

TH-MA1

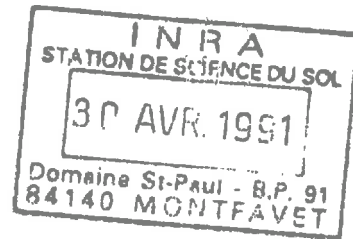
TH - M37

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON

STATION DE SCIENCE DU SOL
INRA - VERSAILLES

THESE

présentée par



Christine LE SOUDER

Ingénieur Agronome de l'Institut National Agronomique
Paris-Grignon

pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE PARIS-GRIGNON

Effet d'un conditionneur minéral
sur la formation des croûtes superficielles du sol
sous l'action des pluies.

Mode d'action du conditionneur sur la stabilité structurale.

Soutenue le 20 décembre 1990 devant le jury composé de :

MM. R. CALVET , Professeur à l'INA P-G	Président
C. CHEVERRY , Professeur à l'ENSA Rennes	Rapporteur
J.L. MOREL , Professeur à l'ENSAIA Nancy	Rapporteur
J. BOIFFIN , Directeur de Recherche à l'INRA	
J.P. CUER , Ingénieur à ATOCHEM	
M. DE BOODT , Professeur à l'Université de Gand (Belgique)	
M. ROBERT , Directeur de Recherche à l'INRA	

AVANT-PROPOS

Cette thèse a été réalisée à la Station de Science du Sol de l'INRA de Versailles, avec la participation financière de la Société ATOCHEM. Les expérimentations de terrain ont été effectuées en collaboration avec l'INRA de Laon, et celles sous pluies simulées au SESCOF-INRA d'Orléans.

Je tiens à remercier ici toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de cette thèse, en particulier :

- R. CALVET, qui m'a fait l'honneur d'être mon président de jury ;*
- C. CHEVERRY et J.L. MOREL, qui ont accepté la lourde charge de réaliser les rapports de thèse ;*
- J. BOIFFIN, qui m'a fait partager son expérience du terrain et pour les fructueuses discussions que j'ai eues avec lui tout au long de ce travail ;*
- J.P. CUER, par l'intermédiaire duquel la collaboration entre l'INRA et la Société ATOCHEM s'est déroulée d'une façon très amicale et enrichissante pour les deux parties ;*
- M. DE BOODT, qui m'a fait l'honneur de venir de Belgique pour participer à mon jury de thèse ;*
- et bien sûr M. ROBERT pour m'avoir confié cette étude et pour m'avoir encadrée tout au long du travail.*

Je suis également très reconnaissante à C. CHENU, L.M. BRESSON, C. JOUANY, Y. LE BISSONNAIS, D. TESSIER, et G. VENEAU pour le temps qu'ils ont consacré à ce travail.

Je remercie très chaleureusement toutes les personnes que j'ai cotoyées et qui m'ont aidée durant ces années passées à l'INRA de Versailles, principalement A. BEAUMONT, J. BERRIER, C. HARTMANN, A.M. JAUNET, J. LAPEYRONNIE, M. LEMAIN, J. OUDARD et M. PERRIER. De même, je remercie vivement toutes les personnes des stations de Laon et d'Orléans qui m'ont accueillie et soutenue.

Je n'oublierai pas tous ceux qui m'ont apporté leur aide et leur expérience sur le terrain, en particulier Y. DUVAL, M. EIMBERCK et bien entendu tous les agriculteurs ou techniciens de groupements d'agriculteurs, en particulier G. HARLAUT.

Je tiens à remercier enfin T. DIMEY pour ses conseils lors de la mise en forme du manuscrit et toute l'équipe du service de reprographie de l'INRA de Versailles, tout particulièrement D. CHARTRAIN.

RESUME

Sous l'action des pluies, la surface de sols cultivés peut subir une dégradation de la structure marquée par la formation de croûtes superficielles qui peuvent gêner la levée des cultures ou favoriser l'érosion. Afin de tenter de résoudre ce problème, nous nous proposons d'étudier un conditionneur minéral et d'expliquer son mode d'action. Le conditionneur est le WAC[®], un polychlorure basique sulfaté d'aluminium, commercialisé comme flocculant des eaux usées par la société ATOCHEM.

Cette étude est abordée à différentes échelles, d'abord sur des surfaces de sol puis sur des agrégats de sol, c'est-à-dire en suivant une démarche progressive du terrain au laboratoire.

Sur le terrain, on a appréhendé l'interaction entre l'effet du conditionneur et les facteurs du milieu, par des observations morphologiques en plan et en coupe de la surface. Le conditionneur s'est révélé avoir un effet sur la dynamique de la dégradation de la structure, avec cependant un rôle déterminant du facteur histoire hydrique. En particulier, dans le cas d'une histoire hydrique de type alterné, avec de longues périodes de dessiccation entrecoupées de petites pluies, la surface du sol a subi une microfissuration provoquant une perturbation des états de surface, ce qui n'a pas permis la révélation de l'effet du conditionneur.

Sous pluie simulée, nous avons pu quantifier le retard de la dégradation provoqué par le conditionneur apporté à la dose de base de 250 l/ha : 30 ou 45 minutes soit 10 ou 15 mm de hauteur de pluie d'une intensité de 20 mm/h. De plus, des observations morphologiques ont révélé que l'origine de ce retard se situe dans une modification de la fissuration par éclatement au tout début de la pluie.

En étudiant plus particulièrement les mécanismes de désagrégation par la pluie **sur des agrégats de sol**, nous avons pu montrer le rôle du conditionneur dans l'augmentation de la résistance des agrégats à la désagrégation par éclatement (désagrégation totale ou microfissuration) et à la désagrégation mécanique. Ce rôle a été étudié pour différentes doses d'application du conditionneur et pour différentes textures de matériaux.

Afin de préciser le mode d'action du conditionneur sur la résistance au mécanisme d'éclatement, nous avons pu montrer que le conditionneur augmente d'une part la cohésion à l'état humide des agrégats et d'autre part, d'une façon remarquable, le caractère hydrophobe de surfaces d'argiles. Ceci s'accompagne d'une réduction de la taille des pores d'accès à l'humectation.

Après son application, le conditionneur se localise en revêtement à la périphérie des agrégats, ralentissant l'entrée de l'eau. Aussi l'effet stabilisateur est évidemment très lié à la position de la partie des agrégats couverte par ce revêtement qui doit être directement au contact des gouttes de pluie. Une modification de l'état de surface du sol sur le terrain peut alors entraîner l'absence d'effet du conditionneur.

L'analyse qui est faite dans ce travail concerne un conditionneur minéral mais une grande partie des concepts et méthodologies utilisés au cours de ce travail sont applicables à l'étude d'autres conditionneurs et à une meilleure compréhension de l'action des facteurs du milieu.

Mots-clés :

Aluminium hydroxylé - Battance - Conditionneur de sol - Croûtes superficielles - Désagrégation mécanique - Désagrégation par éclatement - Espace poral - Histoire hydrique - Mouillabilité - Stabilité structurale - Sols limoneux.

EFFECT OF A MINERAL CONDITIONER ON SOIL SURFACE CRUSTING BY RAINFALL

The conditioner's mechanism of action
on the structural stability of the soil

SUMMARY

During rainfall, the soil surface can suffer from crust formation which can prevent crop emergence and promote erosion. We have studied a mineral conditioner aimed at solving this problem, called WAC[®] (ATOCHEM) which is a basic sulfated aluminum polychloride. The actual soil surfaces in the field down to natural aggregates in the laboratory have been investigated.

In the field, the interaction between the conditioner and environmental factors was studied, using morphological observations of the soil surface. The conditioner acts on the crusting kinetics. But the alternating wet-dry cycles constitute a major interference by promoting microcracking which disturbs the soil surface and prevents the action of the conditioner.

Under simulated rainfall, we have quantified the delay in crust formation due to the conditioner. Morphological observations have revealed that the conditioner acts at the beginning of the rainfall, by modifying the microcracking.

Then we have shown the influence of the conditioner on mechanisms of disaggregation by slaking and mechanical breakdown. The influence of the application rate of the conditioner and of the soil granulometry were also investigated.

In order to explain the role of the conditioner on slaking, we have shown that it improves the mechanical resistance of aggregates and reduces the wettability of clay surfaces. Furthermore, it decreases the pore size at the aggregate periphery.

After application by spraying, the conditioner coats only the upper surface of the aggregates and thus decreases the kinetics of the water entry during wetting. Therefore, it is imperative that this protection remain at the interface with the falling rain to be effective. Our study concerns a particular mineral conditioner but the methodology and concepts used are applicable to others kinds of conditioners or works on the structural stability at the soil surface.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE ET PRESENTATION DE L'ETUDE

CHAPITRE II : ETUDE DU ROLE DU CONDITIONNEUR
SUR L'EVOLUTION D'UNE SURFACE DE SOL
SOUS L'ACTION DES PLUIES

Première Partie :

ETUDE EN CONDITIONS NATURELLES SUR LE TERRAIN

Seconde Partie :

ETUDE SOUS PLUIE SIMULEE

CHAPITRE III : ETUDE DE L'EFFET DU CONDITIONNEUR
SUR LA STABILITE D'AGREGATS DE SOL

Première Partie :

ETUDE DE L'EFFET DU CONDITIONNEUR
SUR LES MECANISMES DE DESAGREGATION

Seconde Partie :

EFFET DU CONDITIONNEUR SUR CERTAINES COMPOSANTES
DE LA STABILITE STRUCTURALE
- LA MOUILLABILITE DES SURFACES
- L'ESPACE PORAL ET LA RETENTION EN EAU

CHAPITRE IV : SYNTHESE ET DISCUSSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

TABLE DES MATIERES

ANNEXES

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les problèmes de dégradation physique des sols cultivés prennent actuellement une importance croissante. D'une part, notamment en France, les agriculteurs deviennent de plus en plus exigeants vis-à-vis de tous les facteurs intervenants sur le rendement des cultures, ceci pour des raisons de rentabilité. D'autre part, des phénomènes de dégradation physique assez graves apparaissent sur les sols de grandes cultures, comme l'érosion hydrique, attribués en partie à une chute de la stabilité structurale des sols par une réduction de leur taux de matières organiques.

Pour faire face à ces problèmes physiques, une solution pourrait être d'augmenter cette stabilité structurale par l'apport de substances appelées conditionneurs de sol. Des recherches à ce sujet sont réalisées depuis plusieurs dizaines d'années dans le monde, en particulier sur des polymères organiques, mais sans toujours aboutir à des applications concrètes. Il semblerait actuellement que des progrès en biotechnologie, notamment par l'obtention de polymères plus performants, et la meilleure connaissance de polymères minéraux moins coûteux et plus faciles d'emploi puissent relancer ces recherches.

Notre travail a pour objet principal, dans le cadre des sols limoneux du nord de la France, d'étudier l'effet d'un conditionneur minéral afin de tenter de remédier aux problèmes de croûtes de surface du sol sous l'action des pluies. Ce conditionneur est le WAC[®] (polychlorure basique sulfaté d'aluminium) commercialisé par la Société ATOCHEM.

Après un premier chapitre consacré aux études antérieures réalisées proches de notre sujet et à la présentation et à la démarche de notre étude, nous chercherons à mettre en évidence le mode d'action du conditionneur sur la structure de surface du sol.

Pour cela, nous étudierons tout d'abord le comportement au champ de surfaces de sol traitées avec le conditionneur sur le terrain en conditions naturelles. Puis progressivement nous préciserons l'action du conditionneur au laboratoire sous pluie simulée puis sur des agrégats de sol.

A cette échelle d'investigation, nous tenterons de mettre en évidence le mode d'action du conditionneur sur la stabilité structurale en cherchant à voir dans quelle mesure il modifie les propriétés des agrégats de sol vis-à-vis d'une mise en contact avec l'eau.

CHAPITRE I

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE ET PRESENTATION DE L'ETUDE

I. LA DEGRADATION DE LA STRUCTURE DE LA SURFACE DU SOL SOUS L'ACTION DE LA PLUIE

A. Généralités

1. Définitions

La dégradation de la structure de la surface du sol sous l'action de la pluie résulte de différents processus. D'une façon générale, les gouttes de pluie provoquent une désagrégation des mottes suivie d'un colmatage des pores de la surface. La résultante de ce phénomène est la formation d'un type d'organisation horizontale particulière appelée couramment "croûte de battance". La surface du sol a alors un aspect lisse et glacé.

Lors de l'étude de la dégradation de la surface du sol en milieu tropical, VALENTIN (1981) a appelé "Organisations Pelliculaires de Surface" toutes les nouvelles structures issues de la dégradation par la pluie.

Dans notre étude, le terme de croûtes superficielles sous l'action de la pluie a été choisi pour qualifier la résultante de la dégradation de la surface du sol. Les Organisations Pelliculaires de Surface forment une dénomination très générale du phénomène et la croûte de battance a une connotation trop restreinte. En effet, cette dernière fait appel à la notion de pluie battante c'est-à-dire de pluie de forte intensité responsable de la dégradation de surface du sol. Or dès 1976, BOIFFIN et SEBILLOTTE ont montré que ces fortes pluies ne sont pas les seules responsables mais que toute l'histoire pluviométrique participe à la dégradation de la surface du sol.

2. Moyens d'étude des croûtes superficielles

L'étude de la mise en place et du fonctionnement hydrodynamique et mécanique des croûtes superficielles a été abordée en utilisant différentes méthodes d'études. Celles-ci mettent en oeuvre des croûtes formées en conditions naturelles sur le terrain ou bien, ce qui est plus souvent le cas, sous pluie simulée sur des échantillons remaniés. Ces méthodes peuvent être séparées en deux types.

21. Méthodes d'études directes par observations morphologiques

Elles visent principalement à déterminer le mode de formation et la constitution de ces croûtes, par analyse des structures et de la porosité.

Il s'agit le plus généralement de la réalisation de lames minces pour des observations micromorphologiques en microscopie optique (DULEY, 1939 ; Mc INTYRE, 1958 ; EVANS et BUOLS, 1968 ; TACKETT et PEARSON, 1965 ; FARRIS, 1978 ; VALENTIN, 1981 ; BOIFFIN et BRESSON, 1987). Certains chercheurs ont aussi utilisé la microscopie électronique à balayage pour observer des échantillons congelés (CHEN et al., 1980 ; ONOFIOK et SINGER, 1984). Ces études ont permis de révéler notamment la faible épaisseur des croûtes superficielles, de 0,1 mm à quelques cm selon les cas, reposant sur des couches sous-jacentes généralement non affectées.

Sur le terrain une méthode originale d'observation de la surface du sol a été mise au point par BOIFFIN (1984). Elle consiste en un suivi morphologique des états de surface au cours du temps et des pluies, à l'aide de notations de critères morphologiques, tels que le calibre des éléments les plus petits, l'état de soudure de la terre fine,...., appuyées par des photographies.

22. Méthodes d'études indirectes

Ces méthodes visent à déterminer certaines des propriétés des croûtes superficielles, responsables de leur comportement vis-à-vis des cultures et des sols.

- Mesure de la résistance mécanique

Un premier moyen utilisé est la mesure du module de rupture (RICHARDS, 1953), c'est-à-dire la force nécessaire pour rompre une "brique" du matériau remanié. Un autre moyen est de mesurer la résistance à la pénétration d'une aiguille. Certains auteurs (ARNDT, 1965 ; CALLEBAUT et al, 1985 ; VALENTIN, 1981) l'ont mesurée dans le sens descendant, à l'aide d'un pénétromètre. D'autres (HOLDER et BROWN, 1974 ; RUIZ FIGUEIROA, 1983) ont mesuré cette résistance du bas vers le haut, avec un appareil appelé "émergéomètre", afin d'obtenir plus précisément la force nécessaire aux plantules pour émerger à travers la croûte.

- Mesures d'infiltration de l'eau

Au cours d'une pluie d'intensité fixe, l'infiltrabilité de la surface d'un sol au départ très poreux diminue jusqu'à une valeur constante. HILLEL (1964) envisage les aspects théoriques de cette dynamique en considérant le système étudié comme la superposition de

deux couches.

La variation de l'infiltration peut être appréhendée d'une part à l'aide de la mesure des volumes d'eau infiltrés au cours du temps. On obtient alors des cinétiques d'infiltration et de ruissellement, sur des surfaces en pente (VALENTIN, 1981 ; SHAINBERG et LETEY, 1984 ; HELALIA et LETEY, 1988). D'autre part, d'une façon mieux contrôlée, des mesures de perméabilité peuvent être faites en milieu saturé, suivant la loi de DARCY, au laboratoire (Mc INTYRE, 1958 ; MORIN et al, 1981) ou sur le terrain (BOIFFIN et MONNIER, 1986).

B. Processus de formation des croûtes superficielles

L'étude du déroulement de la formation des croûtes superficielles du sol sous l'action de la pluie a souvent été liée avec celle de l'érosion hydrique.

Mc INTYRE (1958) a été l'un des premiers à étudier la dynamique de formation des croûtes. Il envisage la succession de plusieurs étapes. Tout d'abord, une étape de désagrégation, pouvant être due selon le type de sol à la dispersion : dans ce cas il y a apparition sur le premier millimètre de surface d'un microhorizon "lavé" de ses particules fines. Lors de cette même étape, les particules sont mises en mouvement par un phénomène de rejaillissement sous l'impact des gouttes de pluie (appelé effet de "splash"). Ensuite vient une étape de compactage de la surface formant une mince croûte (0,1 mm) en surface. Enfin, la surface du sol en conditions d'excès d'eau subit une turbulence sous l'action des gouttes et lorsque la pluie cesse, les particules sédimentent, avec une orientation des argiles.

FARRES (1978) précise sous simulation de pluie le déroulement de ces premières étapes notamment par cinétique de développement spatial des croûtes. Il montre le colmatage progressif des pores de la surface par des particules ou microagrégats déplacés par rejaillissement.

CHEN et al (1980) identifient par micromorphologie deux types de croûtes appelées la première *structural crust* (croûte structurale) et la seconde *depositional crust* (croûte de dépôts).

Par une approche macromorphologique sur le terrain, BOIFFIN et SEBILLOTTE (1976) tentent d'analyser sous différentes séquences pluvieuses la dégradation de la surface. Ils montrent principalement que cette dégradation superficielle n'était pas liée à quelques pluies "battantes" mais à un ensemble d'éléments comme l'état structural de départ et surtout l'histoire hydrique. De plus cette dégradation suit une succession ordonnée de différentes phases.

A la suite de ces observations, BOIFFIN (1984) a analysé en détail la dynamique de la dégradation superficielle sous l'action de la pluie et a établi la succession de

deux phases marquées par la formation d'abord d'une croûte structurale puis d'une croûte sédimentaire.

Dans les situations tropicales, VALENTIN (1981) a réalisé des études sous pluie simulée sur le terrain. Elles ont abouti à établir une typologie des Organisations Pelliculaires de Surface (OPS) et de leur mécanisme de formation, en y associant des études de comportement hydrodynamique. Dans ces conditions de pluies tropicales intenses, la formation de croûtes sédimentaires est très rapide et de nombreux faciès de ces OPS ont pu être distingués.

C. La dégradation superficielle du sol sous l'action de la pluie - Dynamique établie par BOIFFIN (1984)

Sur des sols limoneux du Bassin Parisien et de l'Ain, l'auteur a étudié la dynamique de la dégradation de la surface du sol sous l'action de la pluie. Il a mis au point et utilisé une méthode de suivis morphologiques des états de surface au cours du temps, associée à des mesures d'infiltrabilité.

Ainsi partant d'un état initial fragmentaire de la surface, comme celui créé par la préparation du sol au semis, deux phases de dégradation sont distinguées, dont les descriptions sont présentées dans le Tableau I-1.

Durant la première phase de dégradation, une croûte structurale se forme et se développe. Au départ, des éléments (fragments d'agrégats ou particules) sont mobilisés et détachés selon trois modalités de division. Ce sont une microfissuration produisant des fragments d'agrégats assez grossiers, une désagrégation par le mécanisme d'éclatement dû à la compression de l'air piégé dans les agrégats lors de l'imbibition et une désagrégation sans éclatement par l'énergie d'impact des gouttes de pluie. Ces éléments détachés sont ensuite déplacés soit par simple gravité, soit par rejaillissement ou "splash" par l'impact des gouttes de pluie, soit par circulation d'eau verticale ou horizontale, et colmatent les interstices de la surface. Leur coalescence forme les croûtes structurales. Les modalités de désagrégation apparaissent ici déterminantes car elles conditionnent la taille et la nature des fragments mobilisés puis déplacés, ayant ainsi une incidence directe sur l'épaisseur et la nature des croûtes formées.

TABLEAU I-1

Présentation des deux phases successives de la dégradation structurale de la surface du sol sous l'action des pluies d'après BOIFFIN (1984)

<p>PHASE 1</p>	<p>Morphologie et propriété de la surface du sol</p> <ul style="list-style-type: none"> - apparition de plaques continues et extension de ces plaques - incorporation à la croûte de fragments de taille croissante - diminution de l'infiltrabilité - diminution de la rugosité <p>Processus</p> <ul style="list-style-type: none"> - détachement des particules solides selon trois modalités : <ul style="list-style-type: none"> . microfissuration . désagrégation par éclatement . désagrégation sans éclatement - déplacement des particules - colmatage des interstices de surface - tassement de la surface sous l'impact des gouttes de pluie <p>Facteurs</p> <ul style="list-style-type: none"> - liés au climat : agressivité des pluies (énergie cinétique, intensité) - liés au sol : stabilité structurale, teneur en argile, en matière organique - liés à l'histoire hydrique - liés à l'état initial : taille des agrégats de surface, et état hydrique
<p>PHASE 2</p>	<p>Morphologie et propriété de la surface du sol</p> <ul style="list-style-type: none"> - apparition et développement de croûtes stratifiées dans les dépressions - signes importants de dispersion, avec ségrégation des particules <p>Processus</p> <ul style="list-style-type: none"> - détachement des particules solides - déplacement en phase liquide (par flaques ou ruissellement) opérant un tri granulométrique <p>Facteurs</p> <ul style="list-style-type: none"> - idem phase 1

Au cours de cette phase, du fait du colmatage progressif des pores de la surface, l'infiltrabilité de cette surface décroît jusqu'à des valeurs très faibles, de l'ordre de 1 mm/h, comme le montre la Figure I-1 obtenue d'après des mesures effectuées sur le terrain.

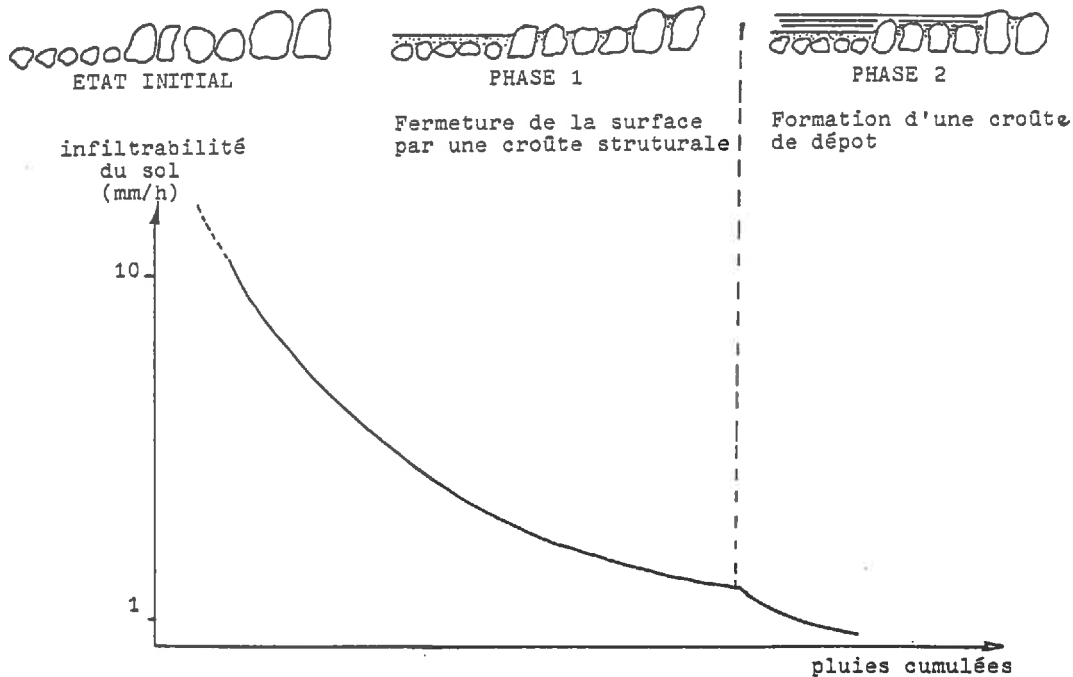


Figure I-1 : Schéma général de la dégradation structurale et variation de l'infiltrabilité de surface du sol

Le déclenchement de la **deuxième phase (la formation d'une croûte sédimentaire)** est provoqué lorsque cette infiltrabilité de la surface du sol devient inférieure durant un temps suffisant à l'intensité de la pluie. Dans ces conditions d'excès d'eau, les particules produites peuvent alors être triées en différents lits granulométriques ou bien être entraînées par le ruissellement en cas de pente.

Ce déroulement de la dégradation ne peut être réversible que par fragmentation des croûtes due à une action du gel, de la faune ou d'une pratique culturale. La dégradation peut aussi être bloquée par une dessiccation du profil augmentant l'infiltrabilité lors de la pluie suivante, par un gradient de potentiel.

D. Conséquences de la formation des croûtes superficielles

La formation d'une croûte de surface peut avoir des conséquences néfastes pour les cultures et les sols. En effet, elle peut constituer une contrainte :

- mécanique, en gênant ou empêchant l'émergence des plantules ;
- physique, en modifiant la dynamique des eaux de surface ; en réduisant l'infiltration

elle peut provoquer en cas de pente une augmentation du ruissellement pouvant conduire à l'érosion ;

- chimique et biologique, en réduisant l'aération du sol sous-jacent et pouvant conduire à un ralentissement de la germination ou à la mort par hypoxie des graines (RICHARD, 1988).

Nous allons présenter maintenant plus en détail les deux premiers points.

1. La levée des cultures

Les croûtes superficielles peuvent être responsables, du fait de leur structure, d'un retard ou d'un blocage de la levée des cultures. Cet effet est augmenté en cas de croûtes sèches et épaisses (SOUTY ET GUERIF, 1988).

Les principaux dégâts sont observés pour les cultures à plantules sensibles telles que la betterave sucrière, le colza, et les autres cultures à petites graines (endives, légumes,...). Les céréales ont des plantules plus vigoureuses pouvant plus facilement percer la croûte.

La croûte structurale peut être responsable d'un retard de la levée de betteraves sucrières, même si elle est peu épaisse, (BOIFFIN, communication orale), ceci pouvant avoir des conséquences sur le rendement final de la culture. De plus, même si elle est discontinuée lors de la levée, elle peut provoquer des variations de peuplement pouvant être très néfastes pour la qualité du produit en cas de cultures à récolte fortement mécanisée (cas de certaines cultures légumières).

Les croûtes sédimentaires sont plus néfastes pour la levée, du fait de leur structure à orientation horizontale très marquée. Dans certains cas, la présence de manques à la levée trop importants peut conduire à la réalisation d'un deuxième semis.

Ces dégâts ont une importance variable selon les années et les régions. Le Tableau I-2 montre l'évolution des surfaces de betteraves sucrières ressemées au cours des dernières années (d'après l'Institut Technique de la Betterave Industrielle).

2. L'érosion hydrique

Présentation

L'érosion hydrique se caractérise par la succession de trois processus :

départ → transport → dépôt d'éléments

où l'agent moteur est l'eau. Ces processus ont été synthétisés par différents auteurs comme ELLISON (1947) et FEODOROFF (1965). Trois principaux types d'érosion sont dégagés : érosion par ruissellement, érosion en nappe, érosion par saltation ou rejaillissement.

En France, sur les sols limoneux de grandes cultures du Nord-Ouest, l'érosion par ruissellement concentré est le plus couramment observé (MONNIER et al., 1986). Au départ se produit une réduction de l'infiltrabilité du sol dont la principale responsable est la formation de la croûte de surface. Le ruissellement en cas de pente est alors favorisé, et devient érosif en se concentrant notamment dans les traces de roue des engins agricoles (BOIFFIN et al., 1988).

Importance du phénomène

Les zones concernées par ce type d'érosion en climat tempéré sont principalement les régions de sols limoneux, qui sont en général les plateaux de loess, représentées sur la carte des risques d'érosion dans le nord de l'Europe (Fig. I-2).

Les dégâts sont constitués d'une part par des ravines et des zones de dépôts sur les parcelles agricoles gênant les pratiques agricoles et amputant le sol de sa couche fertilisée. D'autre part ils peuvent engendrer des inondations boueuses sur le réseau routier ou dans les zones d'habitation.

II. LA DESAGREGATION DU SOL PAR L'EAU

A. Les mécanismes de désagrégation

Quatre mécanismes peuvent être responsables de la désagrégation par l'eau. Ce sont l'éclatement dû à la rupture par compression de l'air interne piégé lors de l'humectation rapide, l'action mécanique due à l'énergie d'impact des gouttes de pluie, le gonflement différentiel lors de l'humectation provoquant des cisaillements et la dispersion des colloïdes.

Cependant, dans notre milieu d'étude, seuls les deux premiers interviennent (BOIFFIN, 1984 ; LE BISSONNAIS, 1988). En effet, avec des textures limoneuses, la teneur en argile est trop faible pour provoquer les cisaillements par gonflement (KHEYRABI et MONNIER, 1968). De même, le taux d'éléments dispersants comme l'ion Na^+ est très faible dans ces sols, ce qui limite le phénomène de dispersion. Cependant dans des conditions d'excès d'eau avec une forte agitation pouvant être due aux gouttes de pluie durant un assez long moment, ce mécanisme peut tout de même intervenir.

TABLEAU I-2

Surfaces de betteraves sucrières resemées
(d'après l'Institut Technique de la Betterave Sucrière)

1984	Total : plus de 30.000 hectares sur 470.000 hectares implantés			
	répartition approximative par département			
Aisne	7.500 ha	Somme	2.500 ha	
Marne-Ardennes	4.000 ha	Seine Maritime-Eure	1.150 ha	
Seine et Marne	1.500 ha	Calvados	450 ha	
Aube	1.500 ha	Oise	4.000 ha	
Nord - Pas-de-Calais	1.500 ha	Loiret	800 ha	
1985	Total : 5.000 hectares Répartition : la moitié en Champagne			
1986	Aucun dégât notable n'a été relevé			

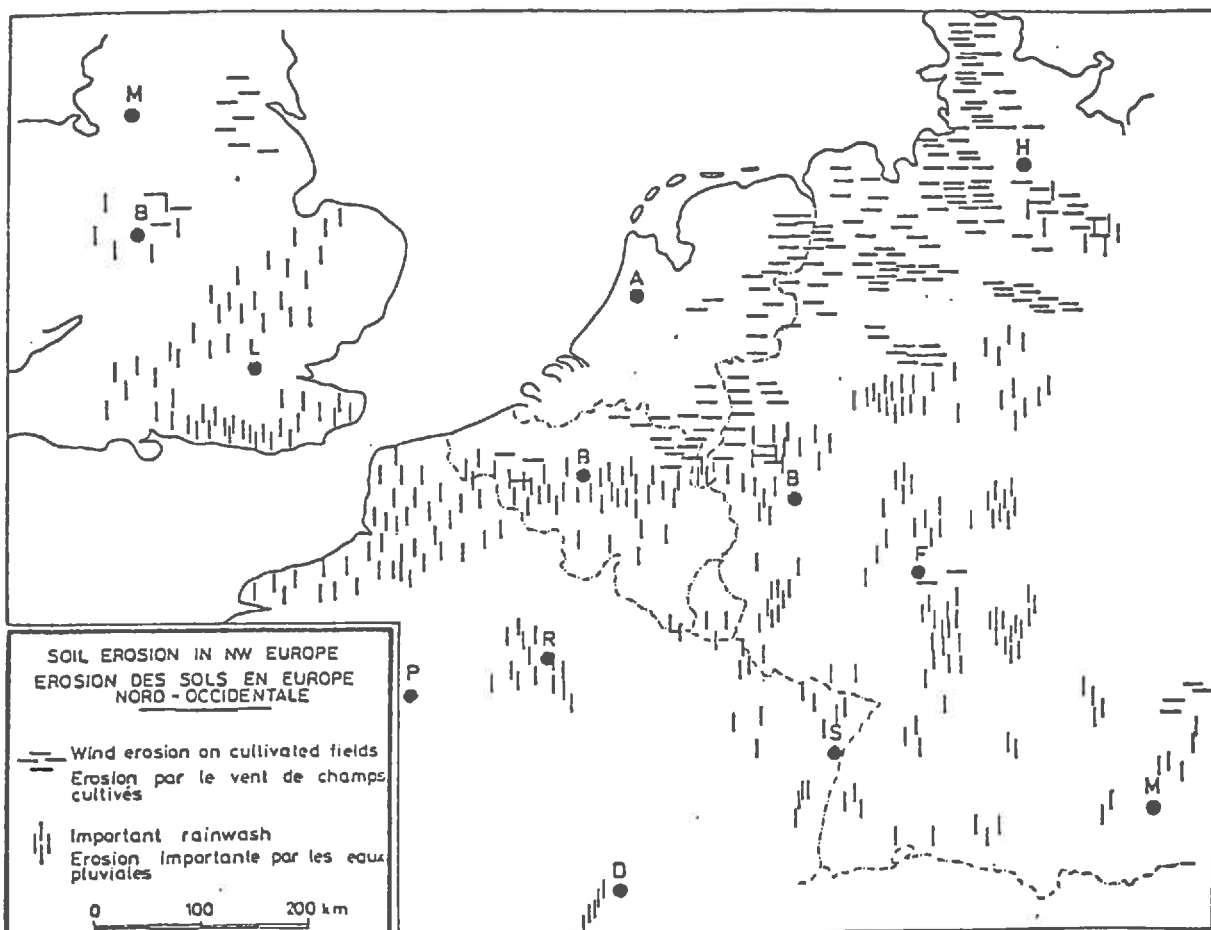


Figure I-2 : Zones concernées par l'érosion en Europe Nord-occidentale (De PLOEY, 1986)

1. L'éclatement

La désagrégation par éclatement est un mécanisme révélé au départ par YODER (1936) et HENIN (1938).

Lors de la mise en contact d'agrégats de sol avec un excès d'eau, de l'air de trouve piégé dans la porosité au coeur des agrégats. En pénétrant par capillarité, l'eau exerce une compression de l'air provoquant un éclatement de l'agrégat. Il apparaît clairement que la désagrégation va dépendre d'une part de la résistance du matériau et d'autre part de l'intensité de la compression de l'air, à savoir le volume d'air pouvant être comprimé et ses possibilités d'échappement. Les facteurs sont donc :

- la cohésion à l'état humide du matériau (CONCARET, 1967) ;
- la mouillabilité du sol, une faible mouillabilité selon son intensité pouvant soit ralentir soit empêcher l'entrée de l'eau (MONNIER, 1965) ;
- la géométrie de l'espace poral intra-agrégats qui, par sa tortuosité pourra favoriser ou non le piégeage d'air (GRAS, 1974), ainsi que la taille des pores influençant la vitesse d'entrée de l'eau (CONCARET, 1967) ;
- l'état hydrique initial du matériau, une humidité plus élevée intervenant d'une part pour diminuer la cohésion et d'autre part pour limiter la quantité d'air susceptible d'être comprimée (PANABOKKE et QUIRK, 1957 ; LE BISSONNAIS, 1988) ;
- les conditions de mise en contact du sol avec l'eau, influant sur les possibilités d'échappement de l'air interne.

LE BISSONNAIS (1988) a distingué deux expressions de ce mécanisme selon les modalités de mise en contact avec l'eau. D'une part une désagrégation totale en éléments fins se produit lors d'une mise en contact brutale comme dans le cas d'une immersion d'agrégats. D'autre part une simple microfissuration se produit dans le cas de conditions d'arrivée d'eau plus modérée comme dans le cas d'une saturation par capillarité.

2. L'énergie d'impact des gouttes de pluie

La désagrégation mécanique par l'énergie d'impact des gouttes de pluie fait intervenir deux caractéristiques liées aux gouttes de pluie qui sont leur taille et leur vitesse, dont la résultante est l'énergie cinétique.

Le facteur intrinsèque au matériau est ici principalement la cohésion, qui varie beaucoup selon l'humidité (KEMPER et ROSENAU, 1984).

Cependant cette désagrégation mécanique au cours d'une pluie est prédominant surtout dans des domaines de teneur en eau bien particuliers (EMERSON, 1954 ; LE

BISSONNAIS, 1988). En effet lorsque une pluie se produit sur un matériau sec, la désagrégation par éclatement intervient de façon prédominante durant l'humectation jusqu'à saturation. Au delà, intervient alors surtout la désagrégation mécanique, se caractérisant principalement par la production des particules fines émises par une abrasion de la périphérie des éléments structuraux.

3. Autres mécanismes

Un autre mécanisme pouvant exister à la surface du sol est le gonflement différentiel créant des zones de rupture lors d'une humectation avec des gradients de potentiel important (STENGEL, 1982 ; TESSIER et al., 1990). Cependant comme nous l'avons déjà dit, ce mécanisme concerne surtout les matériaux très riches en argile.

La dispersion des colloïdes du sol peut aussi provoquer une désagrégation dans le cas de matériaux riches en cations monovalents dispersants comme le sodium. Lors de la mise en contact avec l'eau, les argiles fortement saturées en sodium gonflent jusqu'à une dispersion par expansion des doubles couches diffuses.

B. La stabilité structurale

La stabilité structurale est définie comme l'aptitude d'un matériau à résister à l'action dégradante de l'eau (HENIN et al., 1969). Or celle-ci peut se produire de différentes façons comme nous venons de la voir. La stabilité structurale comporte donc plusieurs composantes ayant des importances différentes selon le mode de désagrégation. Ces composantes sont principalement la cohésion du matériau, la mouillabilité des parois des pores ainsi que la répartition de la taille des pores qui, en jouant sur les possibilités de piégeage ou d'échappement d'air, doit intervenir sur la stabilité structurale. Après avoir cité quelques méthodes d'évaluation de la stabilité structurale, nous détaillerons les deux premières composantes.

1. Les méthodes d'évaluation

Afin d'évaluer la stabilité structurale de sols, de nombreux tests ont été mis au point dans un objectif de comparaison de matériaux. Citons les tests de YODER (1936), de EMERSON (1967) permettant en particulier de classer des matériaux selon leur sensibilité à la dispersion, de HENIN (1938) permettant d'évaluer la part de la stabilité structurale due à la cohésion du matériau ou due à une réduction de la mouillabilité du sol ou de DE LEENHEER et DE BOODT (1959). Ces tests sont le résultat souvent global de l'action simultanée de plusieurs mécanismes, tout en privilégiant le mécanisme d'éclatement.

2. Les composantes de la stabilité structurale

21. La cohésion du matériau

La cohésion d'un matériau résulte de ses forces de liaison interne. Dans le cas d'un sol, ces forces peuvent être de différentes natures. Ce sont :

- les liaisons entre les constituants élémentaires faisant intervenir dans le cas des argiles leur nature minéralogique, leur aire spécifique de surface et leur capacité d'échange cationique ;
- la nature des cations échangeables, leur aptitude à créer des ponts entre les colloïdes ou à fixer de l'eau ;
- l'enrobage et la liaison des particules par d'autres colloïdes tels que les matières organiques et les sesquioxydes.

De plus, peuvent intervenir des forces capillaires (AZZAOU, 1988), responsables aussi du phénomène de prise en masse.

Afin de mesurer la cohésion des matériaux, différentes méthodes peuvent être employées. Une des premières techniques mise au point et déjà citée par ailleurs est la mesure du module de rupture (RICHARDS, 1953). Récemment, GUERIF (1988a) a mis au point une méthode d'étude de la résistance mécanique en traction de petits éléments structuraux de sol. Le problème dans ces études est l'appréhension de la cohésion à l'état humide des matériaux où intervient alors non seulement la rupture mais aussi la déformation.

22. La mouillabilité des parois

Une surface mouillable par opposition à une surface hydrophobe est une surface sur laquelle une goutte d'eau s'étale facilement et qui présente une énergie de liaison forte avec l'eau.

Le caractère hydrophobe peut avoir deux incidences sur la stabilité structurale, soit de façon absolue en empêchant l'imbibition de l'eau par le sol, soit de façon plus relative en réduisant la vitesse d'imbibition.

La plupart des composés minéraux étant hydrophiles, une réduction de la mouillabilité est le plus souvent attribuée aux matières organiques des sols (ROBINSON et PAGE, 1950 ; MONNIER, 1965), où non seulement la quantité intervient mais surtout la nature de ces composés. De plus une action de chauffage ou d'une longue période de dessiccation peut augmenter cet effet (MONNIER et KONAN, 1968 ; BOIFFIN, 1976)

Afin de mesurer cette propriété, différentes techniques ont été mises au point. Leur principe est en général la mesure de l'angle de contact entre une surface de solide et une goutte d'eau posée dessus. Cet angle peut se mesurer de façon indirecte par l'étude de la hauteur d'ascension capillaire à l'équilibre d'un massif de matériau

(LETEY et al., 1962), par la vitesse initiale d'ascension capillaire (EMERSON et BOND, 1963). Il peut se mesurer aussi directement en déposant une goutte d'eau sur une surface plane de matériau, en particulier sur un dépôt d'argiles orientées (CHASSIN, 1979).

III. LES CONDITIONNEURS DE SOL

A. Définition et présentation générale

1. Définitions

C'est au début des années 1950 qu'apparut pour la première fois la notion de conditionneurs de sol. Ils sont définis comme des substances qui améliorent les propriétés physiques des sols ; apportés au sol en relativement faible quantité, ils sont actifs immédiatement.

Ce sont des substances d'origines variées (SCHAMP, 1976), naturelles ou synthétiques et de nature organique ou minérale ; ce sont le plus souvent des polymères organiques de synthèse. Leurs caractéristiques, nature et propriétés, se rapprochent de molécules ou composés actifs existant déjà dans les sols, comme les matières organiques ou les oxyhydroxydes de fer et d'aluminium.

2. Utilisations des conditionneurs et propriétés recherchées

De nombreuses utilisations ont été envisagées et étudiées. En agriculture, elles concernent l'amélioration, la conservation et la mise en valeur des sols soit d'agriculture développée en régions tempérées, soit d'agriculture en voie de développement en régions arides (DE BOODT, 1975). Ce sont en particulier:

- la lutte contre la formation des croûtes de surface afin d'assurer la levée des cultures ;
- l'augmentation de la résistance à la compaction de la couche de sol travaillée ;
- l'augmentation de la perméabilité de sols argileux, en particulier dans le cas de tranchées de drainage ;
- l'augmentation de la réserve en eau du sol ;
- l'amélioration de la structure et de la conductivité hydraulique de sols salés ;
- la limitation de l'érosion en augmentant l'infiltrabilité du sol ;

- la limitation de l'évaporation et de la remontée de sel à la surface des sols de zone aride en empêchant les remontées capillaires.

Leurs utilisations sont aussi envisagées dans les domaines des travaux publics (stabilisation de talus,...) et de l'horticulture (fabrication de substrats).

Pour chacun de ces problèmes, on recherche des conditionneurs ayant des propriétés bien définies, le plus souvent vis-à-vis d'une augmentation de la stabilité structurale, de l'agrégation du sol (dans le sens de la capacité à former des agrégats à partir d'un état dispersé), de la cohésion ou encore de la mouillabilité ou de l'hydrophobicité des sols.

3. Mode d'application des conditionneurs

De même que pour le choix du conditionneur, le choix du mode d'apport dépend du problème posé. D'autres éléments intervenant dans ce choix sont la mobilité du conditionneur dans le sol et la formulation du produit : solutions, poudre ou flocons à dissoudre, émulsions ou microgranulés ...

Trois principaux modes d'apport peuvent être employés :

- incorporation et mélange du conditionneur dans la masse de terre travaillée. Cette méthode entre dans l'optique de vouloir résoudre la majorité des problèmes physiques des sols cultivés (pénétration des racines, perméabilité, risques de compaction ...). Elle a l'avantage de ne pas répéter le conditionnement chaque année, mais demande une très forte quantité de produit et pose souvent des problèmes pratiques quant à l'apport au champ.

- aspersion d'une solution ou d'une émulsion, ou épandage de granulés à la surface du sol.

- incorporation aux eaux d'irrigation, par aspersion ou par goutte à goutte.

B. Les conditionneurs organiques

1. Principaux conditionneurs étudiés

De nombreux conditionneurs organiques ont été étudiés, le plus souvent des polymères (Tableau I-3).

TABLEAU I-3

Principaux conditionneurs étudiés dans la bibliographie

Nom	Abréviation
Modified Vinyl acetate-maleic acid	<i>VAMA</i>
Hydrolysed Polyacrylonitril	<i>HPAN</i>
Polyvynil alcohol	<i>PVA</i>
Polyvynil acetate	<i>PVAc</i>
Cellulose Xanthate	<i>CX</i>
Carboxy methyl cellulose	<i>CMC</i>
Lignosulfonate Methylacrylate	<i>LIMA</i>
Polyacrylamides	<i>PAM</i>
Polysaccharides	

De nombreux polymères sont efficaces sur la **stabilité d'agrégats de sol**. Parmi de nombreux autres auteurs, MARTIN (1953) puis SHERWOOD et ENGIBOUS (1953) l'ont montré sur le *HPAN* et le *VAMA*, WILLIAMS et al. (1968) sur le *PVA*, PAGE (1980) sur le *Cellulose Xanthate*, TAYLOR et BALDRIDGE (1954) sur la *CMC* et SHAVIV et al. (1987) sur le *LIMA*, et ceci quelle que soit la charge du polymère. Récemment, HELALIA et LETEY (1989) ont étudié simultanément des *PAM* et polysaccharides de différentes charges. Les plus efficaces sont le *PAM* neutre suivi du polysaccharide anionique.

La plupart de ces polymères améliorent également l'**infiltrabilité de surface** du sol. BLAVIA et al. (1971) et GABRIELS et al. (1973) ont comparé l'effet de nombreux conditionneurs dont le *PAM*, le *PVA*, le latex et l'asphalte, sur l'évolution des taux de ruissellement, d'infiltration et de pertes en terre sous pluies simulées. HELALIA et LETEY (1988) ont montré qu'un polysaccharide cationique incorporé à l'eau de la simulation de pluie augmentait fortement le taux d'infiltration dès une concentration de 5 mg/l d'eau.

2. Rôle des polymères organiques sur les propriétés physiques des sols intervenant dans la stabilité structurale

Les polymères organiques augmentent tout d'abord la **cohésion des matériaux**. ALLISON et MOORE (1956) révèlent un effet du *VAMA* et du *HPAN*, électronégatifs, sur l'augmentation des valeurs de modules de rupture, sur certains sols à l'état sec. WILLIAMS et al. (1968) montrent que le *PVA*, neutre, augmente la cohésion d'agrégats de sol, très fortement à l'état sec mais plus faiblement à l'état humide.

Les polymères organiques peuvent limiter le **gonflement des argiles** ; EMERSON (1963) avec différents polymères et THENG et al. (1967) avec le *PVA* montrent

cet effet sur des montmorillonites calciques et sodiques.

Les propriétés de surface des matériaux peuvent également être modifiées par l'apport de polymères organiques. Sur du sable, le PVA et le PAM rendent les surfaces plus hydrophobes, alors que sur un sol limoneux ils augmentent l'hydrophilicité (HARTMANN et al., 1976).

C. Les conditionneurs minéraux

1. Principaux conditionneurs étudiés

Peu de conditionneurs minéraux ont fait l'objet d'étude en tant que tels sur les sols.

Des essais réalisés avec le *GLOTAL*, un sous-produit d'industrie chimique, à base de fer ferrique et de gypse, ont révélé un effet sur l'augmentation de l'infiltrabilité et de la porosité des sols traités (CHISCI et al., 1978).

SHANMUGANATHAN et OADES (1982b) ont étudié l'effet de polycations de FeIII apportés dans un sol. Après une simulation de pluie, ils montrent l'effet de ces polycations sur une limitation de la fissuration à la dessiccation ce qui a provoqué une réduction de la résistance à la pénétration ainsi qu'une augmentation du taux de levée de plantules de blé.

Lors d'une étude réalisée pour améliorer les sols de rizière, WADA et al. (1983b) montrent le rôle d'une solution d'aluminium hydrolysé, de formule $\text{Al}(\text{OH})_{2,2}\text{Cl}_{0,8}$, sur la floculation et la perméabilité de fractions d'argiles et de limons extraites de sol.

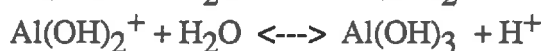
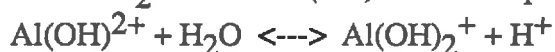
Des oxydes de fer et d'aluminium mélangés à des échantillons de sol permettent d'améliorer fortement la conductivité hydraulique mesurée sur des colonnes de sols (SHAINBERG et al., 1987).

2. Modes d'action des conditionneurs à base d'aluminium et de fer

2.1. Formes d'aluminium et de fer en solution

L'aluminium et le fer en solution peuvent subir certaines réactions telles que l'hydrolyse, la polymérisation, la complexation, la précipitation ou la cristallisation.

Lors de l'hydrolyse de ces éléments, différentes formes d'aluminium ou de fer peuvent apparaître, suivant les réactions :





ou la réaction plus générale d'hydroxylation :



Dans le cas de l'aluminium, avec l'augmentation du pH, différentes formes monomériques, di- tri- ou polymériques sont observées (Fig. I-3).

L'espèce $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_{12}^{7+}$ a été découverte par JOHANSSON (1960) et étudiée grâce à de récentes techniques telles que la R.M.N. et la diffusion des R.X. (BOTTERO et al., 1987). Cette espèce est un polymère tridimensionnel constitué par un atome d'Al central en coordinence tétraédrique entouré de douze atomes d'Al occupant des sites octaédriques (Fig. I-4). Pour un rapport d'hydroxylation $r = \text{OH}/\text{Al} = 2,5$ et pour un temps de vieillissement inférieur à 1 heure, ces polymères peuvent s'associer en "agrégats" tridimensionnels à structure fractale.

Les facteurs de la polymérisation d'aluminium et de l'apparition de différentes espèces en solution sont la dilution, le pH, la concentration initiale en aluminium, l'anion, l'âge de la solution, la présence de matières organiques ... (HUANG, 1988).

Les formes du fer en solution sont aussi diverses mais moins bien connues que celles de l'aluminium. Récemment une étude réalisée sur l'hydrolyse du fer (QUIENNE, 1989) a révélé l'apparition de plusieurs formes polymérisées, de composition encore non définie, à un stade plus précoce que l'aluminium, c'est-à-dire pour un rapport d'hydroxylation proche de 1.

22. Les oxyhydroxydes d'aluminium et de fer dans les sols

Dans les sols, le fer et l'aluminium peuvent être présents sous formes solubles, ioniques ou complexées, ou insolubles, amorphes ou cristallisés. Les composés amorphes sont relativement mal connus ; ce sont le plus souvent du fer ou de l'aluminium rendus insolubles par complexation avec des matières organiques ou encore des composés mal cristallisés. Les formes cristallisées sont pour l'aluminium la gibbsite, la boehmite ou le diaspore, et pour le fer l'hématite, la goethite, ou encore la lépidocrocite, la magnétite et la ferrihydrite.

Dans les sols de régions tempérées, le fer et l'aluminium jouent un rôle de ciments, sous forme amorphe liée aux argiles, dans l'agrégation des sols bruns. De plus, dans les sols bruns acides, une structure microagrégée dite "foisonnante" de certains horizons semble être due à l'action d'aluminium amorphe (BRUCKERT et SELINO, 1978).

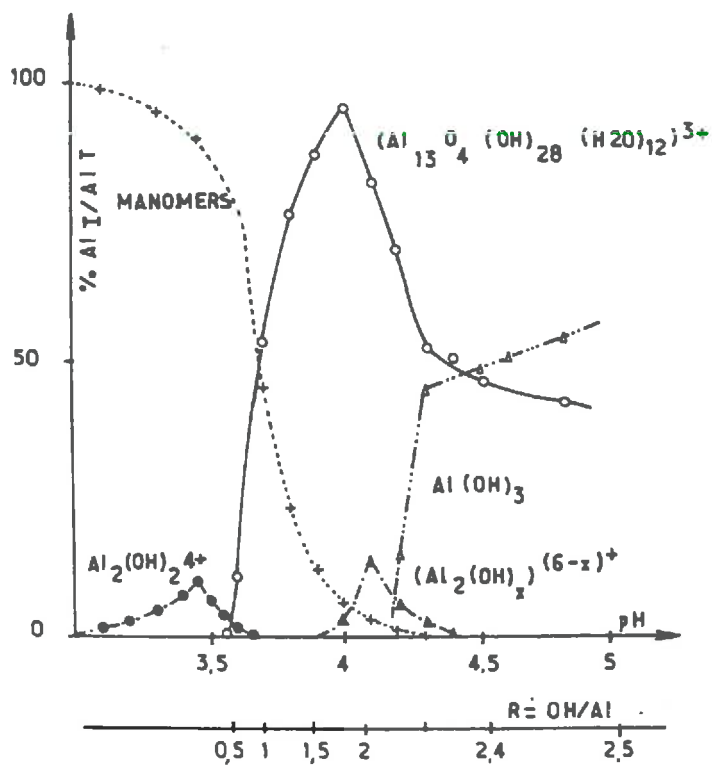


Figure I-3 : Espèces d'aluminium en solution calculées d'après les courbes de titration (BOTTERO et al., 1980).

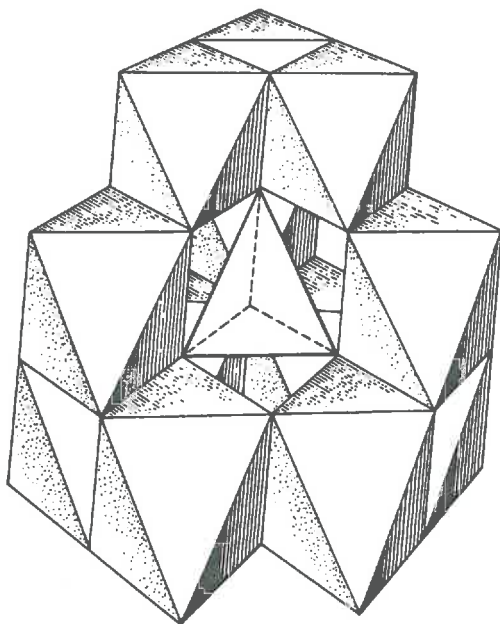


Figure I-4 : Structure de l'ion Al_{13}

En régions tropicales et équatoriales, le fer est très abondant dans les sols fersiallitiques et ferralitiques. L'action de certaines formes peu abondantes de fer (fer dit amorphe) est cependant invoquée par CHAUVEL (1976) dans la formation des micropeds, ces petits agrégats très stables présents dans les sols ferralitiques. L'aluminium, sous forme de composés aluminosiliciques amorphes comme les allophanes, est lui très répandu dans les andosols.

23. Effets des composés d'aluminium et de fer sur les propriétés physiques des sols.

Les composés issus de l'hydrolyse de l'aluminium et du fer ont des propriétés importantes de floculation des argiles (BLACKMORE, 1973 ; BOTTERO et al., 1980 ; SHANMUGANATHAN et OADES, 1982a ; ROBERT et al., 1983 ; OADES, 1984), ainsi que d'augmentation de leur perméabilité (WADA et al., 1983b). De plus, FOSTER et GAZZARD (1975) montrent une forte augmentation de la résistance à des tests de cisaillement de kaolins après traitements avec des polycations d'aluminium. Deux types de polycations ont été utilisés, issus d'une solution de rapport d'hydroxylation $r=1,5$ et $2,5$, les premiers ayant une efficacité supérieure aux seconds. Ces polycations agissent donc sur la cohésion du matériau.

Sur les sols, les polycations de fer III favorisent une résistance au retrait, en modifiant la porosité du sol (SHANMUGANATHAN et OADES, 1982b).

D. Conclusion

De nombreuses études expérimentales ont été réalisées sur les conditionneurs de sol en agriculture ou dans d'autres domaines depuis une quarantaine d'années. Cependant ces produits n'ont pas connu d'expansion sur le marché jusqu'à présent et ceci pour plusieurs raisons probables. La première raison et la plus importante est une raison économique. En effet la plupart de ces conditionneurs sont des polymères organiques de synthèse, trop coûteux pour une utilisation en agriculture. Ensuite le problème est leur mode d'application ; ces polymères en solution ont souvent une forte viscosité rendant difficile leur application par pulvérisation ou bien nécessitant l'apport d'un trop grand volume de solution totale ou encore obligeant l'achat d'un appareil spécial pour leur apport.

D'un point de vue plus fondamental, le mode d'action des différents polymères en particulier leur mode de fixation est maintenant bien connu, mais seulement dans le cas de matériaux purs, en particulier d'argiles. En effet, dans le cas d'un sol, milieu complexe et hétérogène, on ne connaît pas toujours le mode de liaison avec tous les constituants, à savoir les quartz, les argiles, les autres composés minéraux, les molécules organiques ...

D'autre part, afin d'améliorer les propriétés physiques des sol, l'utilisation de

conditionneur peut être appréhendée de trois façons différentes qui ne correspondent pas toujours aux façons d'étudier les conditionneurs au laboratoire. Ce sont tout d'abord la **formation d'une nouvelle structure** à partir d'éléments indépendants, la création d'un nouveau substrat en formant des agrégats. Dans ce cas, ce sont les études réalisées au laboratoire sur des matériaux purs qui peuvent permettre de répondre le mieux aux problèmes posés. Ensuite ils peuvent être utilisés comme **remède curatif** à un problème structural comme par exemple améliorer les propriétés hydriques d'un matériau préalablement imperméabilisé. Enfin ils peuvent être utilisés de façon **préventive**, en cherchant à stabiliser une structure préexistante jugée favorable que l'on souhaite protéger.

C'est dans cette dernière voie que nous allons nous engager dans notre étude. Elle implique une bonne connaissance des processus et mécanismes de dégradation de la structure, afin de prévoir et d'expliquer le mode d'action du conditionneur.

