calibre moyen des gouttes de pluie, celui-ci ne peut intervenir que pour des agrégats de dimension inférieure à celle des gouttes, sinon il existe une possibilité d’échappement d’air qui diminue l’intensité de l’éclatement, et donne un

résultat du type microfissuration. Cet état structural initial résulte des pratiques culturales et des conditions climatiques au cours des différents travaux (MANICHON, 1982 ; PAPY, 1984 ; STUTTARD, 1984 ; ZOBECK et ONSTAD, 1987).

Par ailleurs, il est probable que plus la structure initiale est grossière, plus il faut produire une quantité importante de particules pour que le remplissage interstitiel conduise à la formation d'une croûte continue, en particulier dans le cas d'un régime de désagrégation mécanique cumulatif (BOIFFIN, 1984 ; ARNDT, 1985).

Un bon critère structural pourrait donc être le pourcentage de surface constitué d'agrégats inférieurs à 2 ou 3 mm, qui est la limite de taille pour qu'un éclatement poussé puisse intervenir.

#### **b) Les caractéristiques de l'épisode pluvieux**

Elles influent directement sur le déterminisme de la désagrégation, mais aussi sur la quantité de particules produites et donc sur la dynamique de l'évolution structurale.

Nous avons proposé de prendre en compte deux critères pour caractériser les épisodes pluvieux, afin de tenir compte du déterminisme propre des différents processus.

Le premier est relatif à l'intensité initiale de l'épisode pluvieux, correspondant à la phase d'humectation de la surface. Il est particulièrement déterminant pour les processus de désagrégation liés à l'éclatement.

Le second est relatif à l'énergie totale reçue durant l'épisode pluvieux, et il détermine l'intensité de la désagrégation mécanique, consécutive ou non des autres processus, ainsi que la quantité totale de particules mobilisées, et éventuellement déplacées par rejaillissement.

Différentes expressions de ces paramètres sont possibles, nous proposons pour notre part, de considérer l'intensité moyenne des 2 ou 3 premiers millimètres de l'épisode pluvieux ( $I_n$ ), et l'énergie cinétique cumulée de l'épisode (indices KE) ; le poids respectif de ces deux critères doit être fonction de l'état initial de la surface (tableau 9).

D'autre part, ces caractéristiques pluviométriques peuvent être modifiées par la présence d'un couvert végétal, qui d'un côté limite l'énergie cinétique réelle de la pluie, mais de l'autre peut favoriser la formation de grosses gouttes par concentration de l'eau sur les feuilles, et donc augmenter l'agressivité, surtout vis-à-vis de l'éclatement (MORGAN, 1985 ; BRANDT, 1988). La prise en compte de la nature et du taux de recouvrement du couvert végétal peut donc être un élément de pondération supplémentaire de l'agressivité des pluies.

Ces résultats montrent que l'agressivité de la pluie vis-à-vis de l'évolution structurale superficielle est variable selon l'état de la surface. Comme cet état évolue au cours de la pluie elle-même, il semble nécessaire de décrire la structure des séquences

pluvieuses, pour arriver à caractériser avec précision l'effet des pluies sur la surface des sols.

### **c) Les caractéristiques des matériaux de surface**

Elles jouent un rôle important à la fois vis-à-vis du déterminisme des processus de désagrégation, et par rapport à la nature et la quantité de particules produites.

On peut retenir, dans la gamme des matériaux limoneux, deux caractéristiques essentielles :

o la teneur en argile, qui intègre aussi leur qualité, intervient à de nombreux niveaux : du point de vue de la structure des agrégats, l'augmentation du taux d'argile contribue à limiter le volume poral lacunaire et la dimension des pores, ce qui a des conséquences sur la vitesse de pénétration de l'eau dans ces pores et sur le volume d'air piégeable, et donc sur l'intensité des processus de désagrégation liés à l'éclatement ; pour ces mêmes raisons les particules produites sont d'autant plus grossières que la teneur en argile est élevée ; ce paramètre joue également un rôle important vis-à-vis de la résistance mécanique des agrégats à l'état humide, et donc de l'agressivité de la pluie en régime de désagrégation mécanique ; d'autre part, l'état hydrique des agrégats de surface est largement fonction de cette teneur en argile du fait de son influence sur la rétention en eau des matériaux.

o La seconde caractéristique essentielle des matériaux est leur statut organique, principalement du fait de son rôle sur la mouillabilité des surfaces. Il est probable que seule une fraction de la matière organique totale soit efficace vis-à-vis de cet aspect, c'est pourquoi la teneur en matière organique totale n'est pas forcément une variable significative. Il faudrait prendre en compte sa teneur et sa localisation. Mais ces aspects sont encore mal connus. De plus il existe certainement une variabilité importante dans le temps de ce rôle des substances organiques, liée à la fois à la dynamique de l'activité biologique dans les sols, et à leur histoire hydrique.

En effet, le caractère hydrophobe s'exprime d'autant plus que les conditions sont sèches. Par ailleurs, ce paramètre intervient surtout en régime de désagrégation lié à l'éclatement, et n'a que peu d'influence vis-à-vis de la désagrégation mécanique, puisque le problème de l'humectation ne se pose plus.

Certains aspects relatifs à l'influence des caractéristiques des matériaux seraient à approfondir. Leur étude nécessiterait l'utilisation d'une gamme plus large de matériaux, en particulier du point de vue de leur statut organique.

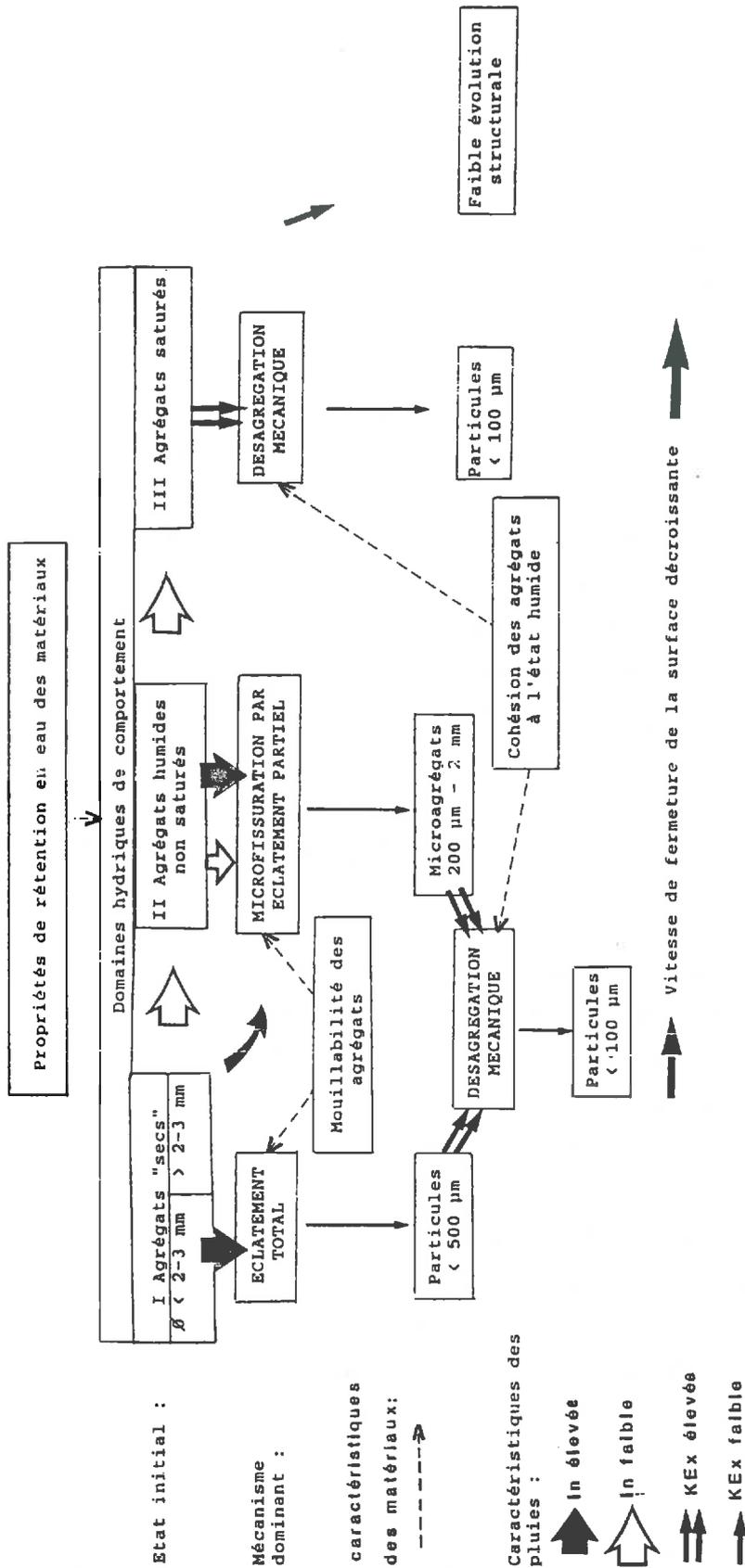


Figure 65: Modèle de l'évolution structurale superficielle sous l'action d'une pluie.

En définitive, il ressort de nos résultats que tous les mécanismes sont possibles, à des degrés divers, pour tous les matériaux étudiés. Ce sont les gammes de variation des différents facteurs et paramètres qui déterminent les probabilités d'intervention des différents mécanismes pour chacun des matériaux.

Par ailleurs, on a pu constater que la structure des croûtes formées était voisine de celle des agrégats initiaux. On peut donc penser que ces structures sont liées à des propriétés texturales des matériaux. Cependant, on n'a pas atteint dans nos expériences les stades d'évolution des croûtes les plus avancés. Il s'agissait plus de décrire la dégradation structurale que les croûtes elles-mêmes.

Le schéma que l'on peut élaborer est fondé sur les interactions que nous venons d'évoquer entre les trois types de caractéristiques. Elles sont représentées sur la figure 65.

### **3 – EVOLUTION STRUCTURALE AU COURS D'UNE SEQUENCE CLIMATIQUE**

L'évolution structurale au cours d'une séquence climatique (correspondant par exemple à la période d'implantation d'une culture), résulte de l'action d'une succession d'épisodes pluvieux, dont l'effet est cumulatif.

Partant d'un état initial donné, (par exemple la préparation d'un lit de semence), l'état de la surface à chaque instant devrait pouvoir être déterminé à partir des données climatiques et du schéma de comportement instantané.

En effet, les caractéristiques du matériau étant connues, et relativement stables à cette échelle de temps, il ne reste que les caractéristiques de chaque épisode pluvieux à connaître, ainsi que l'état initial hydrique et structural qui est lui même déterminé par le climat, l'évolution au cours de l'épisode précédent, et les propriétés de rétention en eau du matériau .

On peut donc imaginer, dans la mesure où le schéma de comportement instantané serait validé, d'élaborer un modèle global, fonctionnant par récurrence à partir de ce schéma et d'un modèle d'évolution hydrique de la surface qui intégrerait de manière précise les données climatiques.

Sans aller jusque là, il est possible en suivant le même raisonnement, d'imaginer à titre d'exemple quelques scénarios d'évolution structurale correspondant à des séquences climatiques données (fig. 66).

Types de séquences climatiques

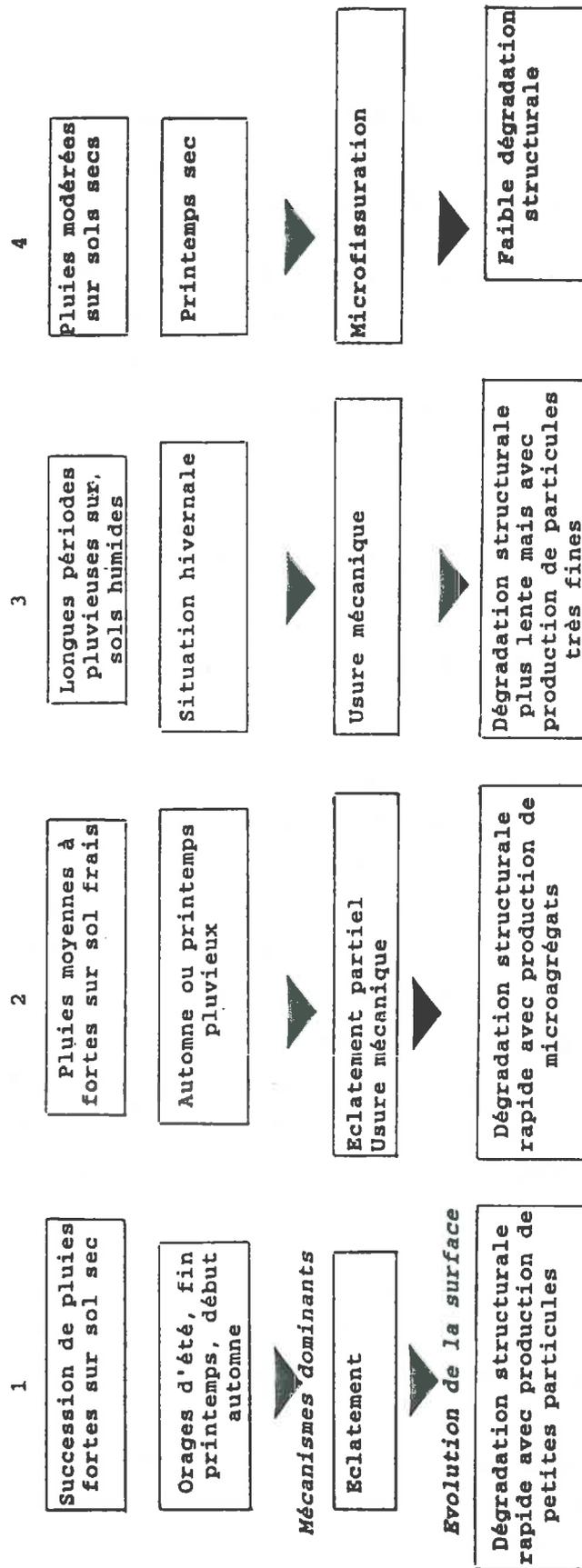


Figure 66: Quelques scénarios d'évolution structurale de la surface du sol pour des séquences climatiques types en climat océanique.