IV. PRESENTATION ET DEMARCHE DE L'ETUDE

A. Objectifs

Nous nous proposons d'étudier l'influence d'un conditionneur minéral à base d'aluminium sur la dégradation structurale de la surface du sol par les pluies.

Vis-à-vis de ce problème agronomique, l'objectif principal est de **déterminer le mode d'action du conditionneur** sur la structure de la surface du sol vis-à-vis de la formation des croûtes superficielles, ainsi que d'évaluer l'influence des facteurs et conditions de cette stabilisation. Nous pourrions alors chercher à prévoir le comportement de surfaces traitées dans des conditions plus généralisées.

B. Le problème posé

Le phénomène de formation de croûtes superficielles sous l'action des gouttes de pluie est un problème agronomique mettant en cause une évolution de la surface du sol dans le temps et dans l'espace, horizontalement et verticalement.

Pour étudier le mode d'action d'un conditionneur sur la structure du sol afin de lutter contre ce phénomène, on doit chercher à comprendre son rôle sur les différents processus responsables de la formation des croûtes superficielles. Aussi, afin de pouvoir prendre en compte tous les processus mis en jeu, il est nécessaire de commencer l'étude à une échelle assez petite, où de nombreux facteurs interviennent, comme c'est le cas en conditions naturelles sur le terrain. Cette partie constitue en fait une innovation dans le sens où, comme

nous avons pu le voir dans le chapitre précédent, très peu d'études sur des conditionneurs ont été réalisées sur le terrain.

Il s'agit ensuite d'isoler chaque processus et ses facteurs lors d'études en conditions contrôlées au laboratoire, en augmentant progressivement l'échelle d'étude. Nous pourrions ainsi décrire l'interaction entre l'effet du conditionneur et les facteurs du milieu, et connaître son action sur la stabilité structurale du sol. L'intérêt de cette progressivité dans l'étude est d'une part d'éviter d'oublier des étapes qui pourraient être préjudiciables à l'interprétation et d'autre part de permettre ensuite plus facilement le retour au terrain afin de prévoir l'effet du conditionneur dans des conditions plus générales.

Rappelons que cette étude se situe dans le cadre général des sols de texture de surface limoneuse, de faible stabilité structurale, dans une zone géographique située dans le nord de la France.

C. Le conditionneur étudié

1. Le WAC[®]

Le conditionneur étudié est un polychlorure basique sulfaté d'aluminium commercialisé sous le nom de WAC[®] par ATOCHEM. Sa formule est :



où pour une valeur de n égale à l'unité, m est compris entre 1,35 et 1,8.

Ce produit est actuellement commercialisé comme flocculant des eaux usées. Quelques caractéristiques sont données dans le Tableau I-4.

TABLEAU I-4
Principales caractéristiques du WAC[®]
(Informations Chimie - 1977 - n°168)

Al ₂ O ₃ (%)	10 mini.
Chlore (%)	9,2 +/- 1,2
SO ₄ (%)	2,9
Métaux lourds en Pb (ppm)	100 maxi.
Fer (%)	< 0,02
Masse volumique 25°C	1,2 +/- 0,01
pH 25°C	2,7 +/- 0,3
pH (dilution 1/20) 25°C	4,4 +/- 0,3
Viscosité 25°C (cps)	25 +/- 0,5
Point de congélation (°C)	-12 +/- 1
Stabilité du produit commercial	plusieurs années

La structure de ce composé en solution est en fait constituée d'aluminium sous formes de monomères ou dimères, liés entre eux par les ions sulfate, constituant ainsi un pseudo-polymère (ZAESSINGER, 1987). Du fait de son rapport d'hydroxylation faible, proche de 1,5, très peu d' Al_{13} y a été découvert, de l'ordre de 4% de l'aluminium total (BOTTERO, non publié). Cependant ce pseudo-polymère est un flocculant très efficace et ce dans une gamme très large de pH.

2. Le mode de conditionnement envisagé

Ce conditionneur se présente sous la forme d'une solution très facilement miscible à l'eau. Le mode d'application proposé ici est la **pulvérisation de la solution en surface du sol**, c'est-à-dire de localiser le conditionneur à l'interface entre le sol et l'atmosphère, au contact des gouttes de pluie, en utilisant le moins de matière possible.

Des essais préalables à cette thèse sur ce conditionneur (DAVID, 1986 ; LE SOUDER, 1987) ont permis d'établir une dose minimale d'efficacité, déterminée sur le terrain et sous pluies simulées au laboratoire. Différentes observations et contraintes ont permis de la définir.

1 : Une dose d'application du conditionneur de 250 litres/hectare s'est avérée être la dose minimale d'efficacité.

2 : Nous nous sommes fixé un volume maximal total apporté à l'hectare de 500 litres afin d'être réaliste vis-à-vis d'une application ultérieure.

3 : Lorsque l'on augmente le volume total apporté, la répartition et la couverture du conditionneur sur la surface est meilleure, ce qui augmente son efficacité.

Une dose de base d'application du conditionneur est ainsi établie, à :

250 l/ha de conditionneur, dilués avec la même quantité d'eau

soit un total de 500 litres/hectare.

Une hypothèse de départ est que le conditionneur migre peu en profondeur dans le sol lors de son application. En effet, un composé d'aluminium avec un rapport d'hydroxylation de 1,5 est fortement cationique. Aussi, on peut supposer qu'il se lie immédiatement par des liaisons électrostatiques fortes avec les colloïdes électronégatifs, en particulier avec les argiles présentes en périphérie des agrégats.

D. La démarche suivie

La démarche suivie afin de répondre au problème posé est la suivante.

Dans le Chapitre II, l'étude va porter sur l'influence du conditionneur sur

l'évolution de surfaces de sols sous l'action de la pluie à des échelles de temps et d'espace compatibles avec le développement de ces croûtes superficielles.

Une première partie sera consacrée à des études de terrain en conditions naturelles. Par des suivis morphologiques des états de surface, l'interaction entre les principaux facteurs responsables de la dégradation et le conditionneur sera dégagée, ainsi qu'une première compréhension du mode d'action du conditionneur.

Une deuxième partie sera consacrée à une quantification des effets du conditionneur sous pluie simulée sur échantillons remaniés vis-à-vis des propriétés hydrodynamiques de surfaces de sol ainsi qu'à la localisation plus précise dans l'espace et le temps, au cours d'une pluie, de l'action du conditionneur.

Dans le Chapitre III, le rôle du conditionneur sera étudié au laboratoire, dans une première partie, sur les principaux mécanismes responsables de la désagrégation constituant une des premières étapes de la formation des croûtes superficielles. Pour cela, des expériences seront réalisées sur des agrégats de sol naturels, unité élémentaire d'une surface de sol à l'état initial de sols cultivés. Chaque mécanisme sera étudié indépendamment ainsi que l'action de différents facteurs comme la nature du matériau.

Dans une deuxième partie, l'influence du conditionneur sur les composantes de la stabilité structurale sera abordée, en particulier sur la mouillabilité, et sur la porosité et les propriétés hydriques des matériaux .

Enfin, le Chapitre IV sera constitué par la synthèse générale et la discussion de ces résultats. Cette partie va permettre, en partant du mode d'action du conditionneur sur la stabilité structurale, d'interpréter et de prévoir le comportement de surfaces de sol conditionnées dans certaines situations pédoclimatiques typiques. De plus seront évaluées les limites et conséquences de l'utilisation de ce produit.

CHAPITRE II

ETUDE DU ROLE DU CONDITIONNEUR SUR L'EVOLUTION D'UNE SURFACE DE SOL SOUS L'ACTION DES PLUIES

Première partie :

ETUDE EN CONDITIONS NATURELLES SUR LE TERRAIN

INTRODUCTION

Cette partie d'expérimentations de terrain va permettre tout d'abord d'observer le comportement en conditions naturelles de surfaces de sol traitées avec le conditionneur, ceci par des mesures semi-quantitatives et des observations qualitatives, dans le plan horizontal de la surface du sol ainsi que dans le plan vertical. Elle va permettre ensuite de dégager les facteurs importants de la dégradation superficielle du sol influençant le comportement de ces surfaces conditionnées. Pour cela il est nécessaire d'avoir un grand nombre de situations pédoclimatiques différentes tout en restant dans le cadre de notre problème, c'est-à-dire surtout dans le cas de semis de printemps et sur des sols de texture limoneuse.

Afin d'atteindre ces objectifs, deux méthodes principales vont être utilisées. Tout d'abord l'ensemble des sites va faire l'objet d'un suivi morphologique des états de surface, nous permettant d'établir quel est l'effet du conditionneur sur la surface du sol sur le plan horizontal. Ensuite, l'évolution morphologique en coupe de la surface sera détaillée sur deux sites, par des observations de lames minces de sol.

I. MATERIEL ET METHODES

A. Sites étudiés

1. Choix des sites

Au cours des printemps 1987, 1988 et 1989 ainsi qu'à l'automne 1988, 28 sites ont fait l'objet d'études de terrain, sur des parcelles cultivées appartenant à des agriculteurs. Le site d'étude est défini comme une zone de quelques dizaines de mètres carrés, où les conditions de sol, de culture et d'histoire climatique sont homogènes.

Afin de répondre à nos objectifs, nous avons recherché dans la mesure du possible des parcelles cultivées avec des dates de semis ainsi que des textures de surface de

sol variables. Cependant, afin de préciser l'importance respective de ces différents facteurs, nous avons aussi cherché à avoir pour les mêmes dates de semis et histoires pluviométriques des sites proches de textures différentes, ou encore, pour une même parcelle et un même type de sol, deux dates de semis différentes.

Le choix des parcelles agricoles constituant les sites s'est fait de deux façons. D'une part, ces parcelles ont été choisies d'après le témoignage des agriculteurs, disant que telle parcelle était "battante" et où les cultures avaient déjà eu à souffrir des croûtes superficielles. D'autre part, elles ont été choisies aussi d'après la texture de surface des sols, en recherchant une gamme de teneurs en argile assez faibles, entre 10 et 20 %, de faible stabilité structurale.

2. Présentation des sites

28 sites ont été étudiés, se répartissant en 2 groupes.

Un premier groupe est constitué de 20 sites principaux pour lesquels toutes les données pluviométriques nécessaires ont été recueillies et où le suivi morphologique des états de surface a été régulier et constant.

Un deuxième groupe est constitué de 8 sites disposant seulement des hauteurs d'eau journalières avec parfois des imprécisions dues à l'éloignement entre le site et la station de recueil des données climatiques. Pour ces sites, principalement du fait de leur éloignement géographique, les suivis n'ont pas été aussi réguliers que les précédents. Les résultats seront donc moins complets.

21. Les sols

Les sols sur lesquels ont été implantés les essais sont surtout des sols lessivés, plus ou moins tronqués lorsqu'ils sont en position sommitale, ou colluviaux en position de bas de versant, ainsi que des rendzines brunes en Champagne.

Dans notre cas, ce sont surtout les caractéristiques de surface qui nous intéressent, en particulier la texture. Les caractéristiques analytiques sont données en Annexe I pour tous les sites. Les textures de surface seront présentées dans le Tableau II-1 récapitulatif de tous les sites, comme nous le verrons plus loin.

Les types de texture rencontrés le plus souvent, définis d'après le triangle de texture de l'Aisne donné en Annexe II, sont les Limons Moyens, les Limons Moyens Sableux et les Limons Argileux, avec une gamme de taux d'argile compris entre 10 et 20 %. Quatre sites sont situés sur des sols sablo-limoneux et deux sites sur des sols très calcaires (taux de CaCO_3 total > 50 %).

La Capacité d'Echange Cationique est peu élevée pour tous ces sites, très souvent de l'ordre de 10 meq/100g. Le taux de matières organiques est lui aussi peu variable

et faible, entre 1 et 2 %. Les valeurs de pH des sols sont assez élevées ; à l'exception de trois sites, elles sont supérieures à 7.

22. Les histoires pluviométriques

221. Les relevés pluviométriques

Pour chacun des 20 sites principaux, les pluies ont été enregistrées à l'aide de pluviographes (à augets basculeurs) d'une précision en hauteur d'eau de 0,1 mm pour certains ou de 0,5 mm pour d'autres, soit en intensité de 0,5 mm/h ou 2,5 mm/h.

Sur les 8 autres sites, seules les hauteurs de pluie journalières sont disponibles. Sur certains sites, du fait de l'éloignement des appareils de relevés, les hauteurs d'eau peuvent être imprécises de quelques mm.

222. Les différents types d'histoires pluviométriques rencontrés

Les sites ont été implantés sur des semis de printemps. Seul un site a été implanté à l'automne, afin de voir l'influence d'une histoire hydrique particulière.

Les histoires pluviométriques de tous les sites sont présentées en Annexe III, sous forme d'histogrammes de pluies journalières.

Les histoires pluviométriques peuvent être divisées en deux groupes selon la répartition des pluies au début des suivis, à savoir son caractère humide ou alterné. Nous avons été ainsi amenés à définir deux types d'histoires hydriques de la surface du sol au début des suivis selon ces histoires pluviométriques :

1 : **histoire hydrique humide**, où les pluies au début du suivi ont des hauteurs importantes (supérieures à 5 mm par jour) et fréquentes, avec seulement 1 ou 2 jours sans pluie ;

2 : **histoire hydrique alternée**, où les pluies sont peu élevées au début du suivi (inférieures à 5 mm par jour) et entrecoupées de longues périodes de dessiccation.

Ainsi, un de ces deux types d'histoire hydrique a pu être attribué à chacun des sites. Le site d'automne, pour lequel la surface du sol ne s'est pas desséchée au début du suivi, a été classé dans le type d'histoire hydrique humide malgré des pluies espacées. Ces attributions sont répertoriées dans le Tableau II-1 récapitulatif comme nous allons le voir ci-dessous.

TABLEAU II-1

Présentation générale des sites étudiés

Sites	Lieu (dpt)	Culture	Date de mise en place	Texture (1)	% A.	Log10S	Type d'histoire hydrique
C87	St Pierre Aigle (02)	B.S.*	17.04.87	LM	11	2,1	Alt
CS87	"	"	"	LA	19	1,9	Alt
CL87	Guisse (02)	B.S.	16.04.87	LA	19	1,4	Alt
CP87	Aulnois (02)	B.S.	15.04.87	LMS	15	2,0	Hum
E87	Ebouleau (02)	B.S.	10.04.87	LA	22	1,7	Alt
F87	Fongueusemare (76)	B.S.	15.04.87	LMS	12	1,5	Alt
I87	Versailles (78)	Endives	06.05.87	LMS	14	1,7	Hum
J87	"	"	09.06.87	"	"	"	Hum
LR88	Aulnois (02)	B.S.	12.04.88	SL	8	1,9	Hum
LT88	"	"	"	LSA calc.	19	1,3	Hum
AH88	Allemant (02)	B.S.	13.04.88	LA	22	1,7	Alt
AB88	"	"	"	LM	13	2,1	Alt
E88	Ebouleau (02)	B.S.	11.04.88	LA	20	1,7	Alt
S88	Athis (02)	Carottes	31.03.88	S calc.	8	1,4	Alt
SB88	"	"	28.04.88	S calc.	8	1,3	Alt
D88	Dercy (02)	Endives	15.05.88	LM	12	2,2	Hum
P88	Pouilly	Endives	16.05.88	LMS	14	2,0	Hum
M88	Mons (80)	B.S.	06.04.88	LA	19	1,9	Alt
LA88	Versailles (78)	aucune	27.10.88	LA	19	1,9	Hum
I89	Versailles (78)	Endives	18.05.89	LMS	14.5	1,7	Alt
B87	Bourgogne (51)	B.S.	09.04.87	Calc.	28(12)**	1,4	Alt
CE87	Cocherel (77)	B.S.	20.05.87	LA	18	1,5	Alt
BM87	Beaumetz (62)	Endives	25.05.87	LA	19	-	Hum
HM87	Hermies (62)	Endives	26.05.87	LAS	20	-	Hum
POM88	Pomacle (51)	B.S.	18.04.88	Calc.	28(8)**	1,0	Alt
CE88	Cocherel (77)	B.S.	15.04.88	LM	15	1,9	Hum
LOR89	Lor (02)	Carottes	29.03.89	SL	10	1,8	Hum
BER89	Bertincourt (62)	Endives	27.05.88	LA	20	-	Hum

(1) : d'après le triangle de texture de l'Aisne (Annexe II)

* : B.S. = Betteraves Sucrières

** : 28 = % d'argile avant décalcification
(12) = % d'argile après décalcification

23. Tableau synthétique (Tableau II-1)

Sur ce tableau sont présentés les deux groupes de sites, avec leur localisation, les principales caractéristiques de leur texture et de leur stabilité structurale (l'indice d'Instabilité Structurale résultant du test de HENIN), ainsi que le type d'histoire hydrique tel que nous venons de le définir ("Hum" pour l'histoire hydrique humide et "Alt" pour l'histoire hydrique alternée).

De plus, sont données les dates de semis et d'implantation des essais, ainsi que le type de culture. Ce sont des betteraves sucrières, des endives, ou des carottes. La principale caractéristique de ces semis est une préparation du sol très fine, afin d'assurer une bonne germination de ces petites graines.

3. Dispositif général d'étude

Les sites sont constitués d'un ensemble de petites parcelles d'expérimentation traitées ou non avec le conditionneur. La taille des parcelles élémentaires est différente selon la culture installée, à cause de la densité de peuplement par unité de surface, dans l'éventualité de comptages de plantules :

- * cultures de betteraves sucrières : 54 m²
- * cultures d'endives : 12 m²
- * cultures de carottes : 12 m².

31. Traitements mis en jeu

Chaque site comporte au moins une parcelle témoin et une parcelle traitée avec le conditionneur appliqué à la dose de base. Rappelons que cette dose est :

250 l/ha de WAC mélangés à 250 l/ha d'eau.

Sur certains sites deux autres doses ont été appliquées pour permettre de confirmer ce choix :

150 l/ha de WAC mélangés à 350 l/ha d'eau

500 l/ha de WAC mélangés à 500 l/ha d'eau.

32. Application du conditionneur

Le conditionneur est pulvérisé à la surface du sol aux doses données ci-dessus, juste après le semis, à l'aide d'un pulvérisateur d'expérimentation. La surface du sol ne doit pas être perturbée ensuite par un binage ou autre, le conditionneur étant supposé être localisé en surface des mottes.

Juste avant la pulvérisation, un volume de sol est prélevé en surface pour

déterminer une teneur en eau pondérale, afin de voir s'il existe une éventuelle interaction avec le conditionneur. Ces humidités sont données pour chaque site en Annexe IV.

B. Méthodes d'étude

1. Stabilité structurale d'agrégats de surface des sols

Sur certains sites, afin de voir un effet éventuel du conditionneur sur la stabilité de surface des sols, des prélèvements d'agrégats de surface ont été effectués, proches des placettes. Sur ces échantillons, a été réalisé le test de stabilité structurale de HENIN, au Laboratoire d'analyses d'Arras, sur les fractions comprises entre 2 et 3 mm préalablement séparées par un tamisage léger. Ce choix d'agrégats calibrés permet d'avoir une standardisation des échantillons en terme de granulométrie d'agrégats initiaux.

Par ce test, on obtient des taux d'agrégats stables après trois prétraitements : à l'eau, au benzène et à l'air. La combinaison de ces taux permet de donner un indice d'Instabilité Structurale.

2. Suivis morphologiques des états de surface

Pour étudier les effets du conditionneur sur l'évolution de la surface du sol sous l'action de la pluie, nous nous sommes inspirés de la méthode mise au point par BOIFFIN (1984). Elle consiste à effectuer un suivi morphologique de surfaces de sol au cours du temps et des pluies. Ainsi à partir du semis et de l'application du conditionneur, des critères d'observation sont notés à différentes dates sur le terrain puis vérifiés plus tard sur des photographies.

21. Dispositif spécifique

Des surfaces de sols de 35x50 cm appelées placettes sont délimitées par quatre piquets positionnés juste après l'application du conditionneur et qui resteront fixes par la suite. De telles surfaces permettent une observation précise tout en étant représentatives d'une surface de sol de quelques m² voire de quelques dizaines de m².

Sur chaque site et pour chaque traitement, deux placettes sont installées afin de constituer une répétition et une sécurité à l'égard d'éventuels dégâts d'animaux.

22. Caractérisation de l'état initial

Juste après la mise en place des placettes, l'état structural initial est décrit par la répartition granulométrique des mottes et particules couvrant les placettes. Les observations sont exprimées par 3 notes, établies en fonction de la proportion en éléments fins et grossiers.

G : surfaces sur lesquelles il existe très peu d'éléments inférieurs à 2 mm (couvrant moins de 20 % de la surface), avec beaucoup de mottes et très peu de terre fine ;

F : surfaces sur lesquelles les éléments inférieurs à 2 mm sont prédominants (couvrant plus de 50 % de la surface) ;

FG : surfaces intermédiaires avec une gamme variée de granulométries d'éléments en surface.

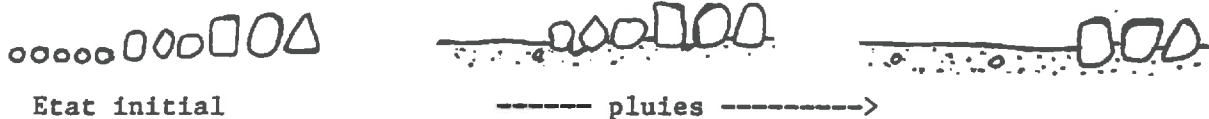
Les notes correspondant aux états initiaux des placettes sont données en Annexe IV.

23. Critères observés

Deux principaux critères sont observés et notés, le premier est le résultat d'une mesure répartie dans des classes, l'autre est de type qualitatif ordonné.

* Le **Dmin**

C'est le diamètre des plus petites particules ou agrégats distincts visibles, exprimé en millimètres. Cette mesure a pour origine le fait montré par BOIFFIN (1984) que en partant d'un état fragmentaire d'agrégats de tous calibres, les particules les plus petites sont d'abord incorporées dans des croûtes. Ainsi que le montre ce schéma,



les plus petits fragments sont d'abord mobilisés et déplacés et se soudent pour former des croûtes. Aussi, au départ ce critère a en général une valeur proche de 0 à l'état initial en cas de semis en conditions sèches comme c'est le cas pratiquement sur tous les sites ; en effet, si toutes les tailles de particules sont représentées sur la placette, les plus petites distinctes à l'oeil sont de l'ordre de 0,1 mm. Au cours des pluies, le Dmin augmente jusqu'à ne plus exister lorsque toute la surface est pratiquement lisse.

Sur le terrain, sa détermination est réalisée par une mesure lors de l'examen de la placette. Cependant nous avons suivi un mode opératoire légèrement différent de celui décrit par BOIFFIN (1984) et que nous allons présenter maintenant.

En partant du principe qu'il pouvait exister une certaine imprécision surtout lorsque la valeur du Dmin augmente, nous avons choisi, pour une meilleure performance des nombreuses notations à effectuer, d'attribuer lors de l'observation des placettes une note correspondant à une valeur moyenne de classe de mesures (en mm) définie comme suit :

Classes (mm)	Valeur notée (mm)	Classes (mm)	Valeur notée (mm)
< 1	< 1	(12-14)	13
1	1	(14-16)	15
2	2	(17-19)	18
3	3	(20-21)	20
(4-6)	5	(22-27)	25
(7-9)	8	(28-32)	30
(9-11)	10		

Afin de quantifier la courbe d'évolution de ce critère en fonction des pluies cumulées et de pouvoir comparer les différents sites, en cas d'ajustement linéaire possible, un coefficient de régression sera déterminé pour chaque courbe. Cependant, on ne cherche pas ici à modéliser les courbes mais seulement à avoir un moyen de comparaison entre elles.

* **le type de croûte** le plus développé (recouvrant plus de 50 % de la surface) ; en faisant référence aux phases de dégradation précédemment définies, on note si l'on est en présence d'un état fragmentaire proche de l'état initial, de croûtes structurales caractéristiques de la première phase de dégradation ou de croûtes sédimentaires caractéristiques de la seconde phase de dégradation.

D'autres observations plus qualitatives sont faites au cours du suivi telles que l'état de fermeture de la surface, la forme des mottes ainsi que la présence et l'abondance de fragments d'agrégats néoformés par microfissuration. La prise en compte de cette dernière caractéristique est nécessaire car elle traduit un mode de désagrégation particulier provoquant la mobilisation de fragments pour leur détachement, lié à une histoire hydrique à alternance marquée d'humectation et de dessiccation. En second lieu, elle gêne la mesure du Dmin qui doit prendre en compte seulement les agrégats présents à l'état initial et non pas ces fragments néoformés.

3. Morphologie en coupe de la surface

Des échantillons de surfaces de sol de deux sites ont été prélevés à différentes dates afin d'observer l'évolution morphologique de la structure des croûtes dans le plan vertical à l'aide de lames minces, afin de préciser l'action du conditionneur.

31. Sites prélevés

Les prélèvements ont été réalisés sur deux sites, I89 (sur un semis d'endives) et

LA88 (sans culture), correspondant respectivement à une histoire hydrique de printemps de type alterné au départ mais devenant plus humide ensuite, et à une histoire hydrique d'automne de type humide, où la surface du sol ne s'est pratiquement jamais desséchée. Les dates des prélèvements ont été choisies en fonction de l'état macromorphologique de dégradation des surfaces, à savoir le stade d'évolution, principalement des placettes témoins.

Sur le site I89, des prélèvements ont été réalisés à deux dates différentes et sur trois types de surfaces : témoin, traitée avec le conditionneur à la dose de base et traitée avec une double dose. La placette témoin est en phase de formation de croûte structurale à la première date de prélèvement, et de croûte sédimentaire à la seconde date.

Sur le site LA88, les prélèvements ont été réalisés à quatre dates et sur deux types de surface, l'une témoin et l'autre traitée à la dose de base (250 l/ha de conditionneur).

A la première date seul l'état initial du témoin a été prélevé.

A la seconde date, la placette témoin est alors en phase de formation d'une croûte structurale mais avec déjà de nombreux signes de disjonction de particules ;

A la troisième date, une croûte sédimentaire particulièrement développée recouvre la placette témoin ;

Enfin, le quatrième prélèvement constitue un état très avancé et stabilisé de dégradation.

32. Prélèvements des échantillons

Les échantillons, constitués de surfaces de sol, sont prélevés à l'aide de boîtes métalliques de taille 12x8x5 cm avec couvercle et fond amovibles. La boîte sans couvercle ni fond est enfoncée doucement à la surface, sur 3 cm de façon à laisser un espace dans la boîte au dessus de l'échantillon pour ne pas abîmer la croûte. La boîte contenant l'échantillon est ensuite dégagée à l'aide d'une truelle et le fond est glissé à sa place. La boîte peut alors être prise et fermée avec le couvercle.

Sur les petites parcelles ayant reçu les traitements, les prélèvements ont été faits le plus près possible les uns des autres aux différentes dates et selon le même alignement par rapport aux lignes de semis ou de bandes de travail du sol. Cela permet d'avoir un même état structural de profondeur.

33. Réalisation des lames minces

Les échantillons sont séchés lentement à l'air durant une quinzaine de jours puis à l'étuve à 40°C durant 48 heures. Ils sont ensuite inclus dans de la résine (résine polyester) contenant un azurant optique (UVtex). Cette substance rend la résine fluorescente sous un éclairage UV ce qui permet de révéler la porosité qui contient la résine.

TABLEAU II-2

Influence du conditionneur sur
les résultats des tests de stabilité structurale de HENIN
effectués sur des agrégats de 2 à 3 mm
prélevés en surface des sols

Sites et traitement	S	log10S	Aga (%)	Agb (%)	Age (%)
LOR89 témoin	5.4	1.7	1	1	2
LOR89 traité *	1.1	1	9	4	8
C87 témoin	4	1.6	6	2	4
C87 traité *	2.6	1.4	8	6	7
CS87 témoin	3.4	1.5	14	1	5
CS87 traité *	1.6	1.2	24	4	10
M88 témoin	8.4	1.9	5	2	3
M88 traité *	4.4	1.6	9	3	6

avec :

- S : indice global d'instabilité structurale
- Aga (%) : le taux d'agrégats stables après le prétraitement à l'alcool,
- Agb (%) : le taux d'agrégats stables après le prétraitement au benzène,
- Age (%) : le taux d'agrégats stables à l'air (sans prétraitement)

Les valeurs données pour ces trois derniers taux ont été corrigées en déduisant les taux de sables grossiers.

* : le traitement subi par les parcelles sur lesquelles ont été réalisés les prélèvements est la pulvérisation du conditionneur à la dose de base, c'est-à-dire de 250 l/ha de WAC.

Les lames sont réalisées selon la technique de GUILLORE (1983). Elles ont une épaisseur proche de 30 μm .

34. Observations

Elles sont réalisées avec une loupe binoculaire ainsi qu'un microscope, jusqu'à des grossissements de X100, avec possibilité d'éclairage par lampe UV. Les critères d'observation utilisés sont :

- la rugosité de surface, traduisant l'état de désagrégation des mottes de surface ;
- la différenciation verticale en micro-horizons ; à ce sujet, les micro-horizons que nous avons rencontrés sont semblables à ceux déjà définis dans le cas de formation de croûtes en milieu tempéré par BOIFFIN et BRESSON (1987) et complétés par BRESSON et BOIFFIN (1990) ; aussi nous utiliserons les mêmes dénominations que nous présenterons en début de présentation des résultats ;
- et enfin la présence de traits tels que des accumulations en profondeur d'argile ou de limons et sables disjoints.

II. RESULTATS ET DISCUSSION DES SUIVIS MORPHOLOGIQUES DES ETATS DE SUFACE

A. Effet du conditionneur sur la stabilité des agrégats de surface

Les résultats des tests de stabilité structurale de sol effectués sur des échantillons provenant de surfaces traitées et témoins sont présentés dans le Tableau II-2. Ces résultats sont issus d'une seule mesure, présentant en général une assez bonne reproductibilité. Toutefois, les différences minimales significatives sont de l'ordre de 5 %.

Dans ce tableau, on peut constater tout d'abord que les indices globaux d'Instabilité Structurale, S et log10S, sont plus faibles pour tous les échantillons issus de surfaces traitées, et ce pour tous les sites, indiquant ainsi une augmentation de la stabilité structurale des agrégats.

Si on regarde plus en détail les composantes de ces résultats, c'est-à-dire les taux d'agrégats stables après les différents prétraitements dont ont été déduits les sables grossiers, on peut voir que les trois taux sont augmentés avec le conditionneur. Cependant ces augmentations sont plus ou moins nettes selon les échantillons. De plus, elles sont à peu près équivalentes sur les trois tests, sans véritable discrimination.

Le conditionneur révèle donc ici une augmentation de la stabilité structurale des agrégats situés en toute surface du sol. Cependant le test utilisé ici ne permet pas d'aller plus loin sur la modalité d'action du conditionneur sur la stabilité structurale.

B. Evolution morphologique des états de surface

Nous allons présenter ici tout d'abord les résultats des évolutions morphologiques des placettes témoins et traitées de tous les sites, sites principaux puis sites secondaires. L'influence de la dose de conditionneur apportée sera aussi abordée. Nous présenterons ensuite les résultats concernant l'influence de certains facteurs, en particulier la teneur en argile ou l'histoire hydrique sur l'effet du conditionneur.

1. Effet du conditionneur sur l'évolution des états de surface observés sur les placettes

11. Mode de comparaison des courbes d'évolution du critère D_{min} en fonction des pluies cumulées

Les courbes de variation du D_{min} en fonction des pluies cumulées sont présentées en Annexe V pour tous les sites principaux. Afin de comparer ces dynamiques d'évolution, nous avons cherché à faire un ajustement en choisissant celui qui pourrait le mieux convenir. A la vue des courbes, nous avons constaté que l'ajustement linéaire pourrait convenir à la plupart de ces courbes, mais seulement pour les portions de courbe où le D_{min} est inférieur à 2 cm. En effet, au delà de 2 cm, la présence ou non de mottes de ces calibres à l'état initial et souvent leur faible importance rend trop variables ces parties de courbes. Nous avons donc vérifié de façon statistique que l'ajustement linéaire convenait le mieux, sur les courbes lorsque D_{min} était inférieur à 2 cm et comme ordonnée à l'origine 0,1 mm.

Pour certains sites, l'ajustement linéaire n'était pas le plus satisfaisant, avec des écart-types assez élevés des coefficients. Mais ils nous ont cependant permis de faire une comparaison entre tous ces sites à partir du coefficient de régression linéaire, que nous appellerons par la suite le coefficient a , indiquant donc les pentes des droites d'ajustement.

12. Présentation des résultats

Sites principaux

Les résultats de l'effet du conditionneur sur l'évolution des critères morphologiques des placettes témoins et traitées à la dose de base, sont présentés sur le Tableau II-3. Cès résultats sont exprimés tout d'abord en terme de coefficients a des régressions, que nous venons de définir. De plus sont notés dans le tableau les durées d'apparition de la phase de formation de croûtes sédimentaires sur les placettes, exprimées en jours et en pluies cumulées.

TABLEAU II-3

Influence du conditionneur
sur les critères d'observation morphologique
de l'évolution des états de surface des placettes

Sites	Coefficients de régression linéaire des courbes d'évolution du critère Dmin en fonction des pluies cumulées (*)		Temps d'apparition de la seconde phase de dégradation depuis l'état initial			
	TEMOIN	TRAITE	TEMOIN jours	pluies cum. (mm)	TRAITE jours	pluies cum. (mm)
C87	0.23 (0.02)	0.23 (0.02)	50	90	50	90
CS87	0.10 (0.002)	0.10 (0.002)	50	90	50	90
CL87	-	-	50	100	50	100
CP87	0.30 (0.06)	0.03 (0.06)	60	100	60	100
E87	0.17 (0.08)	0.17 (0.08)	55	80	55	80
F87	0.10 (0.02)	0.10 (0.02)	60	130	60	130
I87	0.45 (0.07)	0.21 (0.11)	12	40	20	60
J87	0.15 (0.02)	0.03 (0.007)	8	50	14	60
LR88	0.20 (0.03)	0.09 (0.03)	25	50	25	50
LT88	0.05 (0.007)	0.05 (0.007)	38	100	38	100
AH88	0.24 (0.05)	0.24 (0.05)	40	90	40	90
AB88	0.23 (0.06)	0.23 (0.06)	40	90	40	90
E88	0.08 (0.02)	0.08 (0.02)	50	70	50	70
S88	0.43 (0.04)	0.41 (0.08)	35	40	35	40
SB88	0.34 (0.02)	0.33 (0.001)	22	60	22	60
D88	0.17 (0.02)	0.07 (0.02)	50	55	50	55
P88	0.15 (0.06)	0.08 (0.02)	51	40	51	40
M88	0.12 (0.06)	0.12 (0.06)	55	70	55	70
LA88	0.17 (0.01)	0.1 (0.03)	40	60	60	120
I89	0.18 (0.016)	0.07 (0.03)	25	50	30	60

(*) : les valeurs entre parenthèses représentent les écart-types des coefficients de régression linéaire

Le tableau II-3 fait tout d'abord apparaître une variabilité assez importante de la rapidité de dégradation de la surface entre les sites ainsi que des réponses entre traitements.

Sur les placettes témoins, le coefficient a varie en valeurs extrêmes de 0,05 à 0,45, avec pour de nombreux sites une valeur autour de 0,20. Les dates d'apparition de la seconde phase de dégradation marquée par la formation d'une croûte sédimentaire des surfaces témoins varient de 12 à 60 jours, soit après 40 à plus de 100 mm de pluies cumulées. Cependant on peut se rendre compte que sur de nombreux sites ce temps d'apparition est tardif, après 50 jours. Ceci traduit de façon générale des conditions pluviométriques plutôt sèches.

En considérant les résultats des placettes traitées, on peut se rendre compte qu'ils sont différents des placettes témoins seulement dans le cas de quelques sites. En effet, les coefficients de régression sont différents sur ces deux types de placettes seulement sur 10 sites. De plus l'apparition de la seconde phase de dégradation n'est différente que sur 4 sites.

Lorsque cette différence existe, elle se manifeste d'une part par une réduction des coefficients a , plus ou moins importante selon les sites. Ainsi, pour les sites S88, SB88, et LA88, la différence est peu élevée à l'inverse des autres sites. D'autre part, elle se manifeste pour certains sites, par un retard d'apparition de la croûte sédimentaire. Ces retards peuvent être quantifiés de 10 à 20 jours, ou bien de 20 à 60 mm de pluies cumulées.

Sites secondaires

Sur les 8 sites secondaires, des observations en terme d'effet ou non du conditionneur ont pu être faites, mais non quantifiées pour les raisons exposés plus haut. Des notes ont été attribuées à ces sites selon l'existence et l'importance d'une différence de comportement. Les résultats sont présentés dans le Tableau II-4.

Les sites BM87, HM87 et BERT87 ont connu des différences d'états de surface entre parcelles traitées ou témoins avec même dans le cas des deux premiers sites un retard d'apparition de la seconde phase de dégradation. Sur les autres sites, une différence des états de surface a été observée mais d'une façon moins importante que sur les trois sites cités ci-dessus. Sur le site CE87, le suivi n'a révélé aucune différence due au conditionneur.

13. Influence de la dose d'application du conditionneur

Les résultats de l'influence de la dose d'application du conditionneur sur l'évolution des états de surface des placettes sont présentés dans le Tableau II-5 pour certains sites, où quatre doses ont été utilisées.

TABLEAU II-4

**Influence du conditionneur
sur une différence d'évolution des états de surface
des sites secondaires**

Sites	Note attribuée selon l'intensité des différences observées entre les placettes témoins et traitées au cours des suivis
B87	1
CE87	0
BM87	2
HM87	2
POM88	1
CE88	1
LOR89	1
BERT89	2

avec :

Note 0 : aucune différence n'a été observée lors du suivi

Note 1 : une légère différence d'évolution entre placettes témoins et traitées à au moins une date du suivi a pu être observée

Note 2 : une nette différence d'évolution entre les placettes témoins et traitées a pu être observée au cours du suivi

TABLEAU II-5

Influence de la dose d'application du conditionneur
sur les critères d'observation morphologique
de l'évolution des états de surface des placettes

Sites et traitements	Coefficients de régression linéaire des courbes d'évolution du Dmin (*)	Temps d'apparition de la Phase 2 de dégradation	
		jours	pluies cum. (mm)
E88			
Témoin	0.08 (0.02)	50	70
250 l/ha WAC (500 l/ha)	0.08 (0.02)	50	70
500 l/ha WAC (1000 l/ha)	0.08 (0.02)	50	70
C87			
Témoin	0.23 (0.002)	50	90
125 l/ha WAC (250 l/ha)	0.23 (0.002)	50	90
250 l/ha WAC (500 l/ha)	0.23 (0.002)	50	90
CP87			
Témoin	0.30 (0.06)	60	100
125 l/ha WAC (250 l/ha)	0.30 (0.06)	60	100
250 l/ha WAC (500 l/ha)	0.03 (0.06)	60	100
500 l/ha WAC (1000 l/ha)	0.02 (0.03)	60	100
D88			
Témoin	0.17 (0.02)	50	55
150 l/ha WAC (500 l/ha)	0.17 (0.02)	50	55
250 l/ha WAC (500 l/ha)	0.07 (0.02)	50	55
500 l/ha WAC (1000 l/ha)	0.05 (0.02)	50	55
I89			
Témoin	0.18 (0.016)	25	50
250 l/ha WAC (500 l/ha)	0.07 (0.03)	30	60
500 l/ha WAC (1000 l/ha)	0.03 (0.008)	30	60

(*) : les valeurs entre parenthèses représentent les écart-types des coefficients de régression linéaire

Les doses d'application du conditionneur sont données en volume par hectare, avec entre parenthèses le volume total par hectare, c'est-à-dire y compris le volume d'eau de dilution

Ces résultats montrent tout d'abord qu'avec les deux plus faibles doses (125 et 150 l/ha), les valeurs obtenues sont identiques à celles des surfaces témoins ; elles n'ont aucun effet sur les critères observés selon les sites.

Sur les deux sites C87 et E88, aucune des doses d'application du conditionneur n'a d'effet. En revanche, sur les sites D88 et I89, les coefficients de régression des surfaces ayant reçu une dose de 500 l/ha sont encore plus faibles que ceux des surfaces ayant reçu la dose de base, indiquant ainsi qu'elles se sont dégradées moins vite. Sur le site CP87, la valeur du coefficient de la surface traitée avec la forte dose est égale à celle obtenue pour le traitement à la dose de base qui est toutefois déjà très faible (0,03) ; durant le suivi, la différence s'est seulement vue entre ces deux traitements par une différence de densité des agrégats de petite taille conservés.

Sur chacun de ces trois derniers sites, aucune différence entre surfaces traitées avec la dose de base et avec la forte dose n'a pu être relevée en terme de date d'apparition de la seconde phase de dégradation. Seule, le 12-06-89 sur le site I89, une extension supérieure des croûtes sédimentaires de la placette traitée avec la plus forte dose a pu être observée par rapport à la placette traitée avec la dose de base, mais dont le pourcentage de recouvrement de la placette n'atteignait pas 50 % à la différence de la placette témoin.

Ainsi les observations relevées sur ces sites ont permis de montrer d'une part que la dose de base de 250 l/ha est bien la dose minimale efficace et d'autre part que la forte dose (500 l/ha) ne permet que d'amplifier l'effet par rapport à la dose de base. En effet, lorsque la dose de base n'a aucun effet sur un ralentissement de la dégradation de surface, alors la forte dose n'en a pas non plus. Lorsque la dose de base permet de ralentir la dégradation, alors la forte dose augmente cet effet, mais on ne peut cependant pas dire ici que cette forte dose retarde la date d'apparition de la seconde phase de dégradation.

14. Description morphologique de l'effet du conditionneur sur le ralentissement de la dégradation de la surface du sol

Nous avons choisi d'illustrer ici l'effet du conditionneur par un suivi photographique dans le cas d'un site où le conditionneur s'est révélé efficace.

La Figure II-1 représente les deux placettes, à gauche la placette témoin et à droite la placette traitée, photographiées à différentes dates successives sur le site I87.

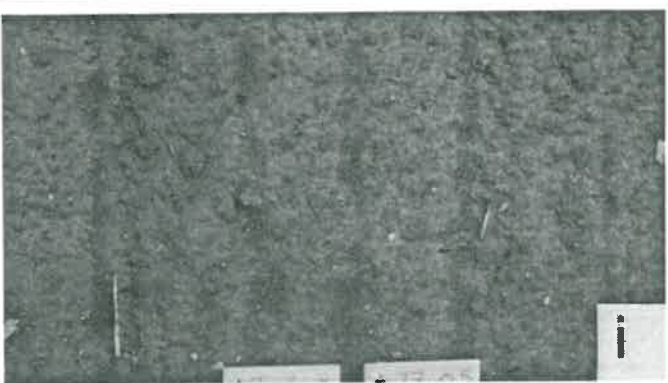
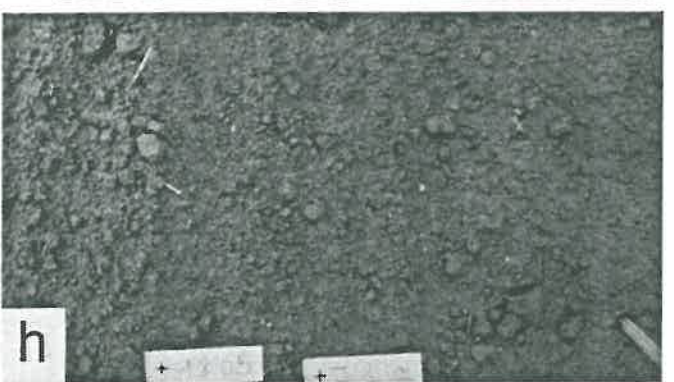
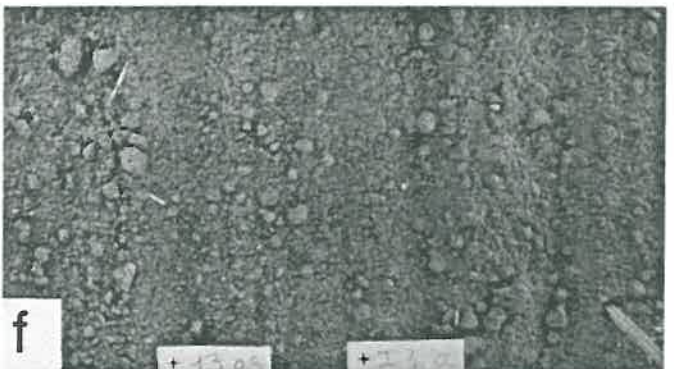
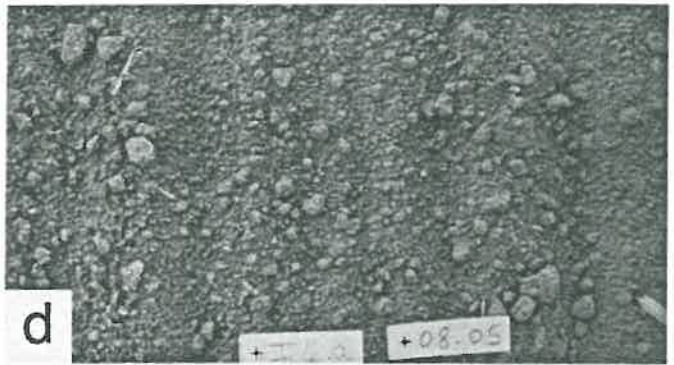
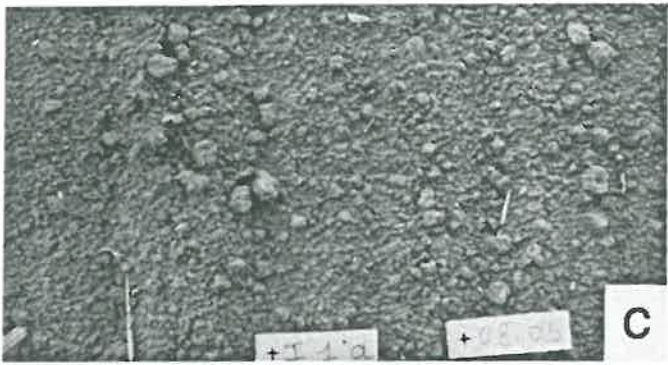
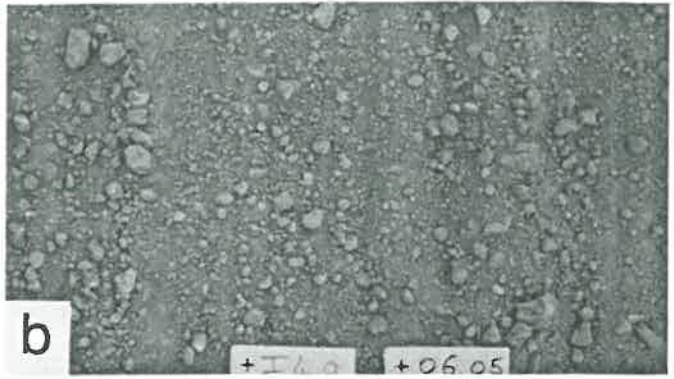
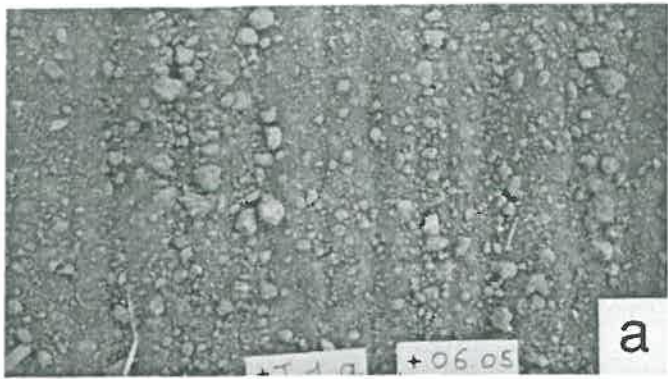
Sur les figures II-1a et II-1b, nous pouvons tout d'abord voir les états initiaux proches entre les deux placettes, avec un état granulométrique des mottes plutôt fin, caractéristique d'un semis d'endives.



10 cm

Figure II-1
Suivi morphologique des placettes du site I87

- * le 06-05-87, état initial
 - a : témoin
 - b : traité
- * le 08-05-87, après 10 mm de pluie
 - c : témoin
 - d : traité
- * le 13-05-87, après 25 mm de pluies cumulées
 - e : témoin
 - f : traité
- * le 18-05-87, après 40 mm de pluies cumulées
 - g : témoin
 - h : traité
- * le 27-05-87, après 60 mm de pluies cumulées
 - i : témoin
 - j : traité



Le 08-05-87, après 10 mm d'apport d'eau par irrigation, sur les deux placettes (Fig. II-1c et II-1d), on peut constater que les agrégats de taille supérieure à 2 mm ne se sont peu ou pas désagrégés, alors que toutes les particules fines sont soudées entre elles en plaques, marquant un début de fermeture de la surface par une croûte structurale. La seule différence entre les deux placettes, qui a été observée sur le terrain et qui est peu visible ici, est la présence sur la placette traitée d'agrégats de 1 à 2 mm encore nettement discernables, non incorporés à la croûte, à la différence de la placette témoin.

Le 13-05-87, après 25 mm de pluies et irrigation cumulées, la placette témoin (Fig. II-1e) se caractérise par une absence d'agrégats de taille inférieure à 1 cm, ayant été désagrégés et incorporés à la croûte structurale. A certains endroits, des dépôts sédimentaires ont pu être observés sur le terrain dans les dépressions. Sur la placette traitée (Fig. II-1f), la plupart des agrégats de taille supérieure à 2 ou 3 mm sont encore distincts, non désagrégés.

Le 18-05-87, après 40 mm de pluies cumulées, 50 % de la placette témoin est recouverte d'une croûte sédimentaire (Fig. II-1g). Sur la placette traitée (Fig. II-1h), la surface est couverte d'une croûte structurale, avec les agrégats et mottes supérieurs à 5 mm encore distincts.

Le 27-05-87, après 60 mm de pluies cumulées, la placette témoin (Fig. II-1i) présente un faciès dominant de croûte sédimentaire, avec toutefois encore un certain relief. La placette traitée a rejoint ici le même stade de dégradation que la placette témoin. Sur ces deux placettes, la présence de petits agrégats dans les dépressions atteste d'une fissuration récente, détachant des petits fragments des parties en relief de la placette.

Sur ce site, le conditionneur a permis la conservation des agrégats de taille supérieure à 1 ou 2 mm plus longtemps sous l'action des pluies, ralentissant ainsi la fermeture de la surface et la formation d'une croûte sédimentaire. Cependant, il n'a pas eu d'action sur les particules très fines, celles-ci s'étant soudées dès la première pluie (irrigation).

15. Synthèse des résultats

Nous avons pu constater que le conditionneur permet de ralentir la dégradation de la surface du sol mais seulement sur certains sites. Le doublement de la dose d'application ne permet pas d'étendre cet effet à d'autres sites. Il existe donc un ou plusieurs facteurs responsables de l'efficacité du conditionneur, que nous allons tenter de déterminer maintenant.

Pour cela, nous allons rapprocher les résultats obtenus pour chacun des sites de certaines caractéristiques comme la nature du matériau, les conditions initiales comme l'état initial des placettes, l'humidité de la surface du sol au moment de la pulvérisation du conditionneur et l'histoire hydrique.

TABLEAU II-6

Influence de la teneur en argile du sol
sur l'effet du conditionneur sur le ralentissement de la dégradation de la surface

coefficients de régression des courbes d'évolution du Dmin	sites	Teneurs en argile (%)	
Sites sans différence d'évolution du Dmin entre placettes témoin et traitée			
0.05	0.05	LT88	19
0.08	0.08	E88	22
0.10	0.10	F87	12
0.10	0.10	CS87	19
0.12	0.12	M88	19
0.17	0.17	E87	22
0.23	0.23	C87	11
0.23	0.23	AB88	13
0.24	0.24	AH88	22
-	-	CL87	19
Sites avec une légère différence d'évolution du Dmin entre placettes témoin et traitée			
0.34	0.33	SB88	7
0.43	0.41	S88	8
Sites avec une différence de l'évolution du Dmin entre placettes témoin et traitée			
0.15	0.08	P88	14
0.15	0.03	J87	14
0.17	0.07	D88	12
0.17	0.10	LA88	19
0.18	0.07	I89	14
0.20	0.09	LR88	8
0.30	0.03	CP87	15
0.45	0.21	I87	14
Sites secondaires			
Note attribuée selon la différence d'évolution entre surfaces témoins et traitées			
0	CE87	18	
1	B87	calcaire 28(12)	
1	POM88	calcaire 27(13)	
1	CE88	15	
1	LOR89	10	
2	BERT89	20	
2	BM87	19	
2	HM87	20	

2. Influence des différents facteurs sur la réponse du conditionneur

21. Influence de la nature du matériau

En considérant tout d'abord la richesse en argile des sols, le tableau II-6 présente le croisement entre les valeurs des coefficients de régression des sites principaux ainsi que les notes attribuées aux sites secondaires et les teneurs en argile. Notons que les sites sont regroupés selon l'importance de la différence d'évolution des placettes témoin et traitée, en particulier du coefficient de régression.

Nous pouvons constater que les teneurs en argile se répartissent dans chacun des groupes d'efficacité du conditionneur, sans véritable ordre. Les sols des sites sur lesquels le conditionneur a eu un effet ont des textures variées.

D'autre part, si on considère les couples de sites disposés dans la même parcelle agricole, ayant donc connu une même histoire culturale et histoire climatique mais de texture de sol différente, les couples C87-CS87 et AH88-AB88 ont un même résultat négatif en ce qui concerne l'effet du conditionneur. Ainsi pour une même histoire hydrique, que le sol ait 11 ou 19, et 13 ou 22 % d'argile, le résultat est le même. Le couple LT88-LR88 a connu une différence. Sur LR88 (sol sableux), le conditionneur a permis de modifier et retarder la dégradation, relevé lors des mesures de D_{min} . A l'inverse, sur LT88 (sol argilo-calcaire), aucune différence d'évolution entre les placettes n'a pu être observée. Il faut remarquer ici que sur ce site, la dégradation a été très lente, par rapport à LR88, ce sol s'avérant ainsi particulièrement stable.

De plus en ce qui concerne d'autres caractéristiques des sols, les taux de matières organiques ou l'indice de stabilité structurale ne permettent pas de dégager des tendances.

La nature du sol n'apparaît pas être ici le facteur déterminant dans l'efficacité du conditionneur.

22. Influence des conditions initiales

L'influence de deux composantes de l'état initial des placettes, données en Annexe IV, a été étudiée : tout d'abord l'humidité au moment de la pulvérisation, c'est-à-dire juste après le semis, et l'état structural de surface, à savoir l'aspect plus ou moins fin ou grossier de la distribution de la taille des mottes en surface de la placette (défini dans le paragraphe I.B.22.). Ces données sont présentées dans le Tableau II-7 en fonction des résultats obtenus sur les sites.

TABLEAU II-7

Influence de l'humidité au moment de la pulvérisation
et de l'état granulométrique initial des placettes
sur l'effet du conditionneur sur le ralentissement de la dégradation de la surface

coefficients de régression des courbes d'évolution du Dmin	sites	Humidité pondérale de la surface du sol avant la pulvérisation du conditionneur (%)	Etat granulométrique initial des placettes	
Sites sans différence d'évolution du Dmin entre placettes témoin et traitée				
0.05	0.05	LT88	-	G
0.08	0.08	E88	2.5	FG
0.10	0.10	F87	-	FG
0.10	0.10	CS87	3	FG
0.12	0.12	M88	1.5	FG
0.17	0.17	E87	4.5	F
0.23	0.23	C87	3	FG
0.23	0.23	AB88	5	G
0.24	0.24	AH88	4	G
-	-	CL87	2	FG
Sites avec une légère différence d'évolution du Dmin entre placettes témoin et traitée				
0.34	0.33	SB88	1	F
0.43	0.41	S88	1.5	F
Sites avec une différence de l'évolution du Dmin entre placettes témoin et traitée				
0.15	0.08	P88	1.5	F
0.15	0.03	J87	-	F
0.17	0.07	D88	4	F
0.17	0.10	LA88	14	G
0.18	0.07	I89	-	FG
0.20	0.09	LR88	-	F
0.30	0.03	CP87	1.5	FG
0.45	0.21	I87	3	F
Sites secondaires				
Note attribuée selon la différence d'évolution entre surfaces témoin et traitée				
0		CE87	8	G
1		B87	15	G
1		POM88	10	G
1		CE88	4	FG
1		LOR89	1.5	F
2		BERT89	-	FG
2		BM87	-	FG
2		HM87	-	FG

Nous pouvons voir tout d'abord que l'humidité avant la pulvérisation du conditionneur, dans la gamme des mesures relevées, n'est pas liée à l'existence ou non de différence d'évolution entre surfaces témoins et traitées.

Ainsi, jusqu'à 10 ou 15 % d'humidité, l'humidité de la surface du sol au moment de l'application du conditionneur n'est pas un élément déterminant dans l'effet du conditionneur contre la dégradation superficielle.

Ensuite, en considérant l'état granulométrique initial de surface des placettes, on peut constater que cette caractéristique n'a pas d'influence non plus sur l'effet du conditionneur.

23. Influence de l'histoire hydrique

Les caractéristiques prises en compte ici sont d'une part le type d'histoire hydrique comme nous l'avons précédemment défini pour chaque site et d'autre part la présence d'abondants agrégats néoformés sur les placettes, relevée au cours des suivis. En effet, leur existence traduit le phénomène de microfissuration, observée sur le terrain par BOIFFIN (1984). Cet auteur a montré la relation entre ce phénomène et une histoire hydrique marquée par une alternance contrastée de dessiccation et d'humectation. Ainsi cette donnée va nous permettre de compléter le rôle de l'histoire hydrique.

Ces deux caractéristiques sont présentées sur le Tableau II-8, pour chacun des sites. Notons que le site BERT89 ne sera pas pris en compte dans cette partie en raison de l'imprécision avec laquelle son histoire hydrique est connue.