Ces scénarios très schématiques, montrent qu'il devrait être possible avec un tel modèle, de prévoir sans trop de risques d'erreur, en connaissant l'état initial et les caractéristiques des matériaux, l'évolution de l'état de surface d'une parcelle et les risques d'apparition d'excès d'eau.

– Dans le premier scénario, des particules de très petites tailles sont mobilisées très rapidement dès le début de la pluie, la structure s'effondre, et un colmatage interstitiel intervient rapidement.

– Dans le second scénario, les particules mobilisées sont plus grossières, et la réduction de la porosité de surface est moins nette.

– Lorsque la surface reste constamment humide, (scénario 3) l'évolution structurale est plus lente et consiste en un colmatage progressif de la porosité interagrégats par des petites particules mobilisées par désagrégation mécanique.

– Enfin, dans le cas du quatrième scénario, seul un affinement progressif de la structure intervient par microfissuration.

Ces types d'évolutions sont évidemment différenciés selon la nature des matériaux de surface.

Les rendements en particules mobilisées, pour une hauteur et une intensité de pluie données, sont très variables selon les mécanismes de désagrégation. Ils sont donc très différents pour les quatre scénarios :

– pour les deux premiers, la quasi-totalité des 10 à 20 mm superficiels du sol seraient mobilisées, pour des hauteurs de pluie de quelques millimètres (mais avec des particules plus grossières dans le second scénario) ;

– pour les deux autres, il n'y aurait, pour une même hauteur de pluie que très peu de particules mobilisées, sauf si l'énergie cinétique est très forte par rapport à la résistance des agrégats à l'état humide.

N'ayant pas effectué de mesures d'infiltrabilité des croûtes, nous ne pouvons discuter des risques d'excès d'eau superficiels qu'à partir des observations effectuées au cours de l'expérience sous pluie simulée sur les cylindres d'agrégats, et sur la base d'hypothèses relatives aux relations entre structure, état hydrique et propriétés hydrodynamiques des croûtes (HILLEL & GARDNER, 1969 ; AHUJA, 1974 ; BEN-HUR et al., 1985 ; SMILES et al., 1988).

– Dans le premier scénario, on considère que le sol est toujours sec au début de la pluie ; l'expérience réalisée dans ces conditions sous pluie simulée a montré qu'un excès d'eau pouvait apparaître en surface après seulement 20 mm de pluie à une intensité de 20 mm/heure, c'est à dire, moins de 7 mm de pluie, et ceci pour une surface formée initialement d'agrégats de 3-4 mm ; avec une agressivité plus importante, les mesures réalisées avec le goutteur sur les mêmes agrégats ont montré que 2 mm de pluie suffisaient à désagréger complètement une couche d'agrégats initialement secs.

Il est donc probable que dans ce type de situation (pluies fortes sur sols secs) les risques de ruissellement soient très importants pour toute pluie de hauteur supérieure à quelques mm et d'intensité suffisante, et ce d'autant plus que la surface est déjà fermée. Il s'agit donc d'un risque élevé, mais ponctuel, lié aux caractéristiques de chaque pluie.

Il doit exister pour chaque sol un seuil de hauteur de pluie, en dessous duquel il ne peut pas y avoir de ruissellement. Ce seuil correspond à la pluie d'imbibition, c'est à dire à la hauteur d'eau nécessaire à resaturer la surface avant que le refus à l'infiltration n'apparaisse (VALENTIN et al., 1986). Il s'agit en quelque sorte du pouvoir tampon de la surface vis-à-vis du ruissellement. Un deuxième tampon existe : il s'agit de la détention superficielle qui est fonction de la rugosité de la surface et de la pente.

– Dans le second scénario, on suppose que le sol reste frais, la valeur de ce tampon est donc réduite. En revanche, la désagrégation est moins poussée, et la structure des croûtes résultantes est probablement plus favorable à l'infiltration. Cependant le risque de ruissellement est important et de manière plus chronique, c'est-à-dire plus indépendamment des caractéristiques des pluies.

Le facteur le plus important dans ce cas, est certainement la sensibilité des matériaux (taille des particules résultantes).

– En situation hivernale, l'évolution structurale est plus lente du fait de l'absence de phénomènes d'éclatement ; cependant compte-tenu de la durée de cette situation, les risques deviennent rapidement chroniques une fois le stade de croûte sédimentaire atteint. Le sol étant constamment saturé, le ruissellement peut intervenir à la moindre pluie, les valeurs d'infiltrabilité dans ces conditions étant de l'ordre du mm/h (BOIFFIN et al., 1988 ; EIMBERCK, 1988).

Seule la rugosité de surface peut jouer le rôle de tampon et limiter les risques.

– Quant au dernier scénario, c'est celui qui semble entraîner les risques les moins importants : en effet, l'évolution lente de la structure est combinée à des apports d'eau modérés et à des conditions hydriques de la surface favorables. On peut cependant se

rapprocher du premier scénario, lorsque la structure de la surface est très affinée, ou bien dans le cas d'une pluie ponctuelle plus agressive.

Par ailleurs, en dehors du ruissellement, des problèmes agronomiques liés à la fermeture de la surface peuvent se poser. Ils concernent essentiellement l'implantation et la levée des semis. Les problèmes se posent en particulier dans deux cas :

– en présence d'une croûte continue et saturée, la réduction de l'alimentation en oxygène de la graine ou de la plantule peut devenir un facteur limitant (RICHARD, 1988),

– d'autre part, une croûte continue et sèche peut opposer un obstacle mécanique à la levée des plantules.

Si l'on fait intervenir les caractéristiques des matériaux dans ces différents scénarios, on est amené à discuter de leur sensibilité.

Pour les deux premiers, la sensibilité des matériaux sera essentiellement fonction du risque de piégeage d'air, et donc à la fois de leur porosité, de la mouillabilité des agrégats, et de leur probabilité d'être non saturés.

Pour le troisième scénario, la sensibilité des matériaux sera déterminée par leur résistance mécanique à l'état humide.

Ainsi, de même que l'agressivité des pluies, la sensibilité des matériaux apparaît comme un caractère contingent de la situation dans laquelle se trouve le sol.

## CONCLUSION

Notre démarche visait essentiellement à étudier le déterminisme de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies, particules qui d'une part constituent les croûtes superficielles, et d'autre part sont susceptibles d'être déplacées par le ruissellement.

Pour cela, nous avons travaillé au laboratoire en conditions contrôlées, sur des fragments de terre prélevés à la surface de sols cultivés, et nous avons analysé les mécanismes de la désagrégation par l'eau, qui est à l'origine de la production de ces particules.

Le choix des expérimentations et les hypothèses de travail ont été déterminés par les résultats des travaux antérieurs sur le sujet, réalisés principalement in-situ, en conditions naturelles (BOIFFIN, 1984), ou sous pluies simulées (VALENTIN, 1981).

Les résultats obtenus nous ont permis de répondre aux questions posées, en particulier par la mise en évidence des interactions existant entre les principaux facteurs du déterminisme de la désagrégation, et par la description des conséquences de la désagrégation vis-à-vis de l'évolution structurale, en terme de masse et de distribution dimensionnelle des particules résultantes.

Le schéma d'évolution structurale superficielle proposé sur la base de ces résultats doit maintenant être validé en conditions naturelles. La confrontation des distributions de taille des particules produites dans les conditions expérimentales et dans les conditions naturelles, pour différents types de situation, devrait permettre d'effectuer cette validation.

La valorisation de ces résultats passe par leur couplage avec l'évaluation des propriétés mécaniques et hydrodynamiques des croûtes superficielles formées, en relation avec leur structure, afin d'arriver à une prévision des risques d'échec des semis, et des risques de ruissellement et d'érosion.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AHUJA L.R., 1974. Applicability of the Green-Ampt approach to water infiltration through surface crust. *Soil Science*, Vol. 118, n° 5, 283-288.
- AL-DURRAH M., BRADFORD J.M., 1981. New methods for studying soil detachment due to waterdrop impact. *Soil Sci. Soc.Am. J.* 45, 949-953.
- AL-DURRAH M., BRADFORD J.M., 1982a. Parameters for describing soil detachment due to single water drop impact. *Soil Sci.Soc. Am. Journal* 46, 836-840.
- AL-DURRAH M., BRADFORD J.M., 1982b. The mechanics of raindrop splash on soil surfaces. *Soil Sci. Soc. Am.J.*,46, 1086-1092.
- ARNDT W., 1985. Factors affecting the nature and impedance of soil surface seals at Katherine N.T. CSIRO. Divisional report N° 79. 32 p.
- AUZET V., 1987a. L'érosion des sols cultivés en France sous l'action du ruissellement. *Annales de géographie* N° 537, p.529- 556.
- AUZET V., 1987b. L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture : Aspects agronomiques. Rapport Ministère de l'Environnement. 60 p.
- AWADHWAL N.K., THIERSTEIN G.E., 1985. Soil crust and its impact on crop establishment : a review. *Soil and tillage res.* 5, 289-302.
- AZZAOUI M., 1988. Comportement et organisation de matériaux argileux soumis à des contraintes hydriques et mécaniques. Rôle des différents types de forces d'hydratation. Thèse Univ. Paris VI, 240 p.
- BEN-HUR M., SHAINBERG I., BAKKER D., KEREN R., 1985. Effect of soil texture and CaCO<sub>3</sub> content on water infiltration in crusted soil as related to water salinity. *Irrig. Sci.* 6, 281-294.

- BEALS D., DICKINSON W.T., HELSDON D.S., PALL R., 1983. An approach for characterizing falling water droplets. *Canadian Agricultural Engineering*, vol. 25, n° 2, 189-192
- BOIFFIN J., 1976. Histoire hydrique et stabilité structurale de la terre. *Ann. Agron.*, 27 (4), 447-463.
- BOIFFIN J., SEBILLOTTE M., 1976. Climat, stabilité structurale et battance. Essai d'analyse d'un comportement du sol au champ. *Ann. Agron.*, 27 (3), 295-325.
- BOIFFIN J., 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse de docteur-ingénieur. INA-PG, 320 p + Annexes.
- BOIFFIN J., MONNIER G., 1986. Infiltration rate as affected by soil surface caused by rainfall. *Int. Symp. on the assessment of soil surface sealing and crusting*, Gand, Belgique.
- BOIFFIN J., PAPY F., PEYRE Y., 1986. Systèmes de production, systèmes de culture et risque d'érosion dans le pays de Caux. Rapport INRA – INAPG – DIAME. 154 p. + annexes.
- BOIFFIN J., BRESSON L.M., 1987. Dynamique de formation des croûtes superficielles : apport de l'analyse microscopique. In : *Micromorphologie des sols. Actes de VII Réunion Internationale de Micromorphologie de sols*, Paris, Juillet 1985. FEDOROFF N., BRESSON L.M. et COURTY M.A. éd., AFES, 393-399.
- BOIFFIN J., PAPY F., EIMBERCK M., 1988. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I) Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion –Agronomie (à paraître).
- BOLLINNE A., 1982. Etude et prévision de l'érosion des sols limoneux cultivés en moyenne Belgique. Thèse Université de Liège. 356 p. + annexes.
- BOTTERO J.Y., 1979. Etude de l'hydrolyse des solutions aqueuses de chlorure d'aluminium. Thèse Nancy.
- BRANDT J., 1988. The transformation of rainfall energy by a tropical rainforest canopy in relation to soil erosion. *Journal of Biogeography*. 15, 41-48.
- BRUAND A., 1986. Contribution à l'étude de la dynamique de l'espace poral. Utilisation des courbes de retrait et des courbes de rétention d'eau. *Science du sol*. 24. N° 4. 351-362.

- BRYAN R.B., 1968. The development, use and efficiency of indices of soil erodibility. *Geoderma*, 2, 5-25.
- BUBENZER G.D., JONES B.A., 1971. Drop size and impact velocity effects on the detachment of soil under simulated rainfall. *Trans. ASAE* 14, 4, p 625-628.
- BULLOCK M.S., KEMPER W.D., NELSON S.D., 1988. Soil cohesion as affected by freezing, water content, time and tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52. 770-776.
- CAMBIER P., 1986. Organisation des constituants et interactions physicochimiques au sein des microagrégats de sols. Application au système ferrallitique kaolinite- oxyde de fer. Thèse Univ. Paris VI, 223 p.
- CASENAVE A. et VALENTIN C., 1988. Les états de surface de la zone sahélienne : influence sur l'infiltration. Ed. ORSTOM. 230 p.
- CHASSIN P., LE BERRE B., NAKAYA N., 1978. Influence des substances humiques sur les propriétés des argiles. IV) Hydratation des associations montmorillonite – acides humiques. *Clay. Minerals*. Vol. 13, n°1. 1-16.
- CHAUVEL A., PEDRO G., TESSIER D., 1976. Rôle du fer dans l'organisation des matériaux kaolinitiques. *Sc. du Sol* 2, 101-105.
- CHEN Y., TARCHITZKY J.T., BROUWER J., MORIN J., BENIN A., 1980. Scanning electron microscope observations of soil crusts and their formation. *Soil Sci.*, 130, 49-55.
- CHENU C., 1985. Etude expérimentale des interactions argiles- polysaccharides neutres. Thèse de doct. de l'univ. de Paris VII. 185 p.
- COLLINET J., VALENTIN C., 1985. Evaluation of factors influencing water erosion in west Africa using rainfall simulation. In *Challenges in African Hydrology and water resources*. IAHS Publ., N° 144, p. 451-461.
- CONCARET J., 1967. Etude des mécanismes de la destruction des agrégats de terre au contact des solutions aqueuses. *Ann. Agron.* , 18 (2), 65-90.
- COUSEN S.M., FARRER P.J., 1984. The role of moisture content in the stability of soil aggregates from a temperate silty soil to raindrop impact. *CATENA*, 11, 313-320.
- C.T.G.R.E.F., 1977. Structure fine de la pluie. in : *Informations techniques*. cahier 27. N° 3. 4 p.

DE LEENHEER L., DE BOODT M., 1959. Determination of aggregate stability by the change in mean weight diameter. *Int. Symp. Bodemstructuur. Gent*, 24, 257-266.

DE PLOEY J., 1978. A consistency index and the prediction of surface crusting on Belgian loamy soils. p. 135-137. In H. VOGT et T. VOGT. *Actes du colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen. Université L. Pasteur-STRASBOURG INRA COLMAR* 264 p.

DE PLOEY J., POESEN J., 1985. Aggregates stability, runoff generation and interrill erosion. In *Geomorphology and Soils*. Ed. : RICHARDS K.S., ARNETT R.R., ELLIS S., Pub. : Allen et Unwin. p. 99-120.

DE PLOEY J., BRYAN R.B., 1986. Time to runoff as a fonction of slope angle. In *Assessment of soil surface sealing and crusting. Proc. of the Symp. Ghent. 1985*. Ed. : CALLEBAUT, GABRIELS, DE BOODT. p. 106-119.

ECKERN P.C., 1954. Rainfall intensity as measure of storm erosivity. *Soil. Sc. Soc. Am. Proc.* p 212-216.

EIMBERCK M., 1988. Facteurs d'érodibilité des sols limoneux : cas du Pays de Caux. N° spécial des Cahiers ORSTOM –Série Pédologie. (à paraître).

ELLISON W.D., 1945. Some effects of raindrops and surface flow on soil erosion and infiltration. *Trans. Am. Geophys. Union*, 26, 415-429.

ELLISON W.D., 1947. Soil erosion. *Soil. Soc. Am. Proc.*, 12, 479- 484.

EMERSON W.W., 1962. The swelling of Ca-Montmorillonite due to water uptake in the liquid phase. *J. Soil Sci.* 13, 40.

EMERSON W.W., RAUPACH M., 1964. Reaction of P.V.A. with Montmorillonite. *Austr. J. Soil Res.* 2. 46-55.

EMERSON W.W., 1967. A classification of soil aggregates based on their coherence in water. *Aust. J. Soil Res.*, 5, 47-57.

FARRES P.J., 1980. Some observations on the stability of soil aggregates to raindrop impact. *CATENA*, 7, 223-231.

FARRES P.J., 1987. The dynamics of rainsplash erosion and the role of soil aggregate stability. *Catena*, Vol. 14, 119-130.

- FARRIS P.J., COUSEN S.M., 1985. Towards a standardised procedure for the measurement of soil aggregate stability to raindrop impact. *Earth Surface Processes*. 10, 321-329.
- FEODOROFF A., 1965. Mécanismes de l'érosion par la pluie. *Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dyn.* 7(2) : 149-163.
- FIES J.C., 1984. Analyse de la répartition du volume des pores dans les assemblages argile-squelettes : comparaison entre un modèle d'espace poral textural et les données fournies par la porosimétrie au mercure. *Agronomie*, 4 (9), 891-899.
- FIES J.C., STENGEL P., 1984. Relations entre la constitution granulométrique et minéralogique et les caractéristiques de l'espace poral des sols. Livre jubilaire du cinquantième de l'AFES, 235-240.
- FOURNIER F., 1960. Climat et érosion : la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques. Thèse. Paris, P.U.F., 201 p..
- FOSTER G.R., 1985. Understanding ephemeral gully erosion. Doc-mult., Purdue Univ., west La Fayette, 29 p. + Annexes.
- FRANCIS P. B., CRUSE R. M., 1983. Soil water matrix potential effects on aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47, 578-581.
- FREE G.R., 1960. Erosion characteristics of rainfall. *Agricultural Engineering*, 41 (7) 447-449 + 455.
- GHADIRI H., PAYNE D., 1977. Raindrop impact stress and the breakdown of soil crumbs. *J. of soil Science*. 28, 2, p 247-258.
- GHADIRI H., PAYNE D., 1986. The risk of leaving the soil surface unprotected against falling rain. *Soil and Tillage Research* 8. 119-130.
- GOVERS G., 1985. Selectivity and transport capacity of thin flows in relation to rill erosion. *Catena*. Vol. 12, 35-49.
- GOVERS G., EVERAERT W., POESEN J., RAUWS G., DE PLOEY J., 1987. Susceptibilité à l'érosion par rigole d'un sol limoneux : Essais dans le canale de Caen. *Bull. du Centre de géomorphologie de Caen – CNRS*, n° 333, 83-106.
- GRAS R., 1974. L'emprisonnement d'air lors de l'humectation des corps poreux. *Science du sol*. 1, 49-60.

- GREENLAND D.J., 1965. Interaction between clays and organic compounds in soils. Part II : Adsorption of soil organic compounds and its effect on soil properties. Soils and fertilizers. Vol. 28 N° 6, 521-532.
- GREENLAND D.J., RIMMER D., PAYNE D., 1975. Determination of the structural stability class of English and Welsh soils, using a water coherence test. J. Soil Sci. 23, 3. 294-303.
- GUNN R., KINZER G.P., 1949. The terminal velocity of fall for water drops in stagnant air. J. of meteorology. 6. 243-248.
- HARRIS R.F., CHESTERS G., ALLEN O.N., 1966. Dynamics of soil aggregation. Advances in Agronomy. 18. 107-168.
- HARTMANN R., DE BOODT M., 1974. The influence of the moisture content, texture and organic matter on the aggregation of sandy and loamy soil. Geoderma – 11, 53-62.
- HELALIA A. M., LETEY J., GRAHAM R. C., 1988. Crust formation and clay migration effects on infiltration rate. Soil Sci. Soc. Am. J., 52, 251-255.
- HENIN S., 1938. Etude physico-chimique de la stabilité structurale des terres. Thèse Paris, 70 p.
- HENIN S., FEODOROFF A. GRAS R., MONNIER G., 1960. Le profil cultural. L'état physique du sol et ses conséquences agronomiques. Sté d'Édition des Ingénieurs Agricoles. Paris.
- HENIN S., MONNIER G., 1956. Evaluation de la stabilité de la structure du sol. C.R. Viè Congrès Int. Science du Sol, Paris, Vol. B,49-52.
- HILLEL D., GARDNER W. R., 1969. Steady infiltration into crust- ted profiles. Soil Science – Vol. 108, n° 3, 137-142.
- HUDSON N.W., 1981. Soil conservation. Cornell University Press. Ithaca N.Y.
- JAMAGNE M., 1973. Contribution à l'étude pédogénétique des formations loessiques du nord de la France. Thèse de doctorat d'état, Université de Gembloux, 440 p.
- JARRY F., 1987. Le ruissellement sur les terres agricoles. Approche par simulation de pluie et par télédétection. Thèse Univ.Paris 7. 276 p.

KEMPER W.D., 1965. Aggregate stability. In BLACK. Methods of soil Analysis.. Amer. Soc. Agron. Inc., Madison. 511-519.

KEMPER W.D. et ROSENAU R.C., 1984. Soil cohesion as affected by time and water content. Soil Sci. Soc. Am. J. 48. 1001-1006.

KHEYRABI D., MONNIER G., 1968. Etude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. Ann. Agron., 19 (2), 129-152.

LAWRENCE G.P., 1977. Measurement of pores sizes in fine textured soils : a review of existing techniques. J. Soil Science, 28, 527-540.

LAWS J.D., 1941. Measurements of fall velocities of waterdrops and raindrops. Trans. Amer. Geophys. Union. p 709-721.

LE BISSONNAIS Y., 1985. Etude expérimentale de l'influence des conditionneurs de sol sur la micro-organisation et les propriétés physiques des argiles et des sols. DEA Univ. d'Orléans, 115p.

MANICHON H., 1982. Influence des systèmes de culture sur le profil cultural. Elaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse doc. ing. INA PG – 232 p.

MARSHALL I.S., PALMER E.M., 1948. The distribution of raindrops with size. Journal of Meteorology, 5, 165-166.

Mc INTYRE D.S., 1958. b. Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impacts. Soil Sci., 85, 261-266.

MERIAUX S., 1958. Stabilité structurale et composition des sols. C.R. Ac. Agric., 799-803.

MEYER L.D., 1967. Simulation of rainfall for soil erosion research. Transactions ASAE. vol. 8, n° 1, p 63-65.

MICHEL C., 1988. Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux. Ed. CEMAGREF 429 p..

MIHARA Y., 1951. Raindrops and soil erosion. Nat. Institute for Agric. Sc. (Japon) Série A.1, p 48-51.

- MONNIER G., 1965. Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. Thèse Paris. 140 p.
- MONNIER G., 1982. Méthodes d'évaluation des comportements structuraux et mécaniques des sols. 7 p. Doc. Multigs.
- MONNIER G., KONAN L., 1968. Influence des conditions de séchage des terres sur leur stabilité structurale. Ann. Agron., 19 (5), 541-551.
- MONNIER G., STENGEL P., FIES J.C., 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. Ann. Agron., 25 (4), 533-545.
- MONNIER G., STENGEL P., GUERIF J., 1982. Recherche de critères de la fertilité des sols et de son évolution en fonction du système de culture. C. R. Coll. CEE "Fertilité des sols et systèmes de culture". Bari, 35-57.
- MONNIER G. et BOIFFIN J., 1986. Influence des conditions d'utilisation agricole des sols sur l'érosion par l'eau ; cas des systèmes de culture de l'Europe de l'Ouest. in : Soil erosion in the European Community. Impact of changing Agriculture. Chisci & Morgan (eds).
- MONNIER G. et GUERIF J., 1988. Conséquences physiques et agronomiques du tassement des sols. C.R. Acad. Agric. Fr., 74, N° 1, 29-42.
- MORGAN R.P.C., 1985. Establishment of plant cover parameters for modelling splash detachment, in : Proc. Int. Conf. on soil Erosion and conservation. January 1983, Honolulu HI, USA. Soil conservation Society of America, Ankeny IA, 377-383.
- MORIN J., BENYAMINI Y., MICHAELI A., 1981. The effect of raindrop impact on the dynamics of soil surface crusting and water movement in the profile. J. hydrol. 52, 321-335.
- NEARING M.A., BRADFORD J.M., 1985. Single water drop splash detachment and mechanical properties of soils. Soil Sc. Soc., Am.J. 49, 547-552.
- NEARING M.A., BRADFORD J.M., 1987. Relationships between water drop properties and forces of impact. Soil Sc. Soc. Am. J. 51, 425-430.
- NORTON L.D., 1987. Micromorphological study of surface seals developed under simulated rainfall. Geoderma, 40, 127-140.

ONOFIOK O., SINGER M.J., 1984. Scanning electron microscope studies of surface crusts formed by simulated rainfall. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48, 1137-1143.

PALMER R.S., 1965. Waterdrop impact forces. *Transaction of the ASAE*.p 69-72.

PAPY F., 1984. Comportement du sol sous l'action des façons de reprise d'un labour au printemps. Effet des conditions climatiques et de l'état structural. Thèse doc. ing. INA PG. 232 p.

PAUWELS J.M., GABRIELS D. & EECKOUT G., 1976. Evaluation of different criteria to assess the stability of the soil surface. 3rd Int. Symp. on soil conditioning. Gent, 135-140.

PIHAN J., 1979. Risques climatiques d'érosion hydrique des sols en France. Coll. Erosion agricole des sols en milieu tempéré. Strasbourg Sept. 1978. 13-18.

POESEN J., SAVAT J., 1981. Detachment and transportation of loose sediments by raindrop splash. II : Detachability and transportability measurements. *CATENA*, 8, 119-41.

POESEN J., 1985. An improved splash transport model. *Z Geomorph.* 29-2. 193-211.

POESEN J., 1986. Field measurements of splash erosion to validate a splash transport model. *Z Geomorph. Suppl.* :Bb 58. 81-91.

POESEN J., GOVERS G., 1985. A field-scale study of surface sealing and compaction on loam and sandy soils. Part 2 : Impact of soil surface sealing and compaction on water erosion processes. Int. Symp. on soil surface sealing and crusting. Ghent – 183- 193.