Nous pouvons alors remarquer une répartition bien ordonnée des types d'histoire hydrique selon l'effet plus ou moins marqué du conditionneur. Pour chacun des sites où une différence de dégradation entre placettes témoin et traitée a été observée d'une façon nette, on peut se rendre compte que l'histoire hydrique en début du suivi a été de type Humide à l'exception toutefois du site I89. A l'opposé, lorsque aucune différence n'est apparue au cours du suivi entre placettes témoin et traitée, l'histoire hydrique a été de type Alternée, à l'exception du site LT88.

Le site I89 a connu une histoire hydrique marquée au départ par une irrigation importante localisée entre deux périodes de dessiccation ce qui explique cette attribution de type d'histoire hydrique. Cependant, juste après il a connu une histoire hydrique humide ce qui peut expliquer ici son comportement. Pour ce qui est du site LT88, rappelons que le sol s'est avéré particulièrement résistant, du fait de sa nature argilocalcaire, ce qui peut expliquer aussi ici son comportement.

TABLEAU II-8

Influence de l'histoire hydrique en début de suivi
et de la présence ou non d'agrégats néoformés sur les placettes
sur l'effet du conditionneur sur le ralentissement de la dégradation de la surface

coefficients de régression des courbes d'évolution du Dmin	sites	Type d'histoire hydrique sur les sites sur le début des suivis	Présence d'agrégats néoformés en abondance sur les placettes	
Sites sans différence d'évolution du Dmin entre placettes témoin et traitée				
0.05	0.05	LT88	Hum	non
0.08	0.08	E88	Alt	oui
0.10	0.10	F87	Alt	oui
0.10	0.10	CS87	Alt	oui
0.12	0.12	M88	Alt	oui
0.17	0.17	E87	Alt	oui
0.23	0.23	C87	Alt	oui
0.23	0.23	AB88	Alt	oui
0.24	0.24	AH88	Alt	oui
-	-	CL87	Alt	oui
Sites avec une légère différence d'évolution du Dmin entre placettes témoin et traitée				
0.34	0.33	SB88	Alt	non
0.43	0.41	S88	Alt	non
Sites avec une différence de l'évolution du Dmin entre placettes témoin et traitée				
0.15	0.08	P88	Hum	non
0.15	0.03	J87	Hum	non
0.17	0.07	D88	Hum	non
0.17	0.10	LA88	Hum	non
0.18	0.07	I89	Alt	non
0.20	0.09	LR88	Hum	non
0.30	0.03	CP87	Hum	non
0.45	0.21	I87	Hum	non
Sites secondaires				
Note attribuée selon la différence d'évolution entre surfaces témoin et traitée				
0		CE87	Alt	oui
1		B87	Alt	non
1		POM88	Alt	non
1		CE88	Hum	non
1		LOR89	Hum	non
2		BERT89	-	non
2		BM87	Hum	non
2		HM87	Hum	non

Cependant l'élément marquant de ce tableau est la parfaite concordance entre les sites sur lesquels le conditionneur n'a eu aucun effet et la présence d'agrégats néoformés sur les surfaces. Ce phénomène montre que le sol acquiert une nouvelle structure par fissuration avec et sans traitement. Cela ne veut pas dire que le conditionneur n'a pas d'effet. Cela signifie seulement que l'effet de la fissuration est dominant.

Dans le cas des histoires hydriques comme nous les avons définies, l'influence de longues périodes de dessiccation, qui peut être responsable d'augmentation de la stabilité des agrégats de surface (BOIFFIN et al., 1986) par renforcement du caractère hydrophobe des matières organiques, n'a pas pu être prise en compte. En effet les histoires hydriques définies par leur caractère alterné comportent toutes aussi de longues périodes de dessiccation.

Cependant des tests de stabilité structurale (test de HENIN réalisé sur des agrégats de 2 à 3 mm) ont été effectués sur des prélèvements faits en surface des sols à deux dates différentes encadrant une période sèche. Ces données vont permettre de discuter l'influence propre des périodes de dessiccation, notamment de voir si en augmentant la stabilité structurale des agrégats des surfaces témoins, la dessiccation n'aurait pas permis de jouer le même rôle que le conditionneur.

Ces mesures ont été réalisées dans le cas de deux sites, C87 et M88, sur un premier prélèvement à l'état initial et sur un second prélèvement réalisé quelques jours après sans qu'il n'y ait eu de pluies. Les résultats sont présentés dans le Tableau II-9.

Nous pouvons constater que les périodes sèches ont eu un effet en augmentant la stabilité structurale des agrégats de surface. La période sèche affecte ici principalement le taux d'agrégats stables après prétraitement à l'alcool.

Cependant, sur les surfaces traitées la stabilité structurale est augmentée de la même façon que sur les surfaces témoins. On peut donc considérer que les deux effets stabilisateurs, le conditionneur et la dessiccation, sont additifs.

C. Discussion et conclusion

Les différents résultats obtenus en conditions naturelles peuvent être ici synthétisés : ils vont nous permettre de dire comment le conditionneur agit sur l'évolution de surfaces de sol sous l'action de la pluie. Nous dégagerons ensuite les facteurs modulant les effets, notamment ceux responsables de l'inefficacité du conditionneur.

1. Action du conditionneur sur l'évolution de la structure de surfaces de sol sous l'action de la pluie

Les éléments apportés par les résultats jusqu'à présent permettent d'indiquer que le conditionneur agit dès les premières pluies en conservant plus longtemps la structure des mottes de surface. Dans le schéma général de la dégradation de la surface vers la

TABLEAU II-9

Influence d'une période de dessiccation de la surface du sol
sur les résultats des tests de stabilité structurale de HENIN

(agrégats de 2 à 3 mm
prélevés sur des surfaces témoins et traitées)

Sites et traitement	S	log10S	Aga (%)	Agb (%)	Age (%)
Etat initial					
C87 témoin	4	1.6	6	2	4
C87 traité	2.6	1.4	8	6	7
Après 7 jours					
C87 témoin	2.7	1.4	9	3	6
C87 traité	2.2	1.35	11	6	8
Etat initial					
M88 témoin	8.4	1.9	5	2	3
M88 traité	4.4	1.6	9	3	6
Après 13 jours					
M88 témoin	4.4	1.6	10	2	4
M88 traité	3.1	1.5	16	2	6

avec :

- S : indice global d'instabilité structurale
- Aga (%) : le taux d'agrégats stables après le prétraitement à l'alcool,
- Agb (%) : le taux d'agrégats stables après le prétraitement au benzène,
- Age (%) : le taux d'agrégats stables à l'air (sans prétraitement)

Les valeurs données pour ces trois derniers taux ont été corrigées en déduisant les taux de sables grossiers.

formation de croûtes, il permet de retarder la mobilisation et le détachement d'agrégats-ou de particules, décalant ainsi le processus ultérieur de fermeture de la surface et la date de formation de la croûte sédimentaire. Il ralentit donc le développement de la première phase de dégradation, de formation d'une croûte structurale.

Cependant, dans de nombreux cas, le conditionneur a été inefficace sur le ralentissement de la dégradation de surface.

2. Cas de non-effet du conditionneur

Les résultats ont montré que ce fait était principalement associé à l'existence d'un mécanisme au début de la dégradation, la microfissuration, liée à une histoire hydrique alternée, qui a été définie par BOIFFIN (1984) puis étudiée plus en détail par LE BISSONNAIS (1988). Cet auteur attribue ce phénomène dans les sols faiblement pourvus en argile à un éclatement partiel des agrégats se produisant lors d'une arrivée d'eau peu brutale sur un matériau sec.

De telles situations se traduisent par la production d'abondants agrégats néoformés par fissuration sur toutes les surfaces, sans que ces éléments se soudent et forment une croûte. La Figure II-2 illustre ce phénomène avec d'une part les zones de départ des fragments d'agrégats visibles sur la motte traitée avec le conditionneur et d'autre part avec l'accumulation de ces fragments détachés, ici dans des traces de roue. On peut donc se rendre compte que le détachement de ces fragments entraîne un bouleversement de la surface du sol.

Ainsi il y a action combinée de la fissuration, mobilisant des agrégats, et des gouttes de pluie par effet de rejaillissement provoquant leur détachement. Ceci nous conduit à envisager le schéma suivant (Fig. II-3), intégrant ces éléments et le fait que le conditionneur est fixé à la périphérie supérieure des mottes. Dans un tel cas, on se rend bien compte que l'action potentielle du conditionneur ne peut plus se faire, la surface du sol étant recouverte de nouvelles surfaces non conditionnées.

Cette hypothèse impliquerait que le conditionneur n'empêche pas ce mécanisme de microfissuration, aux doses testées, ce qui sera à vérifier par la suite.

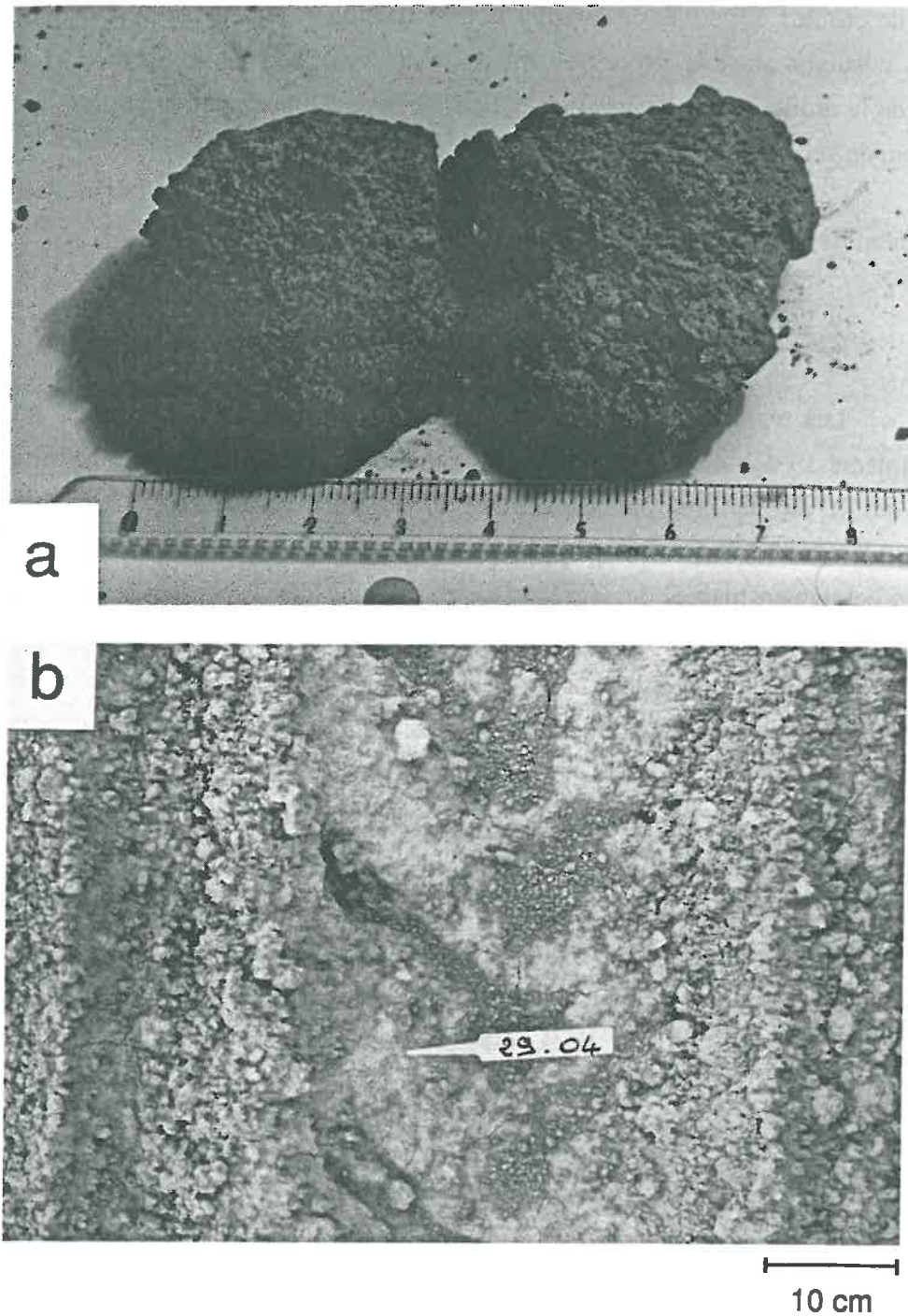
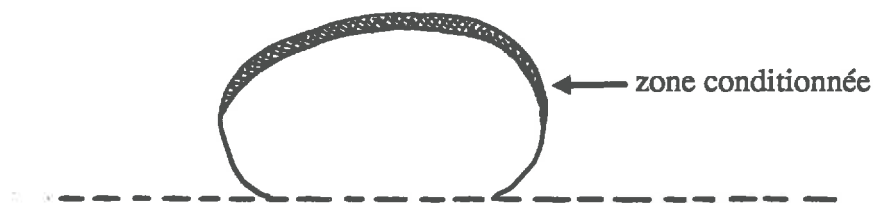


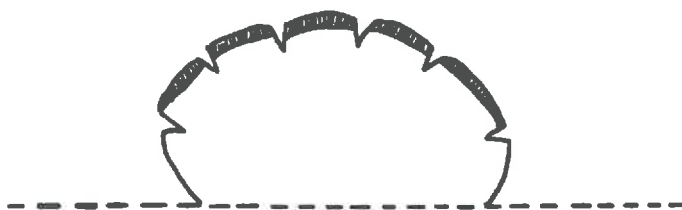
Figure II-2 : Aspects morphologiques de mottes et fragments d'agrégats illustrant la présence d'agrégats néoformés par microfissuration

- a : mottes avec des marques de détachement de petits fragments.
à gauche, motte issue d'une surface témoin
à droite, motte issue d'une surface traitée
- b : dépôt d'agrégats néoformés dans une trace de roue

Etat initial d'une motte à la surface du sol



Microfissuration à l'humectation lors des faibles pluies



Détachement des microagrégats sous l'effet des gouttes de pluies

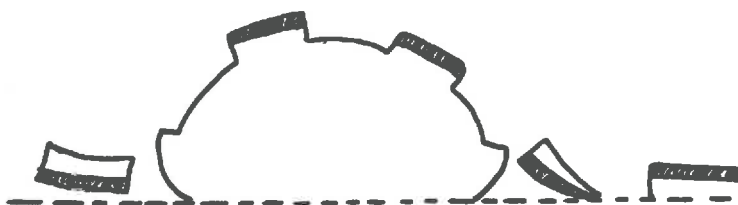


Figure II-3 : Schéma d'évolution de la structure de mottes de surface traitées avec le conditionneur lors d'histoire hydrique alternée provoquant une microfissuration

3. Autres facteurs

Dans la gamme des sols étudiés, la nature du matériau n'a pas eu beaucoup d'influence sur l'effet du conditionneur.

Seuls les sols sableux ont eu un comportement un peu différent. D'une part on n'a jamais ou très peu observé de présence d'agrégats néoformés par microfissuration, alors que les histoires hydriques y étaient favorables. Une hypothèse serait que ce sol très pauvre en argile se trouverait plus rapidement en conditions de désagrégation totale par éclatement et non pas d'une simple fissuration, ce qui reste à confirmer. D'autre part, ces sols n'ont pas révélé un effet très marqué du conditionneur comme dans d'autres sites. Il reste à savoir si c'est à cause vraiment de leur pauvreté en argile, ou plutôt à cause de la répartition granulométrique des mottes à l'état initial, à savoir une faible proportion d'agrégats.

D'autre part, le sol du site LT88, argilo-calcaire avec des cailloux, s'est révélé lui particulièrement résistant à la dégradation avec cependant pas de présence d'agrégats néoformés.

En ce qui concerne les histoires hydriques, l'effet de l'alternance d'humectation non violente et de dessiccation et la présence de longues périodes de dessiccation n'ont pas pu être départagées quant à leur influence sur la microfissuration. Cependant il est sûr que les périodes de dessiccation, en augmentant la résistance des mottes de surface par une augmentation de l'hydrophobie des matières organiques (BOIFFIN et al., 1986), et par l'augmentation du taux d'agrégats stables après prétraitement à l'alcool comme nous l'avons vu, ne peut que favoriser la microfissuration aux dépens d'une désagrégation plus brutale.

4. Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'étudier le comportement en conditions naturelles de surfaces de sol traitées avec le conditionneur. Nous avons pu dégager le rôle déterminant de l'histoire hydrique de la surface du sol, en particulier le caractère humide ou alterné de périodes sèches, engendrant une évolution différente de la structure de surface.

En cas de conditions humides, le conditionneur provoque un retard de la dégradation se manifestant dès les premières pluies par un ralentissement de la désagrégation des mottes et par conséquent de la fermeture de la surface.

En cas d'histoires hydriques alternées (petites pluies et périodes sèches), aucun effet du conditionneur n'a pu être relevé. L'hypothèse que nous évoquons est la microfissuration, liée à de telles histoires hydriques, qui provoque une perturbation de la surface du sol sans toutefois créer de croûte, en formant de nouveau agrégats non protégés par le conditionneur.

D'autres facteurs de la dégradation de la surface sous l'effet des pluies, concernant la nature du sol, ont pu être dégagés comme le degré d'affinement des mottes de

départ ou l'importance de particules indépendantes, que le conditionneur ne peut protéger. L'effet intrinsèque de la nature du sol en particulier du taux d'argile sera étudié dans une prochaine partie.

Nous allons tenter maintenant de préciser l'action du conditionneur, en cas d'histoires hydriques favorables, sur les modalités de fermeture de la surface, en étudiant l'évolution en coupe de la surface, sur un suivi de lames minces, sur deux sites d'histoires hydriques différentes.

II. EVOLUTION MORPHOLOGIQUE EN COUPE DE LA SURFACE

A. Résultats

Les résultats présentés ici concernent le suivi morphologique par observation de lames minces de deux sites, I89 et LA88, le premier au printemps et le second en automne-hiver. Les photographies des vues générales des lames sont présentées sur les figures II-4 et II-6. Les caractéristiques des microhorizons typiques dont nous nous sommes servis pour les observations sont données dans le Tableau II-10.

1. Site I89 de printemps

* Lors du premier stade de prélèvement, le 12-06-89 c'est-à-dire après 51 mm de pluies cumulées, les photographies des lames minces correspondant au trois traitements sont présentées sur la Figure II-4. Le premier fait marquant est l'organisation en profondeur, c'est-à-dire au dessous du centimètre de surface perturbé par la croûte. Elle est caractérisée par une abondance d'éléments très fins qui sont en fait de petits agrégats de l'ordre du millimètre et même inférieurs, avec quelques grosses mottes. Cela traduit en fait un état initial fin comme nous l'avons déjà vu lors du suivi des états de surface sur les placettes, caractéristique d'un semis d'endives.

Sur l'échantillon témoin (Fig. II-4a), la rugosité de surface est assez émoussée, avec encore quelques petits agrégats d'environ 1 mm en relief sur la surface. Sur l'échantillon traité à faible dose (Fig. II-4b), la surface est un peu émoussée aussi mais il y a de plus gros fragments en relief, de 2 à 5 mm. Sur l'échantillon traité à forte dose (Fig. II-4c), la rugosité est encore très élevée avec toutes les classes d'agrégats en relief.

Les microhorizons rencontrés sont représentés sur le schéma de la Figure II-5. La surface de l'échantillon témoin est fermée par un microhorizon de type m_2 continu d'une épaisseur de 1 à 3 mm. Il est constitué d'un assemblage de fragments d'agrégats ainsi que de quelques particules de quartz indépendantes. Ce microhorizon se divise en deux parties selon la porosité. La partie supérieure, sur 1 mm, en contact direct avec les gouttes, est plus dense que la partie inférieure qui reste plus poreuse, avec des vides d'entassement compact. A la surface, des accumulations de quartz disjoints se localisent dans certaines dépressions, constituants des poches (début de m_3). Au dessous du m_2 , on trouve un microhorizon $m_{1,2}$ mais d'extension latérale non continue. Sous ces microhorizons de dégradation, après une fissure horizontale due à un décollement de la croûte lors de la dessiccation préalable à l'inclusion, l'échantillon de sol a une structure fragmentaire, très proche de l'état initial, défini comme un microhorizon de type m_1 .

TABLEAU II-10

Principales caractéristiques des microhorizons rencontrés
lors de la dégradation de surface du sol sous l'action des pluies
(d'après BOIFFIN et BRESSON, 1987; BRESSON et BOIFFIN, 1990)

m₁	<p>Structure fragmentaire très nette Porosité très forte ménagée par un entassement libre des agrégats En coupe, la phase solide est discontinue</p>
m₁₋₂	<p>Structure fragmentaire peu nette Porosité moyenne ménagée par un entassement jointif des agrégats En coupe, la phase solide est continue, mais les vides semblent continus dans l'espace Microhorizon de transition entre m₁ et m₂</p>
m₂	<p>Structure continue Porosité faible, semblant discontinue dans l'espace Les pores sont de forme plus ou moins arrondie, jusqu'à la formation de vésicules Microhorizon caractéristique du faciès de formation d'une croûte structurale</p>
m₃	<p>Structure continue litée Porosité faible Caractérisé par l'accumulation de particules disjointes (grains de limons ou de sables, microagrégats d'argile) plus ou moins bien lités selon le degré d'évolution Microhorizon caractéristique du faciès de formation d'une croûte sédimentaire</p>

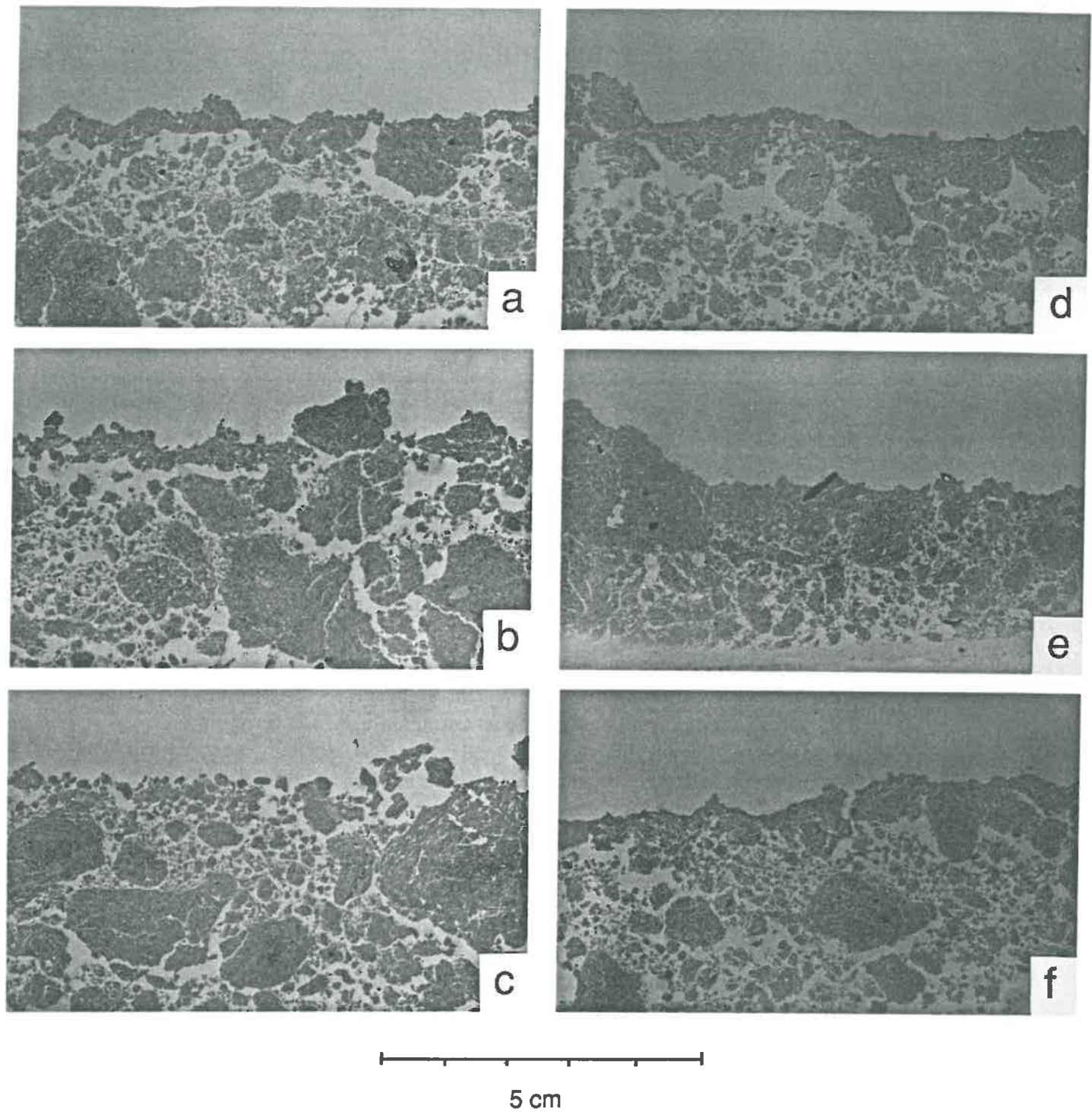


Figure II-4 : Observations en coupe des surfaces témoins et traitées du site I89

Après 51 mm de pluies cumulées
(12-06-89)

a : témoin
b : traitée à la dose de base
c : traitée à la double dose

Après 86 mm de pluies cumulées
(03-07-89)

d : témoin
e : traitée à la dose de base
f : traitée à la double dose

A cette date, la répartition des microhorizons indique que l'état de dégradation de cette surface témoin se situe au début de la seconde phase de dégradation, marquée par le début de la formation d'une croûte sédimentaire.

Sur l'échantillon ayant été traité avec la faible dose, on retrouve les mêmes types de microhorizons mais leur répartition est différente. Le m_2 , toujours en surface, n'est pas continu et moins épais. De même que précédemment, on trouve un m_{1-2} dessous, non continu, avant d'atteindre le m_1 non perturbé. La surface de cet échantillon est ainsi en première phase de dégradation, celle du développement d'une croûte structurale.

Sur l'échantillon traité avec la forte dose, on ne retrouve pas ces mêmes microhorizons. Seul un début de m_{1-2} a pu être observé, de façon discontinue, entre des mottes conservées. L'état de cette surface est donc proche de l'état initial.

* Lors du second prélèvement, le 03-07-89, après 86 mm de pluies cumulées, la rugosité de surface des échantillons s'est émoussée un peu plus, à l'exception de quelques grosses mottes présentes sur les lames. C'est sur l'échantillon traité à forte dose (Fig. II-4f) que la différence par rapport au stade précédent est la plus nette, sa rugosité se rapprochant ici de celle des deux autres échantillons (Fig. II-4d et II-4e).

La succession verticale des microhorizons a évolué sur ces échantillons (Fig. II-5). Sur le témoin, un microhorizon de type m_3 , constitué de lits sédimentaires, s'est formé en surface dans certaines dépressions, pouvant atteindre 2 mm d'épaisseur. Au dessous, le m_2 s'est épaissi, jusqu'à 5 mm par endroit. Il est constitué aussi de deux parties superposées distinctes par l'abondance de porosité (une partie supérieure plus dense et une partie inférieure avec des vides d'entassement compact). Le m_{1-2} se trouve toujours localement, surmontant un m_1 pratiquement inchangé. Sur l'échantillon traité avec la plus faible dose, on peut remarquer au microscope quelques lits de quartz disjoints peu développés (m_3). De même que précédemment, on retrouve un m_2 , d'une épaisseur ici de 2 mm, et un m_{1-2} en poches sur un m_1 . Sur ces trois échantillons, la seconde phase de dégradation est atteinte ; mais elle est encore peu développée sur les échantillons traités.

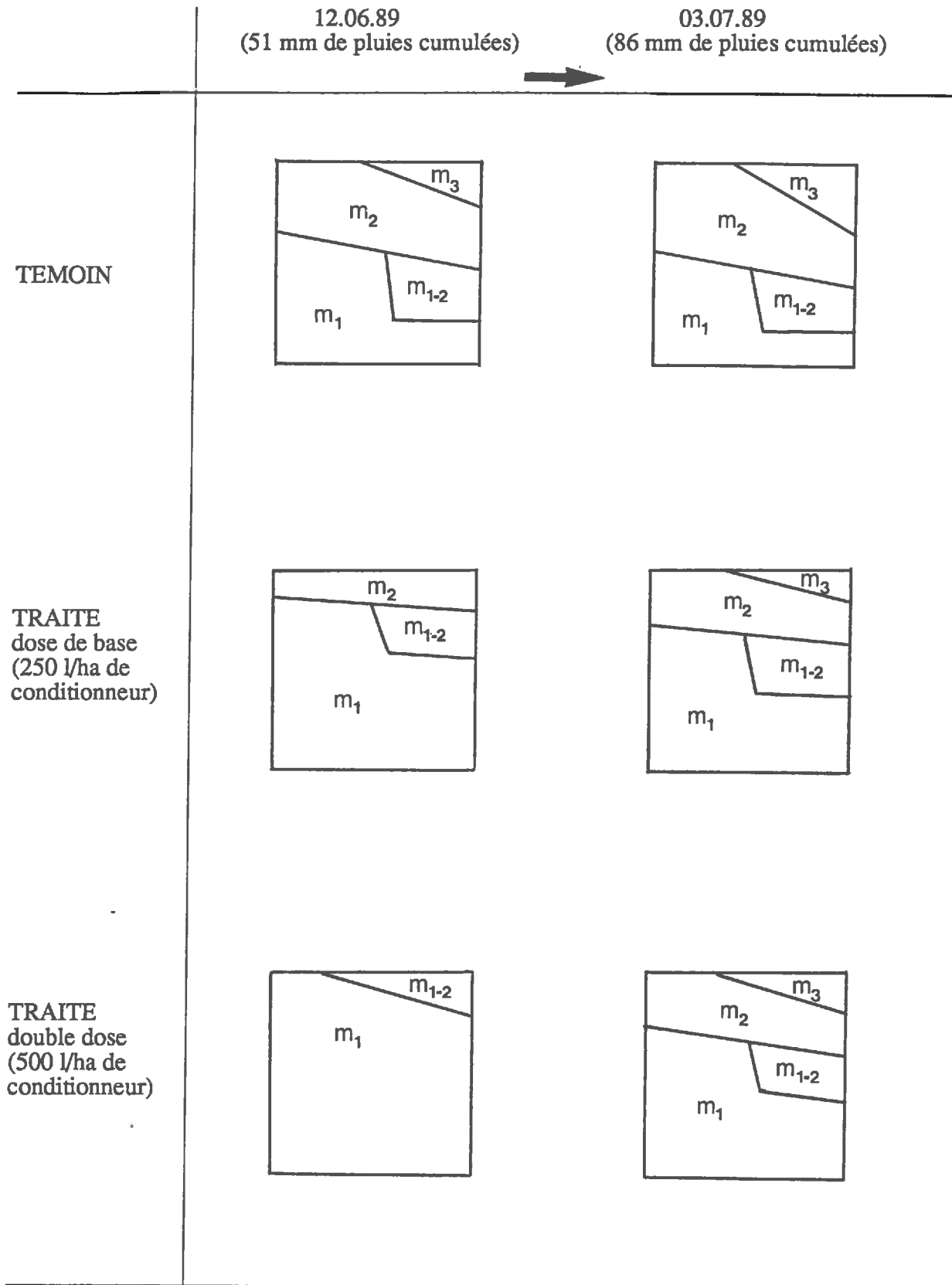


Figure II-5 : Schéma de la répartition des différents microhorizons sur les lames minces du site I89

2. Site LA88 d'automne

L'état initial est ici présenté, sur la Figure II-6a. Il se caractérise, comme nous l'avions déjà noté lors des suivis morphologiques de placettes, par un état plutôt grossier avec des mottes de taille minimale de 2 mm.

* Au premier stade de prélèvement, le 02-11-88, après 19 mm de pluies cumulées réparties en un orage le 28-10-88 (dont 13 mm à 6mm/h), l'échantillon témoin (Fig. II-6b) présente une rugosité de surface très émoussée avec tout de même des variations de hauteur importantes dues à la grossièreté de l'état initial. La surface de l'échantillon traité, elle, a une rugosité élevée, les mottes étant conservées.

Lors de l'examen de la répartition verticale et horizontale des microhorizons (Fig. II-7), l'échantillon traité présente dès cette date de prélèvement un m_3 réparti par poches dans les dépressions et colmatant les gros pores de la surface, jusqu'à une épaisseur de 6-7 mm. La surface de l'échantillon est complètement fermée, soit par ce m_3 soit par un m_2 continu sous ces poches de m_3 . Ce microhorizon m_2 , contenant seulement quelques pores d'effondrement, de forme arrondie se rapprochant des vésicules aussi présentes, a une épaisseur d'au moins 1 cm. Sa partie supérieure au contact des gouttes de pluies, sur 1 ou 2 mm d'épaisseur, est très peu poreuse. Au sein de ce m_2 , de nombreux petits pores sont colmatés par des filets de quartz disjoints. Au dessous, on trouve un microhorizon de type m_{1-2} , avec des pores moins marqués par un effondrement. Cependant, sur une moitié droite de la lame, se trouve une zone à porosité arrondie d'effondrement exprimant en fait la présence d'un m_2 . Dans cette partie au dessous de 1 cm de profondeur, des lits d'argile sont disposés sur le fond des pores jusqu'au bas de la lame mince. On peut remarquer ici qu'il n'y a pas de m_1 fragmentaire, tout l'échantillon prélevé a été dégradé par l'action de la pluie.

Sur l'échantillon traité avec le conditionneur, on ne distingue pas de microhorizon de dégradation ; les mottes sont quasi-conservées sur toute la hauteur de la lame mince. On peut voir seulement certaines zones en surface constituées de fragments d'agrégats et de particules de quartz disjoint, zones encore très poreuses. Des traits comme des lits ou filets de quartz ou d'argile n'ont pas été rencontrés sur cette lame mince.

* Au deuxième stade de prélèvement, le 06-12-88, après 119 mm de pluies cumulées réparties en plusieurs pluies dont une particulièrement longue le 05-12-88 (31 mm durant 6 heures à 5 mm/h), l'échantillon témoin (Fig. II-6d) présente une rugosité de surface totalement disparue avec une surface aplanie. L'échantillon traité a conservé une certaine rugosité avec des mottes conservées en relief mais avec tout de même un aplanissement général.

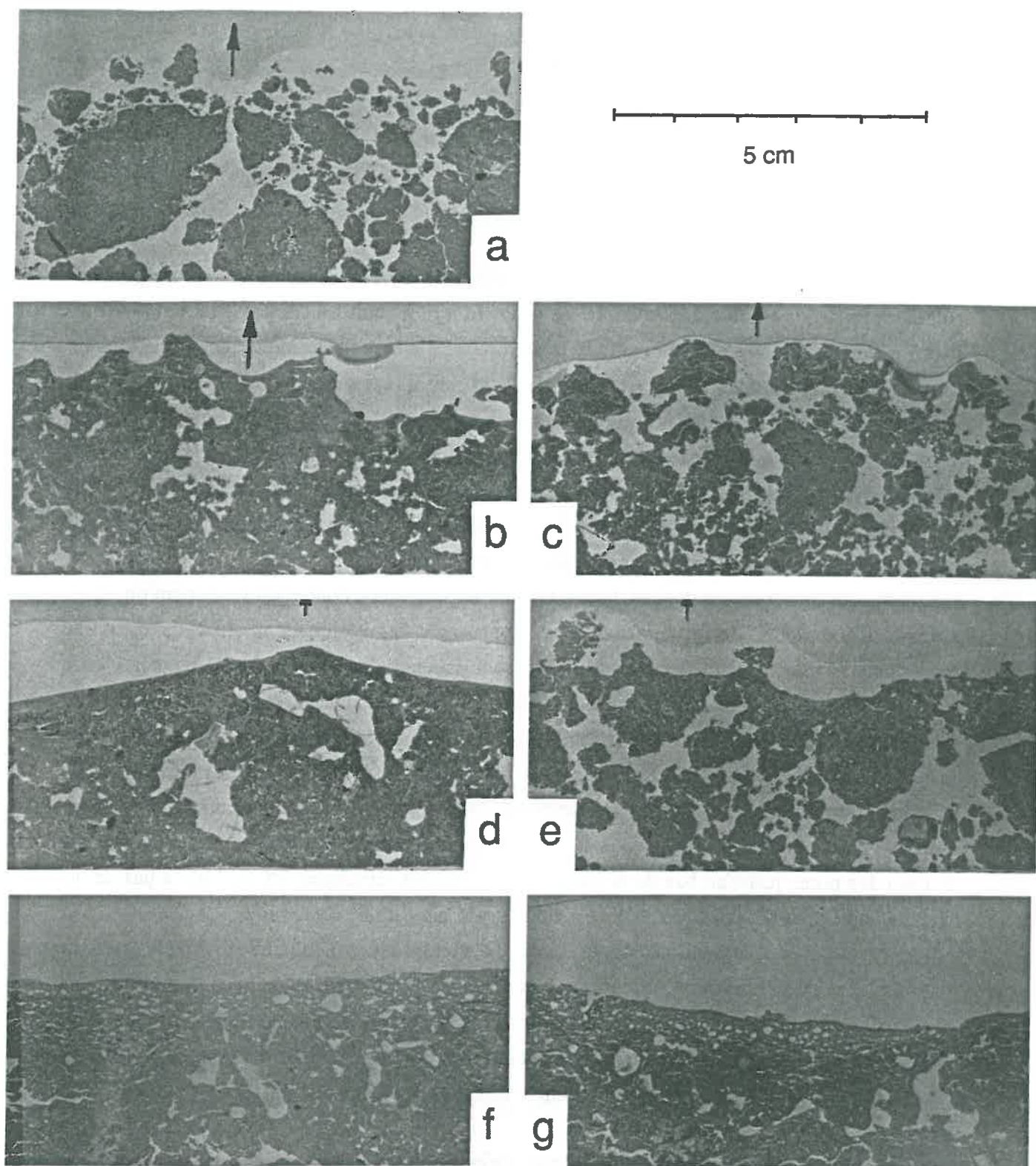


Figure II-6 : Observations en coupe des surfaces témoins et traitées du site LA88

- Etat initial (27-10-88) a : témoin
- Après 19 mm de pluies cumulées (02-11-88) b : témoin . c : traitée
- Après 119 mm de pluies cumulées (06-12-88) d : témoin . e : traitée
- Après plus de 200 mm de pluies cumulées (11-04-89) . f : témoin . g : traitée

L'échantillon témoin présente à ce stade une morphologie très dégradée. Un microhorizon m_3 recouvre toute la surface, même au sommet bien qu'il y soit peu épais (2 mm). Sur les poches latérales, il atteint 1,5 cm. Il est constitué de lits alternés de quartz de différentes granulométries et de lits d'argile. Au dessous se trouve un microhorizon m_2 sur presque toute la surface restante. La porosité est peu élevée répartie surtout en quelques gros pores hérités des gros vides d'entassement de l'état initial dont la présence vient de l'état grossier initial. De nombreux pores plus ou moins gros sont comblés par des accumulations de quartz, avec même dans certains pores de véritables microhorizons m_3 souterrains contenant de nombreux lits de sédimentation de quartz et d'argile. Des lits d'argile, de même qu'au stade précédent sont visibles sur toute la partie inférieure de la lame. Très localement, une porosité plus importante et de forme moins arrondie permet de définir un m_{1-2} . Sur l'échantillon traité, un m_3 est aussi visible en surface, en poches. Il est constitué ici, contrairement à l'échantillon témoin, à la fois de quartz individualisés et de fragments d'agrégats. Un m_2 est ensuite continu sur toute la surface, sur une épaisseur de 2 à 5 mm. Dans cette structure, on trouve quelques filets de quartz comblant certains pores. Au dessous, un m_{1-2} est présent de façon discontinue. Le bas de la lame est occupé par un m_1 très peu perturbé dans sa structure mais où apparaissent de fins lits d'argile en surface des mottes. Dans ce cas, la croûte n'affecte que la partie supérieure des mottes de surface, dont on reconnaît bien les contours, contrairement à l'échantillon témoin.

* Au prélèvement suivant constituant en fait la fin du suivi, le 11-04-89, après plus de 200 mm de pluies cumulées, les deux surfaces sont complètement nivelées (Fig. II-6f et II-6g).

La répartition verticale en microhorizons est la même sur les deux échantillons (Fig. II-7). Un m_3 d'une épaisseur de 5 mm environ très riche en vésicules recouvre un m_2 de mêmes caractéristiques que sur l'échantillon témoin précédent à savoir avec des accumulations de quartz et d'argile plus bas. Sur l'échantillon témoin, on peut voir un chenal biologique vertical rempli de quartz disjoints. Sur l'échantillon traité, localement, on peut noter la présence d'un m_{1-2} .

3. Synthèse des résultats

Nous avons pu relever ici que le conditionneur appliqué en surface a entraîné une modification de la date d'apparition des microhorizons m_2 et m_3 et de leur développement (extension verticale et horizontale). Sur ces différents échantillons, le microhorizon m_{1-2} a été peu présent, soit parce que le microhorizon m_2 était directement en contact avec le m_1 , soit parce que le m_2 était particulièrement développé et occupait toute la surface de la lame.

La répartition des différents microhorizons présentée sur les Figures II-5 et II-7 permet de définir les stades de dégradation des surfaces.

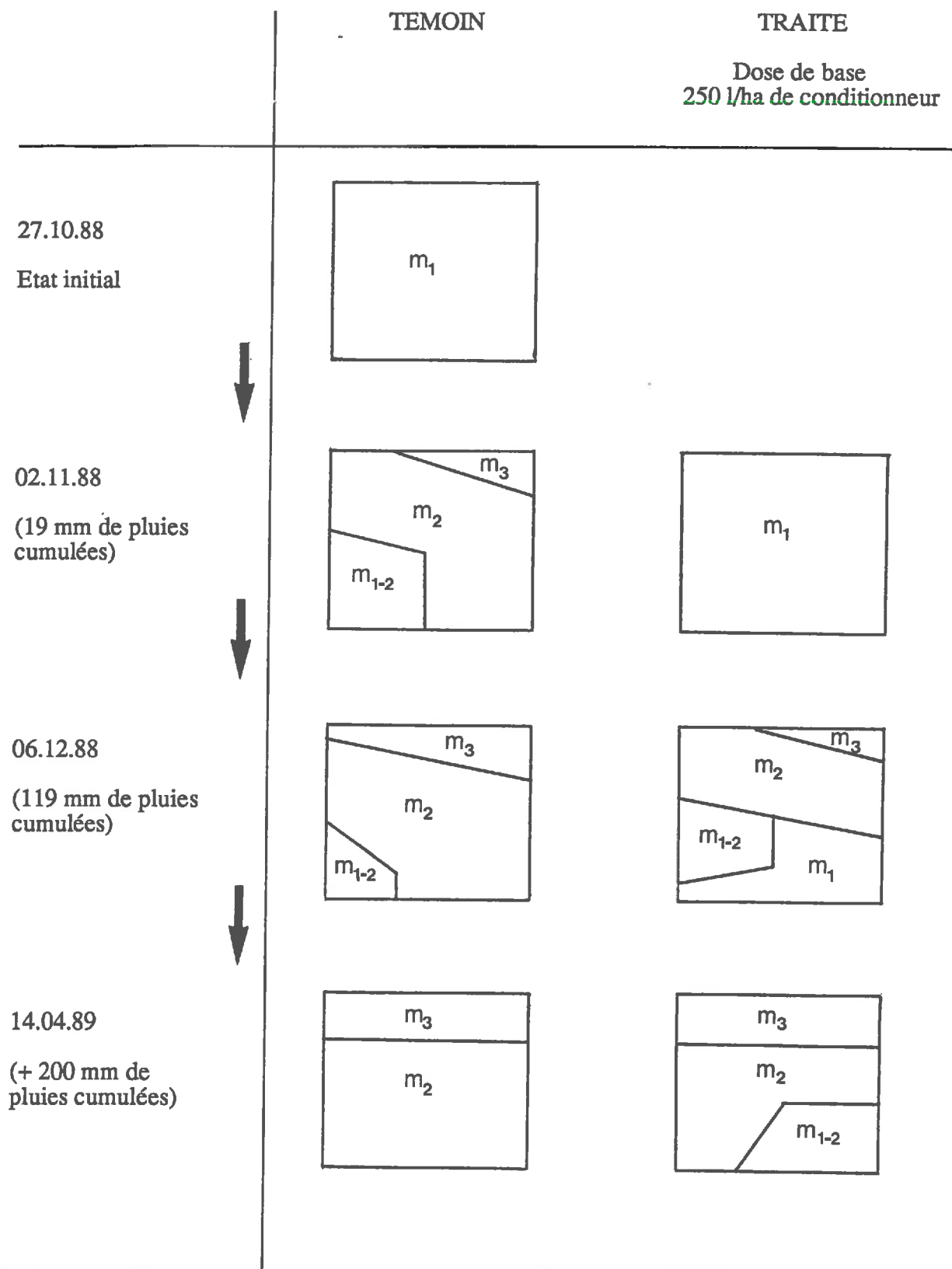


Figure II-7 : Schéma de la répartition des différents microhorizons sur les lames minces du site LA88

Ainsi nous avons pour le site de printemps :

- * le 12-06-89 0 début de 2ème phase de dégradation
 W250 1ère phase de dégradation
 W500 phase 0 (proche de l'état initial)
- * le 03-07-89 0 2ème phase dégradation
 W250 début de 2ème phase de dégradation
 W500 début de deuxième phase de dégradation

Ces observations concordent avec celles effectuées sur le terrain au cours du suivi de placettes.

Pour le site d'automne hiver, nous avons :

- * le 02-11-88 0 2ème phase de dégradation
 W250 phase 0 (proche de l'état initial)
- * le 06-12-88 0 2ème phase de dégradation
 W250 début de 2ème phase de dégradation
- * le 14-04-89 0 2ème phase de dégradation
 W250 2ème phase de dégradation

Cependant ces phases déterminées par la répartition des microhorizons ne correspondent pas toujours avec les observations faites sur le terrain lors du suivi des placettes. A la première date de prélèvement ces dernières observations révélèrent que la surface était en première phase de dégradation car les poches d'accumulation de matériau disjoint ne recouvraient pas totalement la surface ; il restait même de la porosité en surface. Ainsi c'est un problème de taux de recouvrement de la surface par la croûte sédimentaire qui est en cause pour ces différences d'interprétation.

B. Discussion. Rôle du conditionneur sur les mécanismes de formation des microhorizons de dégradation

1. Site de printemps

Sur les échantillons témoin et traité à faible dose lors du premier prélèvement, la structure du microhorizon m_2 présente une assez forte porosité avec peu quartz indépendants. Elle traduit l'action d'une désagrégation par éclatement provoqué par la pluie, suivie d'une prise en masse des fragments produits. Cependant, dans le cas de ce site, l'état initial était déjà très fin ; aussi la prise en masse s'est effectuée sur une partie importante d'éléments non mobilisés par la désagrégation. Un tassement par les gouttes de pluies se produit ensuite, très important sur les 1 ou 2 mm de surface. Ces mécanismes sont caractéristiques des histoires hydriques de printemps, avec des pluies sous formes d'orages

arrivant sur un sol sec (LE BISSONNAIS, 1988).

Le conditionneur a permis de retarder le développement du microhorizon m_2 puis du m_3 . Cet effet augmente avec la dose apportée. Les lames minces, particulièrement la Figure II-5c, font nettement apparaître que le conditionneur protège les agrégats de surface de la désagrégation, et principalement ici de la désagrégation par éclatement.

2. Site d'automne-hiver

Sur l'échantillon témoin dès le début du suivi, la surface a subi une très forte réduction de la porosité, conduisant à la formation d'un microhorizon m_2 très épais très tôt. Deux phénomènes peuvent contribuer à l'expliquer.

Tout d'abord, l'abondance des quartz indépendants comblant les pores de surface peut être responsable. Cependant, on n'en trouve pas partout en surface, surtout lors du prélèvement du 02-11-88, ce qui tend à montrer que ce phénomène ne contribue pas seul à la réduction de la porosité.

Le second phénomène pouvant être mis en cause est l'effondrement général des premiers centimètres de surface, se caractérisant par la formation de pores d'entassement très affaissés.

Nous allons tenter de voir maintenant quels sont les mécanismes de désagrégation et mobilisation responsables de ces phénomènes.

Mécanismes de désagrégation mis en jeu

La désagrégation mécanique par l'impact des gouttes de pluie paraît être le principal mécanisme mis en cause en ce qui concerne la production abondante des quartz disjoints accumulés. En effet, LE BISSONNAIS (1988) montre que les produits de ce mécanisme sont principalement des particules indépendantes, en particulier des grains de quartz lavés arrachés, ainsi que des fragments d'agrégats. Dans notre cas, le mécanisme de désagrégation par éclatement est à exclure au moins comme mécanisme majeur. En effet, la surface du sol est humide au début des pluies (elle le reste tout au long du suivi), ce qui laisse peu de place à l'air qui pourrait être responsable de l'éclatement. Peut-être ce mécanisme s'est produit au début de la pluie, avec une faible intensité, mais l'état de dégradation déjà avancé visible sur ces lames minces ne permet pas de le voir.

Le mécanisme de l'effondrement pose plus de problème quant à son interprétation. Dans ce cas, du fait des conditions hydriques et de la forme allongée et horizontale des pores, la désagrégation par éclatement est à écarter, au moins comme mécanisme majeur. L'hypothèse alors serait que l'effondrement serait dû à une déformation du matériau provoquée par un tassement par l'impact des gouttes en condition humide, au delà du seuil de plasticité du matériau. Ce mécanisme de formation du m_2 a déjà été observé par BRESSON et BOIFFIN (1990). L'épaisseur de la zone compactée pourrait alors être

expliquée par un tassement progressif vers le bas en suivant le front d'humectation au cours de la pluie.

Effet du conditionneur

Sur les échantillons ayant été traités avec le conditionneur, lors de la première étape du suivi, beaucoup moins de grains de quartz disjoints ont été produits. Ils étaient de plus toujours accompagnés de fragments d'agrégats ce qui n'était pas le cas sur l'échantillon témoin. La présence conjointe de ces deux caractères permet d'émettre deux hypothèses quant aux mécanismes responsables dans ce cas (les deux pouvant être associés bien que décalés dans le temps). D'une part elle peut traduire l'existence de la désagrégation par éclatement. Cependant les conditions hydriques n'y sont pas propices comme nous l'avons déjà vu. D'autre part, ces éléments peuvent traduire une désagrégation mécanique par l'énergie d'impact des gouttes de pluie. Ce serait alors à la fois des grains de quartz arrachés et des fragments d'agrégats intacts par l'effet du conditionneur. De toutes les façons, le conditionneur a permis de réduire cette désagrégation mécanique, ce qui est montré par la plus faible quantité d'éléments détachés et accumulés.

En ce qui concerne maintenant l'effondrement, il n'a pas été observé sur les échantillons traités en début du suivi. On l'observe seulement par endroit lors du second prélèvement, proche de la surface. Cet effet très spectaculaire du conditionneur paraît difficile à interpréter, puisque le conditionneur ne migre pas en profondeur. Une des hypothèses serait que le conditionneur modifierait le comportement hydrique des mottes de surface, en décalant les seuils d'entrée en plasticité et en liquidité du matériau. Le fait que l'échantillon en profondeur ne soit pas compacté pourrait provenir d'un amortissement des gouttes de pluie par la surface conditionnée plus rigide.

C. Conclusion

Ces observations morphologiques sur des coupes de croûtes ont permis de préciser l'effet du conditionneur sur le colmatage de la surface. Lors des deux suivis nous avons pu voir qu'il retardait la fermeture de la surface. Différentes hypothèses ont été émises pour expliquer son rôle sur le retard de développement du m_2 . Il nous restera dans les chapitres suivants à confirmer ou infirmer ces hypothèses par des tests très ciblés.

Seconde partie

ETUDE SOUS UNE PLUIE SIMULEE

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons chercher tout d'abord à quantifier le retard de la dégradation provoqué par l'application du conditionneur en conditions contrôlées. A chaque expérience l'intensité de la pluie est contrôlée ; l'échantillon est constitué d'un massif de sol remanié. Dans ces conditions, nous allons évaluer l'influence du conditionneur et de sa dose d'application en terme de retard de la réduction de l'infiltration et du début du ruissellement.

Nous chercherons ensuite, sous une seule pluie, à localiser plus précisément dans le temps l'action du conditionneur au cours de la pluie. Pour cela, nous observerons l'évolution morphologique de la surface d'un massif d'agrégats, en plan horizontal et en coupe sur des lames minces.

I. MATERIEL ET METHODES

A. La simulation de pluie

Les expériences ont été réalisées à l'aide d'un simulateur de pluie installé au SESCOF-INRA d'Orléans.

Cet appareil consiste en un réservoir d'eau à niveau constant (FARRES, 1987) de 1 m² monté à 6 mètres de haut, alimenté avec de l'eau distillée. Il est équipé à sa base de capillaires en silicone à une densité de 5.6/dm². Les gouttes tombent de ces capillaires, éclatent sur un grillage situé à 5 m de haut et se répartissent ainsi sur la zone arrosée où sont placés les échantillons. La hauteur de chute permet de reproduire 80% de l'énergie d'impact des pluies naturelles. La distribution de la taille des gouttes est très proche de celle des pluies naturelles, avec un mode autour de 3 mm (GOVERS et al., 1987).

Cependant, la répartition de l'intensité sur la surface arrosée n'est pas homogène. En effet, elle varie en cercles concentriques avec une intensité de 40 mm/h au centre et 15 mm/h sur le tour. De plus, l'eau passant à travers des capillaires très fins, sa vitesse d'écoulement, par l'intermédiaire de la viscosité, est très sensible à la température. Aussi, avant et après chaque expérience, il est nécessaire de déterminer la répartition des

intensités de la pluie sur la zone arrosée.

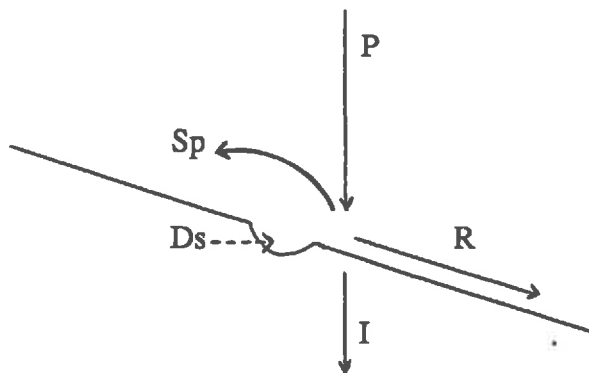
Il faut noter ici que la gamme d'intensités produites, de 15 à 40 mm/h, est de l'ordre de grandeur de celles d'orages dans le nord de la France. Cependant il est très difficile de réaliser des pluies simulées d'intensités inférieures qui correspondraient encore mieux à la réalité. La pluie simulée nous sert en fait de test, de révélateur, dans des conditions pas trop aberrantes, plutôt que d'une technique simulant les pluies naturelles.

Les expériences sont toujours réalisées avec des échantillons de sol remaniés et sous des pluies d'intensité constante.

B. Mesures de l'évolution hydrodynamique de surfaces de sol

1. Principe

Au cours d'une pluie, le bilan hydrodynamique de la surface du sol peut être représenté de la façon suivante :



avec

P : les apports d'eau par précipitations

I : les départs par infiltration dans le sol

R : les départs par ruissellement en cas de pente

Sp: les mouvements d'eau par rejaillissement

Ds: les détentions superficielles dans des dépressions locales.

Dans notre étude, nous allons suivre au cours d'une pluie simulée d'intensité constante l'évolution du taux d'infiltration de la surface de massifs de sol remanié. Les échantillons sont placés avec une pente de 5% afin d'éviter l'accumulation d'eau qui pourrait créer une charge d'eau augmentant l'infiltration. Ainsi le taux d'infiltration ne dépend que de l'intensité de la pluie et de la formation d'une croûte superficielle sur l'échantillon.

2. Matériel

2.1. Matériel spécifique

Le sol remanié est placé dans des boîtes de 15x20x3 cm disposant d'un système de récupération de l'eau infiltrée par un double-fond et de l'eau ruisselée par une gouttière.

Ainsi au cours de la pluie, on mesure les volumes d'eau écoulés avec un pas de temps de 3 minutes.

22. Application du conditionneur

Le conditionneur est appliqué par pulvérisation en surface des massifs de sol de la même façon que sur le terrain mais ici avec un micro-pulvérisateur. Pour compenser d'éventuelles pertes, les volumes sont majorés de 10%. Deux doses sont utilisées :

Traitement 1 :

250 l/ha de WAC dilués avec 250 l/ha d'eau

Traitement 2 :

1000 l/ha de WAC dilués avec 1000 l/ha d'eau.

23. Préparation des échantillons

Le sol choisi pour ces deux types d'expérience est celui du site LA88 étudié à l'automne, de texture limono-argileuse (19 % d'argile). Il s'est révélé sensible à la formation des croûtes, sans être trop rapidement dégradé.

Avant la pluie simulée, le sol est préalablement séché à l'air et tamisé afin de récupérer la fraction inférieure à 1 cm. En effet, les grosses mottes sont éliminées car elles pourraient créer des hétérogénéités dans le remplissage des boîtes. Les massifs de sol ainsi constitués dans les boîtes ont une masse volumique de 1,5 kg/dm³.

24. Obtention des résultats

Les mesures de volumes d'eau écoulés toute les 3 minutes exprimés en ml sont transformées en mm/h, connaissant l'aire des échantillons. Chacun des volumes d'eau recueillis contient une certaine fraction d'éléments solides provenant des massifs de sol. Comme nous nous intéressons ici seulement au bilan de l'eau et non pas de matière solide, nous avons négligé le volume de cette fraction dans celui de l'eau. Trois répétitions sont réalisées et une courbe moyenne de la variation de l'infiltrabilité et du ruissellement au cours du temps est obtenue pour chaque traitement. Cette courbe est ensuite lissée en attribuant à chaque point la moyenne des 5 valeurs les plus proches.

C. Observations morphologiques de l'évolution d'un massif d'agrégats de sol

1. Principe

Afin de préciser la localisation dans le temps et dans l'espace de l'action du conditionneur, un suivi morphologique a été réalisé sur des massifs d'agrégats de sol, au cours d'une pluie. Des agrégats calibrés ont été utilisés afin d'observer plus finement les processus de dégradation, tels que la désagrégation et ses produits, et la fermeture de la surface, les échantillons de départ étant bien définis.