QUIRK J.P., 1950. The measurement of stability of microaggregates in water. *Aust. J. Agric. Res.* 1, 276-284.

RICHARD G., 1988. La germination des semences de betteraves sucrières (*Beta Vulgaris L.*) en conditions d'hypoxie : modélisation, contribution à un diagnostic au champ. Thèse doct. ing. INA-PG, 108p.

RHOTON F.E., MEYER L.D., WHISLER F.D., 1982. A laboratory method for predicting the size of sediment eroded from surface soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46, 1259-1263.

RIEZEBOS H. T., EPEMA G. F., 1985. Drop shape and erosivity. Part 2 : Splash detachment, transport and erosivity indices. *Earth surf. proc. and landforms.* Vol. 10, 69-74.

ROBERT M., VENEAU G., HERVIO M., 1983. Influence des polycations du fer et de l'aluminium sur les propriétés des argiles. *Science du Sol.* n° 3-4. p. 235-251.

ROOSE E., 1973. Contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu tropical. Thèse Doc. Ing. Fac. Sc. Abidjan. ORSTOM. 125p

ROOSE E., LELONG F., 1976. Les facteurs de l'érosion hydrique en Afrique Tropicale. Etudes sur petites parcelles expérimentales de sols. *Rev. de Géogr. Phys. et de Géol. dyn.* Vol. 18, (4),365-374.

ROSE C.W., 1960. Soil detachment caused by rainfall. *Soil Science* 89, 28-35.

SAVAT J., POESEN J., 1981. Detachment and transportation of loose sediments by raindrop splash. Part I : The calculation of absolute data on detachability and transportability. *CATENA*, 8, 1-117.

SEBILLOTTE M., 1968. Stabilité structurale et bilan hydrique du sol. Influence du climat et de la culture. *Ann. Agron.*, 19 (4), 403-414.

SHAINBERG I., 1985. The effect of exchangeable sodium and electrolyte concentration on crust formation. in : *advances in soil Science*, Vol. 1. Springer. Verlag. N.Y.

SHIEL R.S., ADEY M.A., LODDER M., 1988. The effect of successive wet/dry cycles on aggregate size distribution in a clay texture soil. *J. of Soil Sc.* 39, 71-80.

SMILES D. E., KNIGHT J. H., PERROUX K. M., 1988. Absorption of water by soil : the effect of a surface crust. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 46, 476-481.

STENGEL P., 1982. Swelling potential of soil as a criterium of permanent direct-drilling suitability. 9ème conf. ISTRO (Yugoslavia). 131-136.

STUTTARD M. J., 1984. Effect of tillage on clod stability to rainfall : Laboratory simulation. doc. multigr. 17 p.

STYCZEN M., HOGH-SCHMITT K., 1987. A new description of splash erosion in relation to rain drop sizes and vegetation. Doc. multigr.

TESSIER D., 1984. Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Thèse, Univ. Paris VII. INRA. 316 p.

THENG B.K.G., 1982. Clay-Polymer interactions : summary and perspectives. *Clays and Clay min.* Vol. 30, n°1, 1-10.

- TORRI D., 1986. Soil erosion mechanics and models. Workshop on erosion assessment. CEE Brussels. Doc. multigr. 11 p.
- TREVISAN D., 1986. Comportement hydrique et susceptibilité à l'érosion de sols limoneux cultivés. Thèse 3ème cycle. Univ. d'Orléans. 243 p..
- UTOMO W. H., DEXTER A. R., 1982. Change in soil aggregate water stability induced by wetting and drying cycles in non saturated soil. *J. Soil Science* – 33, 623-637.
- VALENTIN C., 1978. Problèmes méthodologiques de la simulation de pluies : Colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen, Strasbourg.
- VALENTIN C., 1981. Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique (AGADEZ. République du NIGER) Dynamique de formation et conséquences sur l'économie en l'eau. Thèse Paris. 213 p. + annexes.
- VALENTIN C., 1987. Soil surface crusting. Some agronomic implications. in : Land management of acid soils. IBSRAM Proc. n° 4, Bangkok, 67-81.
- VALENTIN C., RUIZ FIGUEROA J.F., 1987. Effects of kinetic energy and water application rate on the development of crusts in a fine sandy loam soil using a sprinkling irrigation an rainfall simulation. in : Micromorphologie des sols. AISS-AFES, Paris, 401-408.
- VICENTE M.A. et ROBERT M. ,1981. Rôle des acides humique et fulriques dans la microagrégation des particules argileuses. C. R.A.S. Paris. E 292. Série II. 1161-1166.
- WILLIAMS B.G., GREENLAND D.J., QUIRK J.P., 1968. The water stability of natural soil aggregates containing P.V.A.. *Austr. J. Soil Res.* 6, 59-66.
- WISCHMEIER W.H., SMITH D.D., 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Trans. Am. Geophys. Union.* Vol. 39, n°2, 285-291.
- WISCHMEIER W.H., 1959. A rainfall erosion index for a universal soil loss equation. *S. Sc. Soc. Am. Proc.* Vol. 23. 245-249.
- WISCHMEIER W.H., 1976. Use and misuse of the universal soil loss-equation. *J. of Soil and Water Cons.*, 31 (1), 5-9.
- WRIGHT A. C., 1986. A physically-based model of the dispersion of splash droplets ejected from a water drop impact. *Earth surf. Proc. and Landforms* – Vol. 11, 351-367.

WUSTAMIDIN, DOUGLAS L. A., 1985. Aggregates break down and the relation to raindrop energy. Soil Science. Vol. 139, n°3.

WUSTANDIN, DOUGLAS L. A., CUMMINGS D. J., LESLIE T. I., 1983. Comparison of the water-drop energy required to break down aggregates and soil loss caused by simulated rainfall. Soil Science – Vol. 136 n° 6, 367-370.

YODER R.E., 1936. A direct method of aggregate analyse of soils and a study of the physical nature of erosion losses. J. of the Amer. Soc. of Agron., 28, 337-351.

ZANCHI C., 1979. Problemi Relativi alla simulazione della pioggia e caratteristiche fi alcuni simulatori di pioggia per la studio dell'erosione idrometeorica. Ann. Ist. studio e Difesa Suolo. X 113-150.

ZOBECK T. M., ONSTAD C. A., 1987. Tillage and rainfall effects on random roughness : a review. Soil and Tillage Res. 9, 1-20.

## TABLE DES MATIERES

<b>o INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>9</b>
1 – Situation et contexte du sujet	9
2 – Position du problème : le processus général de formation des croûtes	10
3 – Démarche	11
<b>o PREMIERE PARTIE : ETUDE DES PROCESSUS DE DIVISION DES AGREGATS PAR L'EAU</b>	<b>17</b>
<b>Chapitre 1 : Les différents mécanismes de la désagrégation :</b>	
<b>Bibliographie</b>	<b>19</b>
1 – Les forces de liaison au sein des agrégats	19
2 – Les forces de rupture des agrégats	22
3 – Conclusion : les mécanismes de la désagrégation	25
<b>Chapitre 2 : Le système expérimental</b>	<b>27</b>
1 – Présentation des matériaux	27
A) La gamme des matériaux limoneux	
B) Les deux matériaux argileux	
C) Les matériaux "traités"	
2 – Les méthodes utilisées	33
A) Immersion d'agrégats dans l'eau	
B) Réhumectation par capillarité	
C) Application d'une énergie mécanique	
3 – Expression des résultats	40
<b>Chapitre 3 : Le comportement d'agrégats immergés dans l'eau</b>	<b>41</b>
1 – Introduction	41
2 – Résultats et discussion	43
A) Influence de l'état hydrique initial .	

B) Généralisation des résultats à des agrégats de calibres différents	
3 – Conclusion	64
<b>Chapitre 4 : Le comportement d'agrégats réhumectés par capillarité</b>	
1 – Introduction	67
2 – Résultats et discussion	69
A) Mise en évidence d'un processus de désagrégation lié à une réhumectation par capillarité	
B) Analyse du mécanisme à l'origine de la microfissuration	
C) Analyse de l'influence de l'état initiale des agrégats	
D) Déplacement de particules et réversibilité de la microfissuration	
3 – Conclusion : la microfissuration des agrégats à la réhumectation	85
<b>Chapitre 5 : Synthèse : Les différents mécanismes de désagrégation par l'eau et les scénarios d'évolution structurale</b>	87
Introduction	
1 – Les différentes modalités de désagrégation d'un matériau donné	
2 – Les différents domaines hydriques du comportement	92
3 – Influence des facteurs de constitution des matériaux sur les mécanismes et les domaines de comportement	94
4 – Caractéristiques des particules produites	96
5 – Conclusion	96
<b>o DEUXIEME PARTIE : ETUDE DE L'ACTION DES GOUTTES DE PLUIE A LA SURFACE DU SOL : DESAGREGATION, MOBILISATION ET DEPLACEMENT DE PARTICULES</b>	
<b>Introduction</b>	101
1) Caractéristiques globales des pluies	103
2) Caractéristiques élémentaires des gouttes	105
3) Objectifs de l'étude de l'action des gouttes sur les agrégats	108
<b>Chapitre 1 : Les différents mécanismes de désagrégation liés à l'action des gouttes de pluie</b>	109
1) Conditions expérimentales	109
2) Résultats	111

A) L'action des gouttes de pluie sur des agrégats secs	
B) L'action des gouttes de pluie sur des agrégats initialement saturés	
3) Conclusion	116
<b>Chapitre 2 : L'influence des caractéristiques des pluies sur la désagrégation</b>	117
1) Caractéristiques des pluies utilisées	117
2) Influence de la hauteur de chute des gouttes	117
3) Influence du rapport entre la taille des gouttes et la taille des agrégats	121
4) Influence de la fréquence des gouttes	122
5) Synthèse sur l'influence des caractéristiques des pluies : notion d'agressivité des pluies	124
A) Les deux composantes de l'action des pluies	
B) Les différents paramètres d'agressivité pour les deux modes d'action des pluies	
C) Réflexion sur la notion d'agressivité des pluies	
<b>Chapitre 3 : L'évolution structurale d'un massif d'agrégats sous l'action d'une pluie</b>	131
1) Introduction	131
2) Matériel et méthodes	132
A – Description des échantillons	
B – Simulation de pluie	
C – Observations de surface	
D – Lames minces	
E – Analyse de la taille des particules	
F – Porosimètre au mercure	
3) Résultats	138
A – Description de la surface des croûtes	
B – Description des lames minces	
C – quantité et dimension des particules produites	
D – Evolution de la teneur en eau	
E – Taille des plus gros pores de la croûtes	
F – Taille des pores des agrégats sous la croûtes	
4) Discussion	142
A – La formation des croûtes à partir d'agrégats initialement secs	

B – formation de la croûte à partir d'agrégats initialement saturés	
5) Conclusion	147
<b>– Chapitre 4 : Le déplacement des particules sous l'impact des gouttes de pluie</b>	<b>149</b>
1) Introduction	149
2) Méthode	150
3) Résultats	151
A – Influence de l'état hydrique initial	
B – Influence des caractéristiques de pluies	
C – Influence de la succion exercée sur les agrégats	
4) Discussion	153
A – Discussion sur les mesures réalisées	
B – Signification et intérêt de la notion et des mesures du rejaillissement	
<b>– Conclusion de la deuxième partie</b>	<b>161</b>
o <b>SYNTHESE ET CONCLUSION GENERALE</b>	<b>163</b>
1) Les différents processus élémentaires de la désagrégation	165
2) Modélisation du comportement instantané de la surface sous l'action d'une pluie	169
3) Evolution structurale au cours d'une séquence climatique	172
CONCLUSION	179
o <b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	
o <b>LISTE DES FIGURES</b>	
o <b>LISTE DES TABLEAUX</b>	
o <b>ANNEXES</b>	
o <b>TABLE DES MATIERES</b>	

## Figures

Figure 1: Les différents mécanismes à l'origine de la division des agrégats par l'eau. ....	24
Figure 2: Proportions relatives des différentes fractions argileuses des matériaux limoneux. ....	29
Figure 3: Classes minéralogiques des argiles définies par la C E C et le taux de K <sub>2</sub> O. ....	29
Figure 4: Comparaison des méthodes utilisées pour l'étude du comportement des agrégats immergés dans l'eau. ....	34
Figure 5: Observation en microscopie optique sur lames mince de la structure des agrégats utilisés. ....	37
Figure 6: Relations entre le taux d'agrégats stables à l'eau (Age), et la teneur en eau initiale. ....	42
Figure 7: Relations entre le taux d'agrégats stables à l'eau (Age) et l'état énergétique initial de l'eau dans les agrégats (pF). ....	42
Figure 8: Evolution des D.T.P.R. après immersion en fonction de la teneur en eau initiale (agrégats 2-3 mm). a : Montluel, b : Palaiseau, c : Boigneville. ....	44
Figure 9: Comparaison des proportions relatives des particules résultantes (< 2 mm) pour les trois matériaux . a : domaine des faibles humidités (W = 5 %), b : domaine des humidités intermédiaires (W =15%), c : domaine de saturation (W = 25 %). ....	46
Figure 10: Observation en microscopie optique de l'évolution structurale d'un agrégat de Montluel immergé dans l'eau. ....	49
Figure 11: Observation en microscopie optique de l'évolution structurale d'un agrégat de Boigneville immergé dans l'eau. ....	50
Figure 12: Comparaison des D.T.P.R. après éclatement, pour les agrégats de Boigneville sodiques et non sodiques. ....	51
Figure 13: Comparaison des D.T.P.R. après éclatement, pour les agrégats traités avec des acides humiques et non-traités. a : Montluel, b : Palaiseau. ....	52