A l'état initial et à différents moments au cours de la pluie, des échantillons ont été isolés pour être observés soit sec sur leur surface horizontale, soit en lames minces, en coupe verticale.

2. Matériel

Le sol utilisé est toujours celui du site LA88. Le sol prélevé a été séché à l'air puis, par tamisage ménagé, la fraction comprise entre 3 et 4 mm a été séparée. Ces agrégats ont été placés dans des boîtes sur 3 cm d'épaisseur constituant ainsi des massifs d'agrégats.

Le conditionneur a été appliqué de la même façon que précédemment, à la dose de base des études de terrain (soit 250 l/ha de WAC avec la même quantité d'eau).

Au cours d'une pluie de 20 mm/h, des échantillons témoins et traités ont été mis à l'écart à différents moments : à 10 min, 30 min, 50 min et 1 heure. Ils ont été séchés d'abord à l'air et observés en surface sur le plan horizontal. Ils ont ensuite été séchés à l'étuve à 40°C et directement inclus dans de la résine. Les lames minces ont été réalisées suivant le même protocole déjà expliqué dans la partie précédente.

II. RESULTATS ET DISCUSSION

A. Comportement hydrodynamique de surfaces de sol

1. Rôle du conditionneur sur l'évolution de l'infiltrabilité de surface au cours d'une pluie

L'évolution de l'infiltrabilité des échantillons témoins et traités est représentée sur la Figure II-8, pour une intensité de pluie de 20 mm/h. Ces valeurs ont une marge d'erreur évaluée à +/- 1 mm/h à la vue des trois répétitions.

L'écoulement de l'eau infiltrée débute pour chaque échantillon vers 17-18 mm de pluie cumulée. La valeur initiale de l'infiltrabilité est de 15-16 mm/h sans variation

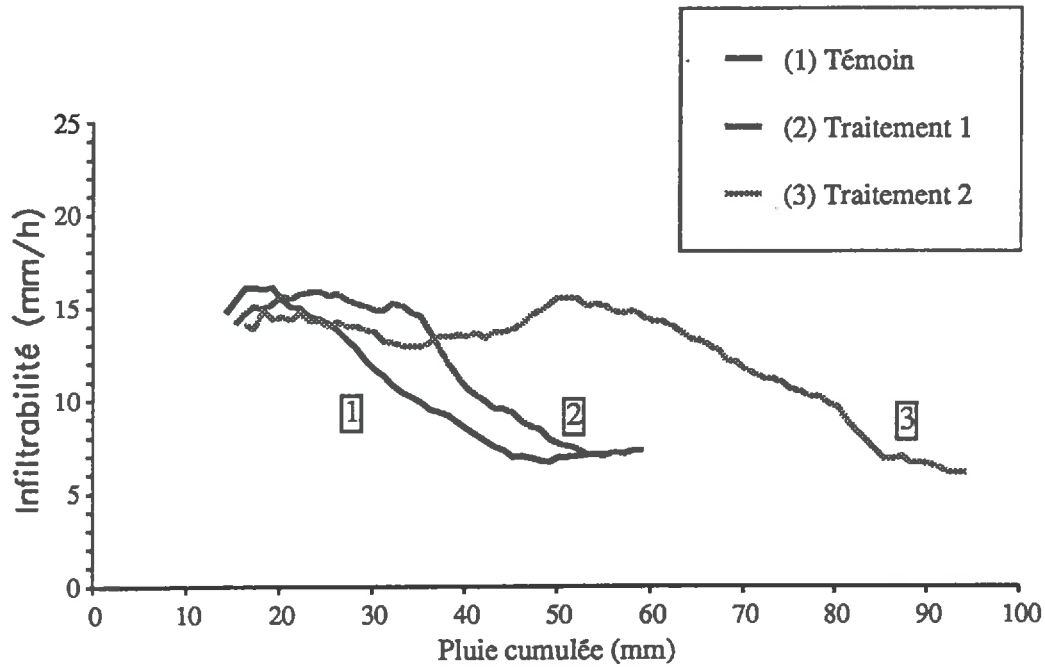


Figure II-8 : Evolution de l'infiltrabilité de surfaces de sol en fonction de la pluie cumulée (intensité de 20 mm/h)

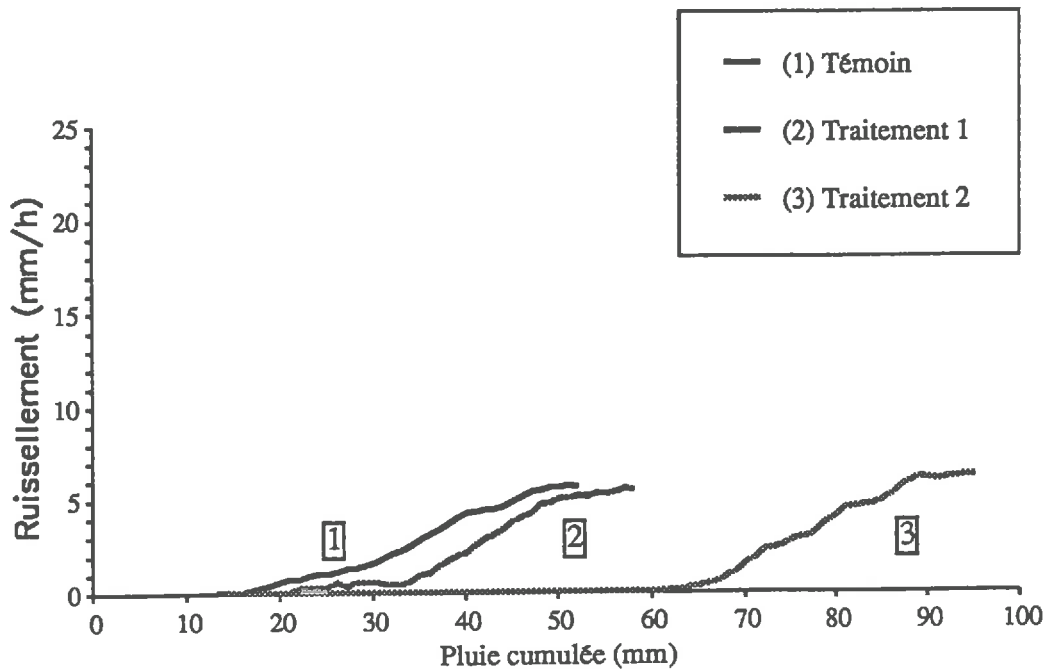


Figure II-9 : Evolution du ruissellement de surfaces de sol en fonction de la pluie cumulée (intensité de 20 mm/h)

significative selon les échantillons.

En ce qui concerne les échantillons témoins, l'infiltrabilité diminue fortement dès 20 mm de pluie cumulée, avec une valeur de 16 mm/h, puis est stabilisée vers 50 mm de pluie à une valeur proche de 7 mm/h.

L'infiltrabilité des échantillons traités à faible dose décroît plus tardivement, vers 35 mm de pluie, et atteint un plancher à 55 mm de pluie, d'une valeur de 7 mm/h, identique à celle des témoins.

La surface des échantillons traités avec la plus forte dose évolue plus lentement. La chute de l'infiltration se produit vers 55 mm de pluie cumulée et de façon plus lente que précédemment. La stabilisation se fait autour de 80 mm de pluie et toujours à la même valeur de 7 mm/h.

2. Rôle du conditionneur sur le ruissellement

Sur la Figure II-9 représentant l'évolution du ruissellement en mm/h des surfaces d'échantillons, on peut tout d'abord remarquer le décalage des courbes moyennes selon les traitements. Le ruissellement débute sur les surfaces témoins vers 25 mm de pluie, sur les surfaces traitées à faible dose vers 35 mm de pluie et sur les surfaces traitées à forte dose vers 70 mm de pluie. Ceci converge logiquement avec les résultats précédents sur les infiltrabilités. De même, la valeur finale à l'équilibre est la même pour chaque échantillon, de 6 mm/h.

3. Discussion

L'évolution de l'infiltration et du ruissellement au cours d'une pluie révèle ainsi un effet retardateur du conditionneur sur la fermeture de la surface et la réduction de l'infiltrabilité. Ce retard, pour une pluie de 20 mm/h d'intensité, est de 10 ou 15 mm de pluie soit de 30 à 45 minutes dans le cas d'un traitement avec la plus faible dose du conditionneur. Avec quatre fois cette dose, le retard devient très important, de 35 ou 40 mm de pluie, soit 1 heure 45 minutes à 2 heures. Il est important de noter ici que l'on retrouve des ordres de grandeurs très proches de ceux obtenus sur le terrain concernant le retard d'apparition de la formation de la croûte sédimentaire en cas d'histoire hydrique favorable au printemps. De plus, avec l'application de la plus forte dose (correspondant à quatre fois la dose de base), non utilisée sur le terrain, le retard de près de 40 mm de pluie est considérable sous la simulation de pluie.

Le retard de la fermeture de la surface et de l'épaississement de la croûte provoqué par le conditionneur, que nous avons pu voir dans le chapitre précédent, se traduit

bien par un retard de l'infiltrabilité au cours de la pluie, dans le cas d'histoires hydriques favorables. Il est important de noter ici que, au cours de toutes les pluies simulées telles que nous les avons utilisées, le WAC appliqué en surface s'est toujours révélé efficace pour retarder la dégradation.

Lorsque l'équilibre hydrodynamique est atteint au cours de la pluie, c'est-à-dire lorsque les taux d'infiltration atteignent un plancher, les valeurs obtenues sont identiques selon les traitements. Cela permet de dire que la croûte structurale de chaque échantillon dans son développement maximum a les mêmes propriétés d'infiltrabilité dans tous les cas.

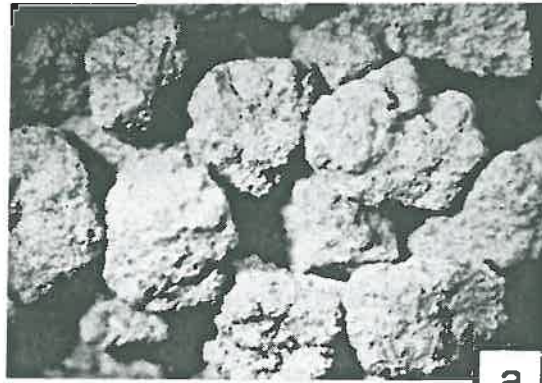
Lors d'études sur le terrain, par des mesures d'infiltrabilité de la surface selon la méthode des taches saturées, BOIFFIN (1984) et BOIFFIN et MONNIER (1986) ont obtenu des valeurs de l'ordre de 5 mm/h pour des surfaces fermées par une croûte structurale et de l'ordre de 1 ou 2 mm/h pour des surfaces au stade de la croûte sédimentaire. Ainsi, dans notre cas, la valeur de 7 mm/h se rapproche des propriétés d'infiltrabilité d'une croûte structurale. Cependant, il est nécessaire de rester prudent dans cette comparaison car on peut difficilement obtenir sous une pluie simulée un état de dégradation de la surface aussi important que dans les conditions naturelles après des histoires pluviométriques complexes. Les croûtes formées sont donc légèrement différentes. De toutes façons, il est sûr que nous n'avons pas pu créer une réelle croûte sédimentaire, les éléments fins partant dans les eaux de ruissellement avec la pente. Seuls des dépôts de particules ont pu se développer dans des dépressions locales dues à la rugosité de la surface, mais sans toutefois pouvoir atteindre un degré important de tri sédimentaire.

Si l'on se rapporte maintenant à des valeurs obtenues sous simulation de pluie, SHAINBERG et LETEY (1984) ont mesuré des taux d'infiltration dans le cas d'échantillons de sol avec différents taux de sels. Ils montrent une forte réduction du taux d'infiltration final jusqu'à des valeurs inférieures à 1 mm/h (pour une intensité de la pluie simulée de 26 mm/h) avec l'augmentation du taux de Na du sol. Dans ce cas, les faibles valeurs d'infiltrabilité sont dues à la dispersion des argiles.

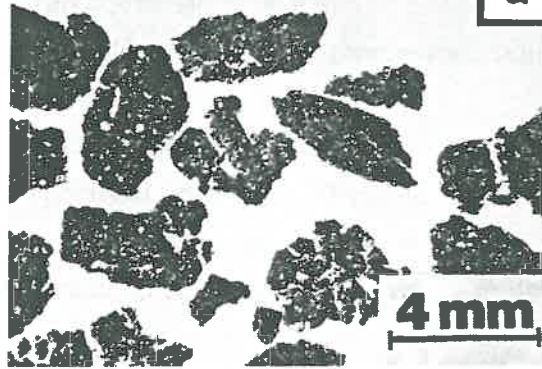
B. Evolution morphologique de la surface d'un massif d'agrégats

1. Observations

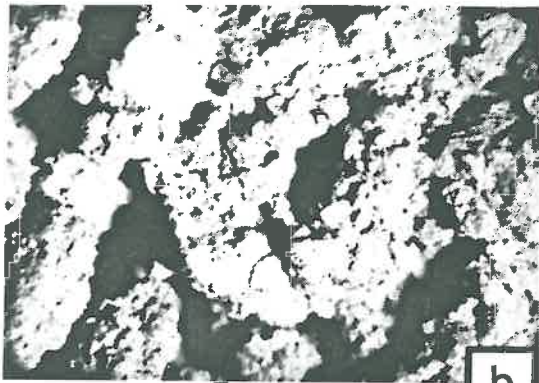
Les vues des surfaces des massifs d'agrégats en plan vertical et horizontal sont présentées sur la Figure II-10. Les observations sont faites ici en prenant en compte principalement la forme et la localisation des agrégats, fragments d'agrégats et particules ainsi que le type de croûte en présence.



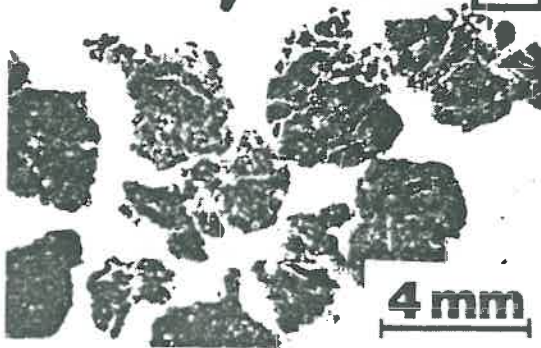
a



4 mm



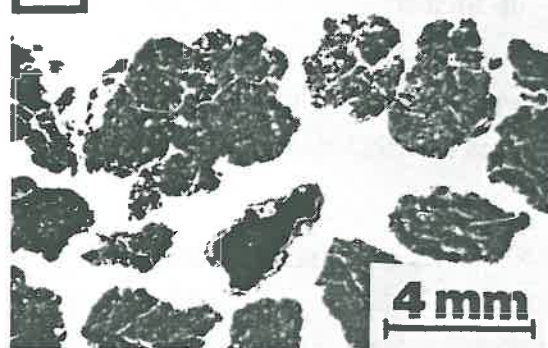
b



4 mm



c



4 mm

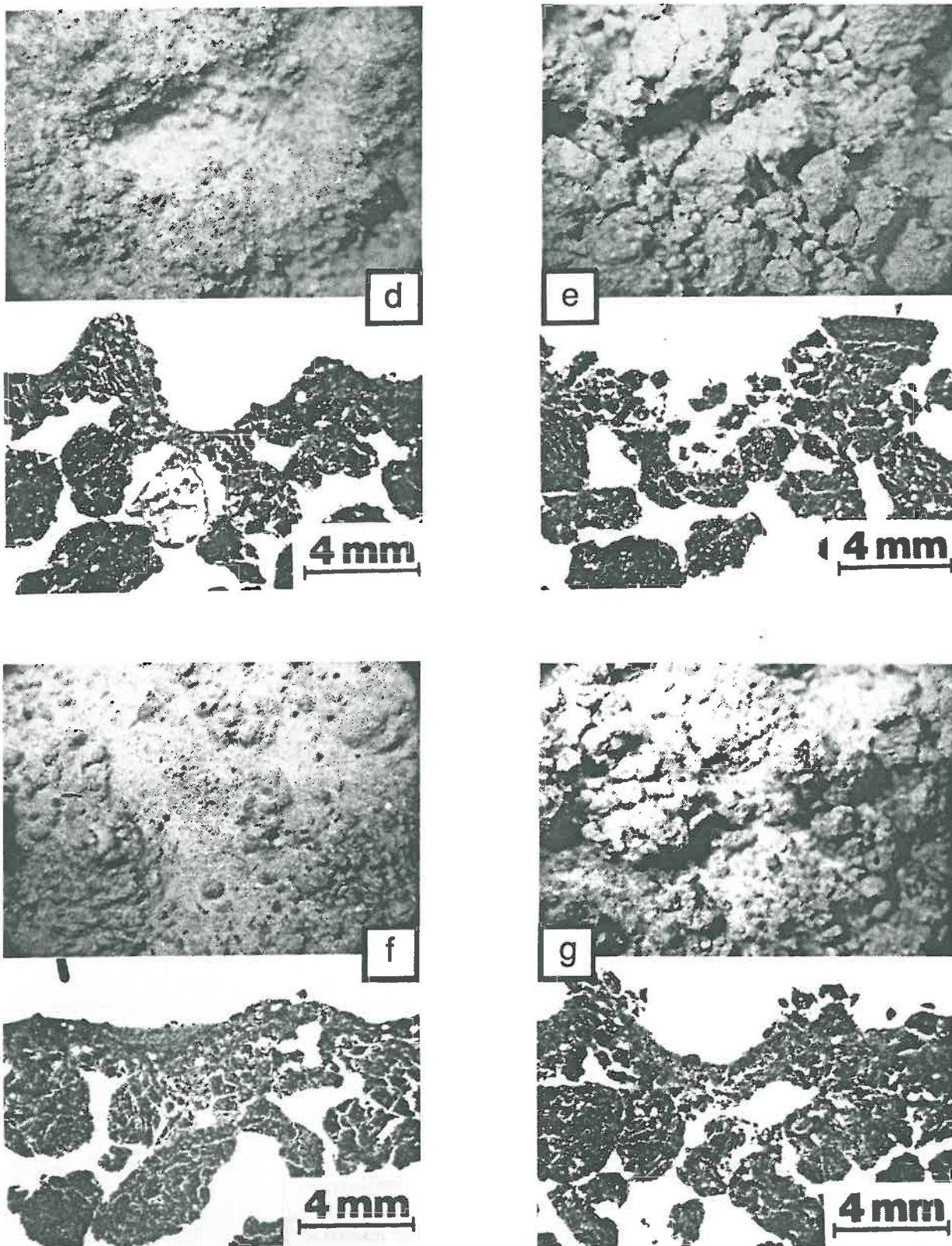


Figure II-10 : Morphologie de la surface de massifs d'agrégats de sol soumis à une pluie simulée (intensité de 20 mm/h)

photo du haut : plan horizontal

photo du bas : coupe verticale (lame mince)

a : témoin, état initial

b : témoin, après 3 mm de pluie

c : traitée, après 3 mm de pluie

d : témoin, après 10 mm de pluie

e : traitée, après 10 mm de pluie

f : témoin, après 17 mm de pluie

g : traitée, après 17 mm de pluie

L'état initial est caractérisé par une forte porosité d'entassement (Fig. II-10a). Les agrégats initiaux sont constitués soit d'un ensemble continu et compact de matériau, soit de l'assemblage de plusieurs agrégats de plus petite taille.

Après 10 minutes, soit 3 mm de pluie, les agrégats sont fissurés jusqu'à une profondeur de deux couches. Sur le témoin (Fig. II-10b), la fissuration est très dense, dégageant des fragments de 0,2 à 0,5 mm, qui sont détachés en surface. Sur l'échantillon traité (Fig. II-10c), la fissuration est moins dense, dégageant de plus grands fragments proches du millimètre, non encore détachés.

A l'étape suivante, après 30 minutes soit 10 mm de pluie, la surface du témoin (Fig. II-10d) est fermée par une croûte structurale formée par le colmatage et la coalescence des fragments. La surface est très lisse et, par endroits, des quartz disjoints sont accumulés dans des dépressions. En revanche, la surface traitée (Fig. II-10e) présente de nombreux agrégats distincts non totalement désagrégés, dégageant une forte porosité. Sur cet échantillon, le colmatage vient juste de commencer. La taille des fragments détachés est de 0,5 à 1 mm. A ce moment, des flaques apparaissent à la surface de l'échantillon témoin.

Après 50 minutes soit 17 mm de pluie, une croûte structurale est formée sur le témoin (Fig. II-10f), avec des lits d'accumulations de quartz disjoints. La surface est pratiquement plane. Des flaques apparaissent à ce moment-là sur l'échantillon traité. La figure II-10g montre la formation d'une croûte structurale de 3 mm d'épaisseur avec des accumulations de particules indépendantes et de fragments dans les dépressions. La surface est lisse mais quelques agrégats conservés restent en relief.

Après 1 heure de pluie soit 20 mm, les surfaces des deux échantillons ont atteint le même état de dégradation avec la formation d'une croûte sédimentaire, identique à celui de la Figure II-10f.

Ainsi, sur des massifs d'agrégats de sol, on retrouve l'action du conditionneur sur le retard de la dégradation sous l'action de la pluie. La seconde phase (formation de la croûte sédimentaire) est retardée, ici de 20 minutes soit d'environ 7 mm de pluie.

2. Discussion

Ce suivi morphologique a permis de localiser plus précisément l'action du conditionneur. L'effet principal est la modification de la fissuration au tout début de la pluie, lors de l'imbibition. Cette modification se fait d'une part en dégageant des fragments d'agrégats de plus grande taille et d'autre part en retardant leur détachement. Ces plus gros fragments ne permettent pas de former une croûte structurale. Ils doivent subir pour cela une désagrégation plus longue pour produire de plus petites unités pouvant colmater la surface. Ainsi tous les stades ultérieurs de la dégradation sont retardés, en particulier la formation des

croûtes structurales et sédimentaires.

Dans le cas de l'échantillon témoin, on retrouve les mêmes faciès de dégradation des agrégats de surface que dans les travaux de LE BISSONNAIS et al. (1989). On a donc durant la phase d'humectation, une prédominance du mécanisme d'éclatement pouvant se manifester par une fissuration ou une désagrégation totale, avec production de fragments d'agrégats ou de particules. Lorsque le matériau est saturé, le mécanisme de désagrégation mécanique par l'impact des gouttes de pluie devient alors prédominant, avec production de fragments s'il reste des agrégats à dégrader et surtout d'éléments fins arrachés par l'usure des gouttes d'eau.

Dans le cas présent, nous avons seulement pu voir que le conditionneur agit sur le mécanisme d'éclatement. Nous n'avons pas pu mettre en évidence son action contre la désagrégation mécanique.

En comparant les résultats obtenus en terme de temps d'apparition des flaques en surface et de temps de début de ruissellement des échantillons en pente de l'expérience précédente, on peut constater que l'utilisation d'agrégats calibrés n'est pas particulièrement aberrante ; les chiffres obtenus sont du même ordre de grandeur. Une première différence se situe dans le fait que les temps de début du ruissellement sont plus courts probablement à cause de l'état initial composé de plus fins éléments donc plus rapidement incorporables à la croûte structurale. L'autre différence est une efficacité du conditionneur supérieure sur le retard de l'apparition de l'excès d'eau sur les massifs d'agrégats calibrés. L'origine probable est que le conditionneur peut difficilement protéger les éléments fins présents à l'état initial dans le cas du sol brut.

III. CONCLUSION

Ces deux expériences sous simulation de pluie nous ont permis tout d'abord de mieux quantifier l'action du conditionneur. Il permet sous une pluie de 20 mm/h, à une dose de 250 l/ha, de retarder la chute de l'infiltration et le début du ruissellement d'une surface de sol de 10 ou 15 mm de pluie (soit 30 ou 45 min).

De plus, l'effet du conditionneur a pu être précisé dans le temps et dans l'espace. Il modifie la fissuration par éclatement lors de l'imbibition au tout début de la pluie, retardant ainsi les processus de dégradation de la surface.

CONCLUSION PARTIELLE

Les expériences conduites en conditions naturelles ou sous pluies simulées ont permis d'approcher le mode d'action du conditionneur sur la dégradation de surface de sols limoneux sous l'action de la pluie et de dégager les facteurs importants.

Ainsi nous avons pu voir sur le terrain que le conditionneur ralentit la dégradation. L'histoire hydrique s'est révélé être un facteur essentiel. La protection par le WAC est très importante en cas d'histoire hydrique très humide (comme dans le cas du site LA88 en automne-hiver), moins importante lors d'histoires hydriques de printemps humides, et inexistante lors d'histoires hydriques de printemps sèches et contrastées.

Ce dernier cas est très lié à la production abondante de fragments d'agrégats néoformés par fissuration. Un tel bouleversement de la surface, que le conditionneur ne peut pas empêcher, conduit alors à des conditions où celui-ci ne peut pas jouer son rôle, dans la mesure où il n'est plus à l'interface entre la pluie et le sol.

En conditions favorables, le conditionneur agit en protégeant les agrégats de surface de la désagrégation, retardant ainsi le déplacement des fragments et particules produits et le colmatage de la surface. Le développement de la croûte structurale puis de la croûte sédimentaire est retardé. Sous pluie simulée, le décalage produit sur la fermeture de la surface et le début de l'apparition de l'excès d'eau a pu être quantifié.

Concernant le mode d'action du conditionneur, des hypothèses ont pu être émises. Il agirait d'une part en limitant la fissuration ou désagrégation par éclatement. D'autre part il augmenterait la résistance de ces agrégats vis-à-vis de l'action mécanique des gouttes de pluie.

Ce sont principalement ces mécanismes que nous allons étudier par la suite, afin de vérifier ces hypothèses et de comprendre plus précisément le mode d'action du conditionneur.

CHAPITRE III

ETUDE DE L'EFFET DU CONDITIONNEUR SUR LA STABILITE D'AGREGATS DE SOL

Première partie

ETUDE DE L'EFFET DU CONDITIONNEUR SUR LES MECANISMES DE DESAGREGATION

INTRODUCTION

Après avoir étudié l'effet du conditionneur sur le comportement de surfaces de sol en conditions naturelles puis sous pluies simulées, nous allons maintenant nous attacher à déterminer comment le conditionneur agit sur les agrégats de sol, qui constituent les unités élémentaires des surfaces de sol à l'état initial, vis-à-vis de l'agent dégradant que sont les gouttes de pluie.

Après avoir défini le système étudié, nous présenterons les résultats de l'influence du conditionneur sur les deux mécanismes de désagrégation existant dans nos conditions d'étude. Nous étudierons d'abord la désagrégation par éclatement, avec deux modalités d'humectation produisant dans un cas une désagrégation totale et dans un autre cas une microfissuration. Dans le cas de l'étude la désagrégation totale par éclatement, l'influence de l'état hydrique initial des agrégats sera abordée. Nous étudierons ensuite la désagrégation mécanique due à l'énergie d'impact des gouttes de pluie. Pour chacun de ces mécanismes, nous ferons varier les modalités de réalisation des tests, la dose de conditionneur appliquée et la nature du matériau.

Nous tenterons ensuite d'évaluer la profondeur de pénétration du conditionneur dans l'agrégat, de façon indirecte par des mesures morphologiques.

Différentes hypothèses quant à l'action du conditionneur sur la stabilité structurale pourront alors être émises.

I. LE SYSTEME D'ETUDE

Les méthodes d'étude des différents mécanismes de désagrégation utilisées dans cette partie ont été mises au point par LE BISSONNAIS (1988). Elles mettent en oeuvre

des tests de stabilité d'agrégats à différentes actions de l'eau, à partir d'échantillons d'agrégats de sol calibrés.

1. Les matériaux étudiés

11. Les agrégats calibrés

Les échantillons de départ sont constitués d'agrégats calibrés. Ainsi l'état initial est bien connu et standardisé et on peut discuter les résultats par rapport au calibre initial. Ce calibre standard n'est cependant pas représentatif des granulométries de surface de tous les sols étudiés qui peuvent avoir des niveaux d'agrégation différents.

La taille d'agrégats retenue pour cette étude est de 3 à 4 mm, principalement pour des commodités de réalisation pratique. LE BISSONNAIS (1988) montre que quelle que soit la taille de ces agrégats, dans une gamme de 1 à 20 mm, les mêmes mécanismes se produisent, seule la cinétique de désagrégation change.

Les agrégats sont obtenus par tamisage non forcé de prélèvements issus de la couche labourée de sols. Ces prélèvements ont été préalablement séchés lentement à l'air, à une température ambiante inférieure à 20°C, ceci afin de ne pas créer d'augmentation de la stabilité du sol par des conditions de séchage trop intenses (MONNIER et KONAN, 1968).

12. Les matériaux étudiés

Des échantillons provenant de l'horizon labouré de cinq sols sont étudiés, correspondant à des sites étudiés sur le terrain à l'exception d'un seul.

Le sol du site LA88, déjà utilisé lors des études sous pluie simulée, est celui sur lequel portera toutes les expériences. Quatre autres sols ont été choisis afin d'étendre la gamme des sols étudiés tout en restant dans le cadre initial des sols de texture limoneuse sensibles à la formation des croûtes superficielles. Ainsi ont été choisis :

- un sol de texture moins riche en argile que LA88 : c'est celui du site I89 contenant 14 % d'argile ;
- un sol de texture plus riche en argile que LA88 : c'est le sol appelé BOI prélevé sur le site de l'ITCF de Boigneville contenant 27 % d'argile ;
- un sol plus sableux et pauvre en argile : celui du site LOR89 contenant 8 % d'argile ;
- un sol calcaire : celui du site POM88 contenant 64 % de calcaire total.

Rappelons que les analyses détaillées de ces sols, y compris BOI, se trouvent en Annexe I.

En ce qui concerne ces deux derniers sols, les mécanismes de formation des

croûtes superficielles sont encore mal connus. Sur des sols très sableux, COULON (1988) a observé que la dégradation de la surface du sol sous l'action des pluies se manifeste par un effondrement très rapide de la structure de la surface. Ces sols sont en dehors de notre cadre d'étude. Toutefois, nous allons tout de même voir leur comportement vis-à-vis de ces mécanismes en interaction avec le conditionneur toujours dans la recherche du mode d'action de celui-ci.

13. Application du conditionneur

Afin de pouvoir faire la relation entre les résultats obtenus ici et ceux obtenus sur le terrain, nous avons choisi d'appliquer le conditionneur en suivant les mêmes modalités que sur le terrain. Pour cela, le conditionneur a été pulvérisé, à l'aide d'un micro-pulvérisateur, sur un lit d'agrégats secs à l'air. Ainsi seule la face supérieure des agrégats a reçu le conditionneur.

Il est sûr que dans le cas des tests, l'arrivée de l'eau ou les chocs mécaniques sont répartis sur tous les points de la périphérie des agrégats. Ceci implique alors que les résultats vont sous-évaluer l'action du conditionneur tel qu'elle pourrait être sur le terrain où l'agent destructeur, la pluie, arrive par la face supérieure, ayant reçu le conditionneur.

L'influence de la dose d'application a été étudiée avec l'utilisation de trois doses d'application. De plus afin de voir l'effet du mode d'application, un traitement supplémentaire a été effectué avec la plus forte dose en agitant doucement les agrégats au cours du traitement afin de recouvrir toutes les faces. Les différents traitements effectués sont synthétisés sur le Tableau III-1 ; lorsque l'influence de la dose d'apport n'est pas étudiée, seule la quantité correspondante à la dose de base de terrain est utilisée.

TABLEAU III-1

Modes de pulvérisation des agrégats de sol avec le conditionneur
et teneurs en eau pondérales à l'issue des pulvérisations

Traitements	W250	W500	W1000s	W1000e
Dose de conditionneur apportée en litres/hectare en ml/m ² en mg/g d'agrégat	250 25 8	500 50 16	1000 100 32	1000 100 32
Volume d'eau apporté en dilution en l/ha en ml/m ²	250 25	500 50	1000 100	1000 100
Mode de pulvérisation	en surface du lit d'agrégats	en surface du lit d'agrégats	en surface du lit d'agrégats	enrobage des agrégats
Humidité pondérale après le traitement (Témoin à sec : 2%)	4%	6%	10%	10%

2. La méthode utilisée

21. Principe

Trois méthodes d'études ont été utilisées, correspondant comme nous l'avons présenté en introduction à l'étude de la désagrégation totale par éclatement, à la microfissuration par éclatement et à la désagrégation mécanique par l'énergie d'impact des gouttes de pluie. Ainsi trois tests vont être réalisés mettant en jeu **indépendamment des autres** chaque mécanisme.

Le résultat obtenu à l'issue de ces trois tests sur des agrégats calibrés est exprimé par une distribution de la taille des particules résultantes, déterminée par pesées de six fractions granulométriques : > 2 mm, 1 à 2 mm, 0,5 à 1 mm, 0,2 à 0,5 mm, 0,1 à 0,2 mm et < 0,1 mm.

22. Réalisation pratique

Les échantillons initiaux sont constitués de lots de 5g d'agrégats calibrés secs à l'air traités ou non. Six répétitions ont été réalisées permettant de faire un traitement statistique des résultats, en particulier de déterminer des intervalles de confiance à 95 % de signification qui seront représentés sur les graphiques.

Le déroulement des trois tests est présenté ci-dessous.

* Désagrégation totale par éclatement

Ce test reproduit une arrivée brutale d'eau autour des agrégats créant des conditions maximales d'éclatement.

Les agrégats sont plongés dans un excès d'eau distillée pendant 5 minutes. L'eau en excès est ensuite éliminée et les agrégats sont transférés doucement sur un tamis de 100 μm plongeant dans de l'alcool. La fraction restant sur le tamis est ensuite mise à l'étuve durant 24 heures puis tamisée à sec dans une colonne de cinq tamis. Les six fractions obtenues sont pesées et exprimées en % de la prise de départ. Le poids de la fraction inférieure à 100 μm , dont une partie est perdue lors du tamisage dans l'alcool, est obtenue par différence aux 5g initiaux.

L'alcool est utilisé ici car il permet de stopper la désagrégation. De plus, les échantillons ne prennent pas en masse dans l'étuve, permettant ainsi le tamisage à sec.

* Microfissuration par éclatement

Ce test reproduit des conditions moins brutales d'arrivée de l'eau, l'air ayant plus de possibilités de s'échapper.

Les agrégats sont humectés proche de la saturation par capillarité sur un tissu posé sur une plaque faisant mèche avec de l'eau distillée dont le niveau est situé à 3 cm au dessous des échantillons. Ils sont laissés 5 minutes sur cette plaque puis transférés sur un tamis de 100 μm dans de l'alcool. Le déroulement est ensuite identique à celui exposé ci-dessus, jusqu'à la pesée des fractions triées par tamisage à sec.

* Désagrégation mécanique

Ce troisième test permet de reproduire une action mécanique sur des agrégats humides.

Après avoir été saturés sous vide pendant 48 heures afin d'éliminer le mécanisme d'éclatement, les échantillons sont agités dans des flacons de 250 ml contenant 200 ml d'eau pendant 5 minutes sur un dispositif rotatif (roue de vélo). L'excès d'eau est ensuite évacué et l'échantillon est transféré de la même façon que précédemment sur un tamis plongé dans de l'alcool.

Il est sûr que le mode d'application de la force est différente de celle de gouttes de pluie ; ce n'est qu'un test permettant de mettre en jeu deux phénomènes pouvant intervenir lors d'une pluie : la rupture des agrégats par chocs et l'usure de leur périphérie. Cependant, LE BISSONNAIS (1988) a observé des distributions granulométriques résultantes similaires lors d'une agitation telle que décrite et lors de l'action mécanique de gouttes de pluies produites par un gouteur sur des agrégats saturés.

3. Comparaison entre agrégats préparés au laboratoire et agrégats prélevés en surface du sol après une pulvérisation

Dans cette partie, nous allons comparer l'effet du conditionneur selon le mode de pulvérisation, au laboratoire ou sur le terrain. Nous pourrions alors vérifier si l'application du conditionneur au laboratoire à l'aide du micropulvérisateur reproduit bien des conditions proches de celles du terrain.

31. Les agrégats initiaux

Les agrégats que nous allons étudier ici sont tous issus du sol LA mais ont deux origines. Un premier ensemble est constitué d'agrégats préparés au laboratoire selon la méthode présentée plus haut, c'est-à-dire à partir de prélèvements de sol de la couche labourée qui ont été tamisés puis pulvérisés.

Un deuxième ensemble est constitué d'agrégats prélevés en toute surface du sol, au début des essais de terrain, juste après la pulvérisation du conditionneur. Ces prélèvements ont été faits à l'aide d'une truelle et d'un couteau afin de veiller à ne prélever que les agrégats et mottes directement en surface. Ils ont ensuite été tamisés doucement pour ne

conserver que la fraction comprise entre 3 et 4 mm.

Les trois tests ont été réalisés sur ces deux ensembles. Dans le cas de l'étude de la désagrégation mécanique, un autre procédé d'agitation a été utilisé, différent de la méthode décrite précédemment. Il s'agissait d'une vingtaine d'agitations manuelles d'erlenmeyers contenant les agrégats préalablement saturés sous vide, dans de l'eau.

Les distributions seront analysées en détail par la suite. Nous allons ici simplement comparer les chiffres obtenus sur les deux types d'agrégats.

32. Résultats

Les résultats sont présentés sur la figure III-1, pour chaque test de désagrégation. Les intervalles représentés correspondent aux intervalles de confiance (à 95 %) qui ont été déterminés lorsque le nombre de répétitions était au moins de 5. Pour des nombres inférieurs, ces intervalles n'ont pas été déterminés et ne sont donc pas représentés.

Les résultats font apparaître des comportements globaux identiques des deux lots d'agrégats selon leur mode de préparation. Les différences entre agrégats témoins et traités sont conservées bien que plus faibles dans le cas des échantillons prélevés sur la surface du sol après pulvérisation.

Cette plus grande sensibilité des agrégats traités prélevés sur le terrain peut être facilement expliquée par le fait que, sur une surface de terrain contenant des mottes de tailles variées, des grosses mottes en relief ont pu intercepter une partie de la solution pulvérisée en créant un écran.

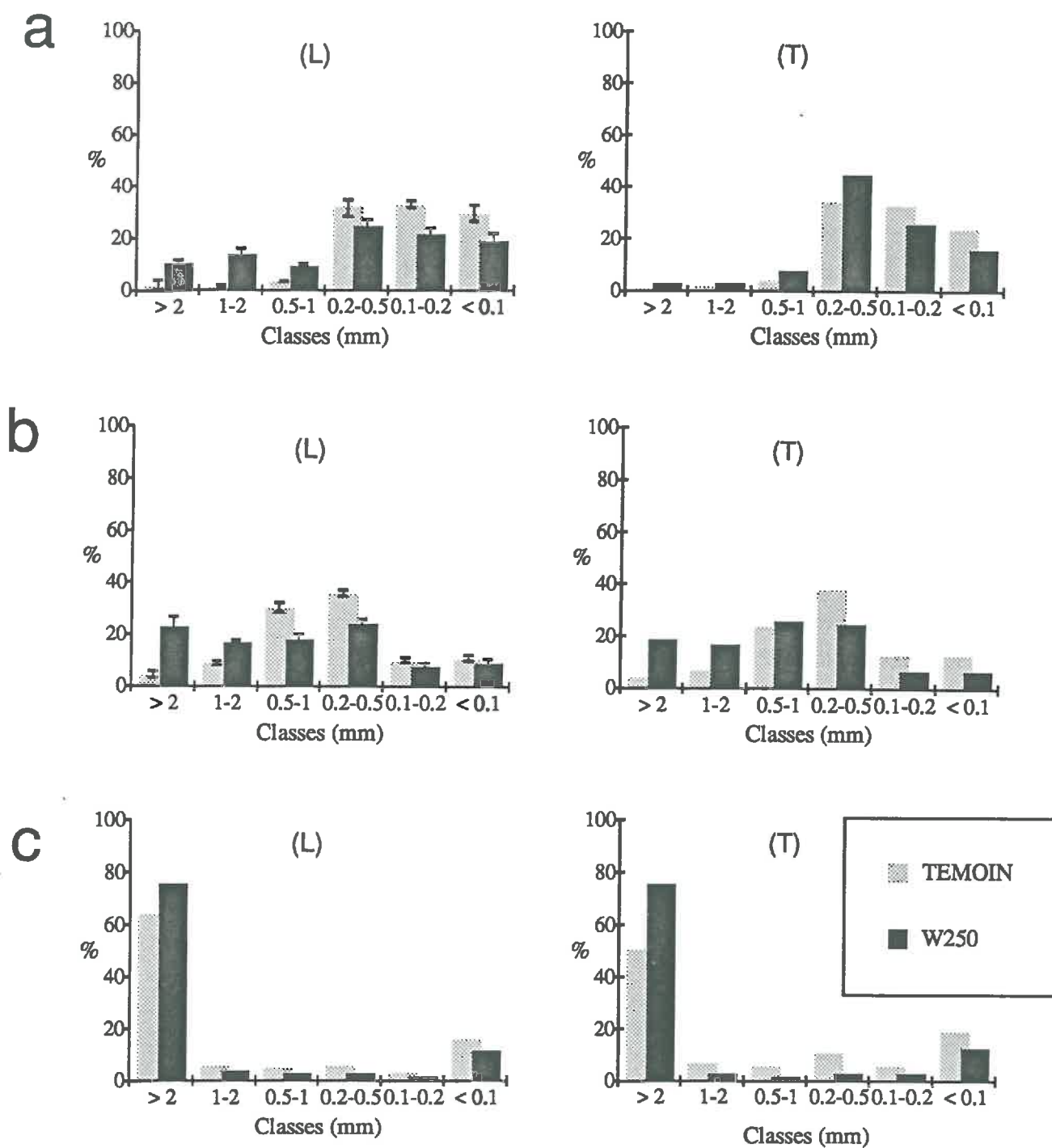


Figure III-1 : Influence des modalités de pulvérisation du conditionneur sur les agrégats
 (L) : au laboratoire (T) : sur le terrain
 sur les distributions granulométriques résultantes à l'issue des 3 tests :
 a : désagrégation totale par éclatement
 b : microfissuration par éclatement
 c : désagrégation mécanique

33. Conclusion

Ainsi le mode de préparation et de traitement des agrégats au laboratoire reproduit les conditions des agrégats de surface du sol après une pulvérisation en conditions naturelles. Les résultats que nous allons trouver par la suite pourront donc directement être extrapolés à ces conditions de terrain.

II. ETUDE DE L'EFFET DU CONDITIONNEUR SUR LES MECANISMES DE DESAGREGATION

A. La désagrégation par éclatement

1. Résultats et discussion

11. Effet du conditionneur et de sa dose d'application

Les résultats concernant l'effet du conditionneur et de sa dose d'application sur la désagrégation par éclatement sont présentés sur la Figure III-2 sur des agrégats du sol LA.

Sur cette Figure, on peut tout d'abord noter que le type de distribution granulométrique obtenue est caractérisée par une forte proportion des particules les plus fines, avec 60 % de la distribution inférieure à 0,2 mm.

Lorsque les agrégats ont été préalablement traités à la dose W250, la distribution granulométrique se trouve décalée : le taux d'éléments fins (ou particules) inférieurs à 0,2 mm passe à 40 %, alors que le taux d'éléments grossiers (ou agrégats) supérieurs à 2 mm passe de 2 à 10 % avec une augmentation significative.

Aux doses supérieures, ce taux d'agrégats résultants supérieurs à 2 mm augmente très fortement atteignant près de 60 % avec le traitement W1000e. Une réduction de toutes les classes inférieures à 1 mm s'effectue simultanément. Nous pouvons remarquer ici que pour les deux traitements W1000s et W1000e dont la différence est le mode d'application enrobant ou non les agrégats, les résultats obtenus sont très proches.

Il est important de noter ici que les produits obtenus dans les classes les plus grossières ont des morphologies différentes selon les traitements. Dans le cas d'agrégats témoins initiaux, les fractions supérieures à 1 mm sont principalement constituées de petits agrégats de forme plutôt arrondie et de petits cailloux. Dans le cas des agrégats W250 initiaux, ces deux fractions sont constituées surtout de petites unités de forme plate ou incurvée, qui du fait de leur relativement grande dimension, font penser à des morceaux de calottes demi-sphériques. Nous les illustrerons par la suite.

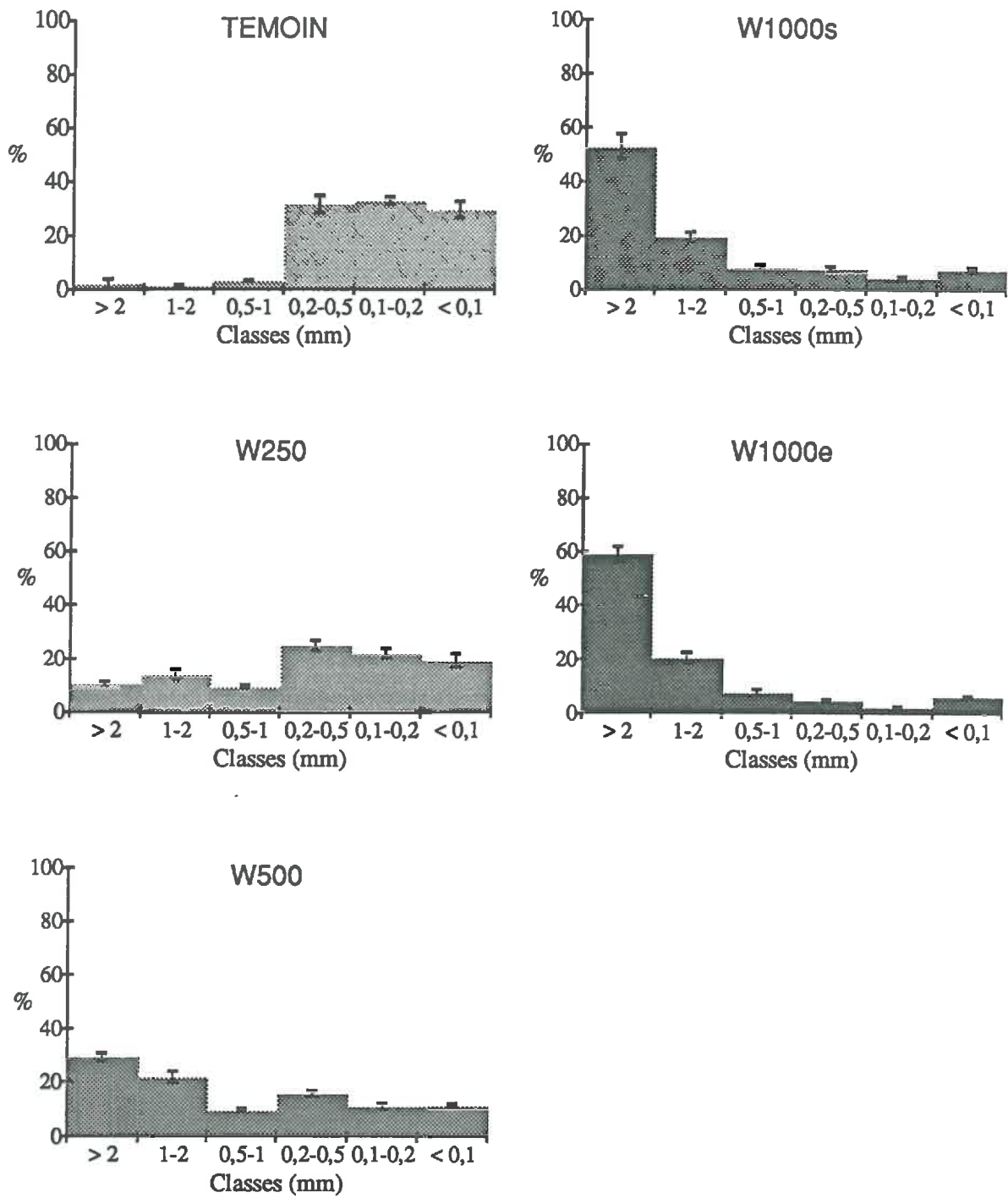


Figure III-2 : Influence de la dose d'application du conditionneur sur la distribution granulométrique résultante à l'issue du test de désagrégation totale par éclatement (les barres représentent les intervalles de confiance à 95 %)

Les produits des agrégats traités W1000e et W1000s sont en partie des fragments de "calotte" et en partie des agrégats conservés. En ce qui concerne la fraction la plus fine, elle est composée surtout de microagrégats et non pas de particules indépendantes qui auraient pu signifier une éventuelle dispersion.

Ces résultats montrent que le conditionneur permet de produire des fragments de plus grande taille mais qui ne sont pas forcément des agrégats conservés. Dans le cas du traitement W250, la forme en calotte fait supposer que seule une zone ayant été directement en contact avec le conditionneur est protégée. Dans le cas des plus forts traitements, en recouvrant presque toute la périphérie des agrégats, il aurait permis leur quasi-totale protection.

12. Influence de la durée d'immersion

L'influence de la durée d'immersion sur la désagrégation est présentée pour les agrégats non traités sur la Figure III-3a. La désagrégation devient totale dès 1 minute.

Sur les agrégats traités W250 (Fig. III-3b), la désagrégation atteint son maximum vers ce même temps. En revanche, sur les agrégats traités W1000e (Fig. III-3c), le maximum est atteint seulement à 2 minutes.

Le conditionneur retarde ici la désagrégation par l'éclatement suite au piégeage de l'air. Nous verrons par la suite quels peuvent être les éléments permettant d'expliquer ce fait.

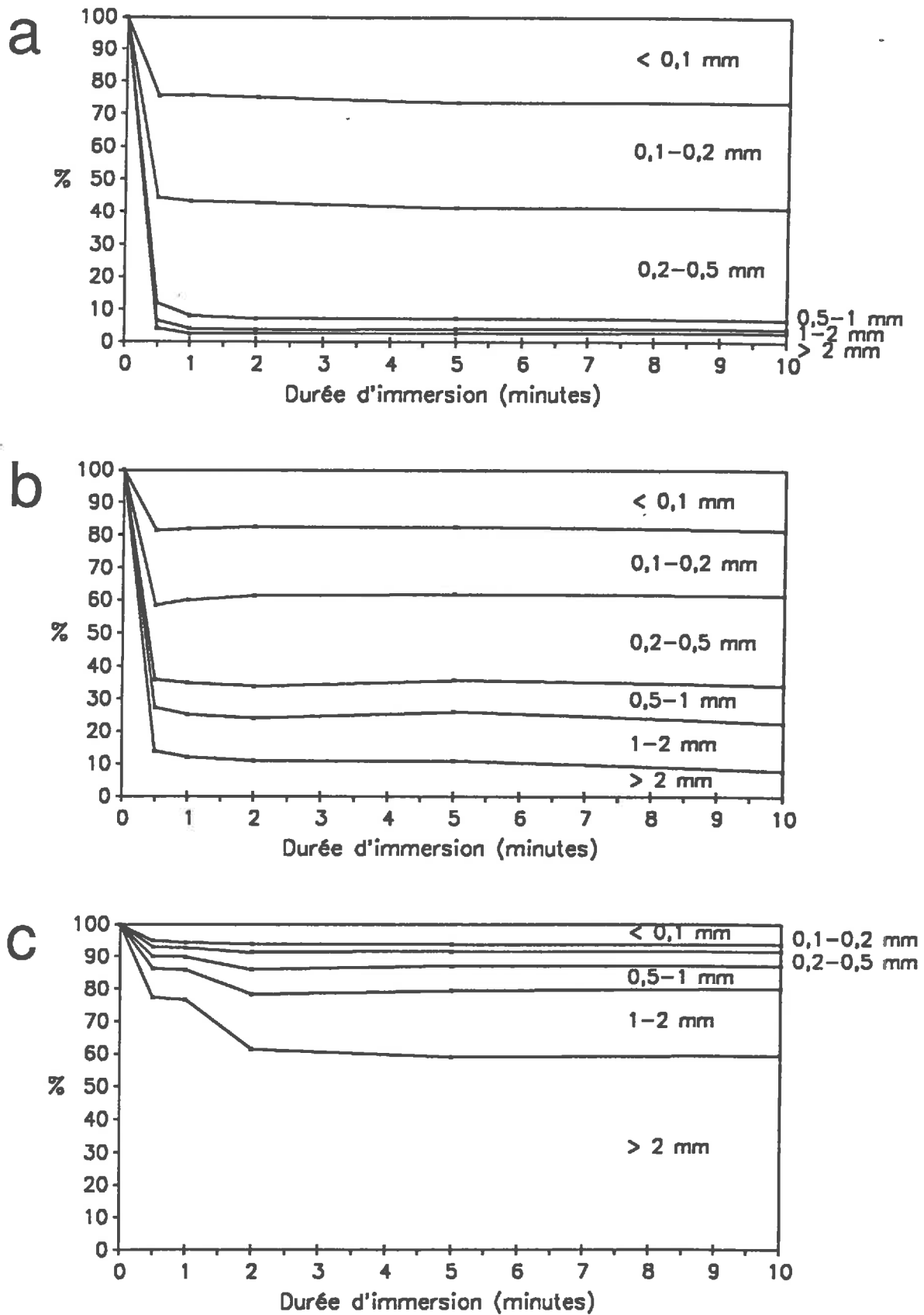


Figure III-3 : Influence de la durée d'immersion sur la distribution granulométrique résultante à partir de différents types d'agrégats

a : témoin

b : W250

c : W1000e

13. Influence de la nature du sol

Les résultats de l'effet du conditionneur sur la désagrégation par éclatement de différents matériaux sont présentés sur la Figure III-4, où les résultats concernant le sol LA sont de nouveau représentés.

Différents points apparaissent sur cette figure. En comparant tout d'abord les échantillons témoins des différents sols, on peut noter que les distributions granulométriques résultantes sont toutes caractérisées par des classes fines importantes. Les échantillons du sol POM ont un taux d'agrégats résultants de taille supérieure à 2 mm qui correspondent en fait à des petits cailloux de calcaire. Le mode de ces distributions se trouve dans la classe de 0,2 à 0,5 mm, à l'exception du sol LOR, où il est situé dans la classe de 0,1 à 0,2 mm. Pour ce sol, cette granulométrie correspond au sables fins, très abondants pour ce matériau.

La distribution de la taille des particules résultantes dans le cas des échantillons traités se caractérise pour tous ces sols par une augmentation des trois classes les plus grossières aux dépens des classes les plus fines. Cette augmentation est la moins importante pour le sol BOI le plus riche en argile ; le taux d'agrégats résultants de taille supérieure à 2 mm est très faible, peu différente des échantillons témoins. Notons que pour ces sols, les fragments des classes grossières ont une morphologie en calottes déjà observée précédemment.

Cette expérience tend ainsi à montrer que le conditionneur protège mieux un sol plus pauvre en argile. Les résultats obtenus pour le sol BOI font supposer qu'il existe dans ce sol des unités préexistantes très résistantes, comprises dans la fraction 0,2-0,5 mm, que le conditionneur aurait du mal à maintenir liées entre elles.

2. Synthèse

Ce test de désagrégation par éclatement a permis de mettre en évidence une action du conditionneur sur une protection voire une consolidation d'une partie de l'agrégat qui a été en contact avec le conditionneur lors de la pulvérisation. Vis-à-vis de cette désagrégation totale par éclatement, la proportion de recouvrement de l'agrégat par le conditionneur paraît être un facteur primordial.

Les hypothèses que l'on peut avancer ici quant au mode d'action du conditionneur sont d'une part le ralentissement de l'entrée de l'eau par augmentation de l'hydrophobie de la surface ou bien par fermeture de la porosité, d'autre part une augmentation de la cohésion du matériau, qui protégerait particulièrement la partie périphérique des agrégats.

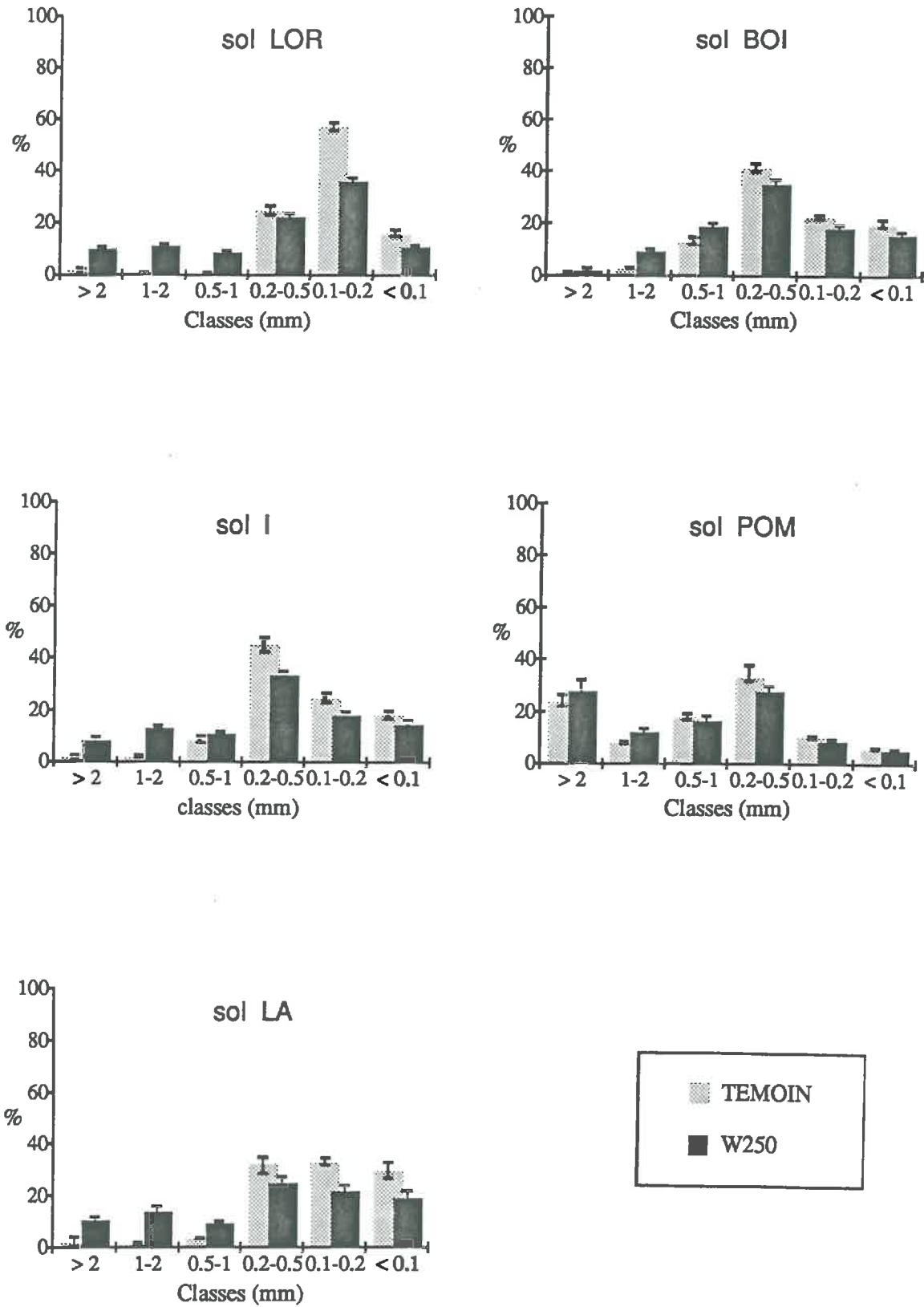


Figure III-4 : Influence de la texture du sol sur la distribution granulométrique résultante d'échantillons témoins et traités à l'issue du test de désagrégation totale par éclatement

B. Influence de l'humidité initiale des agrégats sur l'éclatement

1. Echantillons de départ

Les échantillons ont été équilibrés à différents états hydriques allant d'une gamme de contraintes de $pF=6,03$ à $pF=1$ au cours d'une humectation en partant d'échantillons séchés à l'air dans les mêmes conditions que pour les expériences précédentes.