Figure 14: Comparaison des positions des points d'entrée d'air avec les seuils hydriques de stabilité maximale. ....	54
Figure 15: Relation entre les taux d'agrégats stables à l'alcool (Aga) et à l'eau après saturation (Age sat.). ....	55
Figure 16: Comparaison des taux d'agrégats > 200 µm pour les tests avec et sans agitation. ....	56
Figure 17: Relations entre les taux d'agrégats stables après saturation (Age sat.), et la teneur en argile et la C.E.C. des matériaux. ....	56
Figure 18: Influence du sodium sur la D.T.P.R. après désagrégation mécanique (Boigneville 3-4 mm). ....	58
Figure 19: Influence des acides humiques sur la D.T.P.R. après désagrégation mécanique. a : Montluel, b : Palaiseau. ....	59
Figure 20: Influence du calibre initial d'agrégats secs sur la D.T.P. R. après immersion prolongée. a : Montluel, b : Palaiseau, c : Boigneville. ....	60
Figure 21: Influence de la durée d'immersion d'agrégats secs sur la D.T.P.R., pour différents calibres initiaux. a : 3-4 mm, b : 10 mm, c : 20 mm. ....	62
Figure 22: Comparaison des proportions relatives des particules produites par éclatement (< 2 mm), pour différents calibres d'agrégats et temps d'immersion (Palaiseau). ....	64
Figure 23: D.T.P.R. après réhumectation par capillarité d'agrégats de 3-4 mm des matériaux limoneux. ....	68
Figure 24: Relation entre la teneur en argile des matériaux et les proportions des différentes classes de particules après réhumectation par capillarité. ....	68
Figure 25: Comparaison des D.T.P.R. après réhumectation à l'air et sous vide. a : Montluel, b : Boigneville, c : Vignères, d : Lignère. .	70
Figure 26: Influence du temps de réhumectation sur la D.T.P.R. a : Boigneville, b : Montluel, c : Palaiseau. ....	72
Figure 27: Relation entre l'état hydrique initial et la D.T.P.R. après réhumectation. a : Boigneville, b : Palaiseau. ....	74
Figure 28: Relation entre le calibre initial des agrégats et la D.T. P.R. après réhumectation (Boigneville). ....	76
Figure 29: a : Relation entre la structure initiale des agrégats et la D.T.P.R. après réhumectation. b : proportions relatives des classes < 1 mm. ....	78

Figure 30: Comparaison des D.T.P.R. avant et après séchage des agrégats réhumectés. a : Montluel, b : Boigneville. ....	81
Figure 31: Observation en microscopie optique de l'évolution structurale d'un agrégat de Montluel réhumecté par capillarité. ....	82
Figure 32: Comportement des agrégats de Palaiseau pour différentes conditions de mise en contact avec l'eau. ....	88
Figure 33: Les différents types d'évolutions structurales (Palaiseau). a : quantité de particules produites (< 2mm) pour les différents scénarios, b : proportions relatives des particules < 2 mm pour les différents scénarios. ....	91
Figure 34: Les différents domaines hydriques de comportement des matériaux limoneux. ....	93
Figure 35: Comparaison des D.T.P.R. de différents matériaux pour les principaux types de comportement. a : éclatement total, b : microfissuration par éclatement partiel, c : désagrégation mécanique sans éclatement. ....	97
Figure 36: Distribution des tailles de gouttes pour des pluies naturelles de différentes intensités (d'après Hudson, 1971). ....	104
Figure 37: Relation intensité-énergie cinétique (pour 25 mm de pluie) suivant les climats et les auteurs (d'après Hudson, 1971). ...	104
Figure 38: Relation entre les caractéristiques élémentaires des gouttes et les caractéristiques globales des pluies. ....	107
Figure 39: Schéma du dispositif utilisé pour étudier l'action des gouttes de pluie sur les agrégats. ....	110
Figure 40: Influence de la durée de la pluie (gouttes de 4,5 mm de diamètre tombant de 1 m) sur la D.T.P.R. (Palaiseau). ....	110
Figure 41: Comparaison des D.T.P.R. sous pluie avec celles obtenues après immersion ou réhumectation par capillarité (agrégats initialement secs). a : Montluel, b : Palaiseau, c : Boigneville. ....	112
Figure 42: Influence de la nature des matériaux sur la D.T.P.R. sous pluie. ....	113
Figure 43: Comparaison des D.T.P.R. après des pluies de différentes durées et après immersion (agrégats initialement saturés). a : Montluel, b : Palaiseau, c : Boigneville. ....	114
Figure 44: Evolution des taux de particules < 100 $\mu\text{m}$ en fonction de la durée des pluies. ....	116

Figure 45: Influence de l'énergie cinétique des gouttes sur la désagrégation (Palaiseau). a : agrégats secs, b : agrégats saturés. ....	119
Figure 46: Influence du rapport entre le diamètre des gouttes et le diamètre des agrégats sur la D.T.P.R. (Palaiseau) .....	121
Figure 47: Influence de la fréquence des gouttes (intensité) sur la D.T.P.R. (Palaiseau). ....	123
Figure 48: Les différentes composantes de l'action des pluies sur l'évolution structurale. ....	126
Figure 49: Relation entre le taux de particules < 100 µm (1 mn de pluie) et différents indices d'agressivité de la pluie (agrégats de palaiseau saturés) a : KEC, b : KMV, c : K(EC/d <sup>2</sup> ). ....	127
Figure 50: Schéma d'un anneau rempli avec les agrégats. ....	132
Figure 51: Observation de la surface des anneaux (agrégats initialement secs). a : état initial, b : différents stades de prélèvement au cours de la pluie. ....	133
Figure 52: Schéma d'un fragment de croûte inclus dans la résine. ....	135
Figure 53: Observation à la loupe binoculaire de la surface des croûtes et de leur structure en lame mince (agrégats initialement secs). ..	136
Figure 54: Observation à la loupe binoculaire de la surface des croûtes et de leur structure en lame mince (agrégats initialement saturés). .	137
Figure 55: Evolution des D.T.P.R. sous pluie. agrégats initialement secs (a & b) ou saturés (c & d) respectivement dans la croûte et sous la croûte. ....	140
Figure 56: Evolution de la teneur en eau au cours de la pluie pour les agrégats initialement secs (a), et saturés (b). ....	141
Figure 57: Courbes porosimétriques de fragments de croûtes obtenues après 30 mm de pluie pour des agrégats initialement secs (a) et saturés (b). ....	144
Figure 58: Courbes porosimétriques d'agrégats de 3-4 mm. a : agrégats initiaux, b & c : agrégats prélevés sous la croûte après 30 mm de pluie respectivement dans les cas initialement secs et saturés. ....	145
Figure 59: Influence de l'état hydrique initial sur les relations masse/distance (Boigneville) (gouttes de 4,5 mm de diamètre tombant de 6 m). ....	151
Figure 60: Influence de la hauteur de chute des gouttes sur les relations masse/distance (agrégats de Montluel secs). ....	152

Figure 61: Influence du calibre des gouttes sur les relations masse/distance (agrégats de Montluel saturés). . . . .	153
Figure 62: Influence de la succion exercée sur les agrégats sur les relations masse/distance (gouttes de 4,5 mm de diamètre tombant de 1m). agrégats de Montluel respectivement initialement secs (a) et saturés (b). . . . .	156
Figure 63: Modèles schématiques de rejaillissement d'après FARRES (1987). . . . .	157
Figure 64: Influence de la granulométrie des matériaux sur les relations masse/distance pour deux état hydriques initiaux (gouttes de 4,5 mm de diamètre tombant de 6m) . . . . .	158
Figure 65: Modèle de l'évolution structurale superficielle sous l'action d'une pluie. . . . .	172
Figure 66: Quelques scénarios d'évolution structurale de la surface du sol pour des séquences climatiques types en climat océanique. . .	174

## Tableaux

Tableau 1: Caractéristiques analytiques des matériaux limoneux. . . . .	28
Tableau 2: Teneur en quartz des fractions fines des matériaux limoneux. .	30
Tableau 3: Résultats des tests de stabilité structurale réalisés sur la terre fine ( $< 2$ mm) . . . . .	31
Tableau 4: Caractéristiques analytiques des matériaux argileux. . . . .	32
Tableau 5: Comparaison des taux de particules $< 20$ $\mu\text{m}$ après éclatement, en fonction de l'énergie mécanique appliquée. . . . .	48
Tableau 6: Caractéristiques des particules produites pour les différents mécanismes de désagrégation . . . . .	98
Tableau 7: Vitesse limite des gouttes en fonction de leur diamètre (d'après GUNN & KINZER, 1949). . . . .	105
Tableau 8: Caractéristiques des différentes pluies utilisées avec le gouteur (à intensité constante). . . . .	118
Tableau 9: Influence de l'état initial, des caractéristiques des matériaux et du couvert végétal sur la caractérisation de l'agressivité des pluies. . . . .	130
Tableau 10: Valeurs caractéristiques des courbes de porosimétrie au mercure. . . . .	142

## **LISTE DES ANNEXES**

**Annexe 1 : Localisation des matériaux par rapport aux principales formations limoneuses de France.**

**Annexe 2 : Minéralogie des argiles extraites des matériaux limoneux.**

**Annexe 3 : Courbes de retrait des matériaux limoneux.**

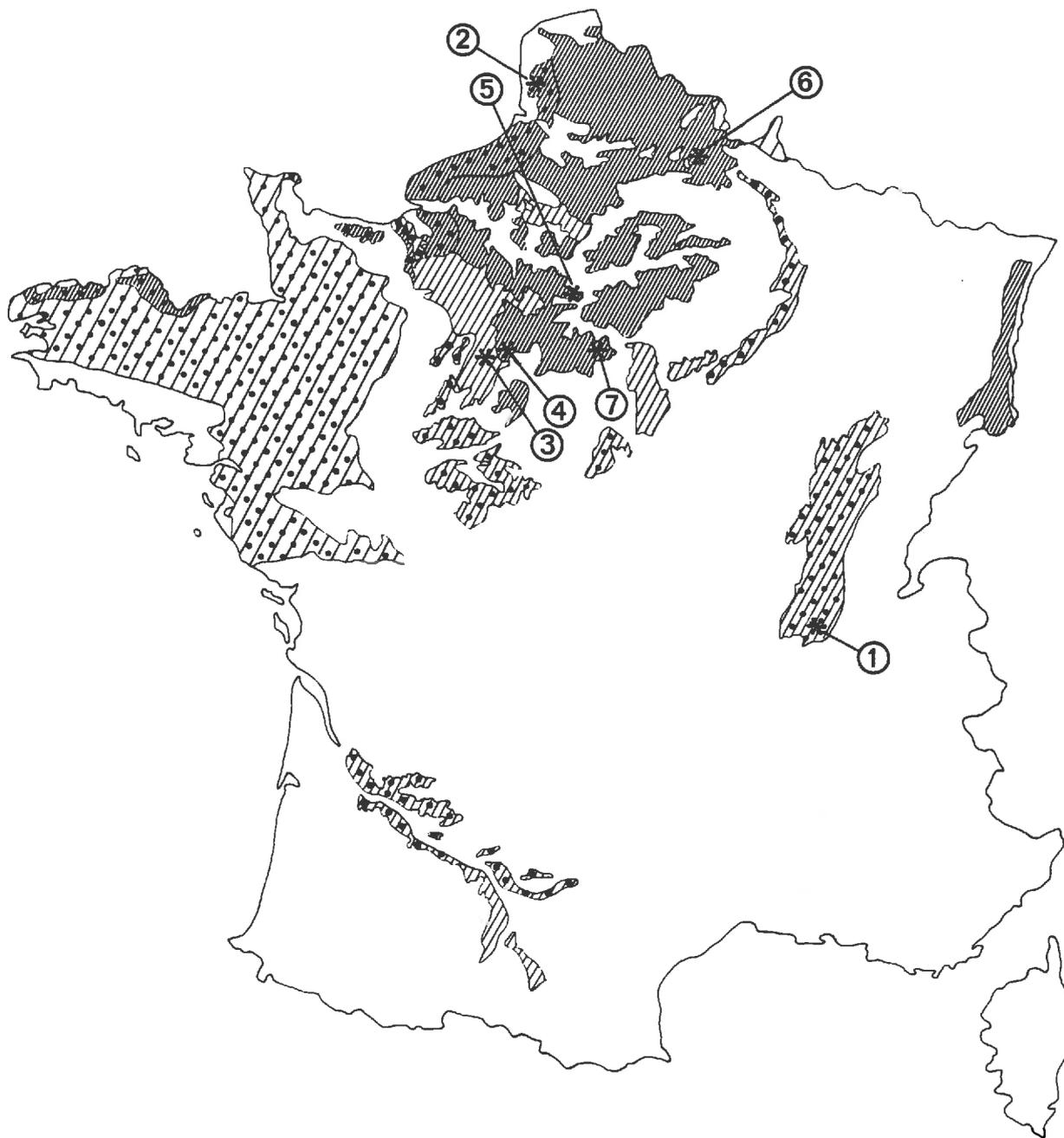
**Annexe 4 : Courbes de rétention en eau des matériaux limoneux.**