Les agrégats du sol LA ont été choisis pour cette étude, avec deux types d'échantillons : des agrégats témoins et des agrégats traités W250.

Les teneurs en eau pondérales (mesurées sur 1 à 2 g d'agrégats) ainsi que les résultats des tests sont des moyennes obtenues sur au moins 5 répétitions.

2. Fixation des états hydriques

Les dispositifs d'établissement des contraintes hydriques exprimées ici en pF sont différents selon ces contraintes.

- A $pF=6$, les échantillons sont équilibrés à ce potentiel hydrique dans des dessiccateurs contenant une solution saline saturée durant 1 mois.

- A $pF=4$, les échantillons sont placés dans des cellules de RICHARDS (1947) durant une semaine.

- Aux pF de 1 à 3, un dispositif de filtration (TESSIER ET BERRIER, 1979) est utilisé, l'état hydrique étant fixé en soumettant les échantillons à une pression pneumatique durant 5 à 7 jours.

L'humectation des échantillons a été réalisée progressivement pour les $pF=1$ et 2, avec un palier à $pF=3$, afin de ne pas créer de fissures par éclatement.

3. Réalisation du test

Deux lots d'agrégats de chaque traitement sont préparés. Dès que les agrégats ont atteint l'équilibre hydrique choisi, un premier lot sert à réaliser le test de désagrégation totale par éclatement. Les agrégats, immédiatement après leur sortie des dispositifs de contrôle de l'état hydrique, sont immergés dans de l'eau distillée pendant 5 minutes. La suite du test est réalisée de la même façon que décrite précédemment. Un second lot sert à mesurer la teneur en eau pondérale.

4. Résultats

L'évolution des distributions granulométriques selon l'état hydrique des échantillons avant l'immersion est présentée sur la Figure III-5 pour les agrégats témoins et les agrégats traités W250.

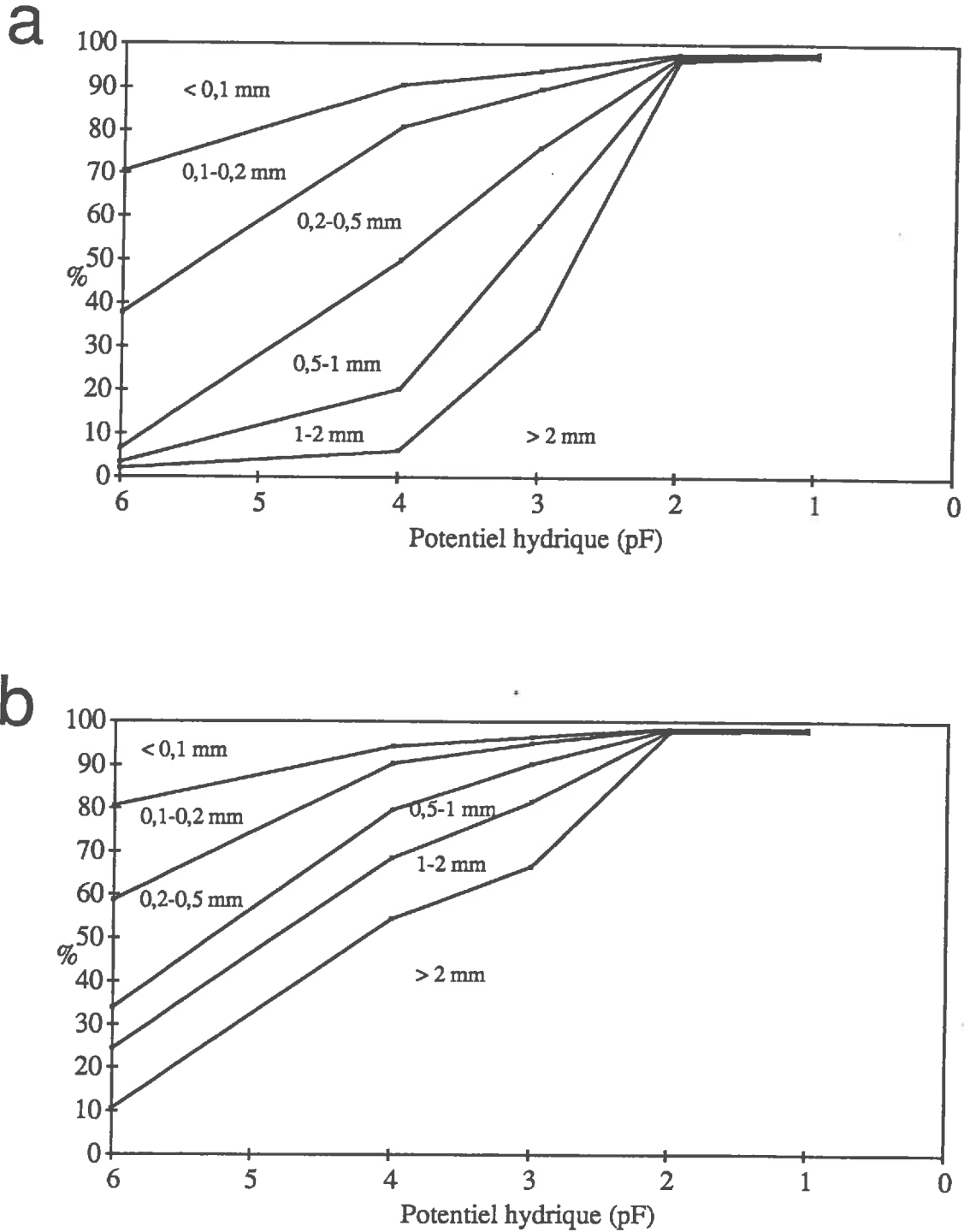


Figure III-5 : Influence de l'état hydrique initial des agrégats témoins et traités sur la désagrégation totale par éclatement

a : témoin

b : W250

Sur ces courbes, on peut constater un décalage des domaines de forte désagrégation selon les deux types d'échantillons. De $pF=6$ à $pF=3$, la désagrégation est maximale pour les échantillons témoins. En revanche, elle n'est maximale qu'à $pF=6$ pour les échantillons traités.

Cependant, en considérant les variations du seul taux d'agrégats > 2 mm en fonction à la fois du potentiel hydrique et de la teneur en eau des échantillons (Fig. III-6), deux faits apparaissent. D'une part, les courbes d'évolution des agrégats résultants > 2 mm sont très proches des courbes de teneur en eau pondérale, pour chacun de deux types d'échantillons. D'autre part, dès $pF=2$, aucune désagrégation ne se produit. Ainsi l'intensité de la désagrégation paraît très liée à la teneur en eau entre $pF=6$ et $pF=2$.

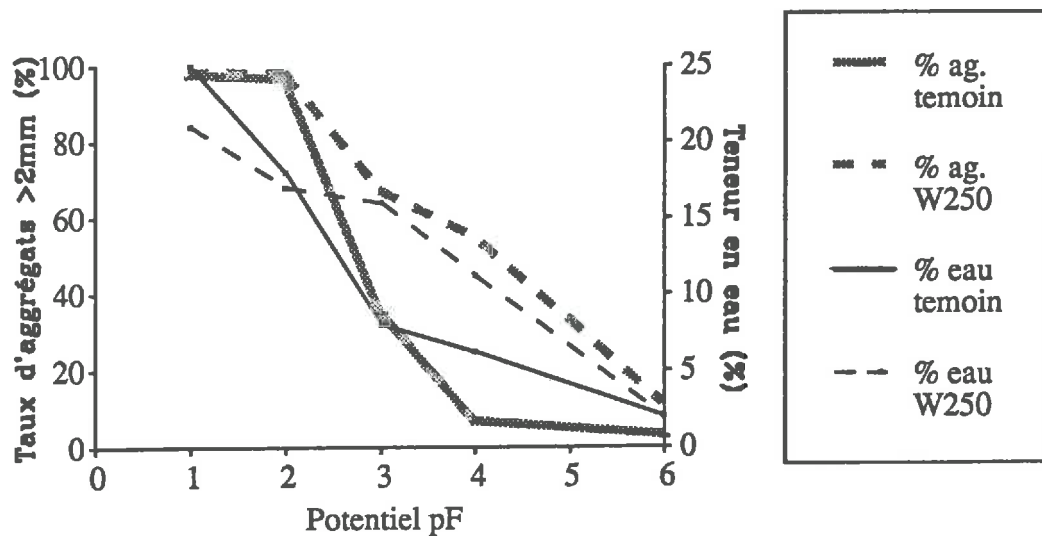


Figure III-6 : Influence de la teneur en eau et du potentiel hydrique au départ sur le taux d'agrégats > 2 mm résultant de la désagrégation totale par éclatement

5. Discussion

La relation que nous avons mise en évidence entre la teneur en eau et la désagrégation par éclatement est largement en accord avec les résultats précédemment obtenus par PANABOKKE et QUIRK (1968) et LE BISSONNAIS (1988), montrant que l'éclatement est ainsi dû au volume d'air présent dans l'agrégat susceptible d'être piégé, c'est-à-dire le complémentaire au volume poral de la teneur en eau. Cependant nous n'avons parlé ici que de teneurs en eau pondérales et non pas volumiques. Il nous restera par la suite à vérifier la complémentarité effective entre les volumes d'eau et d'air, à savoir la rigidité du système au cours du cycle.

Les différences d'intensité de la désagrégation en fonction du pF des deux types d'agrégats semblent être liées avec une différence de comportement hydrique entre les agrégats témoins et traités au cours de la réhumectation. Les propriétés de rétention en eau en fonction du potentiel hydrique seront examinées plus loin en détail.

C. La microfissuration par éclatement

1. Résultats et discussion

11. Effet du conditionneur et de sa dose d'application

Les résultats de l'effet du conditionneur sur la microfissuration par éclatement sont présentés sur la Figure III-7.

La distribution granulométrique résultante des échantillons témoins se caractérise tout d'abord par une importance des classes de taille intermédiaire : 75 % des produits sont compris entre 0,2 et 1 mm.

En ce qui concerne les échantillons ayant été préalablement traités à la dose W250, les fractions les plus grossières sont fortement augmentées : le taux d'agrégats résultants supérieurs à 2 mm passe de 4 % pour les témoins à plus de 20 % sur les échantillons traités.

Ce dernier taux augmente avec la dose de conditionneur apportée, jusqu'à atteindre plus de 90 % avec le traitement W1000e.

Quel que soit le traitement reçu par ces échantillons, la fraction grossière obtenue (> 2 mm) est constituée dans ce cas-ci par des agrégats conservés, on n'y retrouve pas de "calottes" d'agrégats.

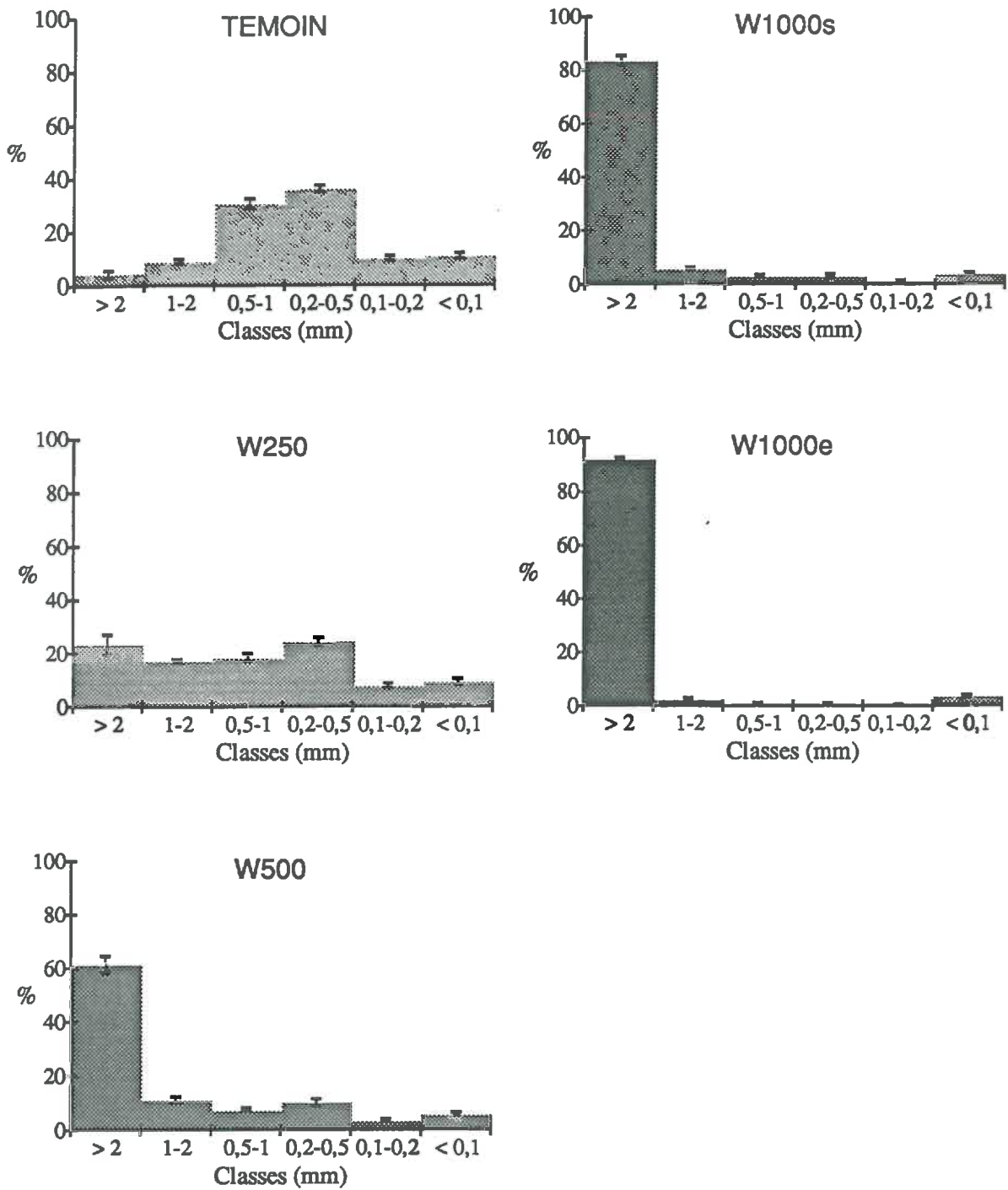


Figure III-7 : Influence de la dose d'application du conditionneur sur la distribution granulométrique résultante à l'issue du test de microfissuration par éclatement

Dans le cas présent d'un plus faible gradient hydrique apporté aux agrégats et de possibilités d'échappement de l'air plus importantes, le conditionneur protège de façon plus importante les agrégats, en étendant cette protection non seulement à une calotte périphérique de l'agrégat mais aux agrégats entiers.

12. Influence de la durée d'humectation

L'évolution de la distribution granulométrique selon le temps d'humectation par capillarité sur les agrégats témoins est présentée sur la Figure III-8a. On peut remarquer que la fissuration devient très importante à 1 minute et est pratiquement stabilisée au delà. Lorsque l'on passe aux échantillons préalablement traités à la dose W250 (Fig. III-8b), la fissuration est plus lente au départ et n'est maximale qu'à 5 minutes. Avec le traitement W1000e (Fig. III-8c), la fissuration est très faible et pratiquement constante dès le début.

La fragmentation par fissuration est donc retardée sur les échantillons ayant été traités avec le conditionneur, de façon amplifiée par rapport à la désagrégation totale par éclatement qui met en jeu des énergies d'humectation plus importantes. Cependant on ne peut dire ici si c'est réellement un ralentissement de l'entrée de l'eau ou bien l'augmentation de la cohésion.

Pour tenter de voir l'effet du conditionneur sur la vitesse d'imbibition des agrégats, nous avons mesuré les teneurs en eau des agrégats aux différents temps d'humectation sur le dispositif correspondant aux points des courbes de la Figure III-8.

13. Effet du conditionneur sur l'évolution de la teneur en eau des échantillons au cours de l'humectation à saturation

Les teneurs en eau pondérales mesurées aux différentes durées d'humectation sur la plaque saturée par le système de mèche pour les différents agrégats sont représentées sur la Figure III-9.

Les trois courbes ont une forme d'abord de forte croissance puis de plateau. Dès 30 secondes d'humectation, tous les agrégats ont atteint une teneur en eau proche de 20 %, avec seulement une légère différence selon la dose de conditionneur apportée. Au delà de 30 secondes, les échantillons ont des comportements très différents. La teneur en eau des échantillons témoins continue d'augmenter, atteignant 32 % après 2 minutes et 40 % après 10 minutes. Les échantillons traités W250 ont une teneur en eau augmentant moins fortement, atteignant 27 % après 2 minutes et 32 % après 10 minutes. En revanche, les échantillons traités W1000e prennent très peu d'eau après 30 secondes, leur teneur après 10 minutes est de 20 %.

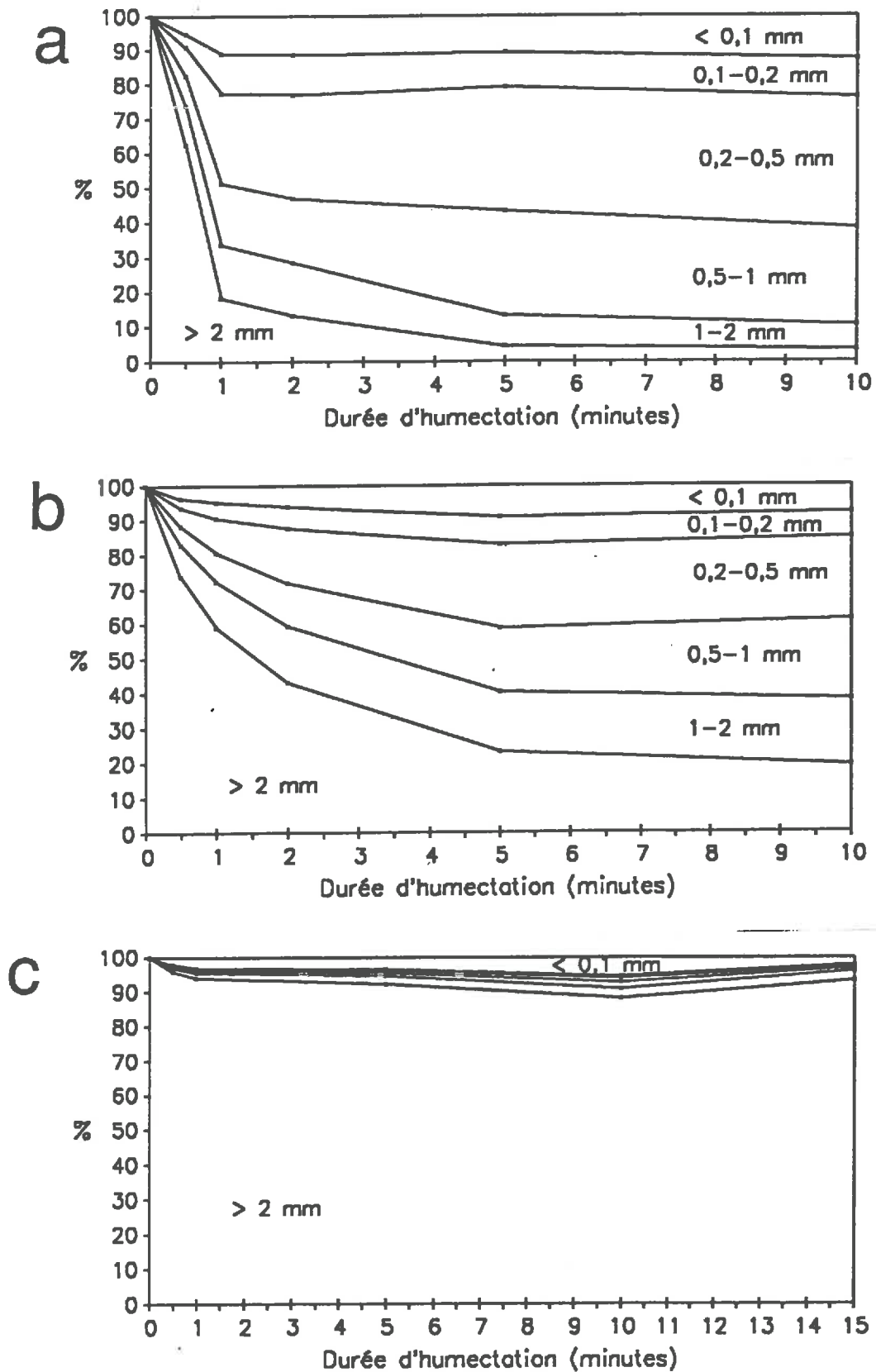


Figure III-8 : Influence de la durée d'imbibition sur la distribution granulométrique résultante à partir de différents types d'agrégats

- a : témoin
- b : W250
- c : W1000e

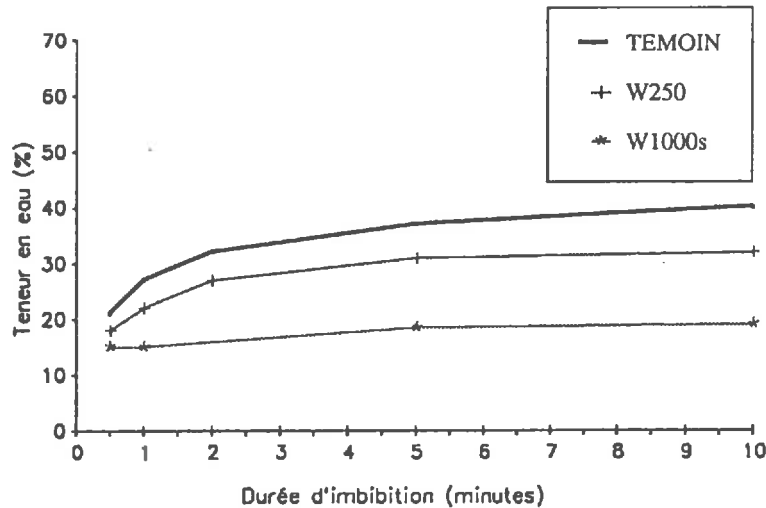


Figure III-9 : Evolution de la teneur en eau pondérale des agrégats en fonction de la durée d'imbibition

En comparant les chiffres obtenus à 10 minutes avec ceux obtenus à l'équilibre, sous vide au bout de 48 heures, qui sont de 28 % pour les échantillons témoins, 25 % pour les échantillons traités W250 et 22 % pour ceux traités W1000e, nous pouvons constater que seuls ces derniers échantillons atteignent ce taux de saturation, les autres le dépassant fortement.

Cette expérimentation ne permet malheureusement pas de mettre en évidence un effet du ralentissement de l'entrée de l'eau dans les agrégats traités. En effet, dès 30 secondes, les agrégats sont déjà très humectés. Des valeurs obtenues pour des temps d'imbibition plus courts seraient alors nécessaires mais ne sont cependant pas réalisables du fait d'une forte hétérogénéité des teneurs obtenues pour des durées très petites. Les humidités obtenues ici sont en fait la conséquence de la microfissuration par l'éclatement partiel, créant des réseaux de fissures d'autant plus importants qu'il y a moins de conditionneur, et donc une porosité nouvelle se remplissant d'eau.

14. Influence de la nature du sol

Les distributions de la taille des particules résultantes à l'issue de la microfissuration par éclatement dans le cas des différents sols sont présentées sur la Figure III-10.

En comparant les échantillons témoins des différents sols, on peut remarquer que les histogrammes sont semblables à l'exception de deux sols. Le sol LOR tout d'abord a une classe de particules résultantes de 0,1 à 0,2 mm plus importante que les autres sols. Ceci serait du comme nous l'avons déjà remarqué à sa composition granulométrique. Le sol POM, très calcaire, a un comportement très particulier lors de ce test : les agrégats initiaux sont

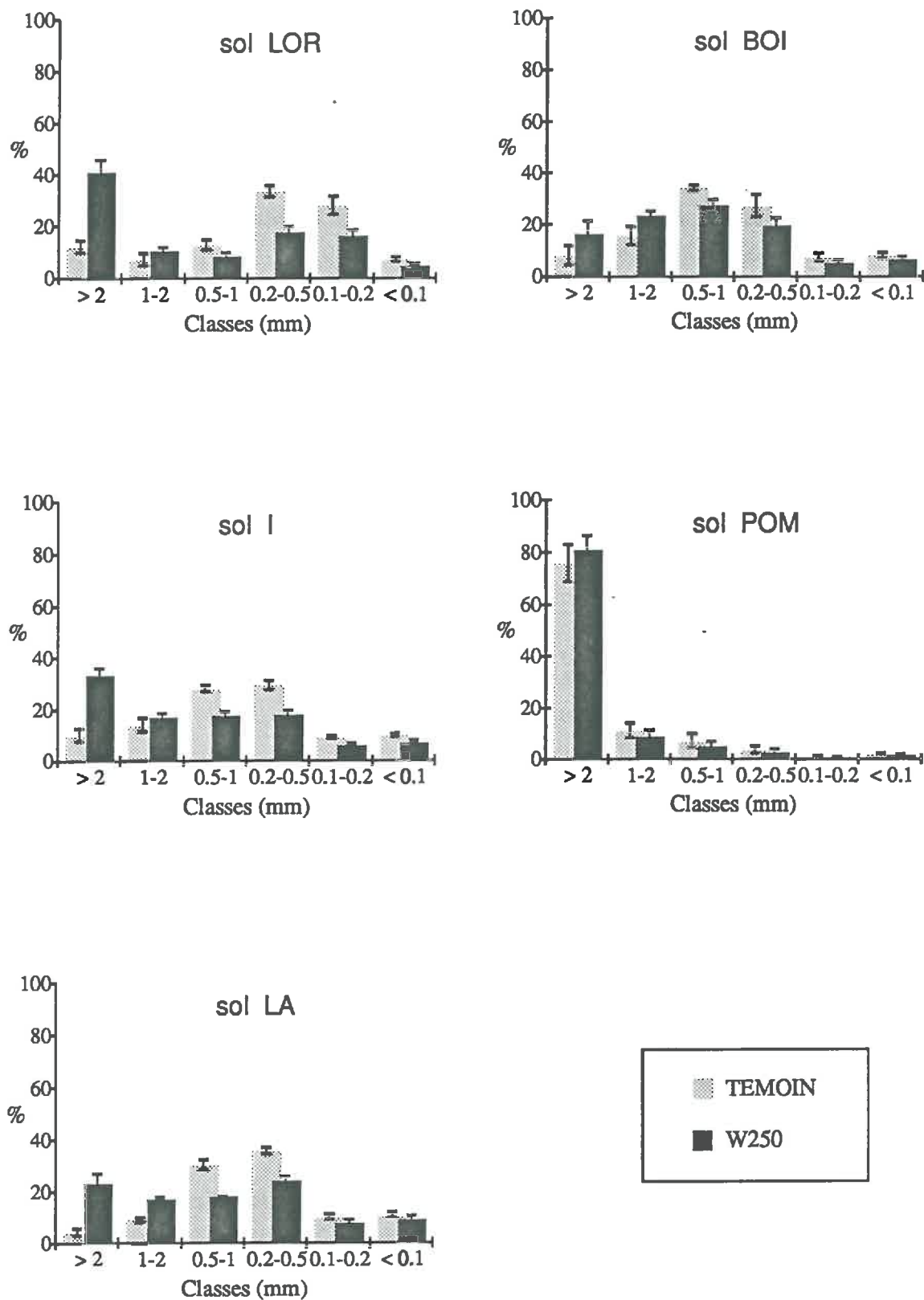


Figure III-10 : Influence de la texture du sol sur la distribution granulométrique résultante d'échantillons témoins et traités à l'issue du test de microfissuration par éclatement

presque tous conservés et la présence de cailloux calcaires ne permet pas d'expliquer ce taux si important.

Les distributions granulométriques résultantes pour les échantillons préalablement traités sont décalées vers les fractions les plus grossières. Le taux d'agrégats résultants de la classe supérieure à 2 mm augmente fortement pour les deux sols I et LOR, passant de 10 % pour les témoins à plus de 40 % pour les échantillons traités. La différence est moins grande pour les deux sols les plus argileux, LA et BOI. Elle est bien plus faible dans le cas du sol POM, qui a déjà un taux très fort sans traitement.

La stabilité du matériau calcaire vis-à-vis de ce test par humectation capillaire est un fait marquant plutôt inattendu. Soit la cohésion du matériau est supérieure à l'énergie capillaire mise en jeu, soit sa porosité est de forme bien particulière telle qu'elle ne permette pas de piégeage de l'air suite à l'arrivée d'eau ici peu brutale.

2. Synthèse

Lors de l'étude de la microfissuration par éclatement, nous avons retrouvé les mêmes facteurs intervenants que lors de l'étude de la désagrégation totale par éclatement. Nous n'avons pas pu aller plus loin dans le rôle du conditionneur sur ces différents facteurs, pour confirmer ou infirmer les hypothèses précédemment émises.

Cependant certains faits nouveaux apparaissent, du fait principalement d'un gradient hydrique mis en jeu plus faible que dans l'étude de la désagrégation totale, entraînant des différences accrues de comportement. D'une part, le conditionneur permet de stabiliser relativement plus les sols les moins riches en argile. D'autre part, le sol calcaire se révèle particulièrement stable vis-à-vis de ce test.

D. La désagrégation mécanique

1. Résultats et discussion

11. Effet du conditionneur et de sa dose d'application

Les distributions de la taille des particules résultantes après désagrégation mécanique pour les échantillons témoins et traités à différentes doses d'application sont représentées sur la Figure III-11.

L'histogramme des échantillons témoins est caractérisé par deux fractions dominantes : la fraction inférieure à 0,1 mm, avec 63 %, et la fraction supérieure à 2 mm avec 22 %. Les fractions intermédiaires ne sont quasiment pas représentées.

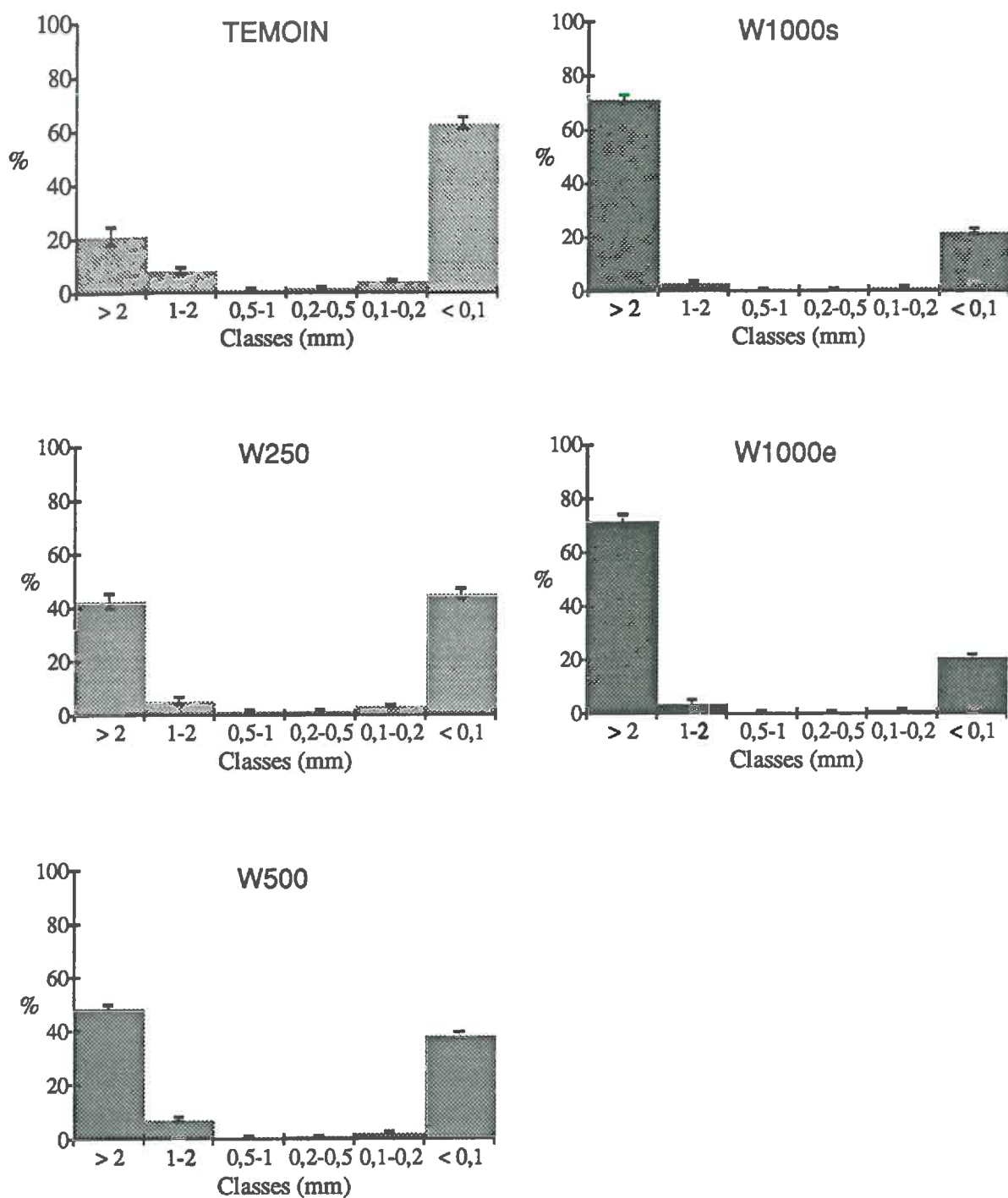


Figure III-11 : Influence de la dose d'application du conditionneur sur la distribution granulométrique résultante à l'issue du test de désagrégation mécanique

Après traitement à la dose W250, le taux d'agrégats résultants supérieurs à 2 mm est fortement augmenté jusqu'à 43 % de la distribution aux dépens des classes les plus fines .

Le taux d'agrégats supérieurs à 2 mm augmente peu en passant à la dose W500, avec 49 % de la distribution, et plus nettement avec les deux autres traitements, jusqu'à 72 % de la distribution.

Par ce mode de désagrégation et quel que soit le traitement reçu au départ par les agrégats initiaux, les fractions les plus grossières sont constituées d'agrégats arrondis, lissés par l'agitation rotative. A l'opposé, les fractions les plus fines sont constituées de grains de quartz brillants bien propres, produits par l'usure de la périphérie des agrégats.

Le conditionneur permet ainsi d'augmenter la stabilité des agrégats contre la désagrégation mécanique. Or le test employé ne met en jeu qu'un seul facteur de la stabilité qui est la cohésion à l'état humide du matériau. Nous pouvons donc conclure ici de l'effet favorable du conditionneur sur l'augmentation de celle-ci.

En effet un autre facteur pourrait être envisagé dans un tel test qui est la dispersion des argiles. Cependant la faible durée d'agitation pour de tels échantillons non sodiques permet d'exclure cette hypothèse.

12. Influence de la durée d'agitation

L'évolution de la distribution granulométrique résultante des échantillons non traités selon le temps d'agitation (Fig. III-12a) montre d'une part que dès 2 minutes d'agitation la désagrégation est déjà importante, avec 40 % de particules obtenues inférieures à 0,1 mm. D'autre part, au bout de 10 minutes, la désagrégation a atteint son niveau maximum, avec presque 80 % de particules résultantes inférieures à 0,1 mm.

Les échantillons traités W250 (Fig. III-12b) sont désagrégés plus lentement sous l'effet de l'agitation. Une différence existe encore avec les échantillons témoins à 10 minutes d'agitation. Au bout d'une heure, les deux échantillons, témoins et traités W250, ne diffèrent que par la présence encore de quelques fragments dans les classes intermédiaires pour ces derniers.

Pour les échantillons traités W1000e (Fig. III-12c), la désagrégation est encore plus ralentie et se fait de façon très progressive en fonction du temps d'agitation. Au bout de 30 minutes, la classe supérieure à 2 mm constitue encore 25 % de la distribution granulométrique. Au bout de 1 heure d'agitation, le taux de particules inférieures à 0,1 mm n'a pas évolué par rapport à 30 minutes. En revanche, la fraction supérieure à 2 mm a diminué, la différence se retrouvant dans les classes 0,5-1 mm.

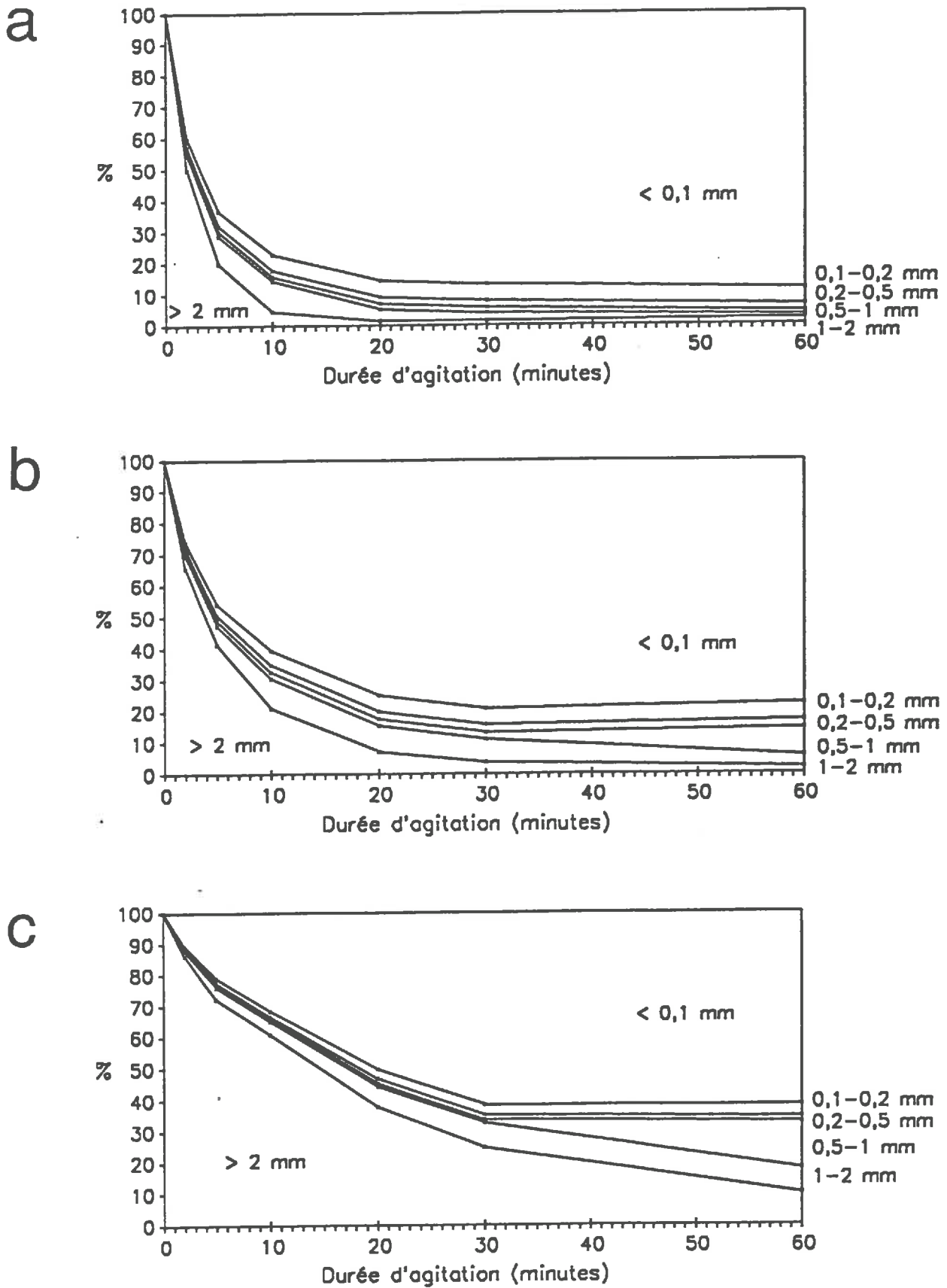


Figure III-12 : Influence de la durée d'agitation sur la distribution granulométrique résultante à partir de différents types d'agrégats

a : témoin

b : W250

c : W1000e

Ainsi, l'augmentation de la cohésion créée par le conditionneur est importante mais tout de même limitée. La périphérie des agrégats particulièrement protégée s'use au fur et à mesure des agitations. Cependant, la constance du taux de particules inférieures à 0,1 mm entre 30 minutes et 1 heure et la compensation des classes > 2 mm et 0,5-1 mm tendent à montrer que dans cette période, les agrégats supérieurs à 2 mm se sont fragmentés en unités de 0,5 à 1 mm mais ne se sont pas usés en particules fines. On peut ici penser qu'il s'est formé des fragments cimentés et consolidés par le conditionneur qui sont très résistants à l'abrasion. Cependant, il faudrait aller au-delà de 1 heure d'agitation, afin de voir si ces unités persistent pour confirmer ce fait.

13. Influence de la nature du sol

Les distributions résultantes des échantillons traités ou non pour les différents types de sol sont présentées sur la Figure III-13.

Concernant les échantillons témoins, le premier fait apparent est la forte désagrégation du sol LOR : après 5 minutes d'agitation, il reste seulement 6 % de fragments de taille supérieure à 2 mm. De plus, on retrouve pour ce sol une forte proportion des particules résultantes dans la classe de 0,1 à 0,2 mm. Le sol I se comporte de la même façon que le sol LA. En revanche, les deux autres sols, BOI et POM, se caractérisent par une plus faible désagrégation.

Avec le conditionneur, les distributions obtenues se caractérisent par des fractions grossières (> 2 mm et 1-2 mm) plus importantes aux dépens des plus fines (< 0,1 mm), de façon assez identique selon les sols.

Ces résultats mettent de nouveau en évidence le rôle important de la teneur en argile dans la cohésion du matériau, déjà montré lors d'autres études (ROGOWSKI and DON KIRKHAM, 1976 ; GUERIF, 1988b).

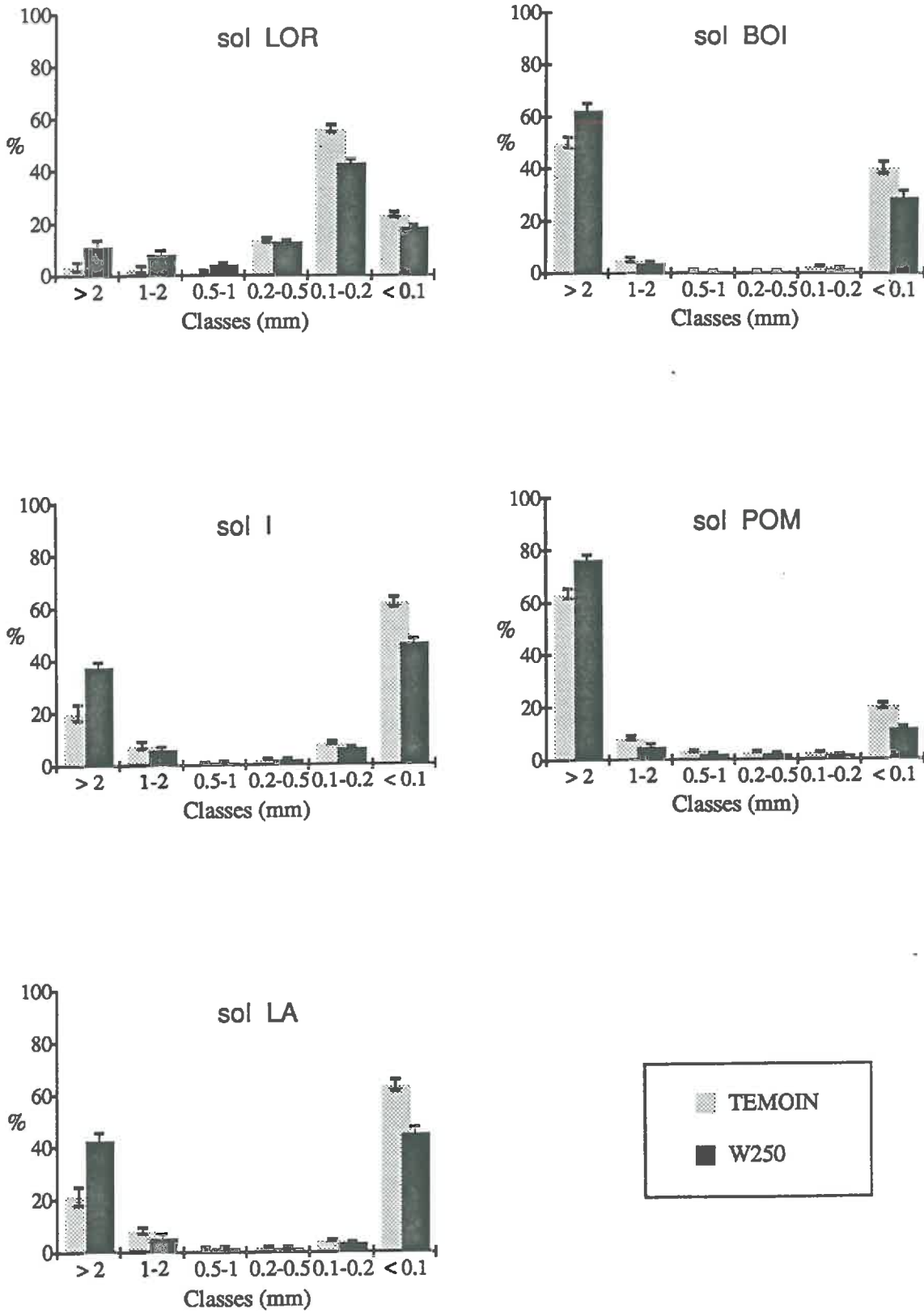


Figure III-13 : Influence de la texture du sol sur la distribution granulométrique résultante d'échantillons témoins et traités à l'issue du test de désagrégation mécanique

2. Synthèse

Dans cette étude, nous avons pu mettre en évidence que le conditionneur permet sur chacun de ces sols d'augmenter la stabilité des matériaux vis-à-vis d'une énergie mécanique, c'est-à-dire leur cohésion. Un tel effet concernant des polycations d'aluminium a déjà été montré par FOSTER et GAZZARD (1975), mais par des tests de cisaillement et sur des kaolins.

E. Observation morphologique des "calottes" périphériques des agrégats traités

1. Présentation

Lors de l'étude de la désagrégation totale par éclatement, nous avons pu constater à l'issue du test la présence de "calottes" dans le cas des échantillons traités. Nous allons présenter ici leur morphologie par des observations à la loupe binoculaire à un faible grossissement. Nous allons par ailleurs évaluer leur épaisseur qui pourra permettre de donner un ordre de grandeur de la profondeur de pénétration du conditionneur.

Pour obtenir une évaluation précise de la profondeur de pénétration du conditionneur, une méthode de dosage de l'aluminium par microsonde sur des agrégats en coupe, en microscopie électronique à balayage, a tout d'abord été envisagée. Cependant à cause de la forte teneur en aluminium total dans le sol à l'état naturel nous n'avons pas pu déceler de zone de plus forte concentration en aluminium dans nos conditions d'application du conditionneur.

2. Observations

Les observations sont réalisées sur les fractions > 2 mm et 1-2 mm résultantes du test de désagrégation totale par éclatement sur les échantillons traités W250. Ces fractions sont constituées ainsi que nous l'avons vu de morceaux de calottes.

3. Résultats

On trouve dans la fraction supérieure à 2 mm des portions de calottes sphériques de grande taille alors que, dans la fraction comprise entre 1 et 2 mm, ce ne sont que des fragments (Fig. III-14). En coupe, on peut voir que ces structures paraissent assez compactes.

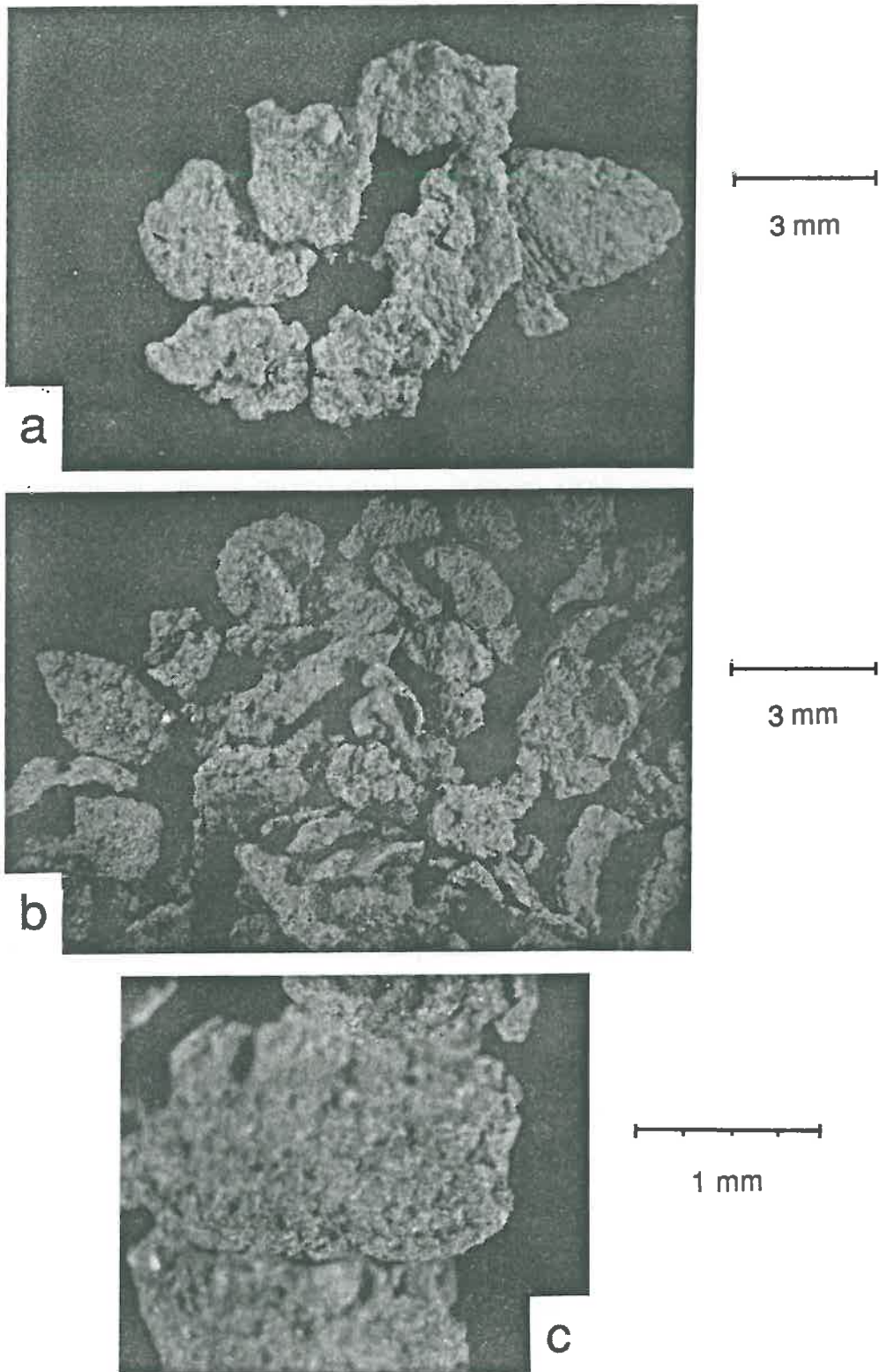


Figure III-14 : Morphologie des calottes
a : fraction > 2 mm
b : fraction 1-2 mm
c : détail en coupe

Les épaisseurs de ces fragments de calottes sphériques sont de l'ordre de 100 à 200 μm . Parfois elles sont plus épaisses ; des microagrégats arrondis se sont alors incorporés dans cette structure.

4. Discussion

Ces observations ne relèvent que du comportement de volumes de sol ayant été en contact avec le conditionneur et non pas de la localisation exacte de celui-ci au coeur des agrégats. Cependant, elles permettent d'envisager que le conditionneur se dispose en revêtement autour des agrégats en modifiant un certain volume en périphérie, de faible épaisseur, en lui conférant une forte stabilité structurale.

F. Conclusion

Par ces différentes expériences, plusieurs faits ont été montrés. Le conditionneur permet d'augmenter la résistance des agrégats vis-à-vis des trois tests de désagrégation, sans discrimination. Il est difficile aussi de juger d'un effet plus important sur tel mécanisme plutôt que sur un autre. Cet effet est dû à une simple partie de l'agrégat, en périphérie, ayant directement reçu le conditionneur lors de sa pulvérisation. Aussi la protection par le conditionneur est d'autant plus efficace qu'il recouvre une grande partie des agrégats.

Le conditionneur agit tout d'abord en augmentant la cohésion en périphérie des agrégats et en limitant ainsi l'usure exercée lors du test d'agitation mécanique.

De plus, il permet de ralentir la désagrégation par éclatement. Deux hypothèses ont été formulées quant à une éventuelle action sur un ralentissement de l'entrée de l'eau dans l'agrégat. C'est d'une part une réduction de la taille de la porosité d'accès à l'eau en périphérie de ces agrégats et d'autre part une hydrophobie plus importante des parois de ces pores d'accès. Dans le chapitre suivant, nous allons tenter d'évaluer le rôle du conditionneur sur chacun de ces facteurs.

Seconde partie :**EFFET DU CONDITIONNEUR****SUR CERTAINES COMPOSANTES DE LA STABILITE STRUCTURALE :****- LA MOUILLABILITE DES SURFACES****- L'ESPACE PORAL ET LA RETENTION EN EAU****Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons chercher à déterminer dans quelle mesure le conditionneur provoque un ralentissement de la vitesse d'humectation des agrégats. Rappelons que la vitesse d'avancée des ménisques dépend d'une part de la mouillabilité des parois des pores, exprimée par l'angle de raccordement solide-liquide, et d'autre part de la distribution de la taille des pores du matériau, ainsi que leur continuité.

Nous allons dans un premier temps étudier l'influence du conditionneur sur la mouillabilité des surfaces, au moyen de la mesure d'angle que fait une goutte d'eau posée sur une surface, constituée ici d'un dépôt d'argile.

Ensuite, nous tenterons de voir dans quelle mesure le conditionneur modifie l'espace poral, en particulier la porosité d'accès de l'eau lors de l'humectation. Ce problème sera appréhendé par l'étude de l'évolution de la rétention en eau des agrégats au cours d'un cycle d'humectation et dessiccation. Ces résultats pourront être interprétés en terme de répartition du volume poral selon la taille des pores d'accès concernés.

I. EFFET DU CONDITIONNEUR SUR LA MOUILLABILITE DES SURFACES**A. Matériels et méthodes****1. Présentation**

Afin d'évaluer l'effet du conditionneur sur le caractère plus ou moins mouillable de surfaces de sol, nous avons choisi de mesurer directement l'angle de contact

que fait une goutte d'eau avec la surface du solide. Cette étude a été réalisée avec la collaboration de Claire JOUANY.

Cette méthode a l'avantage de quantifier directement l'angle de contact, qui nous intéresse dans les expressions de mouvement de ménisques d'eau. De plus, elle ne met en jeu que la mouillabilité, sans faire intervenir la géométrie de l'espace poral comme c'est le cas des mesures de hauteur à l'équilibre ou de vitesses d'ascension capillaire. Elle permet aussi de comparer les valeurs obtenues avec ce conditionneur à d'autres molécules comme des polymères organiques.

Cependant, un inconvénient de cette méthode est le fait que les mesures doivent être réalisées sur un matériau plan et homogène, ce qui n'est pas le cas d'échantillons de sol. C'est pour cela que nous avons utilisé comme matériau de base une argile, une montmorillonite calcique, déjà fort étudiée par ailleurs (CHASSIN et al., 1986 ; JOUANY et CHASSIN, 1987a) qui a été ici associée au conditionneur.

2. Matériaux d'étude

La fraction inférieure à 2 μm d'une montmorillonite de Wyoming a été extraite puis saturée avec du chlorure de calcium. Elle est ensuite rincée par centrifugations successives jusqu'à une concentration saline de 10^{-3} M.

Une solution de polycations d'aluminium ayant le même rapport d'hydroxylation que le conditionneur mais sans les autres ions présents dans sa formulation, a été préparée par neutralisation de chlorure d'aluminium par du carbonate de calcium jusqu'à obtenir un rapport de 1,5 entre les ions OH et Al.

Nous avons ensuite préparé des associations montmorillonite calcique-WAC (MteCa-WAC) et montmorillonite calcique-polycations d'aluminium (MteCa-Al(1,5)) en mélangeant la suspension d'argile avec la solution de conditionneur de telle façon que la quantité d'aluminium apportée soit égale à trois fois la CEC afin de la saturer. L'aluminium non fixé et les sels en excès sont ensuite éliminés par centrifugation puis ultrafiltration, afin d'éviter la présence de ces sels cristallisés sur les surfaces.

On réalise ensuite des dépôts orientés de ces matériaux en faisant évaporer une goutte de suspension sur une lame de verre. Les associations :

- soit sont séchées à 0 % d'Humidité Relative (au silicagel puis P_2O_5),
- soit subissent un cycle de dessiccation-réhumectation (à 75 %, 96 %, et 100 % d'HR) dans des dessiccateurs où l'humidité relative est fixée par des solutions salines.

3. Méthode de mesure

31. Mesure de l'angle de contact à l'air

On mesure alors l'angle de contact à l'avancée d'une goutte d'eau déposée par une microseringue. La valeur de θ est obtenue par mesure optique, à l'aide d'un goniomètre, avec des écart-types de 2° environ. Une trentaine de répétitions ont été réalisées pour chaque échantillon. L'angle de raccordement est d'autant plus élevé que le matériau est hydrophobe ; il est proche de 0° pour la montmorillonite calcique qui est très hydrophile (CHASSIN et al., 1986).

32. Mesure des énergies de surface

Une étude plus approfondie a été réalisée par JOUANY et al. (1990) en utilisant une méthode à deux liquides où l'air est remplacé par des alcanes (TAMAI et al., 1967). Si l'on se réfère à l'équation fondamentale de YOUNG qui décrit l'équilibre d'une goutte posée sur un solide (Fig. III-15), on peut alors déterminer l'énergie de surface γ_{SA} à partir de mesures d'angles de contact θ .

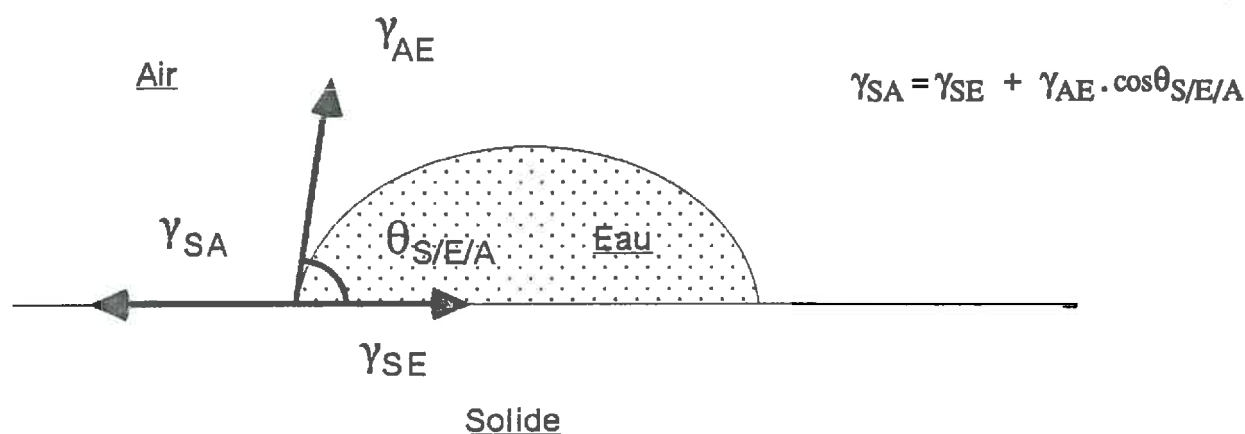


Figure III-15 : Modèle de YOUNG exprimant les énergies interfaciales

En remplaçant l'air par des alcanes (pour lesquels $\gamma_{\text{eau-alcanes}}$ est connu) et en mesurant les angles de contact obtenus, il est possible à partir d'une série d'équations décrites par CHASSIN et al. (1986) de déduire les valeurs de l'énergie de surface γ_S et de ses composantes polaire (γ_S^P) et dispersive (γ_S^D). Une simplification de cette méthode, mise au point par DAVID et MISRA (1985), utilise seulement de l'octane et donne accès à la composante polaire de l'énergie de surface. Cette méthode a été appliquée à l'étude de l'influence du cycle de dessiccation-réhydratation.

Cependant ces mesures ne peuvent être réalisées que sur des matériaux hydrophobes au départ ; comme nous le verrons, l'angle à l'air sur le dépôt orienté de la montmorillonite calcique très hydrophile n'est pas mesurable.

TABLEAU III-2

Angles de contact mesurés à l'air
des surfaces des trois échantillons,
à trois états hydriques
au cours d'un cycle de dessiccation - réhumectation

Etats hydriques	Echantillon	Angles de contact des surfaces	
		Moyenne (en °)	Ecart-type
75 % HR	Mte Ca	~ 0	
	Mte Ca - WAC	90	0.85
	Mte Ca - Al(1,5)	87.5	1.06
0 % HR	Mte Ca	~ 0	
	Mte Ca - WAC	91	2.7
	Mte Ca - Al(1,5)	88	2.4
100 % HR	Mte Ca	~ 0	
	Mte Ca - WAC	100	1.2
	Mte Ca - Al(1,5)	97	2.1

B. Résultats

1. Effet du conditionneur sur l'angle de raccordement solide-liquide à l'air

Les valeurs des angles mesurés à différentes humidités relatives sont présentées sur le Tableau III-2. Elles font apparaître une forte différence entre le témoin et les deux associations.

L'angle de contact sur la surface de montmorillonite calcique est difficilement mesurable (la goutte s'étale trop rapidement), indiquant un matériau très hydrophile. Pour les deux associations avec l'aluminium, les angles de contact sont élevés, proches de 90°. De plus ces valeurs sont obtenues dès une dessiccation à 75 % d'humidité relative et conservées jusqu'à la réhumectation à 100 % d'humidité relative.

2. Effet du conditionneur sur les énergies de surface au cours d'un cycle de dessiccation et réhumectation

Les énergies de surface des associations, obtenues à 0% d'humidité relative sont présentées sur la Figure III-16. Ces valeurs sont très élevées pour la montmorillonite calcique, avec 110 mJ.m^{-2} , dont 83 mJ.m^{-2} de composante dispersive et 27 mJ.m^{-2} de composante polaire. A l'inverse, ces valeurs sont faibles pour les associations avec l'aluminium, de 42 à 24 mJ.m^{-2} . Une différence existe cependant entre les deux associations. Alors que les valeurs de la composante polaire sont toutes les deux de l'ordre de 4 et 6 mJ.m^{-2} , les valeurs des composantes dispersives sont de 37 mJ.m^{-2} pour l'association avec l'aluminium de rapport 1,5 pur préparé au laboratoire et de 18 mJ.m^{-2} pour l'association avec le conditionneur.

Les valeurs des composantes polaires de l'énergie de surface au cours du cycle de dessiccation-réhumectation sont représentées sur la Figure III-17. On peut constater dans le cas de la montmorillonite calcique que la composante polaire décroît avec la dessiccation puis se rapproche lors de la réhumectation de la valeur de l'eau qui est de 50 mJ.m^{-2} . A l'inverse, dans le cas des associations, la valeur de la composante polaire reste constante et très faible tout au cours de ce cycle.

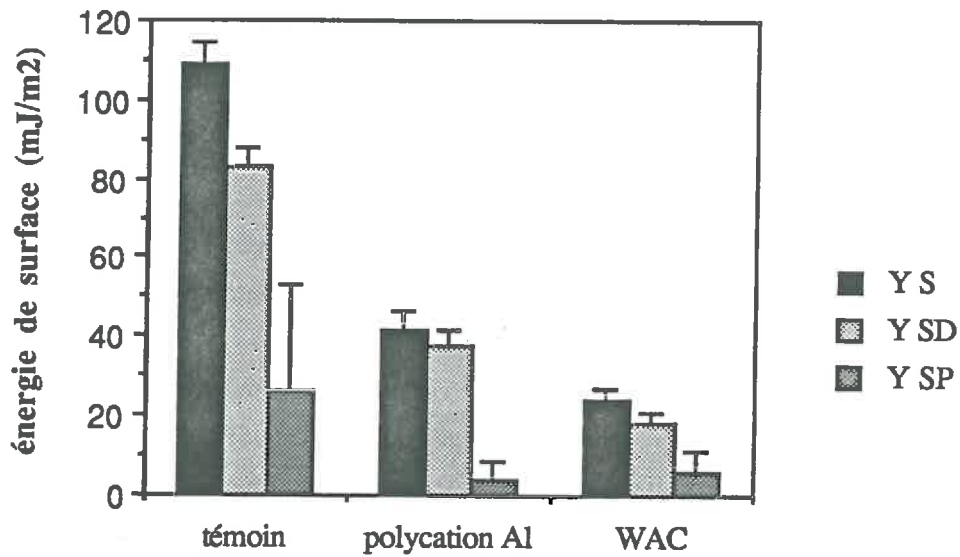


Figure III-16 : Energie de surface des associations Montmorillonite Ca - polycations d'aluminium (les barres au sommet des histogrammes représentent les écart-types)

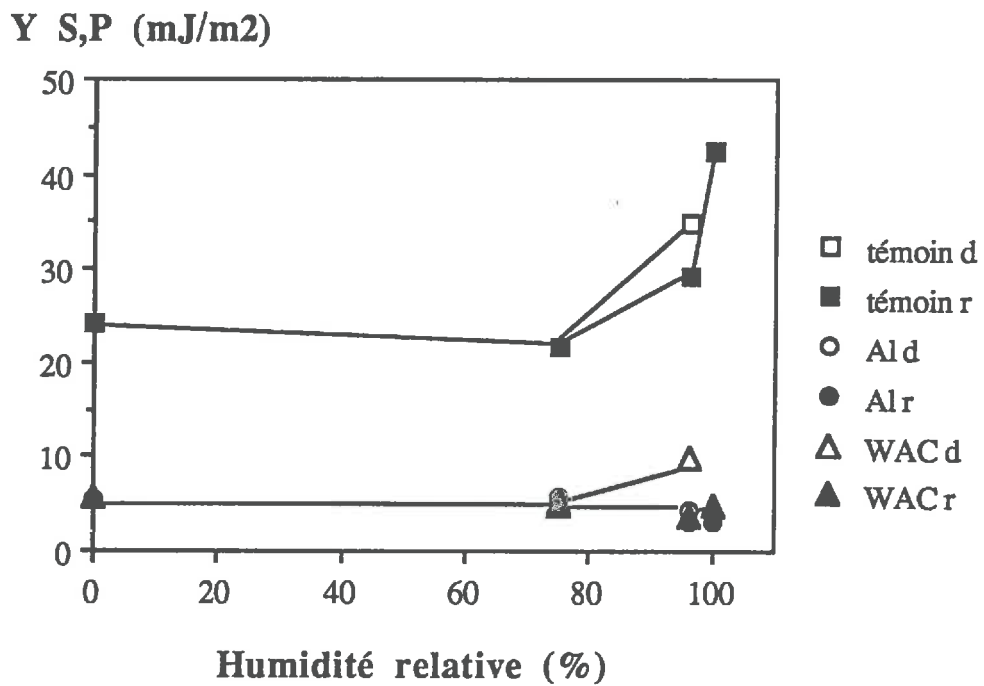


Figure III-17 : Evolution de la composante polaire de l'énergie de surface au cours de la dessiccation (d) et de la réhumectation (r)

C. Discussion

1. Rôle hydrophobe du conditionneur

Cette étude a permis de montrer que le WAC et "son constituant" le polycation d'aluminium peuvent rendre une argile hydrophobe alors qu'elle est hydrophile au départ.

Les valeurs d'énergies de surface obtenues par JOUANY et al. (1990) sur les associations sont assez proches de celles que l'on mesure sur des associations montmorillonite calcique - acides humiques (JOUANY, 1991) (27 mJ.m^{-2} avec 22 mJ.m^{-2} de composante dispersive et 5 mJ.m^{-2} de composante polaire). Elles se rapprochent aussi d'autres polymères connus pour leur hydrophobie, comme le téflon, qui a comme valeurs de l'énergie de surface 11 mJ.m^{-2} , de la composante dispersive 9 mJ.m^{-2} et de la composante polaire 2 mJ.m^{-2} .

L'énergie de surface de l'association Mte Ca-WAC est plus faible que celle de l'association Mte Ca-Al(1,5). Elle pourrait être due à un taux de recouvrement des surfaces de montmorillonite plus important ou encore à une conformation différente du polycation.

Le taux de recouvrement de l'argile par le composé est un paramètre primordial. En effet, lors d'étude de surface de montmorillonite progressivement couverte par des ions alkylammonium, JOUANY et CHASSIN (1987a) ont montré que avec un fort taux de recouvrement, la valeur de l'énergie de surface déterminée est non plus celle de la montmorillonite mais en fait celle des revêtements organiques recouvrant la surface. Dans notre cas, du fait des fortes différences obtenues entre le témoin et les échantillons traités, il est vraisemblable que la surface d'argile soit fortement recouverte et ce que l'on mesure est en réalité l'énergie de surface de revêtements d'aluminium.

2. Aptitude à la réhydratation

Au cours du cycle de desiccation-réhumectation, nous avons pu voir que l'association montmorillonite-conditionneur a, dès 96% d'humidité relative en dessiccation, une valeur très faible de la composante polaire. Tout se passe comme si dès cet état hydrique, un état hydrophobe maximal et irréversible est atteint.

3. Origine de l'hydrophobie

Une étude précédente réalisée avec des humates sur lesquels sont adsorbés des cations différents (JOUANY et CHASSIN, 1987b) a révélé la forte influence du cation adsorbé. L'humate de Ca est hydrophile, avec une énergie de surface autour de 90 mJ.m^{-2} ,

alors que l'humate de Fe est hydrophobe, avec une énergie de surface de l'ordre de 40 mJ.m^{-2} . De plus, JOUANY et al. (à paraître) ont montré la similarité de propriété hydrophobe pour des associations de montmorillonite avec du fer ou de l'aluminium, et ceci à différents niveaux de polymérisation.

Cet effet hydrophobe après dessiccation paraît donc une propriété propre des cations aluminium.

D. Conclusion

Cette étude des propriétés de surface liées à l'application du conditionneur a permis de révéler un aspect nouveau des polycations d'aluminium. Après séchage, ils rendent fortement hydrophobe la surface avec laquelle ils sont associés. Il reste cependant à étendre la gamme d'états hydriques initiaux.

En rapportant ces résultats à l'échelle d'un agrégat de sol traité avec le conditionneur, nous pouvons dire que au tout début de l'humectation, cette hydrophobicité influence certainement la vitesse d'entrée de l'eau. Cependant, l'importance de cet effet doit être modulée en particulier par le taux de recouvrement des surfaces par le conditionneur qui doit sûrement être imparfait du fait de l'hétérogénéité du matériau sol.

II. EFFET DU CONDITIONNEUR SUR LES PROPRIETES HYDRIQUES ET LA POROSITE DES AGREGATS DE SOL

Dans cette partie, nous nous proposons tout d'abord d'étudier la répartition de la taille des pores dans ces deux types d'agrégats, afin de voir une éventuelle modification due au conditionneur. Ensuite, nous allons tenter d'expliquer la différence de comportement hydrique des deux types d'agrégats, témoins et traités, différence que nous avons pu observer lors de l'étude de l'influence de l'état hydrique initial sur la désagrégation totale par éclatement.

Pour cela, nous allons étudier l'évolution des volumes d'eau, des vides et d'air au cours d'un cycle d'humectation et dessiccation, sur différents matériaux. De plus, nous évaluerons la répartition de la taille des pores des échantillons d'après ces courbes de rétention d'eau, ceci à l'humectation afin de prendre en compte les pores d'accès à l'eau lors d'une humectation.

A. Matériel et méthodes

1. Fixation des états hydriques

La fixation des états hydriques a été faite de la même façon que nous l'avons décrite pour les $pF=1, 2, 3, 4$ et 6 lors de l'étude de l'état hydrique initial au test de désagrégation totale par éclatement (p. 109). La contrainte hydrique correspondant à $pF=5$ est réalisée de la même façon qu'à $pF=6$, c'est-à-dire dans un dessiccateur contenant une solution saline saturée, établissant en fait une contrainte de $pF=5,18$.

Les potentiels hydriques sont exprimés ici en pF . Les différents modes d'expression de l'état énergétique de l'eau sont donnés dans le Tableau III-3.

TABLEAU III-3

Niveaux énergétiques, activités de l'eau et tailles maximales des pores remplis d'eau correspondants

Pression gazeuse appliquée (bar)	pF	Activité de l'eau	Taille maximale des pores remplis d'eau (μm)
0.010	1	0.999993	150
0.100	2	0.999927	15
1	3	0.99927	1.5
10	4	0.9927	0.15
15.8	4.2	0.9888	
100	5	0.927	0.015
1000	6	0.484	0.0015

En humectation, avant $pF=1$ et 2 , de façon à éviter l'éclatement par une humectation trop rapide, les échantillons ont été préalablement équilibrés à $pF=3$. En dessiccation, les échantillons sont préalablement saturés sous vide durant 48 heures puis équilibrés à des pF croissants progressivement, après équilibre à chaque point de pF .

2. Présentation des agrégats étudiés

Les échantillons étudiés sont constitués par des agrégats de sol de 3 à 4 mm préparés de la même façon que précédemment (première partie du Chapitre III). Les mesures ont été effectuées sur des lots de 1 à 2 grammes avec 5 à 6 répétitions.

Les cinq échantillons de sols ont fait l'objet de l'étude, tout d'abord LA, pour lequel les mesures ont été les plus complètes, puis LOR, I, BOI et POM, avec pour chacun, des agrégats témoins et des agrégats W250.

3. Mesures effectuées

Aux différents potentiels matriciels, nous avons mesuré la densité apparente des agrégats déterminée par la Poussée d'Archimède dans du pétrole (MONNIER et al., 1973) et la teneur en eau pondérale.

Les résultats sont exprimés en indices, ce qui permet d'obtenir le volume des différentes phases par rapport à un volume constant de solide. Pour cela, nous avons pris la valeur de la densité réelle de 2,65. Les indices d'eau, d'air et de vides sont alors définis par :

$$\text{indice d'eau : } \theta = \frac{V_w}{V_s}$$

$$\text{indice d'air : } a = \frac{V_a}{V_s} = \frac{V_v - V_w}{V_s}$$

$$\text{indice des vides : } e = \frac{V_v}{V_s}$$

avec

V_w : volume d'eau
 V_a : volume d'air
 V_v : volume des vides
 V_s : volume du solide

B. Résultats des comportements hydriques d'agrégats

1. Evolution de l'indice des vides et de l'indice d'eau dans le cas d'agrégats témoins et traités du sol LA

Au cours de l'humectation

Les variations des indices d'eau et des vides en fonction du potentiel hydrique sont présentées sur la Figure III-18 pour les agrégats témoins et traités. Sur une telle courbe, du fait du choix de l'expression des résultats en indices, on peut visualiser l'évolution du volume d'eau, situé entre la droite des abscisses et la courbe des indices d'eau, et l'évolution du volume d'air, situé entre les courbes d'indices d'eau et d'indices des vides.

* En s'intéressant tout d'abord aux variations d'indices des vides, nous pouvons noter une augmentation régulière pour les deux types d'échantillons sans qu'une différence significative apparaisse entre eux. Les indices varient de 0,5 à $pF=6$ à 0,7 à $pF=1$, traduisant un gonflement peu important des matériaux.

* En considérant maintenant les indices d'eau, trois zones différentes peuvent être distinguées selon les potentiels hydriques.

- De $pF=5$ à $pF=6$. Dans cette zone, les variations sont faibles, avec un comportement identique des échantillons.

- De $pF=4$ à $pF=3$. Les comportements des deux types d'agrégats sont ici très différents. Dans le cas des échantillons témoins, l'augmentation de la teneur en eau est faible et régulière. Dans le cas des échantillons traités, l'augmentation est beaucoup plus forte : à $pF=3$, la valeur d'indice d'eau est deux fois supérieure à celle des témoins. De plus, à $pF=4$, lors de la mesure, les échantillons présentent une hétérogénéité d'aspect dans un même lot d'agrégats traités avec le conditionneur. Environ la moitié des agrégats ont un aspect humide alors que les autres paraissent secs comme les agrégats témoins. La teneur en eau mesurée constitue donc une moyenne des teneurs en eau d'agrégats dont l'état d'hydratation est très différent. Cependant cette teneur en eau globale est répétitive selon les lots d'échantillons. Un tel fait provient probablement de la position des agrégats au contact avec la plaque, à savoir si ce contact est assuré par la face ayant directement reçu le conditionneur ou une autre face. Dans notre cas, on peut considérer que la probabilité que la partie de l'agrégat ayant directement reçu le conditionneur par pulvérisation soit en contact avec cette plaque est de l'ordre de 1/2.

- De $pF=3$ à $pF=1$. Dans cette gamme de contraintes, il se produit un croisement des deux courbes. Les échantillons témoins absorbent ici beaucoup d'eau, à la différence des échantillons traités dont l'indice d'eau varie très peu.

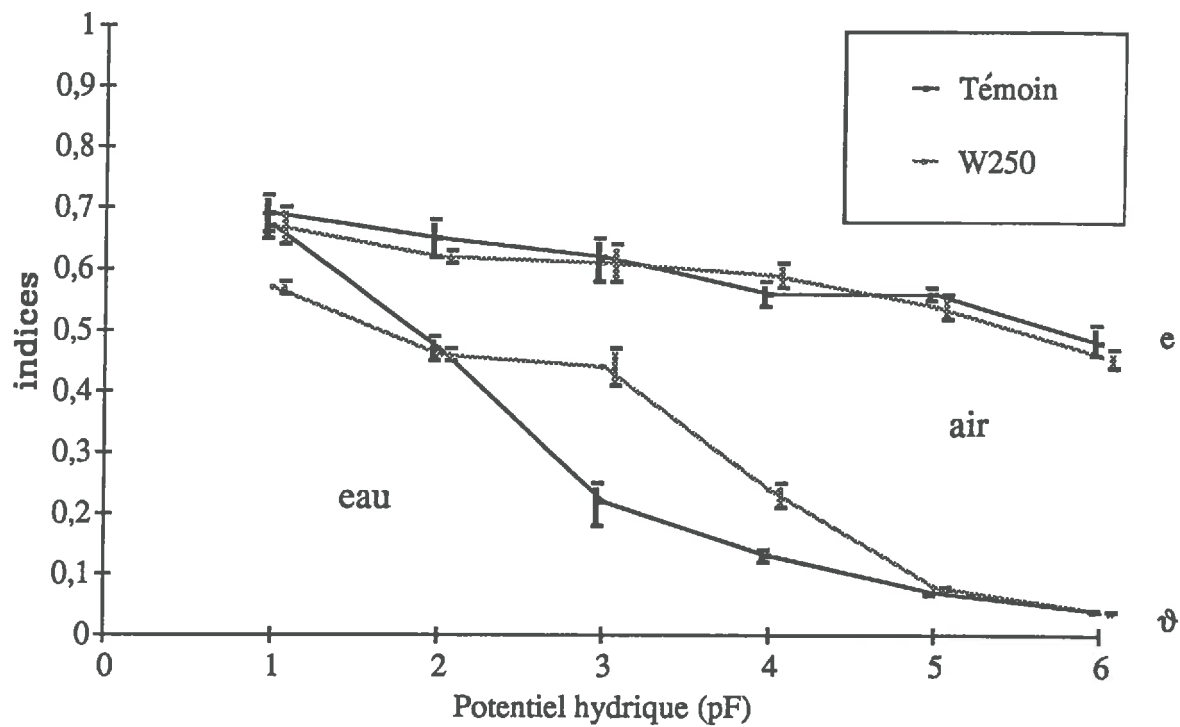


Figure III-18 : Evolution de l'indice d'eau et de l'indice des vides des agrégats témoins et traités du sol LA au cours de l'humectation

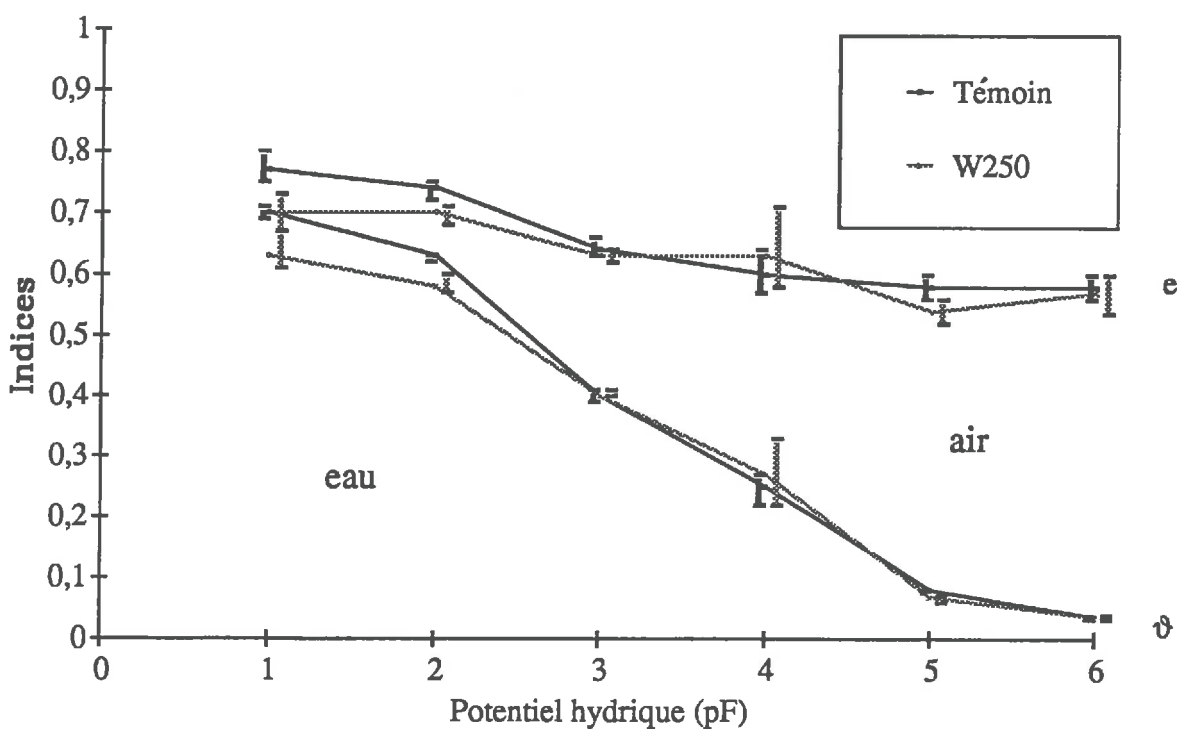


Figure III-19 : Evolution de l'indice d'eau et de l'indice des vides des agrégats témoins et traités du sol LA au cours de la dessiccation

En considérant l'évolution du volume d'air, compris entre les deux courbes, on peut observer qu'il se réduit dès $pF=3$ pour les échantillons traités, alors qu'il se réduit pour des pF plus faibles dans le cas des témoins. Cependant, à $pF=1$, les échantillons témoins sont saturés, alors que les échantillons traités ne le sont pas encore.

Au cours de la dessiccation

L'évolution des indices d'eau, d'air et de vides est représentée sur la Figure III-19. Deux zones de comportement des agrégats peuvent être dégagées.

- De $pF=1$ à $pF=2$. Dans cette gamme, les courbes apparaissent différentes selon le traitement : les échantillons témoins ont des indices supérieurs aux traités, avec un même volume d'air à ces deux points.

- De $pF=3$ à $pF=6$. Le comportement des deux types d'échantillons est identique, les deux indices décroissent progressivement.

Au cours de la dessiccation, de l'air est déjà présent dans les deux échantillons dès $pF=1$ et le volume reste identique de $pF=1$ à $pF=2$. Après $pF=2$ l'indice d'air augmente plus fortement. Le point d'entrée d'air est donc atteint dans ce cas dès $pF=1$.

Comparaison humectation - dessiccation

En comparant les courbes obtenues en humectation et celles obtenues en dessiccation des Figures III-18 et III-19, plusieurs faits apparaissent.

Les valeurs d'indice des vides sont peu différentes au cours du cycle. Elles sont seulement supérieures en dessiccation par rapport à l'humectation.

Concernant les indices d'eau, des différences d'évolution marquées par des valeurs plus faibles en humectation qu'en dessiccation traduisent des phénomènes d'hystérésis. Dans le cas des échantillons témoins, ce phénomène existe dans toute la gamme de contraintes allant de $pF=5$ à $pF=1$. Dans le cas des échantillons traités, au contraire, il se localise entre $pF=3$ et $pF=1$; pour des contraintes supérieures à $pF=3$, les courbes se chevauchent.

En conclusion nous pouvons dire que les échantillons témoins sont différents des échantillons traités seulement en humectation. Il se produit alors un "retard d'absorption d'eau" lors de la réduction de la contrainte des échantillons témoins par rapport aux échantillons traités.

2. Evolution de l'indice des vides et de l'indice d'eau d'agrégats témoins et traités de différents sols

Les évolutions des indices au cours du même cycle d'humectation-dessiccation pour les échantillons des quatre autres types de sol sont représentées sur les Figures III-20 (LOR), III-21 (I) III-22 (BOI) et III-23 (POM).

On peut remarquer tout d'abord que l'allure générale des courbes est la même que celle relevée dans le cas du sol LA. Cependant, des différences plus ou moins accentuées existent.

Dans le cas du sol sableux, LOR, les variations d'indice des vides sont plus faibles que pour LA. En humectation, on peut observer une légère diminution de l'indice des vides à $pF=5$, exprimant une rétraction des agrégats. La différence d'évolution de l'indice d'eau au cours de l'humectation entre les témoins et les traités se fait sur une gamme de potentiel plus large ; l'indice d'eau des échantillons traités est supérieur à ceux des témoins du $pF=4$ au $pF=2$.

Les échantillons du sol I, plus limoneux que LA, présentent un comportement hydrique identique au sol LA.

Dans le cas du sol BOI, plus riche en argile que LA, l'augmentation de l'indice des vides au cours de l'humectation est moindre sur les échantillons traités que sur les témoins. En ce qui concerne l'évolution de l'indice d'eau, elle est la même que pour le sol LA, avec toutefois une moindre différence des indices d'eau à l'humectation.

Le comportement des échantillons du sol calcaire, POM, est différent des autres. La différence d'évolution des indices d'eau entre échantillons traités et témoins au cours de l'humectation est réduite. Cela semble lié au comportement du témoin qui, à la différence des autres sols, présente une forte absorption d'eau entre $pF=4$ et $pF=3$. D'autre part le phénomène d'hystérèse est ici plus réduit.

Ainsi, il apparaît que plus le sol est argileux et plus l'effet du conditionneur sur les propriétés d'hydratation est réduit, à l'exception du sol calcaire qui a un comportement particulier.

3. Action du conditionneur sur la géométrie de l'espace poral

Au cours de l'humectation, des différences d'indice d'eau ont pu être relevées entre les échantillons témoins et les échantillons traités. Dans cette partie, nous allons étudier la répartition de la taille des pores responsables de l'humectation sur les échantillons témoins et traités du sol LA. Avant de présenter les résultats, nous allons exposer le principe de l'obtention de la distribution de la taille des pores.

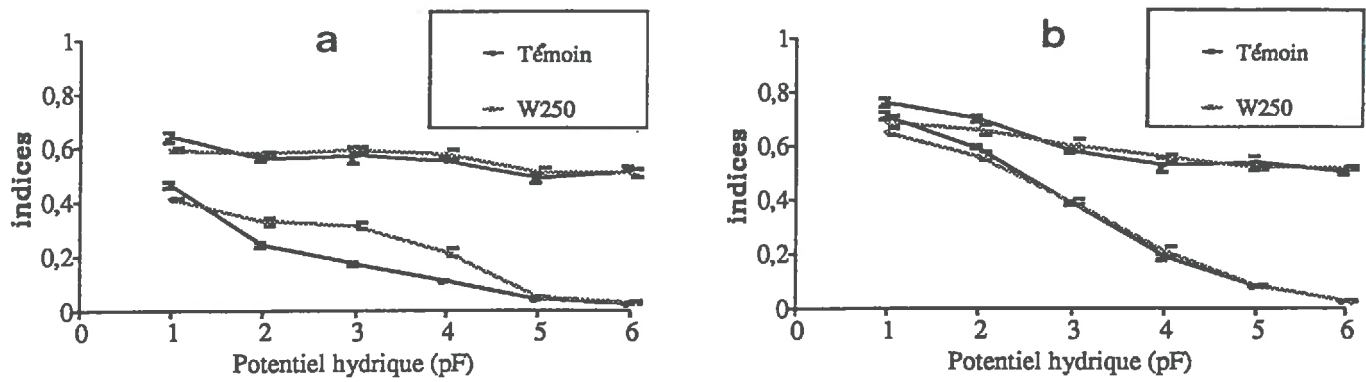


Figure III-20 : Evolution de l'indice d'eau et de l'indice des vides des agrégats témoins et traités du sol LOR au cours de l'humectation (a) et de la dessiccation (b)

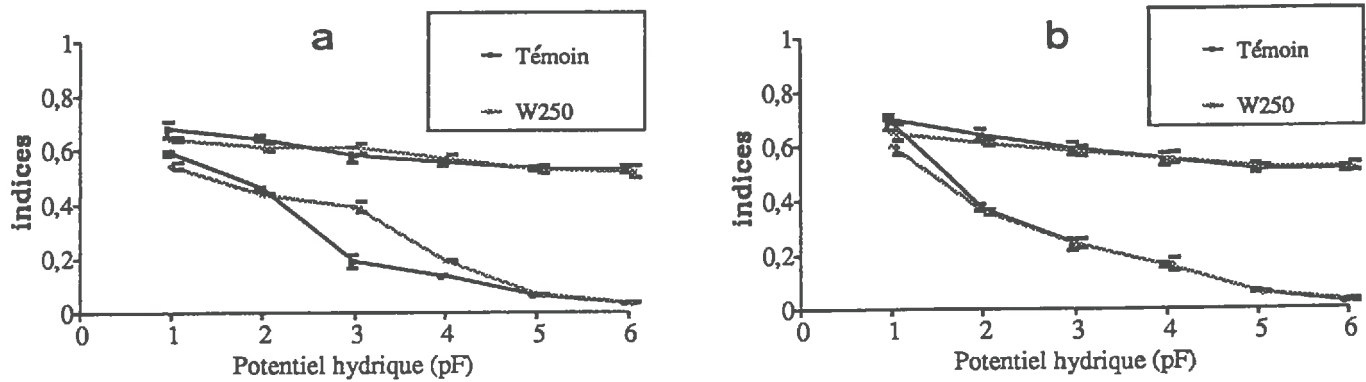


Figure III-21 : Evolution de l'indice d'eau et de l'indice des vides des agrégats témoins et traités du sol I au cours de l'humectation (a) et de la dessiccation (b)

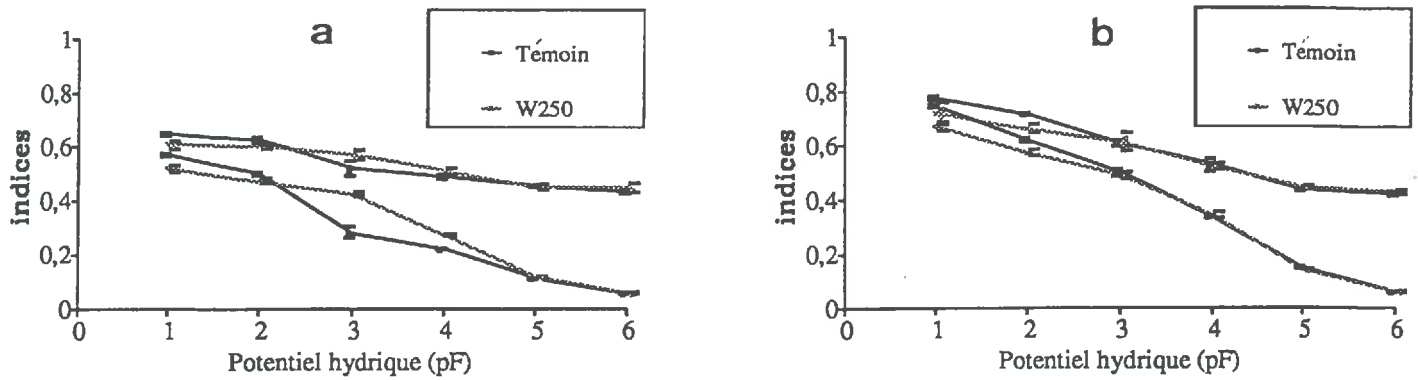


Figure III-22 : Evolution de l'indice d'eau et de l'indice des vides des agrégats témoins et traités du sol BOI au cours de l'humectation (a) et de la dessiccation (b)

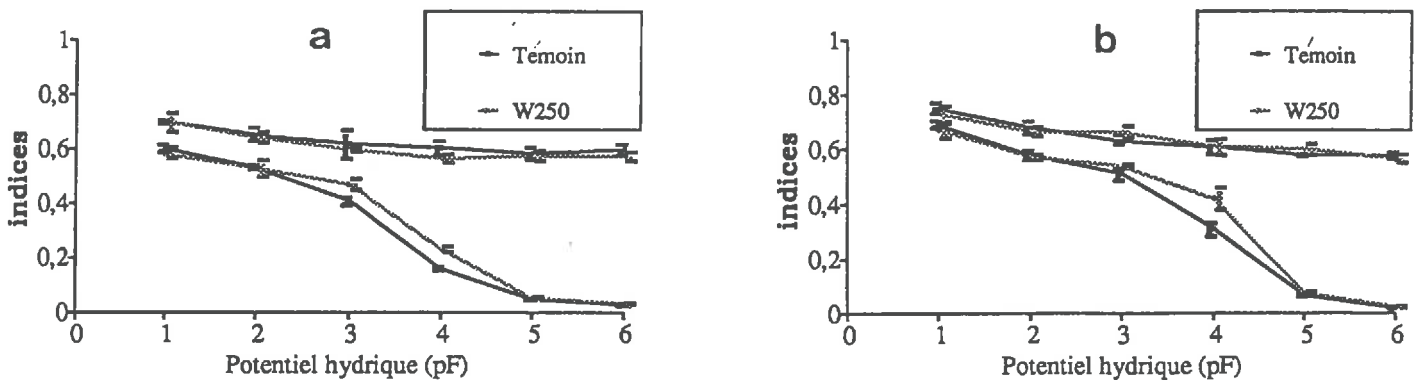


Figure III-23 : Evolution de l'indice d'eau et de l'indice des vides des agrégats témoins et traités du sol POM au cours de l'humectation (a) et de la dessiccation (b)

31. Obtention de la distribution de la taille des pores à partir de la courbe d'évolution de l'indice d'eau à l'humectation

La loi de LAPLACE permet de fixer, en fonction de la pression pneumatique appliquée, le rayon de courbure des ménisques à l'interface solide-liquide-gaz. Il est ainsi possible d'établir une relation entre la pression pneumatique appliquée et la taille maximale des pores remplis d'eau d'après l'équation de LAPLACE-JURIN :

$$P = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos\theta}{R}$$

avec

P : la pression pneumatique appliquée
 γ : la tension superficielle de l'eau
 θ : l'angle de raccordement sol-eau
 R : le rayon maximal des pores remplis d'eau

Cependant, le remplissage et la vidange de l'espace poral dépendent de la continuité de la taille des pores. Ainsi l'interprétation doit-elle être faite avec précaution.

On peut ainsi représenter la courbe dérivée de l'évolution de l'indice d'eau en fonction du potentiel de l'eau ce qui nous donne la répartition des rayons de constriction des pores d'accès de l'eau. L'interprétation de cette courbe est facilitée si deux conditions sont réunies : la mouillabilité parfaite des échantillons et leur rigidité. Nous allons maintenant voir ce qu'il en est pour ces échantillons.

Mouillabilité de échantillons

Nous avons montré précédemment que les argiles recouvertes de conditionneur étaient hydrophobes. Or dans les études de rétention d'eau, l'hydratation des échantillons traités, notamment à pF=3, était supérieure. Nous pouvons donc en conclure que le caractère hydrophobe de la périphérie des agrégats ne modifie pas les propriétés de rétention en eau des échantillons dans leur masse, à l'équilibre ; il intervient seulement en terme de cinétique.

Rigidité des échantillons

Au cours du cycle d'humectation et dessiccation, nous avons pu voir que les variations de l'indice des vides étaient très faibles, ce qui établit la rigidité des échantillons témoins comme des échantillons traités.

Ainsi, les deux conditions sont donc réunies, ce qui permet d'interpréter la courbe de rétention d'eau en terme de taille de constriction.

32. Résultats

Dans le cas du sol LA, l'histogramme de la Figure III-24 révèle nettement des différences de répartition des pores d'accès. Dans le cas des échantillons témoins, les grands pores au dessus de $1,5 \mu\text{m}$ de rayon d'accès sont les plus importants. A l'inverse, la plupart des pores d'accès de l'eau dans le cas des échantillons traités sont plus étroits, dans les classes de $0,015$ à $1,5 \mu\text{m}$.

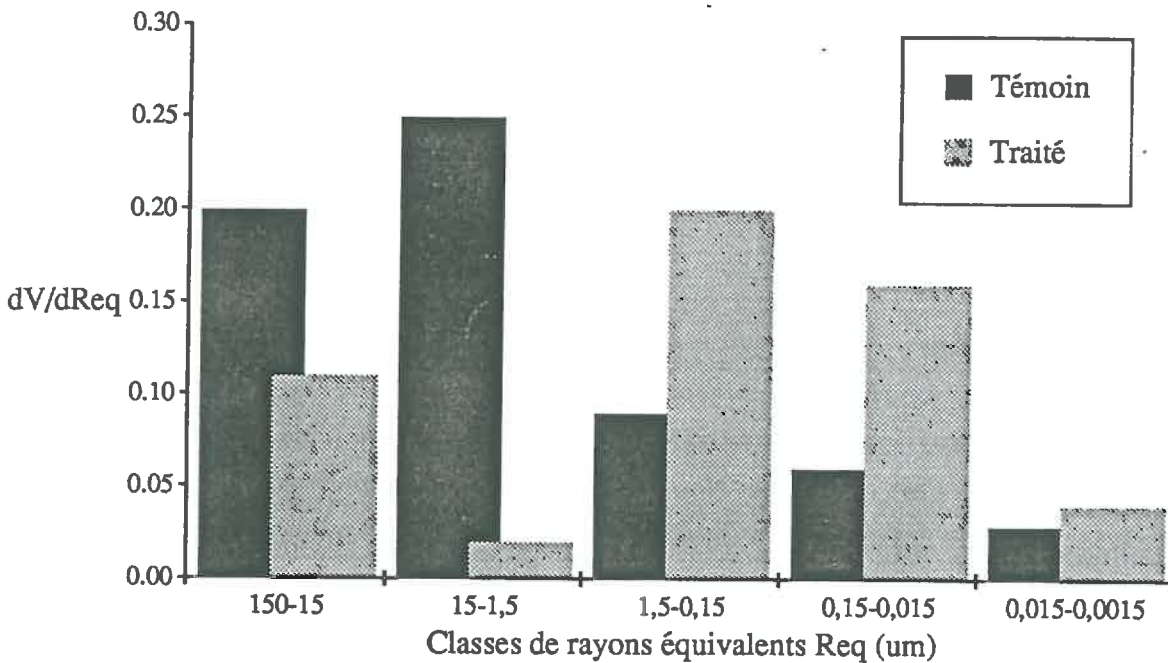


Figure III-24 : Contribution des différents pores au volume poral pour les agrégats témoins et traités du sol LA

C. Discussion

1. Origine de l'action du conditionneur sur la modification de la géométrie de l'espace poral

Les courbes d'évolution de l'indice d'eau et d'une façon plus claire les histogrammes de répartition des tailles maximales de pores remplis d'eau font apparaître sur les agrégats traités avec le conditionneur une modification de la répartition de la taille de ces pores lors de l'humectation. Tout se passe comme si en présence du conditionneur, des pores d'une taille de 1,5 à 15 μm sont transformés en pores plus petits de 0,015 à 1,5 μm . Ces derniers pores sont caractéristiques de l'assemblage des particules argileuses elles-mêmes ou avec les autres colloïdes (matières organiques).

Différentes causes pourraient être responsables du déplacement du spectre poral. Nous allons tenter de déterminer quelle serait la plus probable dans notre cas.

- Une première cause serait une hydrophobie supérieure des agrégats témoins par rapport aux agrégats traités, les parois des pores de 0,015 à 1,5 μm se mouillant très peu sur les échantillons témoins. Cependant, d'après ce que nous avons vu antérieurement, nous devons éliminer cette hypothèse.

- Le conditionneur enrobant les agrégats pourrait former une sorte de filet créant un réseau de petits pores à la surface des agrégats, ce qui faciliterait l'entrée de l'eau aux fortes contraintes hydriques. Cependant cette mince couche ne permettrait pas d'expliquer la forte rétention d'eau à $pF=3$ en humectation.

- Le conditionneur pourrait provoquer lors de son application, en phase très humide ou bien lors de la dessiccation après pulvérisation, une modification de l'arrangement d'une partie du volume des agrégats, c'est-à-dire la fraction ayant directement reçu le conditionneur. Cette hypothèse serait le plus en accord avec les observations précédemment faites à savoir en particulier la présence de "calottes" en périphérie des agrégats. Les plus grands pores auraient pu être resserrés ou partiellement colmatés par l'action agrégeante ou le dépôt par précipitation du conditionneur. A leur place se seraient créés des pores de plus petite dimension. Mais cette hypothèse reste à vérifier, notamment par des études morphologiques à fort grossissement des agrégats de sol ou encore d'agrégats d'argile pure afin d'avoir un matériau plus homogène, ce que nous n'avons pas pu réaliser dans le cadre de ce mémoire.

Enfin, l'absence de différence de comportement à la dessiccation des deux types d'agrégats pourrait alors être expliquée par le fait suivant. Comme la zone ayant directement reçu le conditionneur (la "calotte") ne couvre que la moitié environ de la périphérie des agrégats, l'eau peut alors se vidanger par les pores de l'autre moitié qui sont

identiques aux agrégats témoins.

2. Conséquence sur la stabilité structurale

CONCARET (1967) a montré la relation entre la vitesse d'humectation et la stabilité des agrégats à l'éclatement. Plus la taille des pores est importante, plus la vitesse d'humectation est grande et plus l'éclatement est important. Les résultats de nos expériences tendent ainsi à montrer qu'un des modes d'action du conditionneur sur la stabilité structurale réside dans la réduction de la taille des pores d'accès pour l'humectation, ce qui aboutit à ralentir la vitesse d'entrée de l'eau et donc à accroître la stabilité.

Une des confirmations de ce phénomène peut être apportée par le comportement du sol calcaire qui présente une porosité d'accès à l'humectation qui est fine, avec une abondance de pores de rayon d'accès dans la classe de 0,15 à 1,5 μm . En effet, rappelons que ce sol s'est montré particulièrement résistant à l'éclatement modéré créé lors du test de microfissuration. Cependant cette remarque doit être modulée par le fait que le sol calcaire révèle aussi une cohésion élevée d'après le test de désagrégation mécanique, qui peut participer aussi à cette stabilité.

De plus, l'augmentation des pores pour lesquels le rayon de courbure est très petit permet d'augmenter fortement la cohésion interparticulaire par les forces capillaires (AZZAOU, 1988).

D'autre part, on peut maintenant établir la relation avec les résultats précédemment obtenus sur un domaine de stabilité plus grand selon le potentiel initial des agrégats traités. A $pF=4$ et 3, le volume d'air dans les agrégats traités est plus faible que dans les agrégats témoins.

3. Hystérèse des comportements

Différentes explications peuvent être attribuées au phénomène d'hystérésis. Il peut d'abord être dû au caractère hydrophobe de la surface modifiant l'angle de contact et donc la taille des pores réellement remplis d'eau. La rétention de l'eau lors de l'humectation diminue alors. Une autre explication peut être une possibilité de piégeage d'air, par une vitesse d'humectation très rapide ou par une forte tortuosité de la porosité. Il peut aussi être dû à une forte discontinuité de la taille des pores créant ce que l'on appelle le phénomène de bouteille d'encre.

Nous avons vu que dans notre cas, un phénomène d'hystérésis se produisait sur nos échantillons de sol, à l'exception du sol calcaire, dans différentes gammes de potentiels hydriques. Sur les échantillons témoins, il se produit de $pF=5$ à au moins $pF=1$ et sur les

échantillons traités, seulement de $pF=3$ à au moins $pF=1$.

Dans la gamme de $pF=3$ à $pF=1$, l'hypothèse la plus évidente est que l'on aurait de l'air piégé dans les gros pores du fait de l'humectation, et ceci pour les deux types d'échantillons, témoins et traités. En effet, dans les sols limoneux, une porosité de type lacunaire est très présente avec ainsi de gros pores connectés par de plus fins (FIES and BRUAND, 1990). Ceci se révèle en fait de $pF=2$ à $pF=1$. On voit alors des valeurs d'indice d'eau supérieures en dessiccation par rapport à l'humectation. Rappelons que la dessiccation se fait au départ avec des agrégats saturés sous vide ; il n'y a donc pas de possibilité de piégeage d'air dans cette phase du cycle.

Dans la gamme de $pF=5$ à $pF=3$, là où se manifeste en fait l'action du conditionneur, l'hystérésis, qui est présent seulement dans le cas des échantillons témoins et absent sur les échantillons traités, pourrait être expliquée par un moins bon accès des pores responsables de la rétention d'eau dans cette gamme à l'humectation. En effet, ces pores existent visiblement d'après la courbe obtenue en dessiccation. Cependant, l'absence d'hystérèse importante dans cette gamme dans le cas des agrégats traités, impliquerait que les pores en question soient tous continus, ce qui paraît difficile à expliquer avec notre système d'étude. Dans le cadre de cette étude, nous ne pouvons ainsi pas apporter d'explication satisfaisante concernant cette absence d'hystérèse.

D. Conclusion

Par cette étude, nous avons pu voir que le conditionneur provoque une modification de la porosité des agrégats traités, principalement la porosité responsable de l'humectation, en réduisant la taille des pores. Ceci implique que le conditionneur permet d'augmenter la résistance des matériaux à l'éclatement, en ralentissant l'entrée de l'eau.

Cependant pour pouvoir trouver l'origine de cette modification, des études complémentaires seraient à effectuer, comme des études morphologiques et de propriétés hydriques sur des matériaux argileux purs puisque c'est en effet la porosité entre ces argiles qui est mise en cause.

CHAPITRE IV
SYNTHESE ET DISCUSSION GENERALE

Introduction

Au cours des expériences sur le terrain puis au laboratoire, nous avons pu dégager progressivement les différents éléments intervenant dans le mode d'action du conditionneur sur l'évolution des surfaces de sols limoneux soumises aux pluies.

Nous allons donc tout d'abord synthétiser tous ces éléments concernant la stabilité structurale, en partant d'un modèle d'agrégats de sol traités par le conditionneur. Puis nous interpréterons, à partir de ces éléments, le comportement de surfaces de sol traitées d'une part sous une pluie et d'autre part au cours de différentes histoires hydriques typiques telles que nous avons pu les observer sur le terrain.

Nous ferons ensuite le bilan des intérêts et limites d'utilisation du conditionneur, en envisageant par ailleurs les autres conséquences de son application. Puis nous évaluerons la contribution de notre travail dans les études de conditionneurs de sol. Enfin une comparaison sera effectuée entre notre système d'étude et les modèles d'organisation d'agrégats de sol naturellement stabilisés par l'aluminium ou le fer.

I. ROLE DU CONDITIONNEUR SUR LA STABILISATION DE SURFACES DE SOL SOUS L'ACTION DES PLUIES

A. Mode d'action du conditionneur sur la stabilité structurale des agrégats de sols limoneux

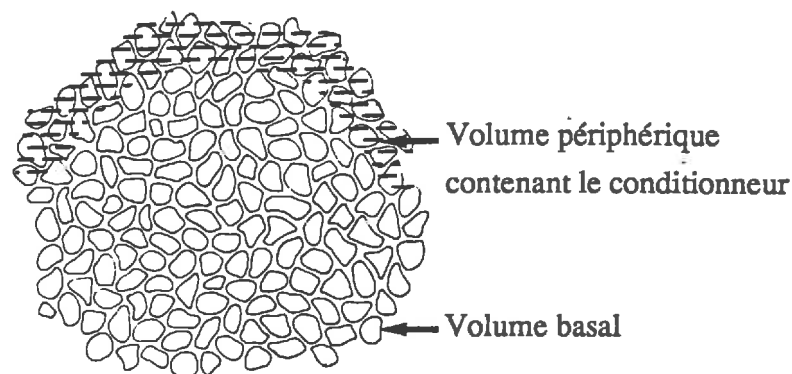
1. Particularité du système initial

Différents éléments relevés lors de cette étude ont permis d'interpréter la localisation du conditionneur sur les agrégats ou la surface de sol traitée.

Tout d'abord sur le terrain, nous avons pu nous rendre compte de l'importance d'un bouleversement de l'état de surface provoqué par la microfissuration, sur une inefficacité du conditionneur. Ensuite, au laboratoire, lors des tests de désagrégation totale par éclatement, nous avons pu relever que les fractions les plus grossières obtenues à l'issue de ce test ont une morphologie en "calottes", traduisant une certaine forme de recouvrement du conditionneur sur les agrégats. De plus, lors de l'étude du comportement hydrique des

agrégats à différents potentiels, nous avons pu voir que les pores d'accès à l'humectation, c'est-à-dire ceux de la périphérie, étaient modifiés.

Ainsi nous pouvons arriver au schéma suivant représentant un agrégat de l'ordre de grandeur de ceux utilisés dans les tests de stabilité au laboratoire. Cet agrégat comprend deux volumes principaux qui sont d'une part la partie supérieure ayant directement reçu le conditionneur lors de sa pulvérisation (appelée volume périphérique), et d'autre part le reste de l'agrégat (appelé volume basal), n'ayant pas été en contact direct avec le conditionneur.



Lors d'études antérieures sur le PVA, WILLIAMS et al. (1966, 1967a et 1967b, 1968) ont tenté de même d'évaluer la profondeur de pénétration et la localisation de ce polymère organique neutre sur les agrégats de sol traités. Pour cette molécule ils aboutissent à une localisation le long des parois des pores séparant les domaines et les microagrégats (définis par AYLMORE et QUIRK, 1962), sans pénétrer dans les espaces intradomaines d'argiles. Ils parlent ainsi de "peripheral pore occupation".

Ces observations se rapprochent ainsi des nôtres à savoir une localisation du conditionneur dans les pores de surface. Cependant, du fait du caractère très cationique de notre conditionneur, sa pénétration doit être plus réduite encore que le PVA, neutre, bien que la pénétration de ce dernier puisse être dans certains cas limitée principalement du fait de l'encombrement stérique dans ces pores pouvant exister lors de son application, ou d'une faible humidité de l'agrégat empêchant la mobilité du polymère.

Il resterait cependant des expériences à réaliser pour préciser la pénétration et

la localisation du conditionneur dans les agrégats, nous n'avons obtenu qu'un ordre de grandeur.

2. L'augmentation de la stabilité structurale

Ainsi que nous l'avons vu au cours de cette étude, le conditionneur permet d'augmenter la stabilité structurale en agissant sur plusieurs caractéristiques des agrégats.

Le premier effet est **une augmentation de l'hydrophobicité** des surfaces couvertes par le conditionneur et initialement sèches.

Le second effet est **une réduction de la taille des pores** de la zone avec laquelle il est directement en contact.

Ces deux effets permettent ainsi d'augmenter les possibilités d'échappement de l'air lors de l'humectation des agrégats et donc de réduire les forces de compression de l'air interne piégé.

Le troisième effet est **l'augmentation de la cohésion** du matériau, c'est-à-dire sa résistance mécanique.

Cependant, ces effets concernent seulement le volume périphérique, c'est-à-dire la surface de l'agrégat qui a reçu le conditionneur lors de sa pulvérisation. Aussi, l'importance de l'effet stabilisateur que le conditionneur peut avoir sur les agrégats est liée au fait que ce volume périphérique soit directement au contact de l'arrivée de l'eau.

A la lumière de ces résultats obtenus sur les mécanismes de désagrégation, nous allons maintenant tenter d'interpréter le rôle du conditionneur sur l'évolution de surfaces de sol sous l'action de la pluie. Nous allons tout d'abord nous placer dans les conditions qui ont été celles des études réalisées sous une pluie simulée. Nous considérerons ensuite les deux histoires hydriques que nous avons rencontrées sur le terrain. Nous chercherons alors à expliquer l'efficacité ou non du conditionneur dans chacun des cas.

B. Effet du conditionneur sur une surface de sol soumis à une pluie simulée

Rappelons les conditions initiales. Un massif d'agrégats de sol dont la surface a été pulvérisée avec le conditionneur puis séchée à l'air est soumis à une pluie d'intensité constante. L'échantillon traité est donc constitué d'un empilement d'agrégats dont seulement la

couche supérieure est formée d'agrégats se présentant comme ceux précédemment décrits, à savoir constitués de deux volumes, l'un périphérique en forme de calotte orientée vers la partie supérieure et l'autre basal.

1. Mécanismes de désagrégation mis en jeu

Ces conditions permettent, ainsi que l'a montré LE BISSONNAIS (1989), l'expression des deux mécanismes précédemment étudiés à savoir la désagrégation par l'éclatement dû au piégeage d'air, liée ainsi à une énergie d'humectation, et la désagrégation mécanique par l'impact des gouttes de pluie. Au cours de la pluie, ces deux mécanismes sont successivement prédominants. Le premier se produit au cours de l'humectation et le second lorsque l'agrégat est saturé.

2. Premier domaine : désagrégation par éclatement

Au début de la pluie, la partie supérieure des agrégats, directement au contact de l'arrivée d'eau, permet de ralentir l'entrée de l'eau et donc d'augmenter les possibilités d'échappement de l'air, du fait de ses propriétés particulières dues au conditionneur. Cela produit une réduction des forces de compression de l'air interne.

Cette partie en "calotte" constitue en fait un filtre ou encore un effet tampon vis-à-vis d'une arrivée d'eau brutale.

Ainsi, dans une certaine gamme d'intensités de pluie, le conditionneur permet de réduire les contraintes de pression interne dans les agrégats traités.

De plus, le conditionneur permet aussi d'augmenter la résistance de la périphérie des agrégats. Il est sûr dans ce cas d'humectation, que cet effet permet d'amplifier la résistance des agrégats.