**Annexe 5 : Courbes porosimétriques des matériaux limoneux.**

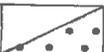
**ANNEXE 1**

**LOCALISATION DES MATERIAUX PAR RAPPORT  
AU PRINCIPALES FORMATIONS LIMONEUSES DE FRANCE**

# PRINCIPALES FORMATIONS LIMONEUSES



## LEGENDE

-  Limons éoliens épais
-  Limons d'épaisseur variable
-  Limons discontinus issus de l'altération de grès et schistes
-  Limons légèrement sableux

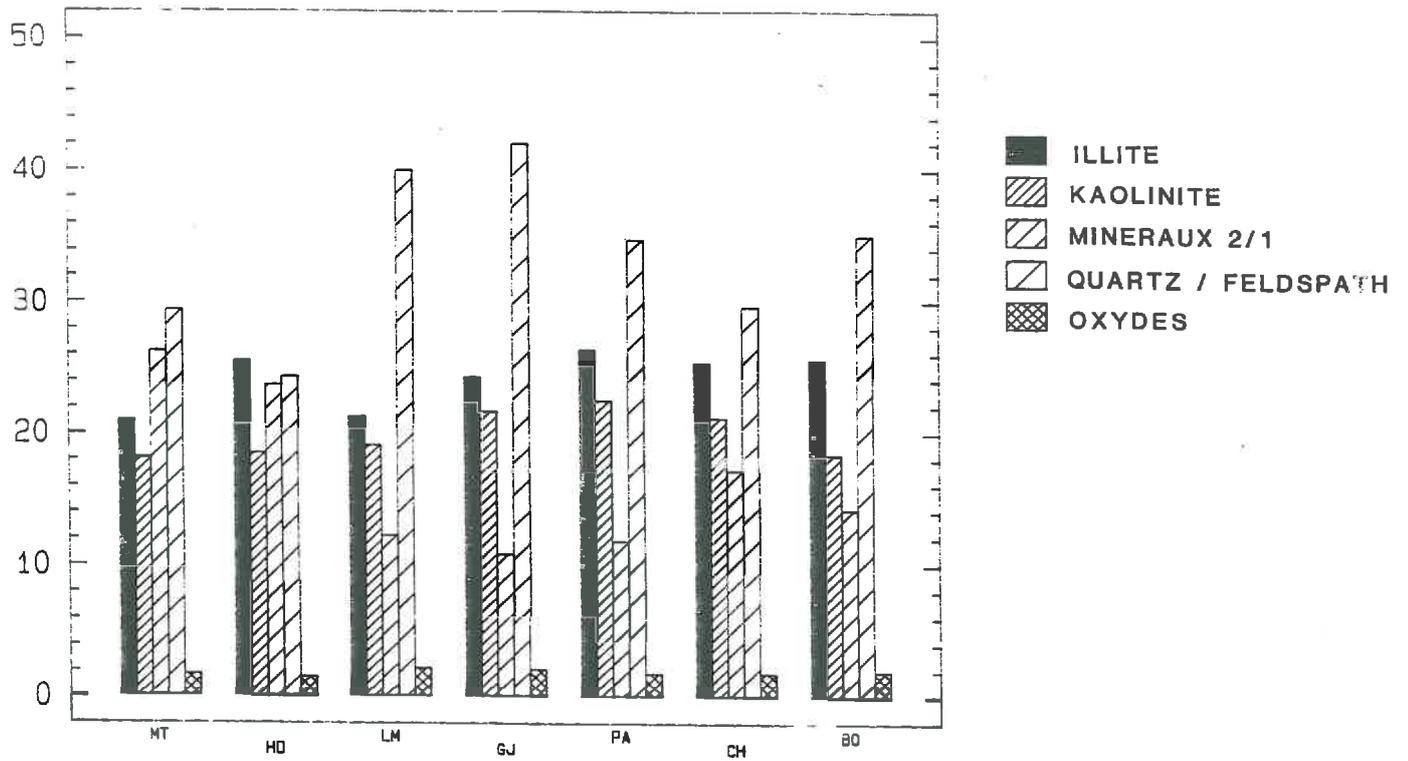
## LOCALISATION DES ECHANTILLONS

- 1-Montluel
- 2-Hesdin
- 3-Le Ménard
- 4-Grand Juday
- 5-Palaiseau
- 6-Chêne
- 7-Boigneville

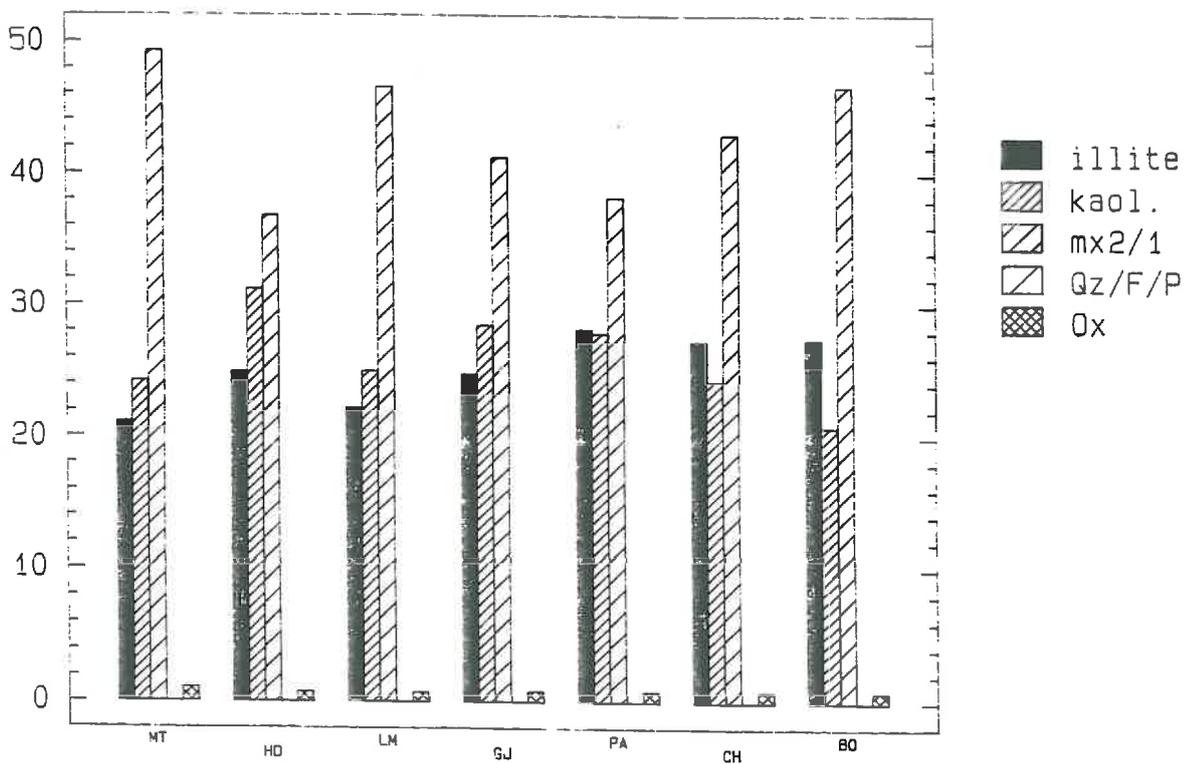
ANNEXE 2

MINERALOGIE DES ARGILES EXTRAITES  
DES MATERIAUX LIMONEUX

### Argiles grossières (0,2-2 $\mu$ m)



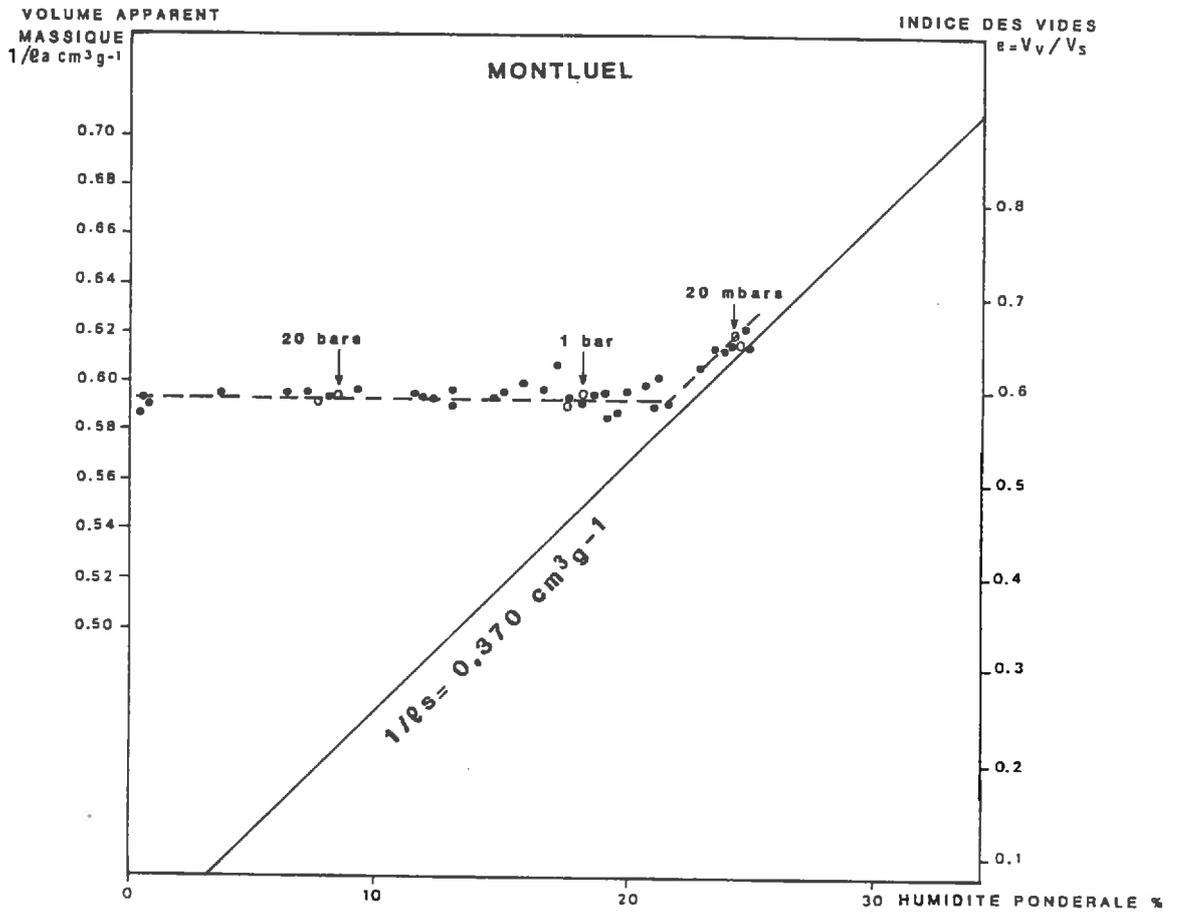
### Argiles fines (0-0,2 $\mu$ m)