Cependant, sachant bien que le conditionneur agit à la fois sur la cinétique d'humectation et sur la cohésion, nous ne pouvons pas conclure à une prédominance d'une action par rapport à l'autre dans le phénomène d'éclatement.

Lors d'une pluie simulée d'intensité de 20 mm/h, nous avons pu voir qu'une fissuration se produisait sur l'échantillon traité, de façon moins accentuée que sur l'échantillon témoin. Dans ce cas, les agrégats de la surface traitée subissent tout de même une mobilisation de fragments qui, même en étant moins intense que sur la surface témoin, favorise le détachement de ces fragments et fait apparaître en surface de nouveaux volumes basaux non conditionnés.

3. Second domaine : désagrégation mécanique sans éclatement

Après saturation en eau des agrégats, le phénomène d'éclatement n'a plus lieu d'exister. Aussi intervient alors de façon prédominante la désagrégation mécanique par l'énergie d'impact des gouttes de pluie.

Dans ce cas, d'après tout ce qui précède, l'évolution de la surface traitée avec le conditionneur dépend de deux principaux éléments. D'une part, elle dépend de l'état de perturbation de la surface créé par l'éclatement, à savoir si les volumes périphériques ("calottes") sont toujours en position supérieure au contact de la pluie ou non. D'autre part, elle dépend de l'énergie cinétique de la pluie qui, si elle est très importante, peut déplacer les agrégats et donc perturber l'état de surface.

On peut tout de même faire remarquer ici que l'effet de rejaillissement causé par les gouttes de pluie paraît primordial pour annihiler l'effet du conditionneur. De ce fait, il apparaît que lors de cette phase, le rôle du conditionneur ne peut s'exprimer et donc que l'effet stabilisateur est très réduit.

C. Effet du conditionneur sur l'évolution de la surface d'un sol limoneux sous l'action des pluies dans le cas de trois séquences d'histoire hydrique

Nous allons partir ici de trois types d'histoire hydrique que nous avons rencontrés à savoir une histoire de type alterné et une histoire de type humide au printemps, et une histoire de type humide d'automne-hiver. Ces séquences de pluies favorisent certains mécanismes modélisés par LE BISSONNAIS (1988).

1. Histoire hydrique alternée

Rappelons que ce type d'histoire hydrique tel que nous l'avons précédemment défini est caractérisé par une période de dessiccation de la surface du sol interrompue par de faibles pluies.

11. Mécanismes de désagrégation mis en jeu

Nous avons vu que la dégradation de la surface du sol était marquée, selon la nature des sols et la durée de cette histoire hydrique, par l'apparition d'agrégats néoformés en quantité abondante, traduisant une microfissuration des mottes. Ces observations concordent avec les hypothèses émises par LE BISSONNAIS (1988) telles que de faibles pluies se produisant sur un sol sec favorisent une microfissuration par éclatement modéré.

12. Effet du conditionneur

Dans ce cas, aucun effet du conditionneur n'a pu être relevé à l'exception de grosses mottes d'aspect plus anguleux sur les placettes traitées. Une fissuration s'est donc produite de la même façon sur les surfaces témoins et traitées avec, à l'origine, de faibles pluies, de l'ordre de 1 à 2 mm.

Un autre élément important venant compléter cette hypothèse est que ces histoires hydriques comportent plusieurs cycles à savoir plusieurs petites pluies interrompant les périodes de dessiccation. On peut donc concevoir que ces effets de fissuration sont cumulatifs au cours de ces différentes pluies. De plus il faut ajouter ici le phénomène de rejaillissement, nécessaire pour expliquer cette hypothèse en déplaçant les fragments mobilisés par cette fissuration, mais qui peut aussi être responsable du déplacement en l'état de fins agrégats contribuant aussi à perturber l'état de surface.

Aussi, lorsque les pluies plus importantes se produisent ultérieurement, l'état de surface est alors constitué de petits fragments plus facilement mobilisables et transportables. Ce phénomène se produit alors sur les deux surfaces, témoin et traitée, sans effet sur cette dernière du fait de la perturbation de la surface, entraînant une répartition aléatoire des volumes périphériques ("calottes") en surface.

2. Histoire hydrique humide

Dans une telle séquence, les pluies sont importantes peu de temps après le semis.

21. Mécanismes mis en jeu

Le principal mécanisme de désagrégation mis en jeu au départ est l'éclatement, se produisant d'une façon plus brutale en cas d'intensité élevée de la pluie. Lorsque les pluies durent longtemps, la désagrégation sans éclatement peut alors intervenir, par destruction mécanique par l'effet d'impact des gouttes.

22. Effet du conditionneur

Dans ce cas, la surface traitée avec le conditionneur se dégrade plus lentement que la surface témoin. On peut alors supposer que le conditionneur peut jouer son rôle d'effet tampon en réduisant le gradient d'entrée de l'eau dans les agrégats de surface. L'expression de la dégradation est, dans ce cas de surface traitée, une microfissuration alors qu'elle serait plus proche d'une désagrégation totale sur la surface témoin.

Cependant cet effet du conditionneur ne constitue qu'un retard de la

dégradation de la surface car cette microfissuration alliée à l'effet de rejaillissement des gouttes de pluie finit par perturber l'état de surface.

3. Cas particulier de l'histoire hydrique très humide d'automne

Dans ce cas correspondant à l'histoire hydrique du site LA88, la surface du sol est restée quasiment toujours très humide avec une humidité pondérale de 15 % juste après le travail du sol.

31. Mécanismes mis en jeu

Deux cas doivent alors être considérés. Ou bien le mécanisme d'éclatement peut se produire car même à 15 % d'humidité la surface n'est pas saturée d'eau, ou bien il n'intervient pas. L'autre mécanisme intervenant alors est la désagrégation mécanique alliée à une déformation des mottes de surface, comme nous avons pu le voir lors des observations de lames minces en coupe.

32. Effet du conditionneur

*** Hypothèse où l'éclatement intervient**

Dans ce cas, du fait de l'effet filtre des surfaces conditionnées, la surface témoin est sujette à une désagrégation supérieure. Avec cette mobilisation de fragments, le tassement par les gouttes de pluie peut alors entraîner une déformation plus facilement. Sur la surface traitée nous n'avons pu constater qu'une faible fissuration sans mobilisation de particules ; dans ces conditions l'effet de filtre aurait pleinement rempli ce rôle. Rappelons ici que l'état granulométrique de ces surfaces est grossier. Très peu d'éléments sont directement mobilisables et transportables par effet de rejaillissement. Si l'éclatement a été très faible sur la surface traitée, alors peu de zones de faiblesse ont été dégagées, et la déformation par tassement s'exprime peu.

Un élément permettant de confirmer cette hypothèse est que des agrégats préalablement saturés sous vide et soumis à une pluie simulée se déforment très peu (LE BISSONNAIS et al., 1989). Il est nécessaire d'avoir une désagrégation préalable pour favoriser une déformation.

*** Hypothèse où l'éclatement n'intervient pas**

Nous venons de voir que cette hypothèse était peu probable. Cependant, une déformation existante sur la surface témoin et absente sur la surface traitée pourrait alors être due à un effet du conditionneur modifiant les propriétés de plasticité du matériau, en retardant

les domaines hydriques d'entrée en plasticité puis en liquidité. Cet effet resterait alors à démontrer.

D. Conclusion

D'après cette synthèse des résultats obtenus sur le terrain et au laboratoire, deux principaux faits peuvent être dégagés.

D'une part, la perturbation de l'état de surface, par microfissuration et/ou par rejaillissement, est une cause de non révélation de l'effet stabilisateur du conditionneur.

D'autre part, apparaît ici l'importance de bien définir contre quel phénomène on veut lutter avec le conditionneur. Dans certains cas, on cherche à protéger la surface de l'effet destructeur d'une seule pluie alors que dans d'autres cas on cherche à la protéger le plus longtemps possible. Les mécanismes de désagrégation (en l'occurrence dans notre étude nous avons surtout été en présence du mécanisme d'éclatement), peuvent avoir des répercussions différentes sur la dégradation générale de la surface s'ils sont ponctuels ou au contraire répétitifs avec ainsi des effets additifs.

Cette remarque permet d'insister sur le fait que les tests de stabilité sont en général incomplets pour pouvoir prédire la résistance de certains matériaux au cours de cycles hydriques naturels et qu'il est tout à fait nécessaire de tenir compte des séquences et de définir la nature des événements pluvieux en cause.

II. CONSEQUENCES AGRONOMIQUES DE L'UTILISATION DU CONDITIONNEUR

Dans cette partie, nous allons synthétiser d'une part les intérêts et limites du conditionneur contre la dégradation de la surface du sol sous l'action des pluies. Nous envisagerons ensuite les conséquences physico-chimiques (Capacité d'Echange Cationique et pH) et les risques phytotoxiques à son application.

A. Intérêts et limites du conditionneur

1. Les intérêts du conditionneur

Nous avons pu voir au cours des essais de terrain que le conditionneur permettait dans les meilleurs cas de retarder l'apparition de la croûte sédimentaire de 10 à 20

jours ou encore en terme de pluies cumulées de 20 à 60 mm. De plus, parmi ces cas en particulier ceux localisés au printemps, la dégradation se produisait rapidement après le semis. On peut donc supposer que le conditionneur aurait pu avoir un effet bénéfique de **protection de la levée des cultures**.

De plus, si l'on considère le problème de l'**érosion hydrique** par ruissellement, on peut aisément supposer que le conditionneur peut retarder son apparition en ralentissant le colmatage des pores de la surface du sol et la chute de l'infiltrabilité. Dans le cas de l'érosion hydrique par ruissellement concentré, comme l'ont observé MONNIER et al. (1986), il peut ainsi diminuer le volume d'eau en excès qui sera responsable du ruissellement et du départ de terre.

2. Les limites de son efficacité

Nous avons pu déjà relever les limites de l'efficacité du conditionneur due à sa localisation en périphérie des mottes. C'est principalement une **perturbation de l'état de surface** par microfissuration due à une histoire hydrique de type alternée ne permettant d'exprimer l'effet stabilisateur du conditionneur.

De plus nous pouvons concevoir que dans le cas d'un état initial très fin au départ, avec très peu de mottes et agrégats, le conditionneur peut difficilement agir. En effet un tel état initial ne nécessite pas de désagrégation pour se dégrader, les pluies provoquent dès le début une soudure et une prise en masse des éléments fins. Comme le conditionneur est efficace sur un ralentissement de la désagrégation, son effet ne peut pas dans ce cas s'exprimer.

Cependant, on peut considérer que la nature même du conditionneur peut constituer dans une certaine mesure une limite à son efficacité.

D'une part, le conditionneur est constitué d'aluminium hydroxylé de rapport $r = \text{OH}/\text{Al} = 1,5$. Or des études récentes en floculation-agrégation des produits hydroxylés d'aluminium (BOTTERO et al., 1987) montrent que pour un rapport $r = 2,45$ l'aluminium peut alors se présenter sous la forme d'un polymère stable de grande taille et de structure fractale. Il resterait à vérifier qu'un tel polymère soit aussi efficace sinon plus que le "pseudo-polymère" du conditionneur étudié, en particulier sur une meilleure couverture de la surface des agrégats, limitant les points de rupture à la fissuration.

D'autre part, la faible pénétration du conditionneur très cationique peut aussi constituer dans une certaine mesure une limite à son efficacité. On peut aisément concevoir que si le conditionneur pénétrait dans les agrégats et les mottes sur une épaisseur d'au moins 1 cm, l'efficacité serait fortement augmentée dans le sens où cela pourrait pallier plus longtemps aux perturbations causées par les fissurations successives, si elles se produisaient encore, ou

les déplacements par le rejaillissement.

Nous allons envisager maintenant les autres conséquences de l'application du conditionneur, non plus physiques, mais physico-chimiques et éventuellement phytotoxiques. Notre objectif ici n'est pas de détailler ces conséquences mais plutôt d'apporter quelques éléments de réponse.

B. Autres conséquences de l'application du conditionneur sur les sols cultivés

1. Conséquence sur la CEC et le pH du sol

Des dosages ont été effectués sur les agrégats de sol préparés au laboratoire dont nous avons étudié le comportement dans le Chapitre III. Les résultats concernant le pH et la Capacité d'Echange Cationique sont présentés dans le Tableau IV-1 suivant.

TABLEAU IV-1

Résultats de mesures de pH et de CEC
sur les agrégats calibrés 3-4 mm du sol LA
ayant subi différents traitements avec le conditionneur

	TEMOIN	W250	W1000s
pH eau	7.6	5.7	4.1
CEC (méth. Metson) (meq/100g sol)	10.3	9.7	8.8

Nous pouvons y constater tout d'abord une baisse importante du pH avec l'augmentation de la dose de conditionneur apportée. La solution apportée est en effet très acide, de pH proche de 2,7 sans dilution.

Ensuite, nous pouvons observer une réduction de la Capacité d'Echange Cationique. Elle est due à la fixation de l'aluminium sur le complexe d'échange. OADES (1984) a étudié la fixation de différents composés hydroxylés d'aluminium jusqu'à saturation des argiles. Cependant, nous devons être prudents sur les chiffres ; leurs faibles différences peuvent être liées à des imprécisions des mesures. Mais ils permettent tout de même ici d'indiquer la tendance. La saturation de la CEC par l'aluminium est ici relativement faible sur les agrégats. Cela constitue un autre élément pour confirmer la faible migration du conditionneur dans les agrégats.

Cependant rappelons que ces chiffres concernent des agrégats de 3 à 4 mm qui pourraient être disposés à la surface du sol. Ramenés à une couche de sol labourée, ces chiffres sont vraiment minimes, sans influence grave sur l'état calcique ainsi que sur la capacité de rétention en éléments nutritifs. Cependant il est sûr que à l'échelle du millimètre de surface, des transformations peuvent se produire.

En ce qui concerne l'acidité produite par l'apport de 250 litres de WAC, on peut la calculer d'après le nombre d'ions H^+ par litre de produit. Elle est équivalente à -45 kg/ha de $CaCO_3$, ce qui est très faible.

2. Formes d'aluminium apportées

Les dosages des formes d'aluminium apportées par le conditionneur sont donnés dans le Tableau IV-2. La teneur en aluminium échangeable a été obtenue par le traitement au KCl N et celle de l'aluminium amorphe par la méthode TAMM à l'obscurité.

TABLEAU IV-2

Formes d'aluminium apportées par le conditionneur
sur les agrégats du sol LA

	TEMOIN	W250	W1000s
Al échangeable (meq/100g)	0.2	0.2	5.2
Al amorphe (%)	0.07	0.12	0.32

Dans ce tableau, on peut tout d'abord remarquer que la teneur en aluminium échangeable est fortement augmentée lorsque l'on passe de l'échantillon témoin à l'échantillon traité à la plus forte dose. La teneur en aluminium amorphe est augmentée dans un moindre rapport. Ensuite on peut relever que dans l'échantillon témoin il existe déjà une quantité non négligeable d'aluminium sous forme amorphe.

Ces résultats montrent aussi que le conditionneur apporte relativement plus d'aluminium échangeable que d'aluminium amorphe. Cependant, rappelons encore que ces chiffres ne concernent qu'une épaisseur de 3 mm sur une couche de sol travaillée.

3. Conséquences sur une éventuelle phytotoxicité

La phytotoxicité de l'aluminium est principalement liée à la forme monomère, c'est-à-dire en grande partie échangeable, et non pas à la fraction amorphe (BLAMEY et al., 1982). Cependant, nous venons de voir qu'une partie de l'aluminium apporté l'est justement sous cette forme.

Cependant dans le sol, la forme d'aluminium présent est très lié au pH ; au dessus de pH=5, on ne trouve pas la forme Al^{3+} . Dans les conditions des sols étudiés, pour des pH supérieurs à 6, l'aluminium évolue vers des formes amorphes par hydroxylation et précipitation.

4. Conclusion

Ces derniers éléments tendent à dire que pour les sols sur lesquels nous avons travaillé et à l'échelle d'une couche travaillée, le conditionneur apporté à la dose de base n'a pas de conséquence néfaste pour le sol et la culture. Notons que lors de nos expériences de terrain, aucun problème n'était apparu pour les cultures. Il convient cependant de s'assurer d'un bon état calcique du sol qui doit être complémentaire de l'apport du conditionneur, l'un étant responsable d'un effet lent à mettre en oeuvre et durable, et l'autre à action instantanée.

III. CONTRIBUTION DE NOTRE TRAVAIL A L'ETUDE DES CONDITIONNEURS DE SOL

Il est important maintenant de resituer notre travail dans les études de conditionneurs de sol, en particulier des polymères organiques. Pour cela, nous allons considérer trois niveaux d'études successifs, le niveau colloïdal (interactions avec les argiles), le niveau des agrégats de sol, et le niveau d'une surface de sol.

A. Niveau colloïdal

La plupart des conditionneurs ont été étudiés tout d'abord sur des argiles, en milieu très hydraté. Il s'agit en fait de voir l'influence des conditionneurs sur les propriétés de floculation - dispersion des argiles. Vis-à-vis de problèmes concrets, la justification de telles études se situe dans le cas où la dispersion est le mécanisme prédominant dans la dégradation du sol.

Dans nos conditions de travail, le mécanisme de dispersion n'intervient

quasiment pas. Cependant, de nombreuses études ont été réalisées sur l'action des formes hydrolysées de l'aluminium sur les argiles montrant un effet floculant très important (ROBERT et al., 1983 ; OADES, 1984). Nous pouvons ainsi prévoir que dans des conditions de sols salés le conditionneur peut avoir un rôle sur l'amélioration des propriétés physiques. Une réserve doit être toutefois faite ici à savoir d'étudier la localisation spatiale du conditionneur dans ces conditions en relation avec la localisation spatiale de l'intervention du mécanisme. En effet, si la dispersion intervient sur toute une couche épaisse de sol, il reste à montrer que l'on peut appliquer le conditionneur sur toute la zone concernée, ce qui peut poser certains problèmes.

La particularité du conditionneur étudié ici réside donc dans le caractère cationique très marqué des composés hydroxylés de l'aluminium. Ceux-ci peuvent jouer le rôle à la fois d'agent floculant et de ciment entre les argiles, c'est-à-dire d'agent de liaison irréversible, après leur précipitation sur des surfaces de sol. D'autre part, ROBERT et al. (1983) ont pu observer en microscopie électronique à balayage une modification de l'arrangement d'argiles après traitement avec différents formes d'aluminium hydroxylé. Pour un rapport d'hydroxylation proche de 2, des argiles gonflantes se regroupent en microagrégats. Une telle modification peut contribuer à expliquer la différence de porosité que nous avons pu noter.

B. Niveau des agrégats de sol

A ce niveau d'investigation, on cherche à évaluer l'influence de conditionneurs sur la stabilité des agrégats vis-à-vis de l'action dégradante de l'eau. Cependant, les méthodes dont nous disposons jusqu'à présent sont globales vis-à-vis des mécanismes de destruction par l'eau, incluant souvent à la fois les mécanismes d'éclatement, de dispersion et d'énergie mécanique. Elles peuvent donc difficilement constituer un mode de prévision de comportement d'agrégats de sol dans des conditions naturelles bien définies.

La méthode d'étude sur agrégats que nous avons utilisée (LE BISSONNAIS, 1988), permet de distinguer les mécanismes mis en jeu et de replacer leur importance respective dans des conditions hydriques bien définies, et ainsi d'ébaucher cette prévision de comportement des sols.

Par ailleurs, la relation entre les résultats obtenus à ce niveau et au niveau colloïdal est très difficile à établir. A ce sujet, HELALIA et LETEY (1989) montrent que pour un même type de polymère organique, à un poids moléculaire comparable, l'espèce anionique est plus efficace que l'espèce cationique sur la stabilisation d'agrégats. A l'inverse lors d'études de suspensions d'argiles, ils ont trouvé une efficacité allant dans le sens opposé, le

polymère cationique étant plus efficace sur la floculation des argiles. Sur des tests de stabilité d'agrégats, nous avons retrouvé le même type de résultats que ces auteurs, à savoir qu'à un poids moléculaire comparable, un polyacrylamide cationique est moins efficace qu'un polyacrylamide anionique sur l'augmentation de la résistance des agrégats vis-à-vis de la désagrégation par éclatement et de la désagrégation mécanique.

C. Niveau d'une surface de sol

Deux systèmes doivent être distingués ici, d'une part une surface de sol soumise à une pluie simulée, et d'autre part une surface de sol soumise à une histoire pluviométrique naturelle complexe.

Dans le cas d'une pluie simulée, l'action de nombreux conditionneurs a été évaluée sur l'évolution des propriétés hydrodynamiques d'échantillons de sol. Nous avons quantifié l'effet du conditionneur dans des conditions expérimentales bien contrôlées. Ce genre d'étude, facile à mettre en oeuvre, a été réalisé par de nombreux auteurs, sur un grand nombre de conditionneurs.

Une des originalités de notre étude est l'étude du comportement de surfaces de sols traitées avec le conditionneur dans le cas d'histoires hydriques complexes en conditions naturelles. Très peu d'autres travaux ont été réalisés à une telle échelle et en tenant compte de tous les facteurs externes. Une telle étude permet de relativiser l'importance des différents mécanismes intervenant, avec une éventuelle additivité de leurs conséquences au cours des différents événements pluvieux. Il est important de noter que pour cela, nous avons bénéficié de l'utilisation d'une méthode d'étude mise au point par BOIFFIN (1984) permettant de mettre en relation la dynamique d'évolution de la surface avec les caractéristiques pluviométriques et hydriques. Cette méthode, sans être nettement quantitative nous a permis de comprendre l'effet du conditionneur sur le ralentissement de la dégradation sous l'action des pluies, en interaction avec l'histoire hydrique.

IV. COMPARAISON ENTRE NOTRE SYSTEME D'ETUDE ET LES SOLS NATURELLEMENT STABILISES PAR LES COMPOSES AMORPHES D'ALUMINIUM ET DE FER

Il existe dans le milieu naturel un assez grand nombre de sols où l'aluminium et le fer, généralement sous forme amorphe, sont responsables de structures microagrégées.

Ainsi le fer amorphe est mis en cause dans la formation et la stabilisation des micropeds de sols ferrallitiques (CHAUVEL, 1976 ; CAMBIER, 1986), et l'aluminium et le fer associés aux matières organiques dans les horizons dits "foisonnants" des sols bruns acides

et bruns ocreux (BOUDOT et BRUCKERT, 1978).

Cependant dans le cas de ces sols, la localisation des revêtements est très certainement interne à la structure des agrégats, à la différence de notre système.

Un de nos résultats particulièrement nouveau concernant l'hydrophobie provoquée par de tels revêtements nous amène à envisager ce mode d'action dans le cas de la forte stabilité des agrégats des horizons "foisonnants".

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les résultats obtenus au cours de ce travail ont permis de dégager certains points importants et originaux sur l'effet d'un conditionneur minéral sur la dégradation de la structure de surface des sols sous l'action de la pluie.

Tout d'abord, nous avons pu voir que le conditionneur permet d'augmenter la résistance d'agrégats de sol vis-à-vis du mécanisme d'éclatement par piégeage d'air, en modifiant certaines propriétés de leur partie périphérique.

Cette modification se traduit par une augmentation du caractère hydrophobe et une modification de la taille des pores contribuant à ralentir l'entrée de l'eau dans les agrégats et donc à permettre à l'air de s'échapper. De plus, le conditionneur permet d'augmenter la cohésion des agrégats à l'état humide.

L'intérêt majeur de ce travail est d'avoir envisagé toutes les échelles depuis l'agrégat jusqu'au champ cultivé, où les facteurs à prendre en compte sont bien plus complexes. A cette échelle, le conditionneur est appliqué par pulvérisation en surface du sol.

Lors d'études de terrain où le mécanisme d'éclatement était prédominant, l'effet du conditionneur n'a pas pu se révéler dans toutes les conditions. Dans les conditions les plus favorables, les surfaces de sol traitées par le conditionneur se sont dégradées plus lentement que les surfaces témoins sous l'action des pluies. Cependant dans des conditions défavorables, la dégradation de la surface du sol a été identique quelle que soit la surface considérée. Ces conditions défavorables sont en fait liées à l'histoire hydrique subie par les surfaces de sol. En cas d'histoire hydrique alternée, une microfissuration des mottes traitées ou non se produit qui, conjuguée à l'effet de rejaillissement des gouttes de pluie, provoque une perturbation de l'état de surface sans qu'il y ait une forte dégradation.

Dans le cas de ce système d'application par pulvérisation en surface, la révélation de l'efficacité du conditionneur est liée à la position de la zone contenant cette substance, dans notre cas le volume périphérique, par rapport à l'arrivée de l'eau. Ainsi tout mouvement de la surface par fissuration ou splash empêche l'expression de l'effet du conditionneur sur le ralentissement de la dégradation.

Le conditionneur sur lequel nous avons travaillé n'est pas optimal, certaines améliorations pourraient être envisagées notamment dans sa composition. Cependant, il a permis d'une part d'étudier le mode d'action d'une certaine forme d'aluminium hydroxylé sur la stabilité structurale et d'autre part de révéler notamment sur le terrain l'importance de certains facteurs du milieu comme l'histoire hydrique sur la dégradation superficielle du sol sous l'action des pluies.

A l'issue de ce travail, certains problèmes restent cependant à résoudre. Ils concernent d'une part l'augmentation de l'hydrophobie obtenue avec les revêtements d'aluminium, à savoir quelles sont les raisons au niveau moléculaire de ce comportement de la surface. D'autre part, ils concernent la modification de l'espace poral de la périphérie des agrégats, que l'on pourra étudier sur un matériau plus homogène. De plus la profondeur de pénétration du conditionneur au sein de l'agrégat après sa pulvérisation reste à quantifier.

Nous avons donc proposé un modèle de la stabilisation des agrégats par revêtement de la partie périphérique. Ce modèle peut être généralisable à l'action des conditionneurs de sol, qu'ils soient organiques ou minéraux. Il resterait à voir s'il correspond aussi à la stabilisation des structures et à la formation d'agrégats dans le milieu naturel, que ce soit par l'action des composés du fer ou de l'aluminium ou par celle de la matière organique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

- ALLISON L.E. and MOORE D.C., 1956. Effect of VAMA and HPAN soil conditioners on aggregation, surface crusting and moisture retention in alkali soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 20 (2), 143-146.
- ARNDT W., 1965. The impedance of soil seals and the forces of emerging seedlings. *Aust. J. Soil. Res.*, 3, 55-68.
- AYLMORE L. and QUIRK J.P., 1962. The structural status of clay systems. *Clays and clay minerals*, 9, 104-130.
- AZZAOUI M., 1988. Comportement et organisation de matériaux argileux soumis à des contraintes hydriques et mécaniques. Rôle des différents types de force d'hydratation. Thèse Univ. Paris VI, 240 p.
- BLACKMORE A.V., 1973. Aggregation of clay by the products of Iron III hydrolysis. *Aust. J. Soil Res.*, 11, 75-82.
- BLAMEY F.P.C., EDWARDS D.G. and ASHER C.J., 1982. Effects of aluminum, OH/Al, and P/Al molar ratios, and ionic strength on soybean root elongation in solution culture. *Soil Sci.*, 136 (4), 197-207.
- BLAVIA F.J., MOLDENHAUER W.C. and LAW D.E., 1971. Materials for stabilizing surface clods of cropped soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35, 119-122.
- BOIFFIN J., 1976. Histoire hydrique et stabilité structurale de la terre. *Ann. Agron.*, 27 (4), 447-463.
- BOIFFIN J., 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse de Docteur-Ingénieur, INAPG, 320p + annexes.
- BOIFFIN J., et BRESSON L.M., 1987. Dynamique de formation des croûtes superficielles : apport de l'analyse microscopique. In : *Micromorphologie des sols. Actes de la VII Réunion Internationale de Micromorphologie des sols, Paris, Juillet 1985.* FEDOROFF N., BRESSON L.M., et COURTY M.A., eds., AFES, 393-399.
- BOIFFIN J., and MONNIER G., 1986. Infiltration rate as affected by soil surface crusting caused by rainfall. *Int. Symp. on the Assessment of soil surface sealing and crusting, Gand, Belgique, 1985.*
- BOIFFIN J., et 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., PAPY F., et EIMBERCK M., 1988. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. 1) Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie*, 8 (8), 663-673.
- BOIFFIN J., PAPY F., et 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.
- BOTTERO J.Y., POIRIER J.E. and FIESSINGER F., 1980. Study of partially neutralized aqueous aluminum chloride solutions : identification of aluminum species and relation between the composition of the solutions and their efficiency as a coagulant. *Prog. Wat. Tech.*, 12, Toronto, 601-612.
- BOTTERO J.Y., AXELOS M., TCHOUBAR D., CASES J.M., FRIPIAT J.J. and FIESSINGER F., 1987. Mechanism of formation of aluminum trihydroxide from Keggin Al_{13} polymers. *J. of Coll. and Interface Sci.*, Vol. 117, 1, 47-57.
- BOUDOT J.P. et BRUCKERT S., 1978. Complexes organo-métalliques et structures micro-agrégées des sols sur matériaux chloriteux du système schisto-grauwackeux vosgien. *Science du Sol*, 1, 31-40.
- BRESSON L.M., and BOIFFIN J., 1990. Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field. *Geoderma*, 47, 301-325.
- BRUCKERT S. et SELINO D., 1978. Mise en évidence de l'origine biologique ou chimique des structures microagregées foisonnantes des sols bruns ocreux. *Pédologie*, XXVIII, 1, 46-59.
- CALLEBAUT F., CABRIELS D., MINJAUW W. and DE BOODT M., 1985. Determination of soil surface strength with a needle-type penetrometer. *Soil and Till. Res.*, 5, 227-245.
- CAMBIER P., 1986. Organisation des constituants et interactions physico-chimiques au sein des microagregats de sols. Application au système ferrallitique kaolinite-oxyde de fer. Thèse Univ. Paris VI, 223p.
- CHASSIN P., 1979. Détermination de l'angle de contact acides humiques - solutions aqueuses de diols. Conséquences sur l'importance relative des mécanismes de destruction des agrégats. *Ann. Agron.*, 30 (6), 481-491.
- CHASSIN P., JOUANY C., and QUIQUAMPOIX H., 1986. Measurement of the surface free energy of calcium-montmorillonite. *Clays minerals*, 21, 899-907.
- CHAUVEL A., 1976. Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. Thèse Doct. Strasbourg, Trav. et Doc. ORSTOM, 62, 532p.

- CHEN Y., TARCHITZKY J.T., BROUWER J., MORIN J., and BENIN A., 1980. Scanning electron microscope observations of soil crusts and their formation. *Soil Sci.*, 130, 49-55.
- CHISCI G., LORENZI G. and PICCOLO L., 1978. Effects of a ferric conditioner on clay soils. In : *Modification of soil structure*. EMERSON W.W., BOND R.D. and DEXTER A.R. Eds. Chap. 41, 309-314.
- CONCARET J., 1967. Etude des mécanismes de la destruction des agrégats de terre au contact de solutions aqueuses. *Ann. Agron.*, 18(1), 65-90, et 18(2), 99-144.
- COULON E., 1988. Conséquence du tassement sur l'organisation de l'espace poral des sols sableux. Thèse Doct. Univ. Orléans, 242p.
- DAVID P., 1986. Effets et mécanismes d'action de conditionneurs minéraux sur la stabilisation des sols battants. DEA Féd. Pédologie, 103p.
- DAVID D.J. and MISRA A., 1985. Surface energetic characterization and relationship to adhesion using a novel contact angle measuring technique. *J. of Coll. and Interface Sci.*, 108 (2), 371-376.
- DE BOODT M., 1975. Use of soil conditioners around the world. In : *Soil conditioners*. *Soil Sci. Soc. Am. Spec. Publ.*, n°7, 1-12.
- DE LEENHEER L. and DE BOODT M., 1959. Determination of aggregate stability by the change in mean weight diameter. *Int. Symp. Bodemstruutur. Gent*, 24, 257-266.
- DULEY F.L., 1939. Surface factors affecting the rate of intake of water by soils. *Soil Sc. Soc. Amer. Proc.*, 4, 60-64.
- ELLISON W.D., 1947. Soil erosion. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 12, 479-484.
- EMERSON W.W., 1954. The determination of the stability of soil crumbs. *J. Soil Sci.*, 5 (2), 233-250.
- EMERSON W.W., 1963. The effect of polymers on the swelling of montmorillonite. *J. of Soil Sci.*, 14 (1).
- EMERSON W.W., 1967. A classification of soil aggregates based on their coherence in water. *Aust. J. Soil Res.*, 5, 47-57.
- EMERSON W.W. and BOND R.D., 1963. The rate of water entry into dry sand and calculation of the advancing contact angle. *Aust. J. Soil Res.*, 1, 9-16.
- EVANS D.D. and BUOLS S.W., 1968. Micromorphological study of soil crusts. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 32 (1), 19-22.

- FARRES P.J., 1978. The role of time and aggregate size in the crusting process. *Earth Surf. Processes*, 3, 243-254.
- 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*, 14, 119-130.
- FEODOROFF A., 1965. Mécanisme de l'érosion par la pluie. *Rev. de Géogr. Phys. et de Géol. Dyn.* (2), Vol VII, fasc. 2, 149-163.
- FIES J.C. and BRUAND A., 1990. Textural porosity analysis of a silty clay soil using pore volume balance estimation, mercury porosimetry and quantified backscattered electron scanning image(BESI). *Geoderma*, 47, 209-219.
- FOSTER R.H. and GAZZARD I.J., 1975. The influence of polymeric hydroxy-Al cations on the consolidation, shear strength and consistency limits of clay soils. *Géotechnique*, 25 (3), 513-525.
- GABRIELS D.M., MOLDENHAUER W.C. and DON KIRKHAM, 1973. Infiltration, hydraulic conductivity and resistance to water-drop impact of clod beds as affected by chemical treatment. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37, 634-637.
- GOVERS G., EVERAERT W., POESEN J., RAUWS G. and DE PLOEY J., 1987. Susceptibilité à l'érosion par rigole d'un sol limoneux : essais dans le canal de Caen. *Bull. du Centre de Géomorphologie de Caen-CNRS*, 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., 1972. Interactions between organic polymers and inorganic soil particles. *Proc. Symp. Fundamentals of soil conditioning. Med. Fac. Landbouww. Rijksuniv.*, 897-922.
- GUERIF J., 1988a. Détermination de la résistance en traction des agrégats terreux : revue bibliographique et mise au point technique. *Agronomie*, 8 (4), 281-288.
- GUERIF J., 1988b. Résistance en traction des agrégats terreux : influence de la texture, de la matière organique et de la teneur en eau. *Agronomie*, 8 (5), 379-386.
- GUILLORE P., 1983. Méthode de fabrication mécanique et en série de lames minces (2ème édition) INA P-G, Dep. des Sols, 22p.
- HARTMANN R., VERPLANCKE H. and DE BOODT M., 1976. The influence of soil conditioners on the liquid-solid contact angles of sands and silt loams. *Soil Sci.*, 121 (6), 346-352.

- HELALIA A.M. and LETEY J., 1988. Cationic polymer effects on infiltration rates with a rainfall simulator. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52, 247-250.
- HELALIA A.M. and LETEY J., 1989. Effects of different polymers on seedling emergence, aggregate stability, and crust hardness. *Soil Sci.*, 148 (3), 199-203.
- HENIN S. 1938. Etude physico-chimique de la stabilité structurale des terres. Thèse Paris, 70p.
- HENIN S., GRAS R. et MONNIER G., 1969. Le profil cultural (2ème édition). MASSON éd., Paris. 332p.
- HILLEL D., 1964. Infiltration and rainfall-runoff as affected by surface crusts. In 8th Congress of Soil Science, Bucharest, Romania, 54-65.
- HOLDER C.B. and BROWN K.W., 1974. Evaluation of simulated seedling emergence through rainfall induced soil crusts. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 38, 705-710.
- HUANG P.M., 1988. Ionic factors affecting aluminum transformations and the impact on soil and environmental sciences. *Adv. in Soil Science*, Vol. 8, 1-78.
- JOHANSSON G., 1960. On the crystal structures of some basic aluminum salts. *Acta Chem. Scand.*, 14 (3), p771.
- JOUANY C., 1991. Surface energy of clay - synthetic humic acid complexes from contact angle measurements. *Clays and clay min.*, à paraître.
- JOUANY C., and CHASSIN P., 1987a. Determination of the surface energy of clay-organic complexes by contact angle measurements. *Coll. and Surf.*, 27, 289-303.
- JOUANY C., and CHASSIN P., 1987b. Wetting properties of Fe and Ca humates. *The science of the total environment*, 62, 267-270.
- JOUANY C., LE SOUDER C., CHENU C., and VENEAU G., 1991. Determination of the wetting and the surface energy of associations montmorillonite-Al polycations. à paraître.
- KEMPER W.D. and ROSENAU R.C., 1984. Soil cohesion as affected by time and water content. *Soil Sci. Soc. Am.*, 48, 1001-1006.
- KHEYRABI D. et MONNIER G., 1968. Etude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. Agron.*, 19 (2), 129-152.
- LE BISSONNAIS Y., 1988. Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies. Thèse Univ. Orléans, 196p.

- LE BISSONNAIS Y., BRUAND A. and JAMAGNE M., 1989. Laboratory experimental study of soil crusting : relation between aggregate breakdown mechanisms and crust structure. *Catena*, 16, 377-392.
- LE SOUDER C., 1987. Effets d'un conditionneur minéral sur la battance des sols cultivés. DAA INA P-G, 86p.
- LETEY J., OSBORN J. and PELISHEK R.E., 1962. Measurement of liquid-solid angles in soil and sands. *Soil Sci.*, 93 (3), 149-153.
- MARTIN W.P., 1953. Status report on soil conditioning chemicals. I. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 17 (1), 1-9.
- Mc INTYRE D.S., 1958. Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impacts. *Soil Sci.*, 85, 261-266.
- MONNIER G., 1965. Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. *Ann. Agron.*, 16(4), 327-400.
- MONNIER G. et KONAN L., 1968. Influence des conditions de séchage des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. Agron.*, 19 (5), 541-551.
- MONNIER G., BOIFFIN J. et PAPY F., 1986. Réflexions sur l'érosion hydrique en conditions climatiques et topographiques modérées : cas des systèmes de grande culture de l'Europe de l'Ouest. *Cah. ORSTOM, ser. Pédol.*, 12 (2), 123-131.
- MONNIER G., STENGEL P. et 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.
- MORIN J., BENYAMINI Y. and 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.
- OADES J.M., 1984. Interactions of polycations of aluminum and iron with clays. *Clays and Clay Min.*, 32 (1), 49-57.
- ONOFIOK O. and SINGER M.J., 1984. Scanning electron microscope studies of surface crusts formed by simulated rainfall. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48, 1137-1143.
- PAGE E.R., 1980. Cellulose Xanthate as a soil conditioner : laboratory experiment. *J. Sci. Food Agric.*, 31, 1-6.
- PANABOKKE C.R. and QUIRK J.P., 1957. Effect of initial water content on the stability of soil aggregates in water. *Soil Sci.*, 83, 185-195.

- QUIENNE P., 1989. Mécanisme de coagulation-floculation de la silice colloïdale par les hydroxydes de fer : étude par diffusion aux petits angles des rayons X. Thèse Doct. Univ. Orléans, 99p.
- RICHARD G., 1988. La germination des semences de betteraves sucrières en conditions d'hypoxie : modélisation, contribution à un diagnostic au champ. Thèse Doct.-Ing. INA P-G, 108p.
- RICHARDS L.A., 1947. Pressure membrane apparatus - Construction and use. *Agric. Eng.*, 28, 451-454.
- RICHARDS L.A., 1953. Modulus of rupture as an index of soil crusting. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 17, p321.
- ROBERT M., VENEAU G. and HERVIO M., 1983. Influence des polycations du fer et de l'aluminium sur les propriétés des argiles. *Science du Sol, Bull. de l'AFES*, 3-4, 235-251.
- ROBINSON D.O. and PAGE J.B., 1950. Soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 15, 25-29.
- ROGOWSKI A.S. and DON KIRKHAM, 1976. Strength of soil aggregates : influence of size, density and clay and organic matter content. *Med. Fac. Landbouww. Rijksuniv. Gent*, 41 (1), 85-100.
- RUIZ FIGUEIROA J.F., 1983. Les micro-organisations pelliculaires superficielles formées sous pluie simulée sur des sols ferrallitiques de savane (Centre Nord de la Côte d'Ivoire). Comportement hydrodynamique et mécanique de ces pellicules de battance en relation avec la texture, la couverture du sol et la levée du riz pluvial. Thèse Paris, 167p.
- SCHAMP N., 1976. Chemicals used in soil conditioners. In : 3rd Int. Symp. on soil conditioning. *Med. Fac. Landbouww. Rijksuniv., Gent*, 13-18.
- SCHANMUGANATHAN R.T. and OADES J.M., 1982a. Modification of soil physical properties by manipulating the net surface on colloïds through addition of FeIII polycations. *J. Soil Sci.*, 33, 451-465.
- SCHANMUGANATHAN R.T. and OADES J.M., 1982b. Modification of soil physical properties by addition of FeIII polycations : influence on plant growth. *J. Soil Sci.*, 33, 639-647.
- SHAINBERG I. and LETEY J., 1984. Response of soils to sodic and saline conditions. Effect of sodicity and salinity on the hydraulic conductivity of soil surface (crust formation) as determined by the infiltration rate. *Hilgardia*, 52 (2), 33-57.

- SHAINBERG I., SINGER M.J. and JANITZKY P., 1987. Effect of aluminum and iron oxides on hydraulic conductivity of sandy loam soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51, 1283-1287.
- SHAVIV A., RAVINA I. and ZASLAWSKY D., 1987. Field evaluation of methods of incorporating soil conditioners. *Soil and Till. Res.*, 9 (2), 151-160.
- SHERWOOD L.V. and ENGIBOUS J.C., 1953. Status report on soil conditioning chemicals. II. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 17 (1), 9-16.
- SOUTY N. and GUERIF J., 1988. Seedbed structure and seedling emergence of maize. *Proc. of the 11th Intern. Conf. of the Intern. soil Tillage Research Organization*, 11-15th July, Edimburg, Scotland, 135-140.
- STENGEL P., 1982. Swelling potential of soil as a criterium of permanent direct-drilling suitability. *Proc. 9th Cof. of ISTRO, Osijek, Yugoslavia*, 131-136.
- TACKETT J.L. and PEARSON R.W., 1965. Some characteristics of soil crusts formed by simulated rainfall. *Soil Sci.*, 99, 407-413.
- TAMAI Y., MAKUUCHI K. and SUZUKI M., 1967. Experimental analysis of interfacial forces at the plane surface of solids. *J. Phys. Chem.*, 71, 4176-4179.
- TAYLOR G.S. and BALDRIDGE P.E., 1954. The effect of sodium carboxymethyl-cellulose on some physical properties of Ohio soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 382-385.
- TESSIER D. et BERRIER J., 1979. Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude du sol. Observation de sols humides soumis à différents pF. *Science du Sol*, 1, 67-82.
- TESSIER D., BEAUMONT A. and PEDRO G., 1990. Influence of clay mineralogy and rewetting rate on clay microstructure. *Proc. of the VIIIth Intern. Working Meeting of soil Micromorphology, San Antonio, Texas, July 1988*. In : *Soil micromorphology : a basic and applied science*. DOUGLAS L.A., Ed. *Developments in soil science*, 19, Elsevier, 115-121.
- THENG B.K.G., 1979. Formation and properties of clay-polymer complexes. *Developments in Soil Science* 9, Elsevier.
- THENG B.K.G., GREENLAND D.J. and QUIRK J.P., 1967. The swelling in water of complexes of montmorillonite with PVA. *Aust. J. Soil Res.*, 5, 69-75.
- 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 eau*. Thèse Paris, ORSTOM éd., 213p.

- WADA K., TSUMORI Y., NITAWAKI Y. and EGASHIRA K., 1983a. Effects of hydroxy-aluminum on flocculation and permeability of smectite clays. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 29 (3), 305-312.
- WADA K., TSUMORI Y., NITAWAKI Y. and EGASHIRA K., 1983b. Effects of hydroxy-aluminum on flocculation and permeability of silt and clay fractions separated from paddy soils. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 29 (3), 313-322.
- WILLIAMS B.G., GREENLAND D.J., and QUIRK J.P., 1966. The adsorption of poly(vinyl alcohol) by natural soil aggregates. *Aust. J. Soil Res.*, 4, 131-143.
- WILLIAMS B.G., GREENLAND D.J., and QUIRK J.P., 1967a. The effect of polyvinyl alcohol on the nitrogen surface area and pore structure of soil. *Aust. J. Soil Res.*, 5, 77-83.
- WILLIAMS B.G., GREENLAND D.J., and QUIRK J.P., 1967b. Tensile strength of soil cores containing polyvinyl alcohol. *Aust. J. Soil Res.*, 5, 85-92.
- WILLIAMS B.G., GREENLAND D.J., and QUIRK J.P., 1968. The water stability of natural clay aggregates containing polyvinyl alcohol. *Aust. J. Soil Res.*, 6, 59-66.
- YODER R.E., 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *J. of the Amer. Soc. of Agron.*, 28, 337-351.
- ZAESSINGER A., 1987. Etude de la structure et caractérisation d'un flocculant alumineux utilisé dans le traitement des eaux. Thèse Univ. Haute Alsace, 167p.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I	
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE ET PRESENTATION DE L'ETUDE	5
I. LA DEGRADATION DE LA STRUCTURE DE LA SURFACE DU SOL SOUS L'ACTION DE LA PLUIE	7
A. Généralités	7
1. Définitions	7
2. Moyens d'étude des croûtes superficielles	7
B. Processus de formation des croûtes superficielles	9
C. La dégradation superficielle du sol sous l'action de la pluie - Dynamique établie par BOIFFIN (1984)	10
D. Conséquences de la formation des croûtes superficielles	12
1. La levée des cultures	13
2. L'érosion hydrique	13
II. LA DESAGREGATION DU SOL PAR L'EAU	14
A. Les mécanismes de désagrégation	14
1. L'éclatement	16
2. L'énergie d'impact des gouttes de pluie	16
3. Autres mécanismes	17
B. La stabilité structurale	17
1. Les méthodes d'évaluation	17
2. Les composantes de la stabilité structurale	18
21. La cohésion du matériau	18
22. La mouillabilité des parois	18
III. LES CONDITIONNEURS DE SOL	19
A. Définition et présentation générale	19
1. Définitions	19
2. Utilisations des conditionneurs et propriétés recherchées	19
3. Mode d'application des conditionneurs	20
B. Les conditionneurs organiques	20
1. Principaux conditionneurs étudiés	20
2. Rôle des polymères organiques sur les propriétés physiques des sols intervenant dans la stabilité structurale	21
C. Les conditionneurs minéraux	22
1. Principaux conditionneurs étudiés	22
2. Modes d'action des conditionneurs à base d'aluminium et de fer	22
21. Formes d'aluminium et de fer en solution	22
22. Les oxyhydroxydes d'aluminium et de fer dans les sols	23
23. Effets des composés d'aluminium et de fer sur les propriétés physiques des sols.	25
D. Conclusion	25
IV. PRESENTATION ET DEMARCHE DE L'ETUDE	26
A. Objectifs	26
B. Le problème posé	26
C. Le conditionneur étudié	27
1. Le WAC~	27
2. Le mode de conditionnement envisagé	28
D. La démarche suivie	28

CHAPITRE II	
ETUDE DU ROLE DU CONDITIONNEUR	
SUR L'EVOLUTION D'UNE SURFACE DE SOL	
SOUS L'ACTION DES PLUIES	31
Première partie :	
ETUDE EN CONDITIONS NATURELLES SUR LE TERRAIN	33
Introduction	33
I. MATERIEL ET METHODES	33
A. Sites étudiés	33
1. Choix des sites	33
2. Présentation des sites	34
21. Les sols	34
22. Les histoires pluviométriques	35
221. Les relevés pluviométriques	35
222. Les différents types d'histoires pluviométriques rencontrés	35
23. Tableau synthétique (Tableau II-1)	37
3. Dispositif général d'étude	37
31. Traitements mis en jeu	37
32. Application du conditionneur	37
B. Méthodes d'étude	38
1. Stabilité structurale d'agrégats de surface des sols	38
2. Suivis morphologiques des états de surface	38
21. Dispositif spécifique	38
22. Caractérisation de l'état initial	38
23. Critères observés	39
3. Morphologie en coupe de la surface	40
31. Sites prélevés	40
32. Prélèvements des échantillons	41
33. Réalisation des lames minces	41
34. Observations	43
II. RESULTATS ET DISCUSSION DES SUIVIS MORPHOLOGIQUES DES ETATS	
DE SURFACE	43
A. Effet du conditionneur sur la stabilité des agrégats de surface	43
B. Evolution morphologique des états de surface	44
1. Effet du conditionneur sur l'évolution des états de surface observés	
sur les placettes	44
11. Mode de comparaison des courbes d'évolution du critère D_{min} en	
fonction des pluies cumulées	44
12. Présentation des résultats	44
13. Influence de la dose d'application du conditionneur	46
14. Description morphologique de l'effet du conditionneur sur le	
ralentissement de la dégradation de la surface du sol	49
15. Synthèse des résultats	53
2. Influence des différents facteurs sur la réponse du conditionneur	54
21. Influence de la nature du matériau	55
22. Influence des conditions initiales	55
23. Influence de l'histoire hydrique	57
C. Discussion et conclusion	59
1. Action du conditionneur sur l'évolution de la structure de	
surfaces de sol sous l'action de la pluie	59
2. Cas de non-effet du conditionneur	61
3. Autres facteurs	64
4. Conclusion	64

II. EVOLUTION MORPHOLOGIQUE EN COUPE DE LA SURFACE	66
A. Résultats	66
1. Site I89 de printemps	66
2. Site LA88 d'automne	71
3. Synthèse des résultats	73
	73
B. Discussion. Rôle du conditionneur sur les mécanismes de formation des microhorizons de dégradation	75
1. Site de printemps	75
	75
2. Site d'automne-hiver	76
	76
C. Conclusion	77
Seconde partie	
ETUDE SOUS UNE PLUIE SIMULEE	79
Introduction	79
I. MATERIEL ET METHODES	79
A. La simulation de pluie	79
B. Mesures de l'évolution hydrodynamique de surfaces de sol	80
1. Principe	80
2. Matériel	80
21. Matériel spécifique	80
22. Application du conditionneur	81
23. Préparation des échantillons	81
24. Obtention des résultats	81
C. Observations morphologiques de l'évolution d'un massif d'agrégats de sol	82
1. Principe	82
2. Matériel	82
II. RESULTATS ET DISCUSSION	82
A. Comportement hydrodynamique de surfaces de sol	82
1. Rôle du conditionneur sur l'évolution de l'infiltrabilité de surface au cours d'une pluie	82
2. Rôle du conditionneur sur le ruissellement	84
3. Discussion	84
B. Evolution morphologique de la surface d'un massif d'agrégats	85
1. Observations	85
2. Discussion	88
III. CONCLUSION	89
CONCLUSION PARTIELLE	91

CHAPITRE III	
ETUDE DE L'EFFET DU CONDITIONNEUR SUR LA STABILITE D'AGREGATS DE SOL	93
Première partie	
ETUDE DE L'EFFET DU CONDITIONNEUR SUR LES MECANISMES DE DESAGREGATION	95
Introduction	95
I. LE SYSTEME D'ETUDE	95
1. Les matériaux étudiés	96
11. Les agrégats calibrés	96
12. Les matériaux étudiés	96
13. Application du conditionneur	97
2. La méthode utilisée	99
21. Principe	99
22. Réalisation pratique	99
3. Comparaison entre agrégats préparés au laboratoire et agrégats prélevées en surface du sol après une pulvérisation	100
31. Les agrégats initiaux	100
32. Résultats	101
33. Conclusion	103
II. ETUDE DE L'EFFET DU CONDITIONNEUR SUR LES MECANISMES DE DESAGREGATION	103
A. La désagrégation par éclatement	103
1. Résultats et discussion	103
11. Effet du conditionneur et de sa dose d'application	103
12. Influence de la durée d'immersion	105
13. Influence de la nature du sol	107
2. Synthèse	107
B. Influence de l'humidité initiale des agrégats sur l'éclatement	109
1. Echantillons de départ	109
2. Fixation des états hydriques	109
3. Réalisation du test	109
4. Résultats	110
5. Discussion	112
C. La microfissuration par éclatement	112
1. Résultats et discussion	112
11. Effet du conditionneur et de sa dose d'application	112
12. Influence de la durée d'humectation	114
13. Effet du conditionneur sur l'évolution de la teneur en eau des échantillons au cours de l'humectation à saturation	114
14. Influence de la nature du sol	116
2. Synthèse	118
D. La désagrégation mécanique	118
1. Résultats et discussion	118
11. Effet du conditionneur et de sa dose d'application	118
12. Influence de la durée d'agitation	120
13. Influence de la nature du sol	122
2. Synthèse	124

E. Observation morphologique des "calottes" périphériques des agrégats traités	124
1. Présentation	124
2. Observations	124
3. Résultats	124
4. Discussion	126
F. Conclusion	126

Seconde partie :

EFFET DU CONDITIONNEUR

SUR CERTAINES COMPOSANTES DE LA STABILITE STRUCTURALE :

- LA MOUILLABILITE DES SURFACES

- L'ESPACE PORAL ET LA RETENTION EN EAU

127

Introduction	127
--------------	-----

I. EFFET DU CONDITIONNEUR SUR LA MOUILLABILITE DE SURFACES	127
------------------------------------------------------------	-----

A. Matériel et méthodes	127
1. Présentation	127
2. Matériaux d'étude	128
3. Méthode de mesure	128
31. Mesure de l'angle de contact	128
32. Mesure des énergies de surface	129
B. Résultats	131
1. Effet du conditionneur sur l'angle de raccordement solide-liquide à l'air	131
2. Effet du conditionneur sur les énergies de surface au cours d'un cycle de dessiccation et réhumectation	131
C. Discussion	133
1. Rôle hydrophobe du conditionneur	133
2. Aptitude à la réhydratation	133
3. Origine de l'hydrophobie	133
D. Conclusion	134

II. EFFET DU CONDITIONNEUR SUR LES PROPRIETES HYDRIQUES ET LA POROSITE DES AGREGATS DE SOL	134
--------------------------------------------------------------------------------------------	-----

A. Matériels et méthodes	135
1. Fixation des états hydriques	135
2. Présentation des agrégats étudiés	136
3. Mesures effectuées	136
B. Résultats des comportements hydriques d'agrégats	137
1. Evolution de l'indice des vides et de l'indice d'eau dans le cas d'agrégats témoins et traités du sol LA	137
2. Evolution de l'indice des vides et de l'indice d'eau d'agrégats témoins et traités de différents sols	140
3. Action du conditionneur sur la géométrie de l'espace poral	140
31. Obtention de la distribution de la taille des pores à partir de la courbe d'évolution de l'indice d'eau à l'humectation	143
32. Résultats	144
C. Discussion	145
1. Origine de l'action du conditionneur sur la modification de la géométrie de l'espace poral	145
2. Conséquence sur la stabilité structurale	146
3. Hystérèse des comportements	146
D. Conclusion	147

CHAPITRE IV	
SYNTHESE ET DISCUSSION GENERALE	149
I. ROLE DU CONDITIONNEUR SUR LA STABILISATION DE SURFACES DE SOL SOUS L'ACTION DES PLUIES	151
A. Mode d'action du conditionneur sur la stabilité structurale des agrégats de sols limoneux	151
1. Particularité du système initial	151
2. L'augmentation de la stabilité structurale	153
B. Effet du conditionneur sur une surface de sol soumis à une pluie simulée	153
1. Mécanismes de désagrégation mis en jeu	154
2. Premier domaine : désagrégation par éclatement	154
3. Second domaine : désagrégation mécanique sans éclatement	155
C. Effet du conditionneur sur l'évolution de la surface d'un sol limoneux sous l'action des pluies dans le cas de deux séquences d'histoire hydrique	155
1. Histoire hydrique alternée	155
11. Mécanismes de désagrégation mis en jeu	155
12. Effet du conditionneur	156
2. Histoire hydrique humide	156
21. Mécanismes mis en jeu	156
22. Effet du conditionneur	156
3. Cas particulier de l'histoire hydrique très humide d'automne	157
31. Mécanismes mis en jeu	157
32. Effet du conditionneur	157
D. Conclusion	158
II. CONSEQUENCES AGRONOMIQUES DE L'UTILISATION DU CONDITIONNEUR	158
A. Intérêts et limites du conditionneur	158
1. Les intérêts du conditionneur	158
2. Les limites de son efficacité	159
B. Autres conséquences de l'application du conditionneur sur les sols cultivés	160
1. Conséquence sur la CEC et le pH du sol	160
2. Formes d'aluminium apportées	161
3. Conséquences sur une éventuelle phytotoxicité	162
4. Conclusion	162
III. CONTRIBUTION DE NOTRE TRAVAIL A L'ETUDE DES CONDITIONNEURS	162
A. Niveau colloïdal	162
B. Niveau des agrégats de sol	163
C. Niveau d'une surface de sol	164
IV. COMPARAISON ENTRE NOTRE SYSTEME D'ETUDE ET LES SOLS NATURELLEMENT STABILISES PAR LES COMPOSES AMORPHES D'ALUMINIUM ET DE FER	164
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	167
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	171
ANNEXES	

ANNEXES

ANNEXE I

**CARACTERISTIQUES ANALYTIQUES
DES SOLS DES SITES ETUDIES**

Sites	Constituants granulométriques					Texture (*)	Log10S Test de HENIN
	A(%)	Lf(%)	Lg(%)	Sf(%)	Sg(%)		
C87	11	24	52	12	1	LM	2.1
CS87	19	26	47	7	1	LA	1.9
CL87	19	26	43	10	1	LA	1.4
CP87	15	16	24	38	7	LMS	2.0
E87	22	22	50	5	1	LA	1.7
F87	12	20	42	25	1	LMS	1.5
I87	14	19	40	23	4	LMS	1.7
J87	"	"	"	"	"	"	"
LR88	8	12	16	59	5	SL	1.9
LT88	19	16	13	44	8	LSA Calc	1.3
AH88	22	24	45	8	1	LA	1.7
AB88	13	23	49	14	1	LM	2.1
E88	20	24	51	5	1	LA	1.7
S88	8	4	5	70	13	S Calc	1.4
SB88	7	5	4	71	13	S Calc	1.3
D88	12	26	54	6	2	LM	2.2
P88	14	23	40	19	4	LMS	2.0
M88	17	21	55	5	1	LA	1.9
LA88	19	20	41	16	4	LA	1.9
I89	14	18	38	25	4	LMS	1.7
B87 ₁	28	37	17	10	8	Calc.	1.4
B87 ₂	12	9	14	8	1		
CE87	18	31	44	4	3	LA	1.5
BM87	19	30	45	5	1	LA	-
HM87	20	22	37	19	1	LAS	-
POM88 ₁	27	33	11	9	20	Calc	1.0
POM88 ₂	13	3	7	5	3		
CE88	15	32	48	3	1	LM	1.9
LOR89	10	6	8	59	17	SL	1.8
BERT89	20					LA	-
BOI	27	28	36	6	2	LA	1.5

(*) : d'après le triangle de texture de l'Aisne (Annexe II)

O₁ : avant décalcification

O₂ : après décalcification

Sites	Teneur en Matières Organiques (%)	pH eau	CaCO3 total (%)	CaCO3 actif (%)	(en meq/100g sol)			
					CEC Metson	Ca éch	Mg éch	K éch
C87	1.3	7.6	0.4	-	6.6	12.8	0.27	0.26
CS87	1.3	7.6	0.4	-	9.9	26	0.5	0.37
CL87	2.1	8	5.7	-	10.8	40	0.37	0.46
CP87	1.7	7.2	0.8	-	9.2	13.6	0.46	0.54
E87	1.4	7.4	0	-	10.8	15.2	0.96	0.40
F87	1.6	6.6	0	-	6.5	6.6	0.41	0.62
I87	1.7	7.2	0	-	10.1	12.8	0.69	0.66
J87	"	"	"	"	"	"	"	"
LR88	1.3	8	1	-	4.6	17.6	0.23	0.32
LT88	1.9	7.9	19	-	8.6	36.9	0.36	0.40
AH88	1.3	7.5	1	-	10.7	15.4	0.99	0.41
AB88	1.2	7.9	0.9	-	6.8	16.3	0.29	0.36
E88	1.7	7.6	1	-	11.9	17.8	0.42	0.26
S88	1.5	8.1	2	-	4.8	25.1	0.32	0.42
SB88	1.3	8.2	3.2	-	3.8	29.1	0.33	0.59
D88	1.5	7.8	0.5	-	7	13	0.2	0.71
P88	1.6	8	1.5	-	7.3	25.4	0.42	0.44
M88	1.8	7.9	0.3	-				
LA88	1.4	7.4	0	-	10.1	11.3	0.72	0.37
I89	1.7	7.5	0	-	10	13.6	0.72	0.55
B87	2.4	8.2	55	25	7.7	38.1	0.69	0.88
CE87	1.5	7	0	-	9.5	10.6	0.53	0.35
BM87	1.9	6.6	0	-	10.4	11.3	0.78	0.54
HM87	1.8	7.1						
POM88	3.6	8.2	69	30	7.3	36	1.05	0.94
CE88	1.2	6.9	0	-	7.4	7.9	0.52	0.31
LOR89	1.3	8	0.8	-	6.9	15.3	0.31	0.53
BERT89								
BOI	1.8	7.2	0.4	-	15.2	16	0.79	0.69

BOI :

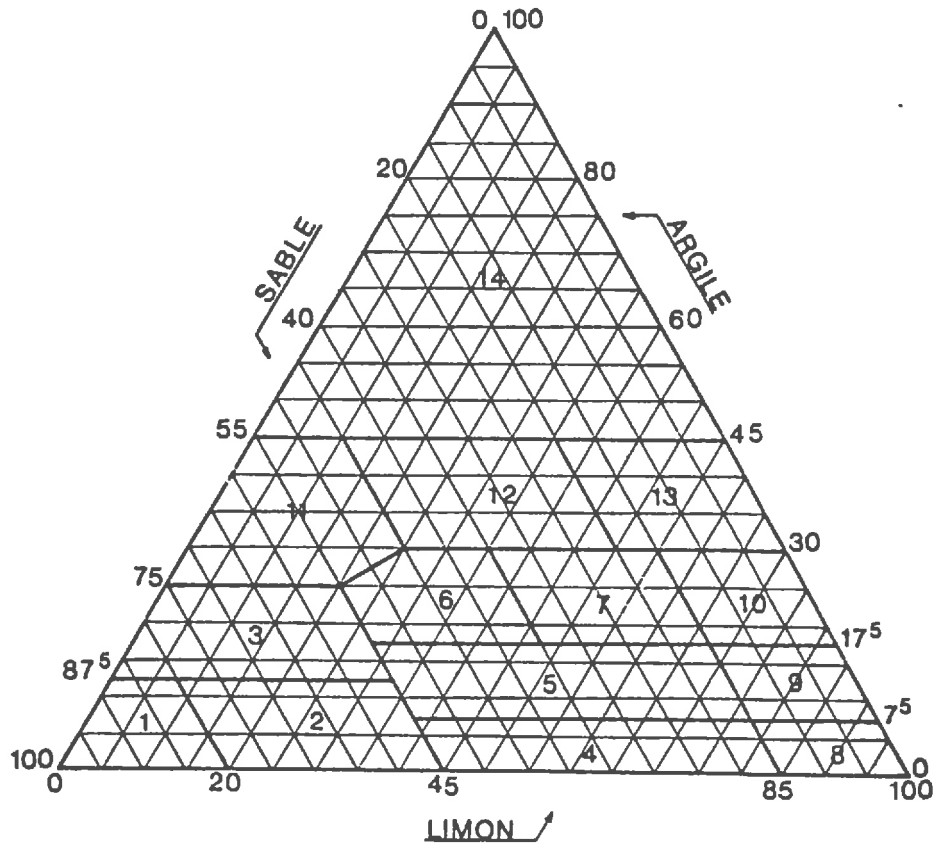
site pour lequel il n'y a pas eu d'essai de terrain, seulement un prélèvement de sol pour les études de stabilité d'agrégats de la Partie III.