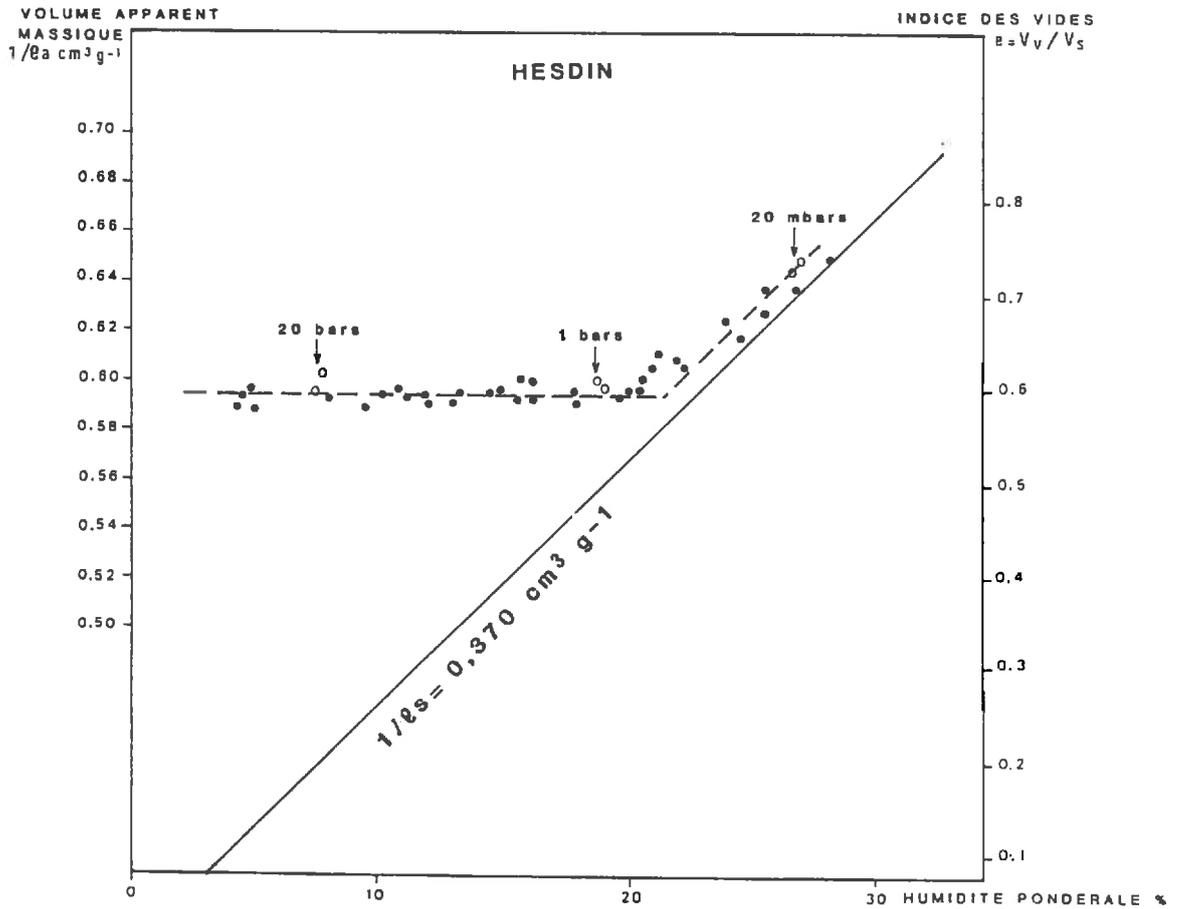
ANNEXE 3

COURBES DE RETRAIT DES MATERIAUX LIMONEUX

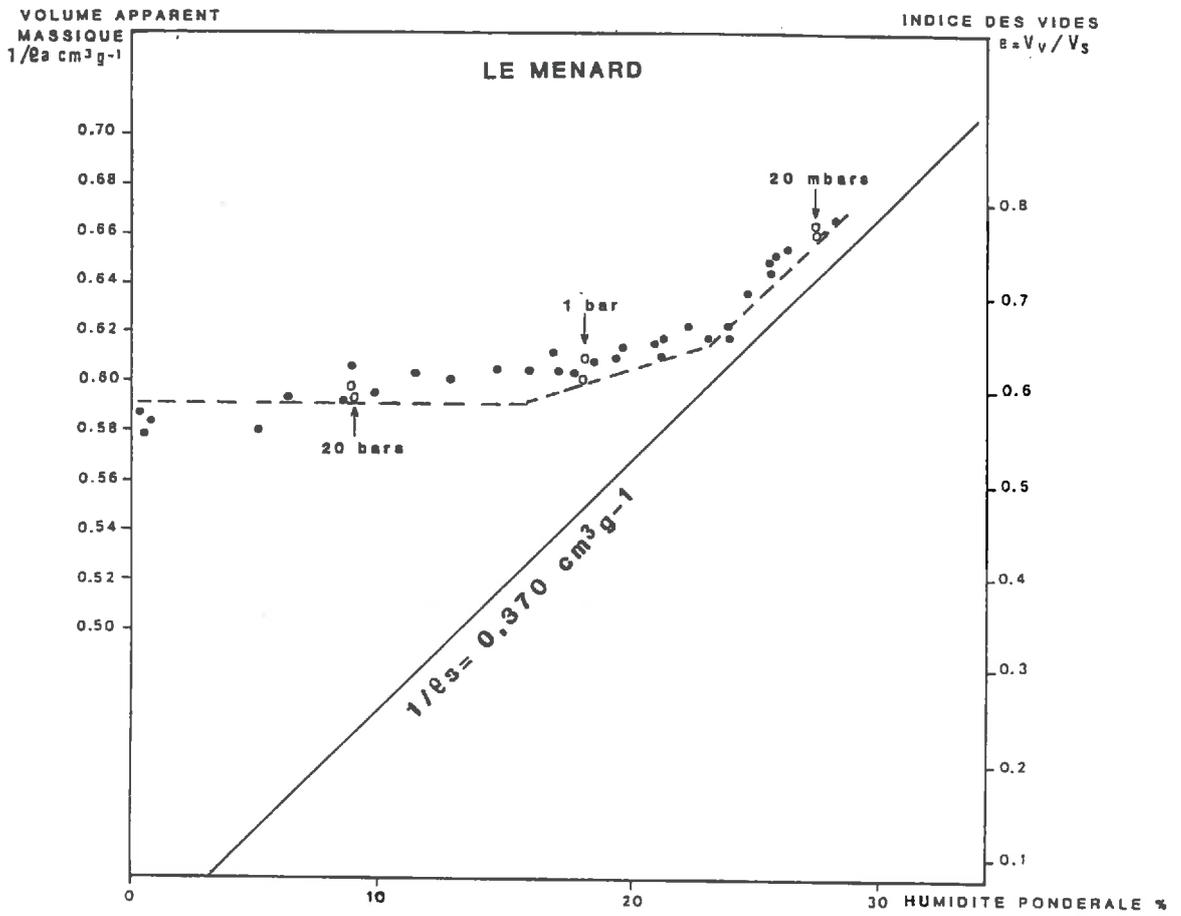
### COURBE DE RETRAIT



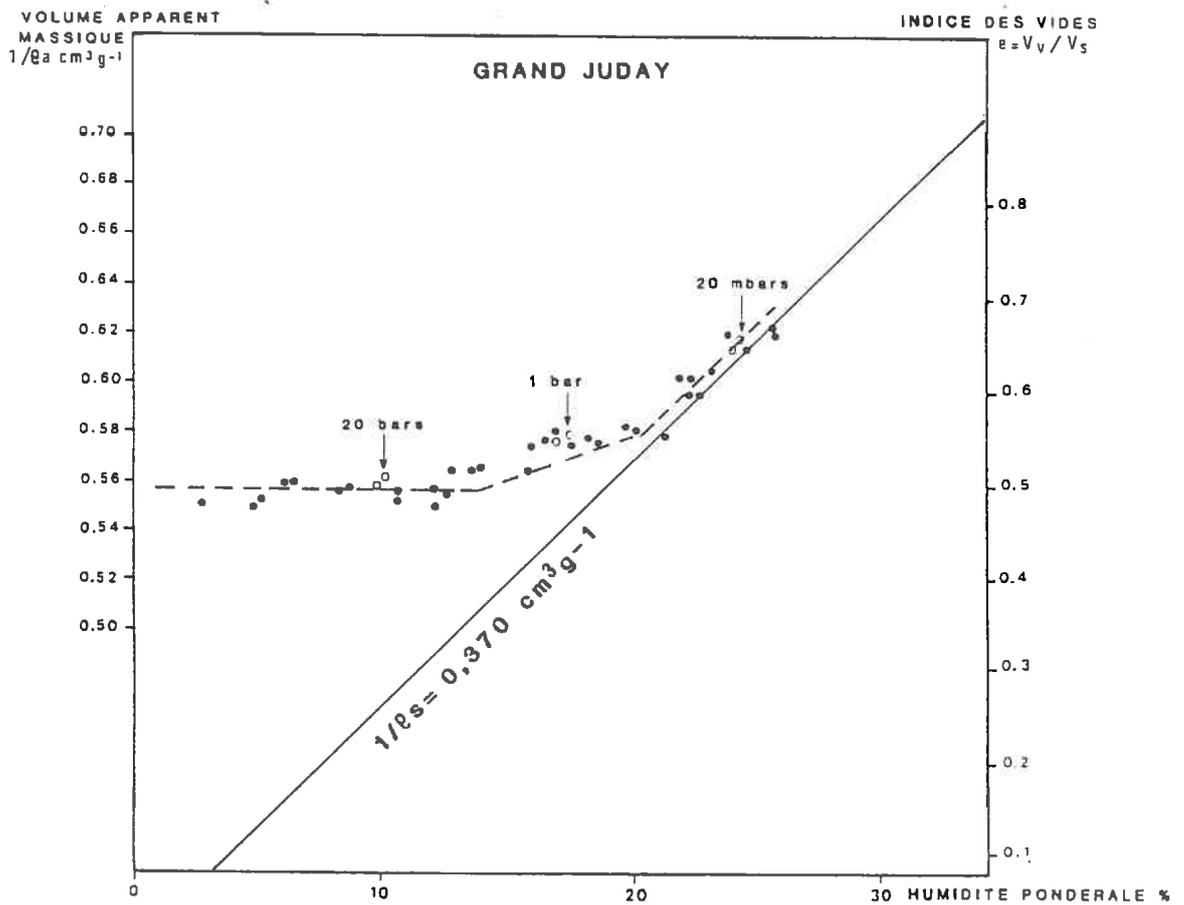
### COURBE DE RETRAIT



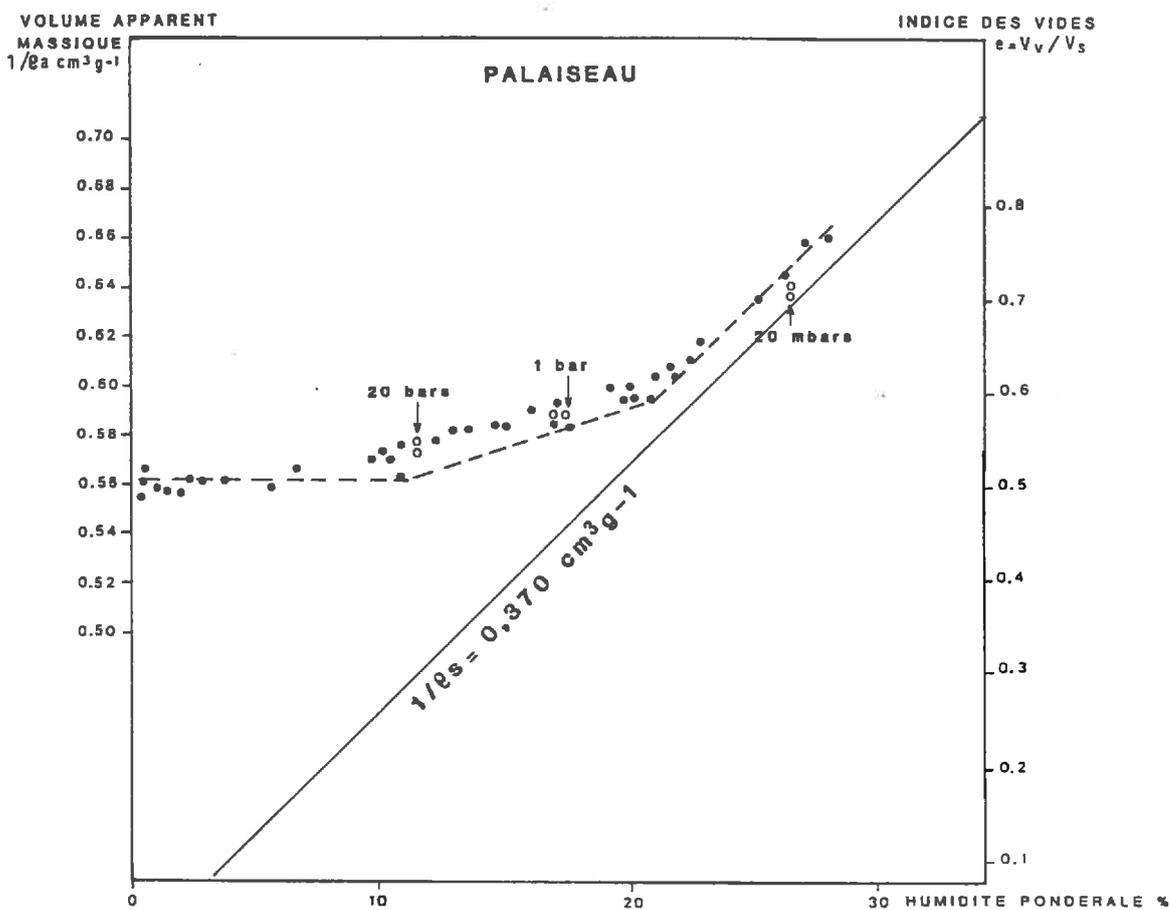
# COURBE DE RETRAIT



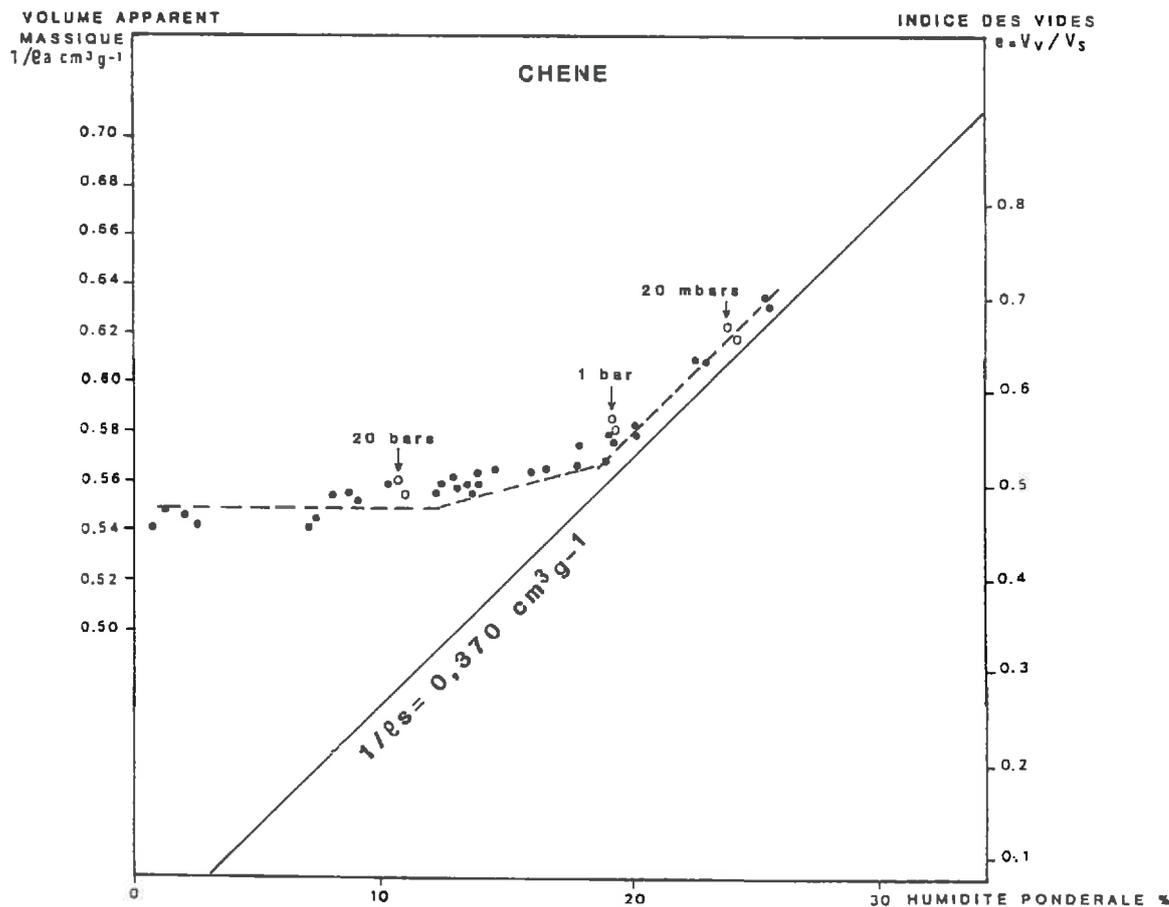
# COURBE DE RETRAIT



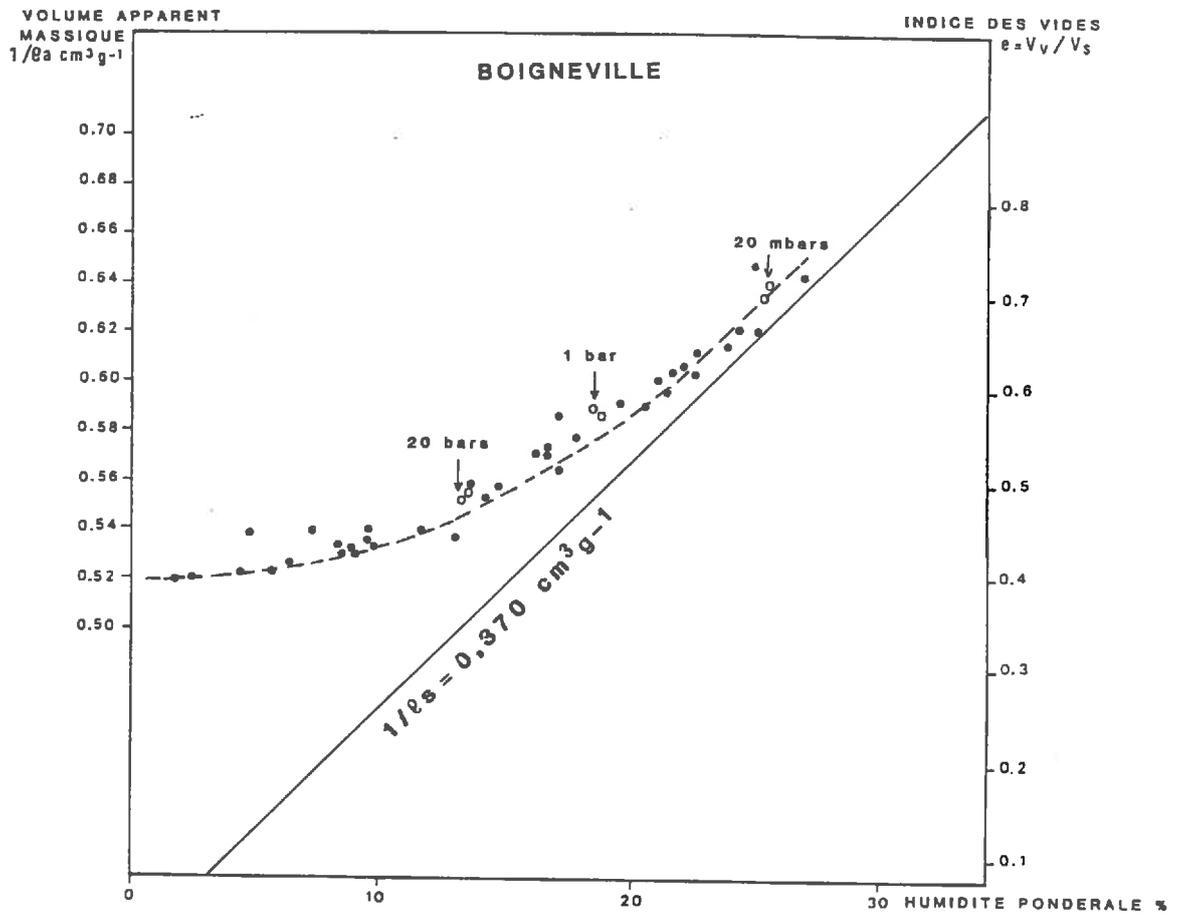
### COURBE DE RETRAIT



### COURBE DE RETRAIT



# COURBE DE RETRAIT



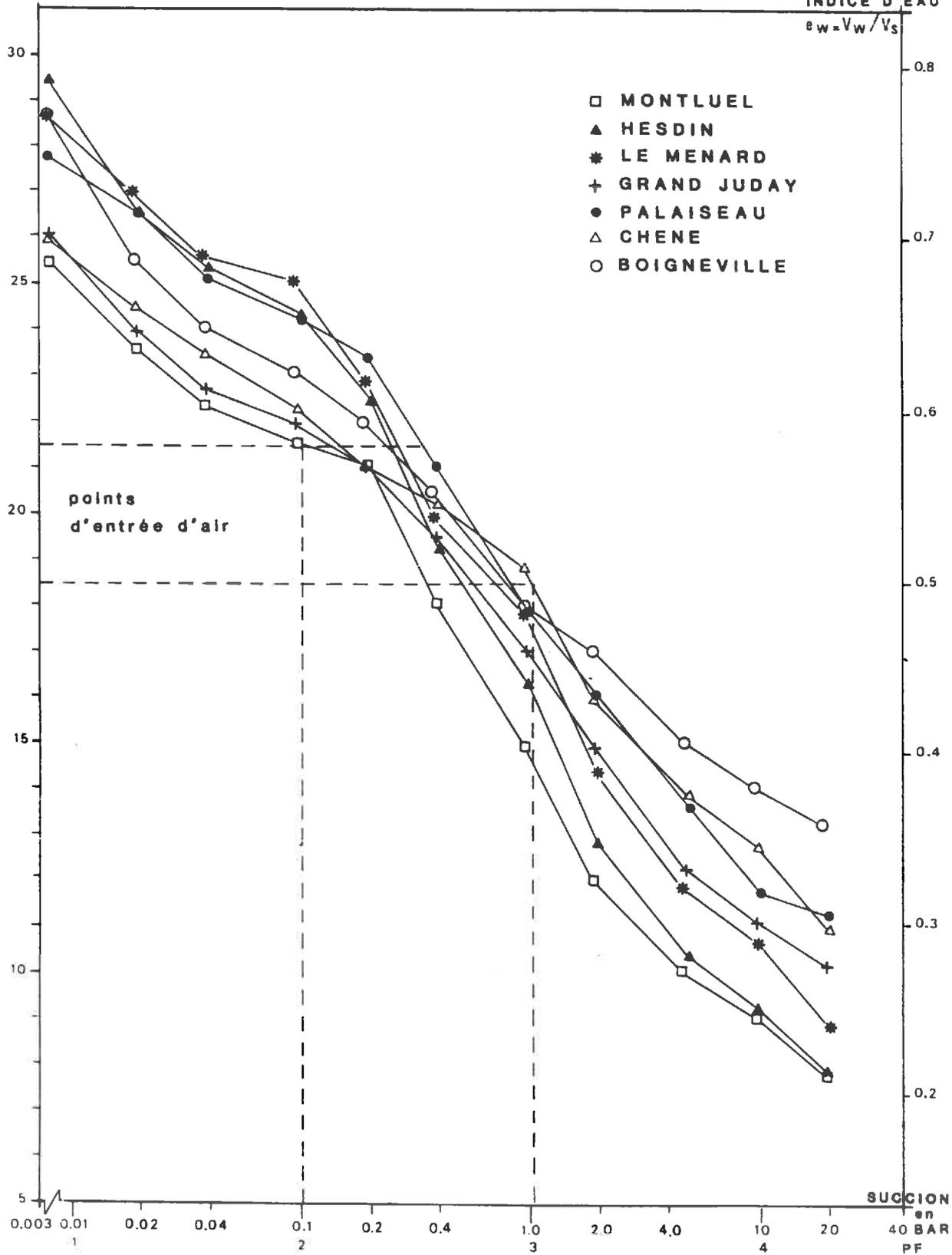
ANNEXE 4

COURBES DE RETENTION EN EAU DES MATERIAUX LIMONEUX

# COURBES DE RETENTION EN EAU

TENEUR EN EAU  
PONDERALE %

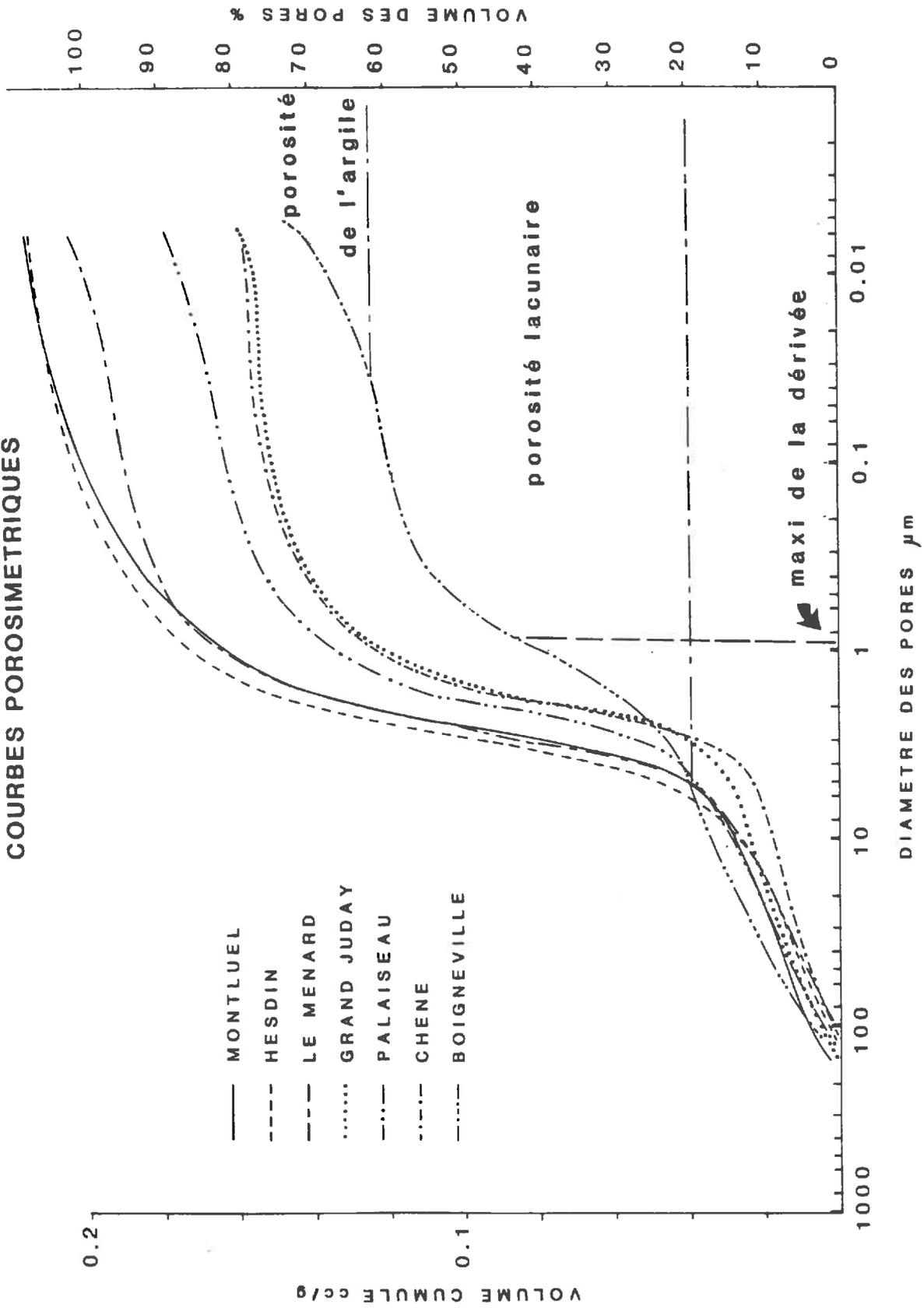
INDICE D'EAU  
 $e_w = V_w / V_s$



ANNEXE 5

COURBES POROSIMETRIQUES DE MATERIAUX LIMONEUX

# COURBES POROSIMETRIQUES



---

INRA Publications, Rte de St Cyr, 78026 Versailles Cedex  
*Dépôt légal : 3<sup>ème</sup> trimestre 1989*  
ISBN : 2-7380-0192-0