ANNEXE II

TRIANGLE DE TEXTURE DE L' AISNE

**Diagramme granulométrique
déterminant les classes de textures**

(d'après la carte des
sols de l'Aisne)

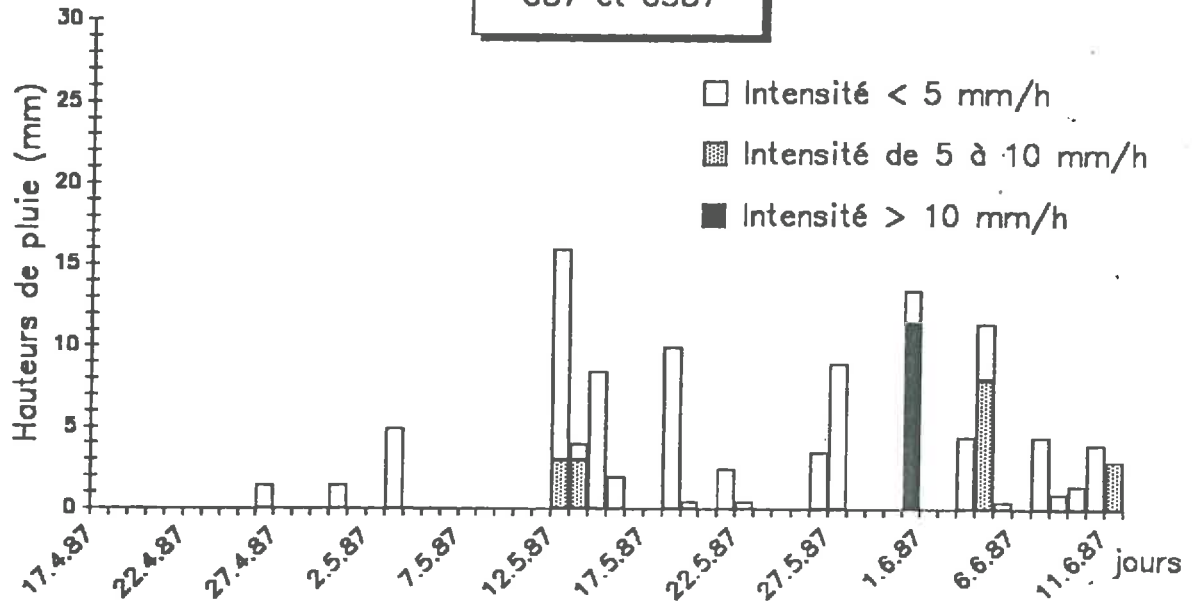


- | | |
|-------------------------|----------------------|
| 1_ Sable | 8_ Limon léger |
| 2_ Sable limoneux | 9_ Limon moyen |
| 3_ Sable argileux | 10_ Limon argileux |
| 4_ Limon léger sableux | 11_ Argile sableuse |
| 5_ Limon moyen sableux | 12_ Argile |
| 6_ Limon sablo-argileux | 13_ Argile limoneuse |
| 7_ Limon argilo-sableux | 14_ Argile lourde |

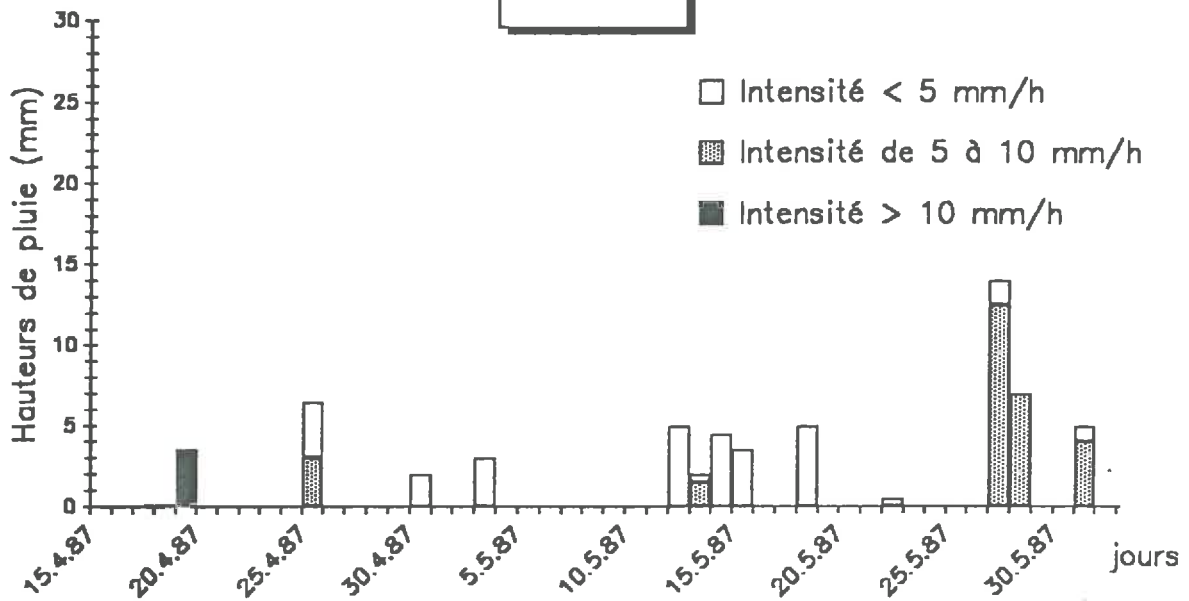
ANNEXE III

**HISTOGRAMMES DE PLUIES JOURNALIERES
SUR LES SITES ETUDIES**

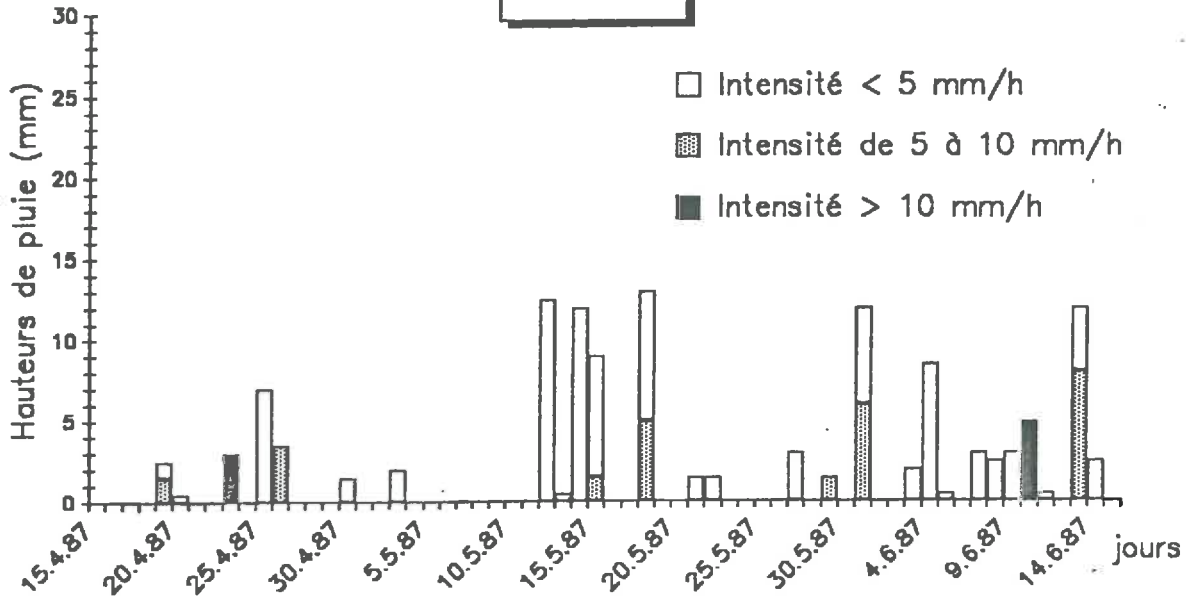
C87 et CS87



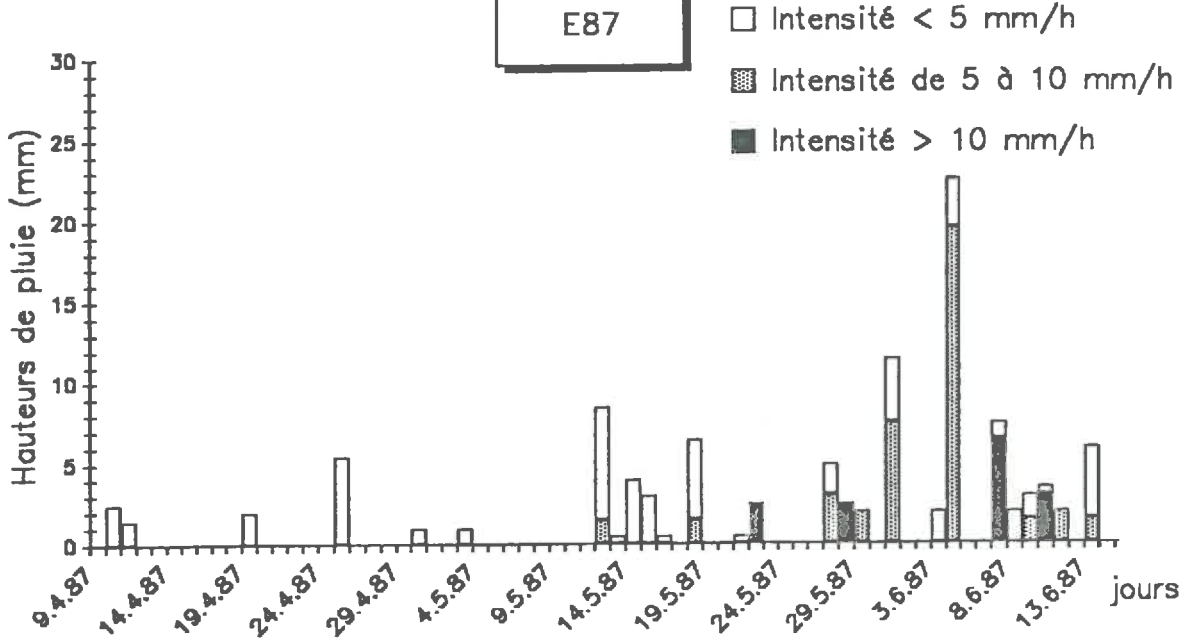
CL87

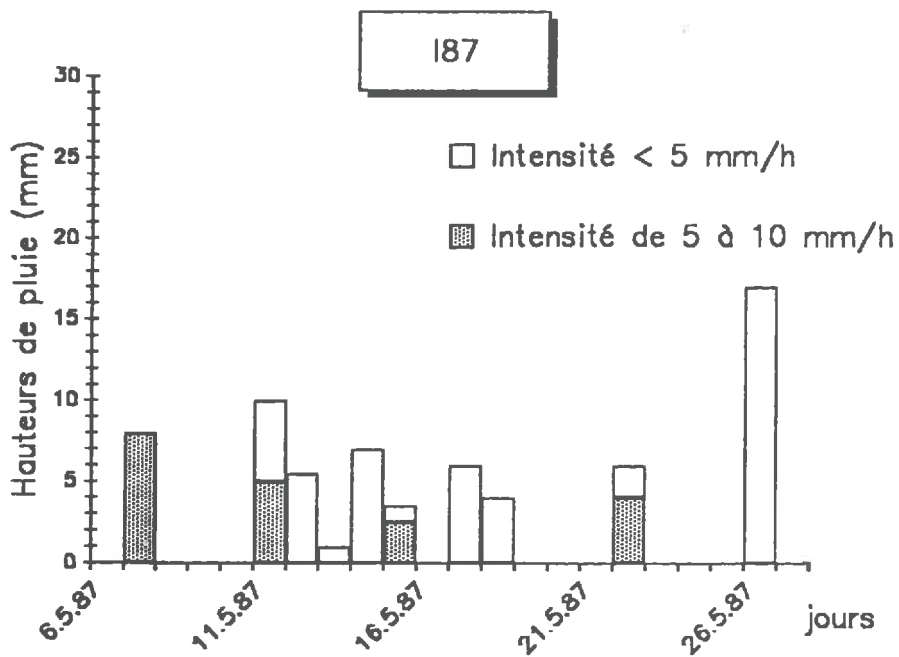
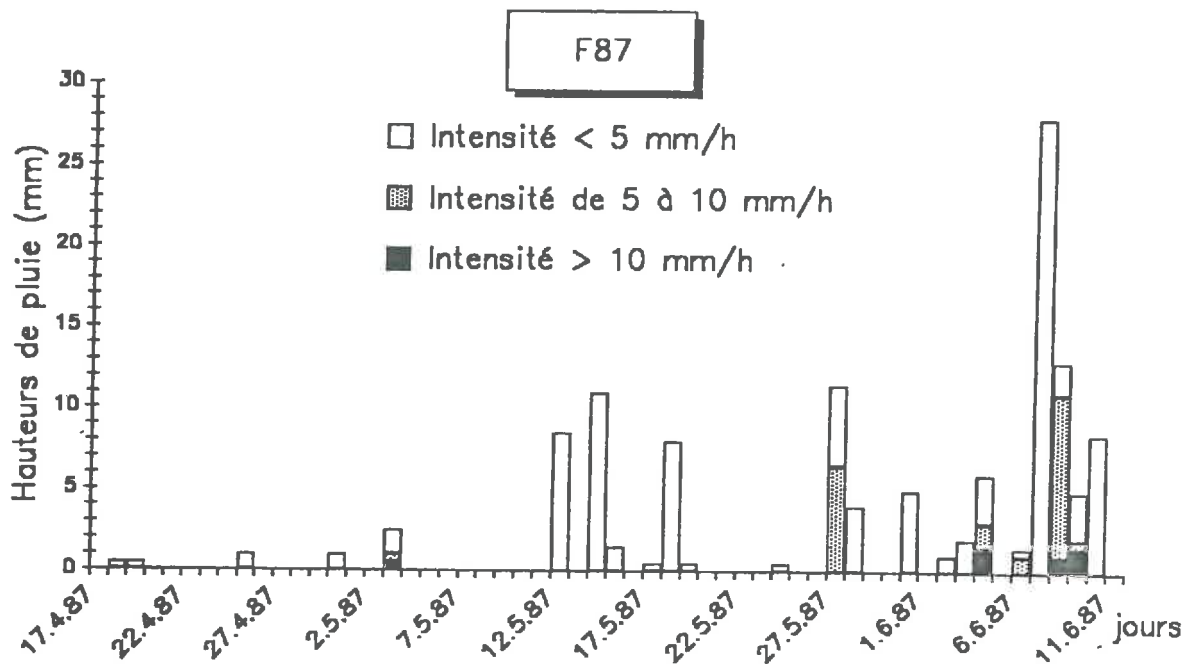


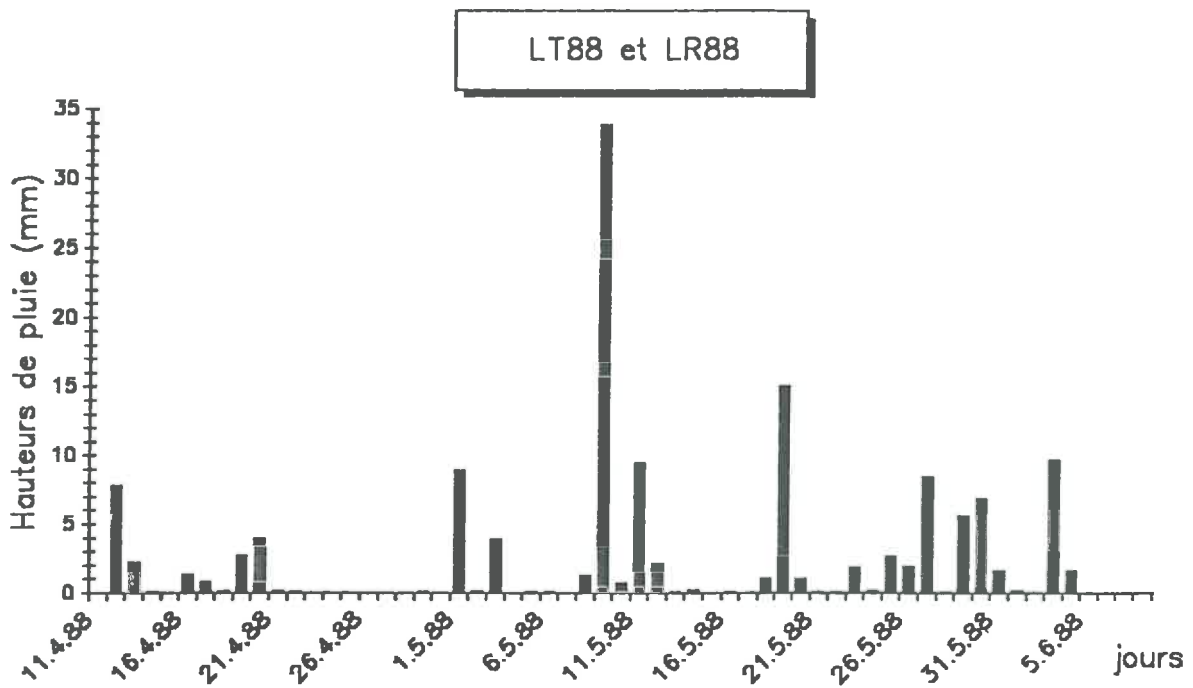
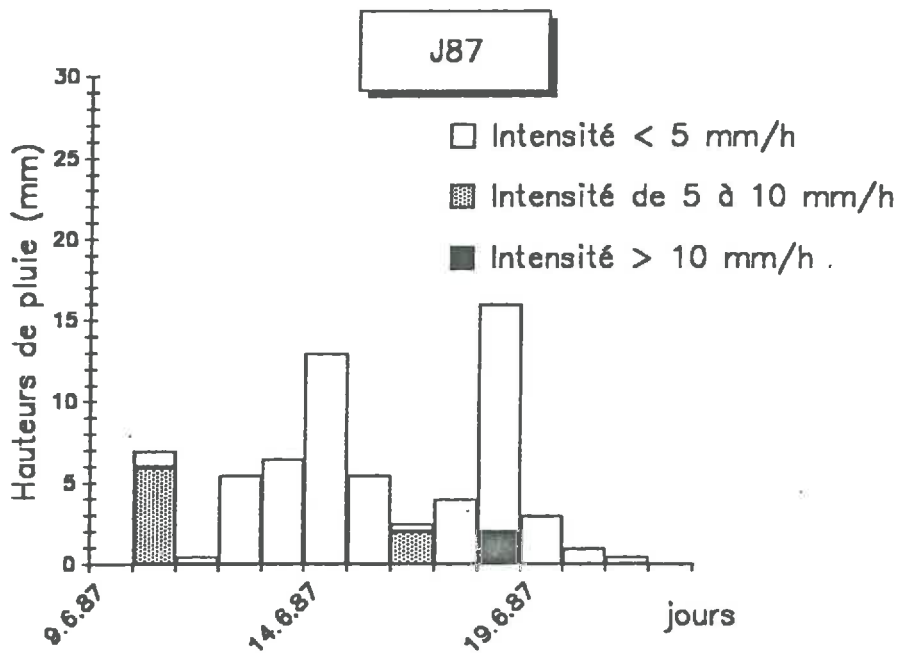
CP87

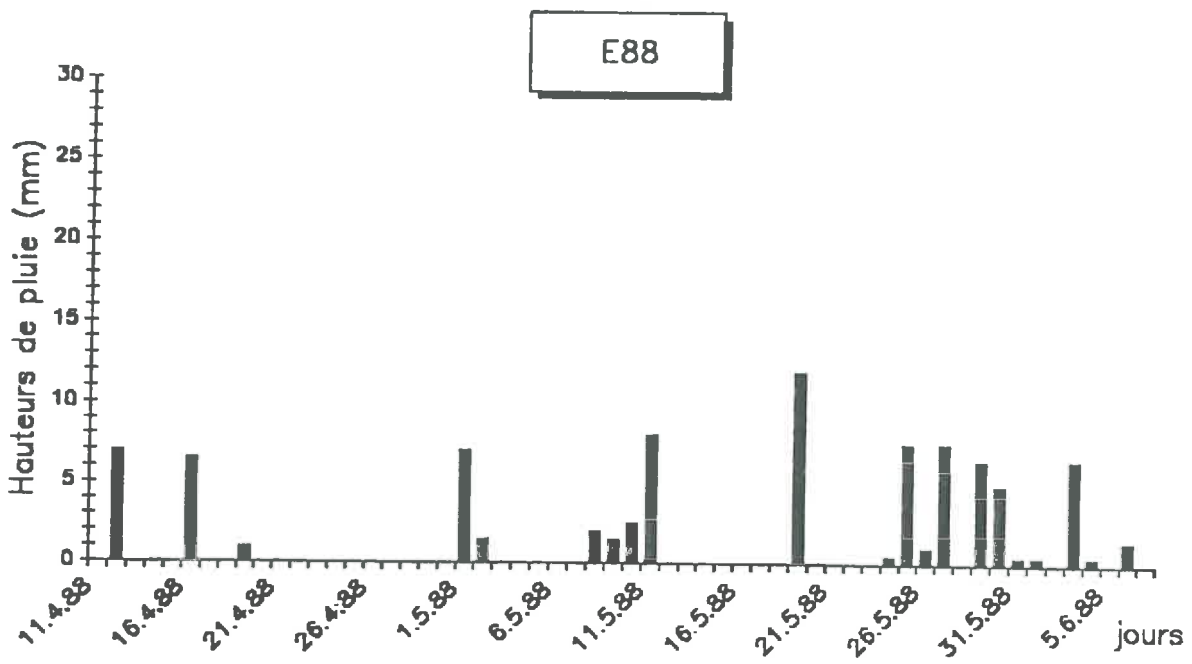
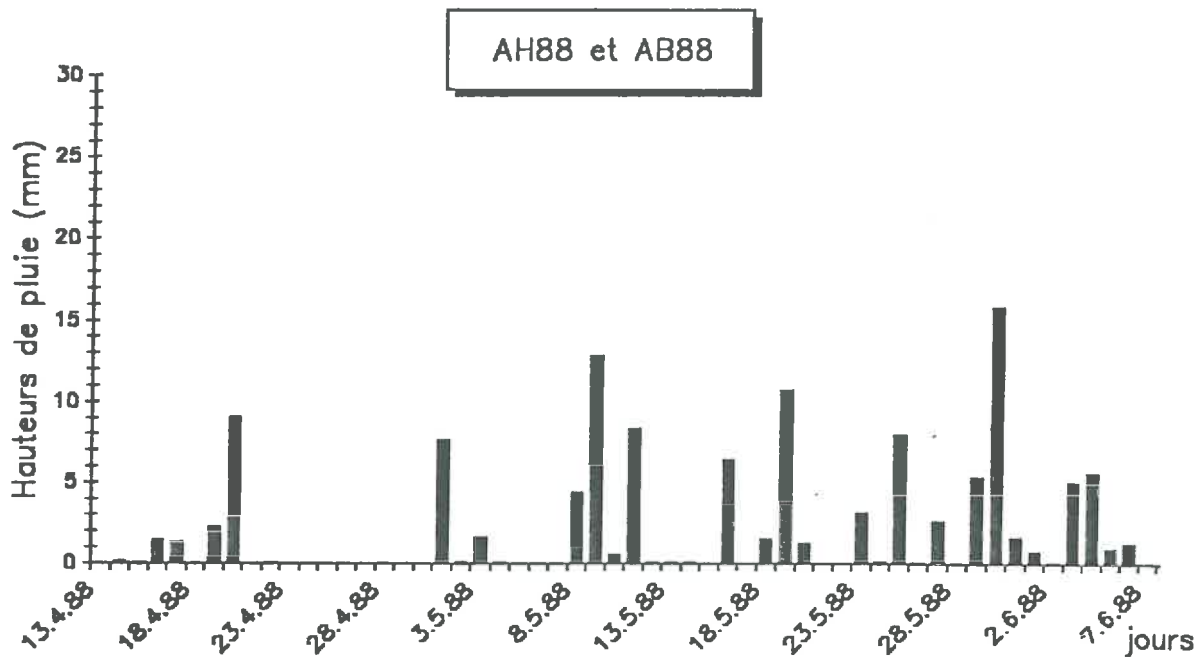


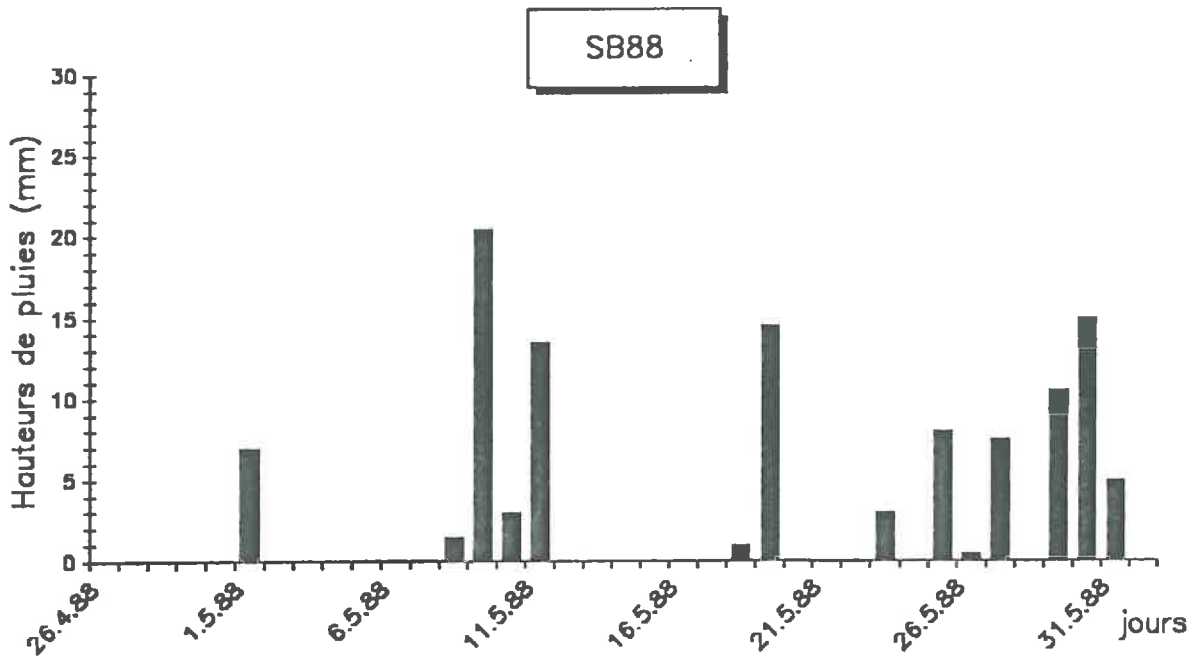
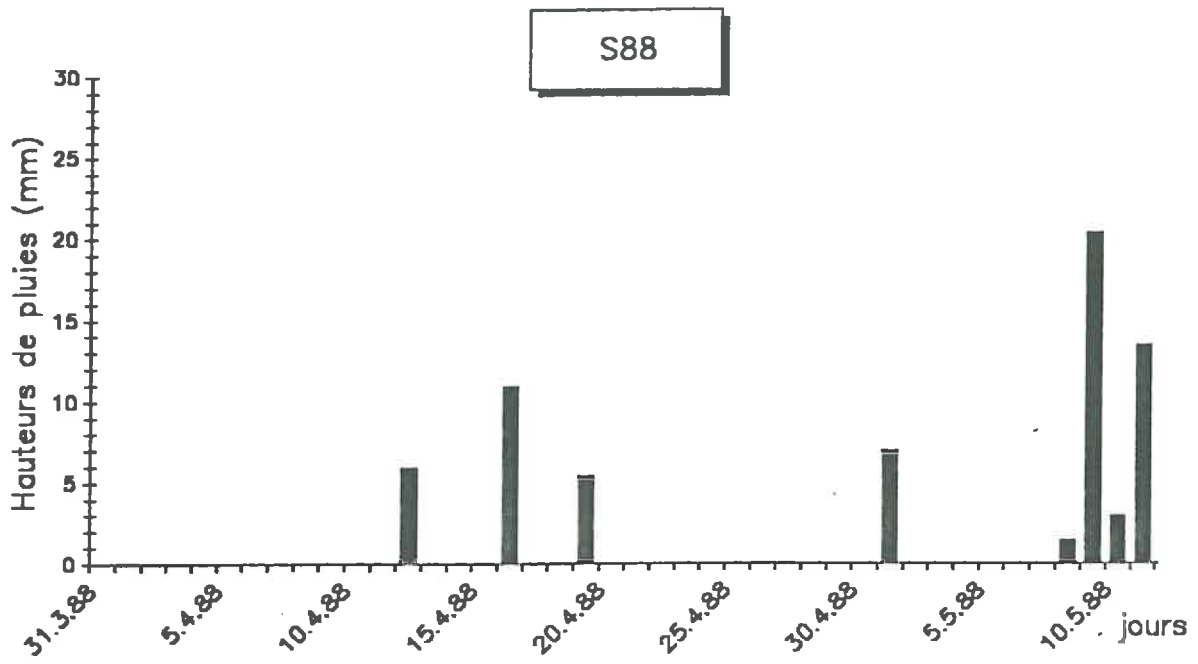
E87

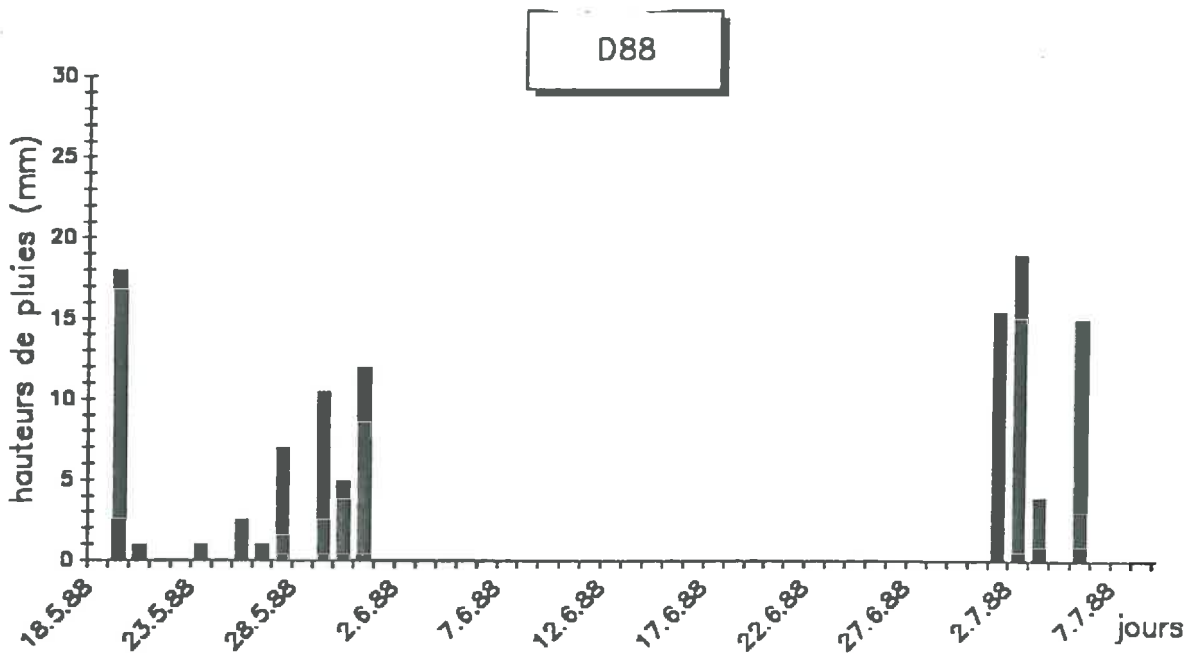
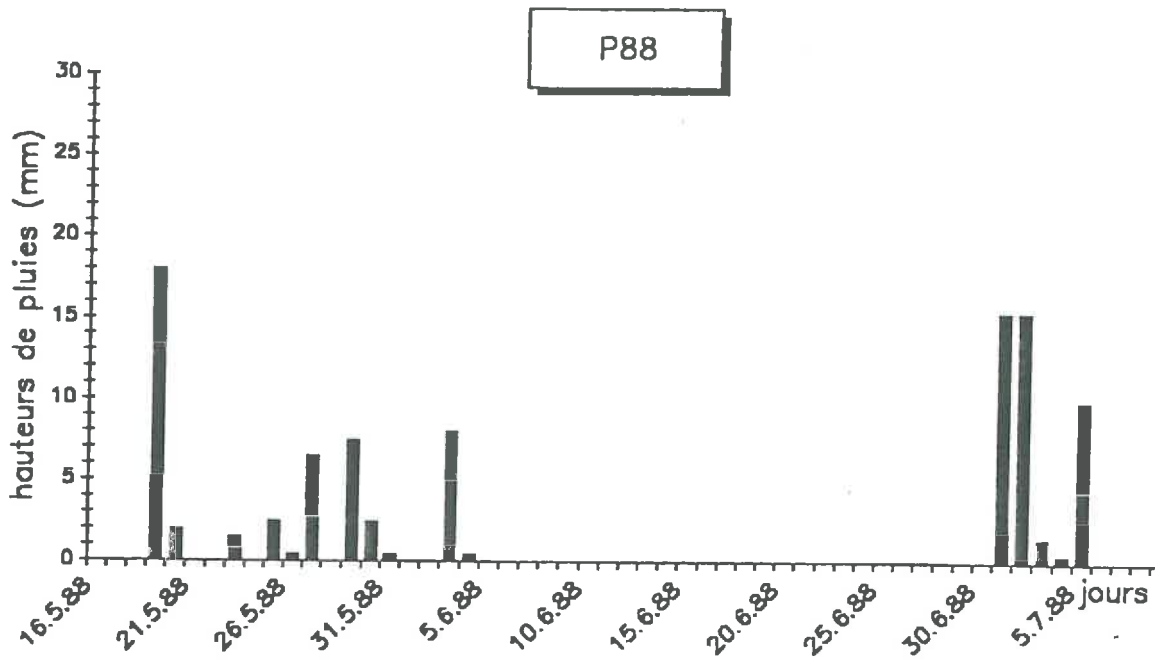


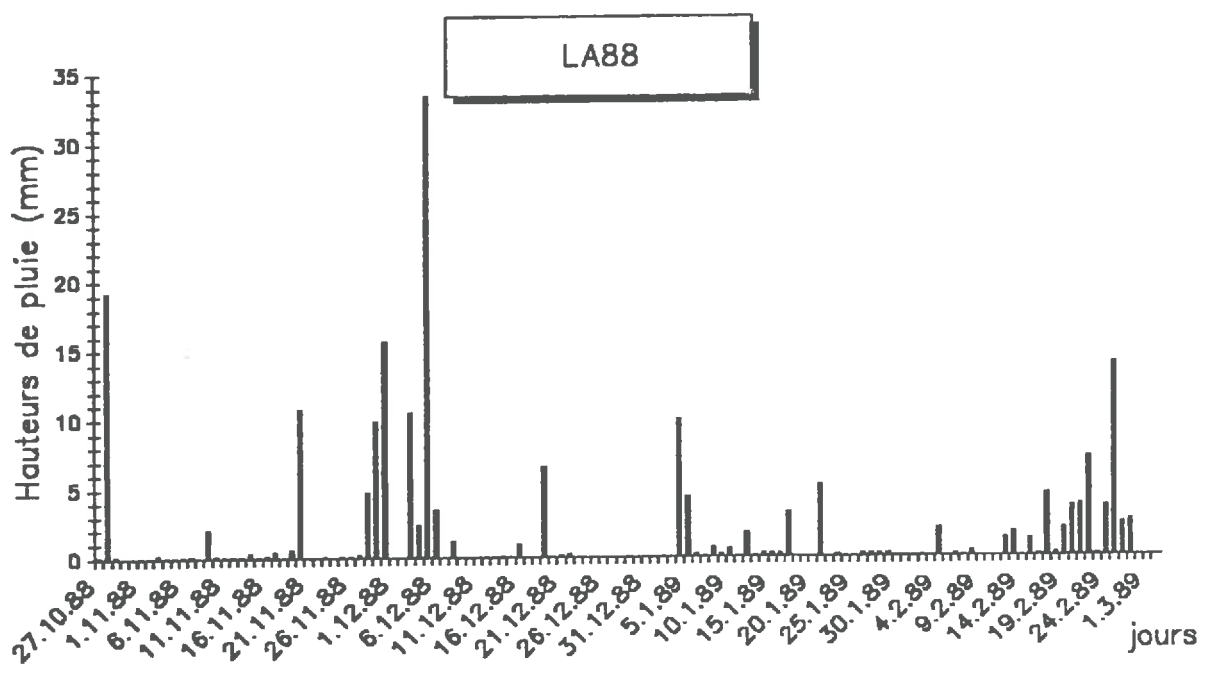
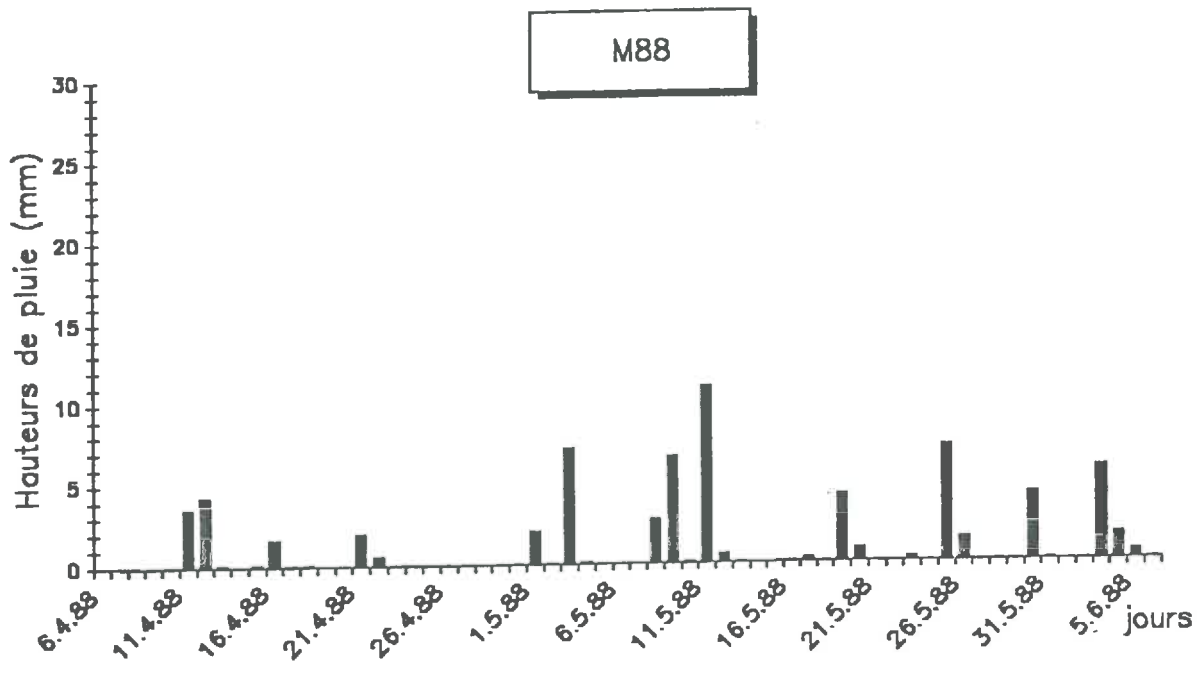


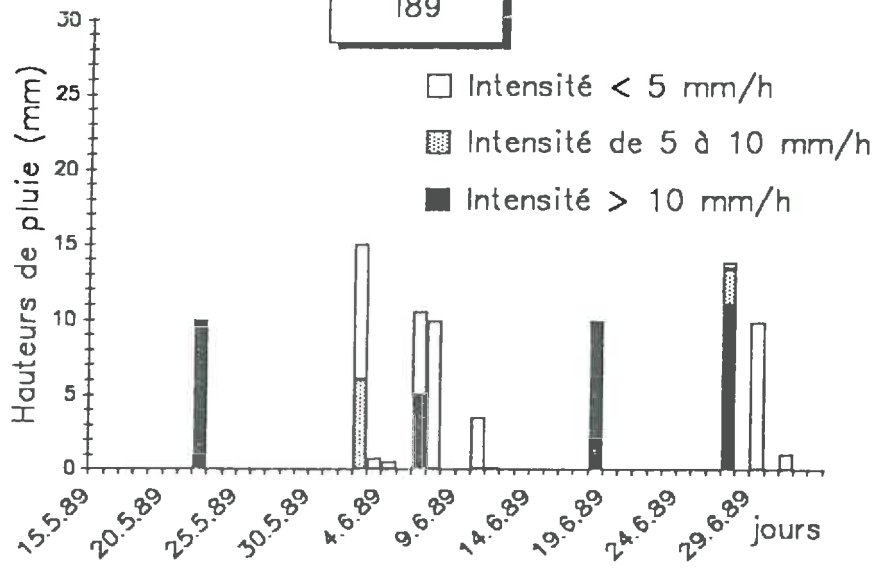


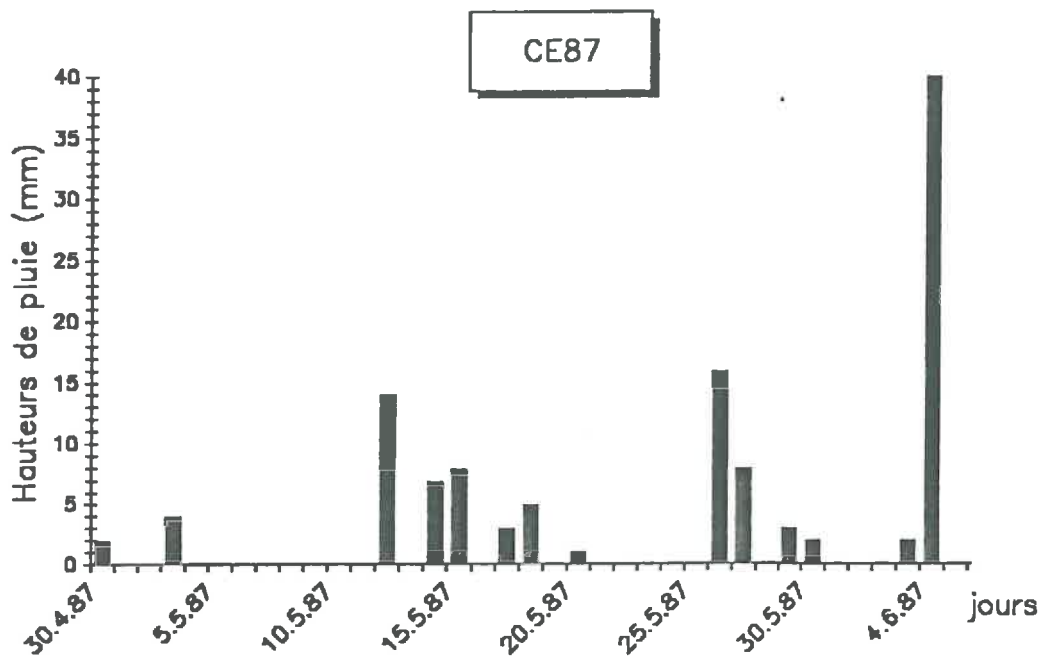
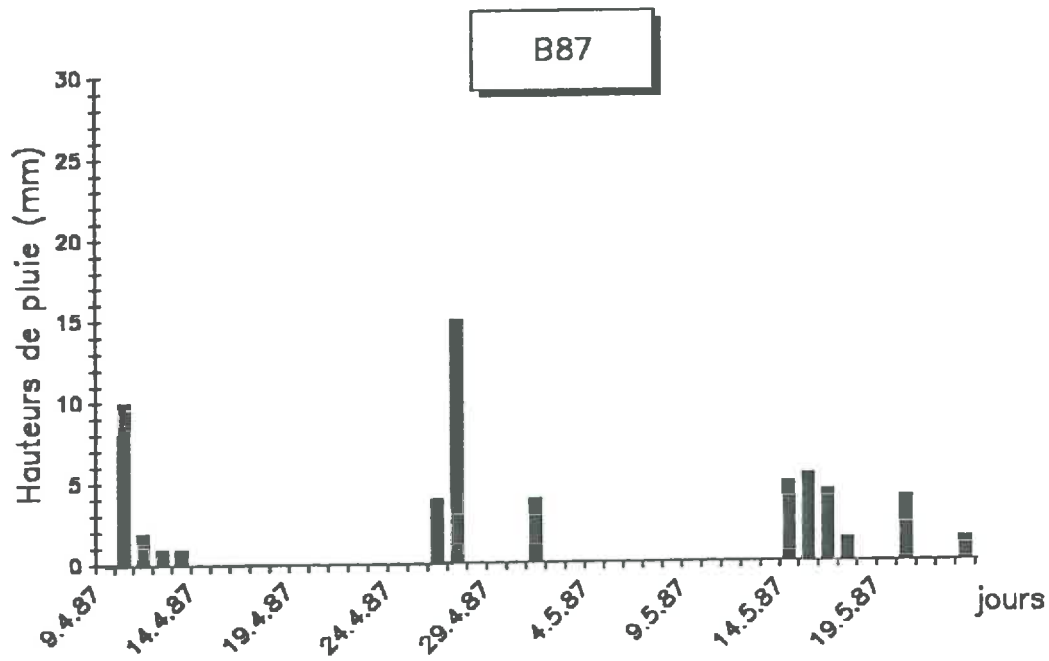


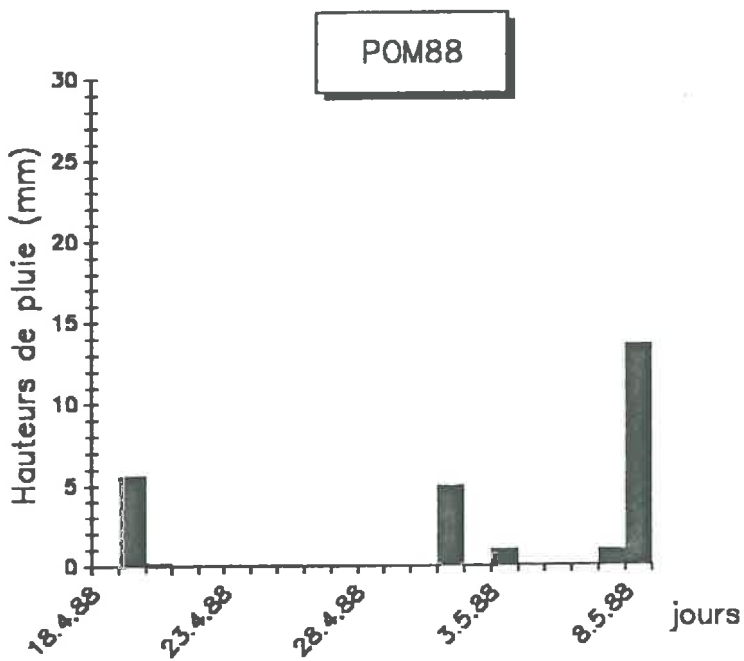
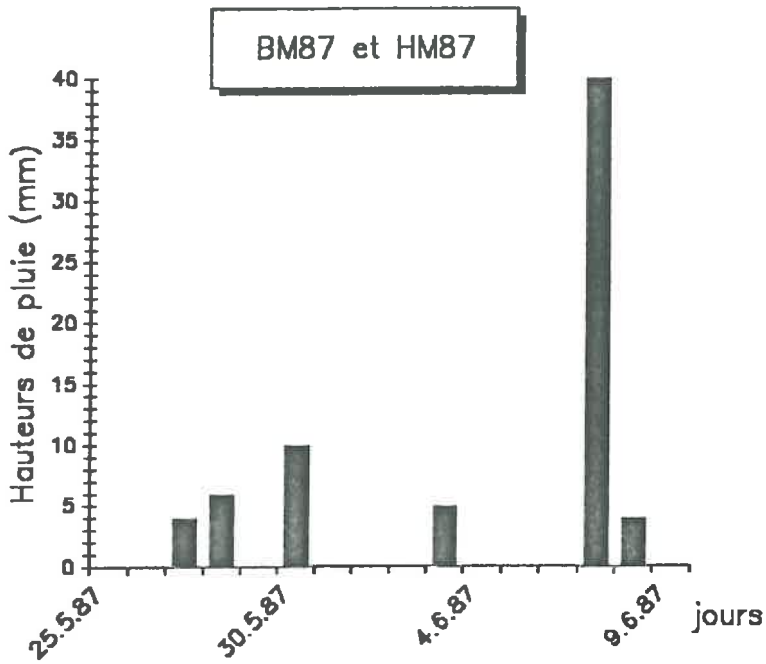


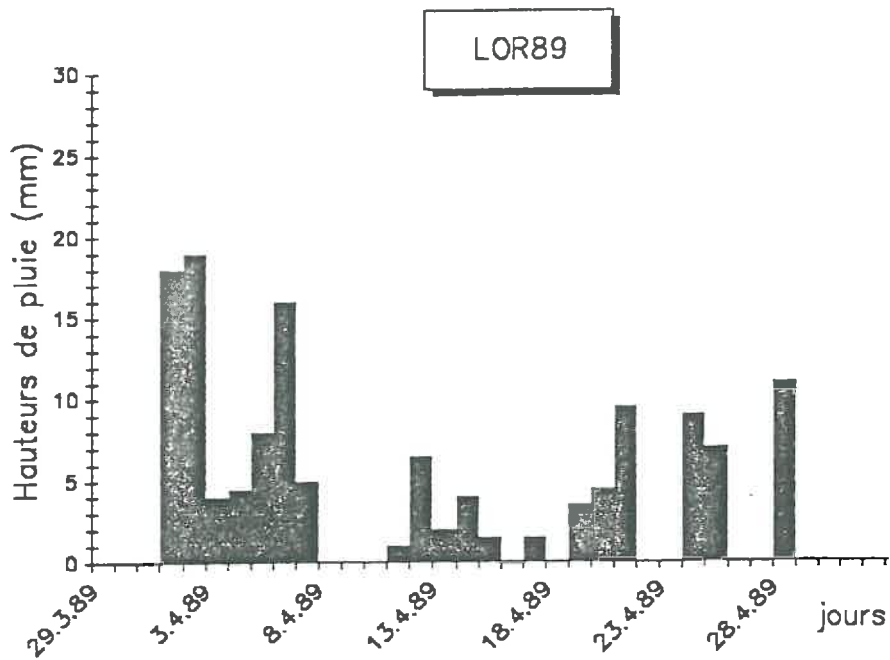
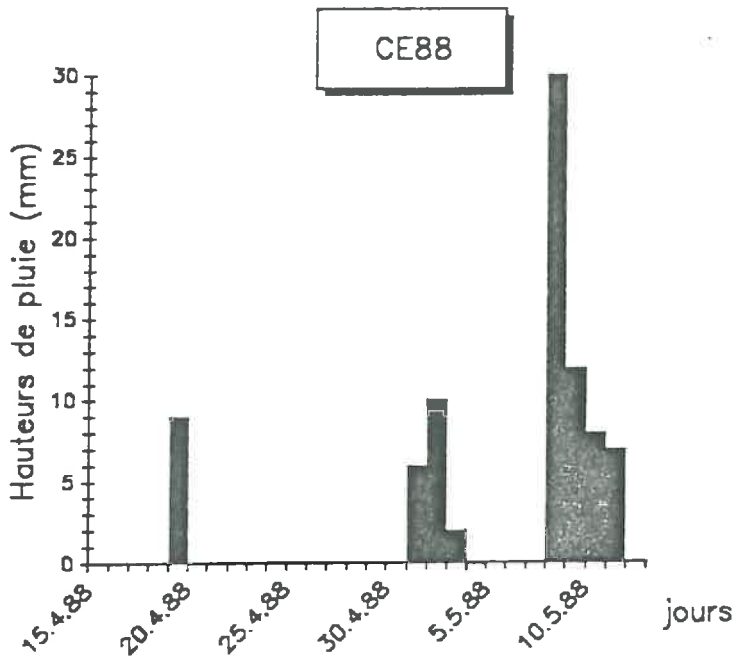












ANNEXE IV

DONNEES CONCERNANT LES CONDITIONS INITIALES DES SITES

HUMIDITE DE LA SURFACE DU SOL A LA PULVERISATION
ETAT GRANULOMETRIQUE INITIAL

Données concernant
l'humidité avant la pulvérisation du conditionneur
et
l'état granulométrique initial des surfaces des placettes
sur les sites lors des essais de terrain

Sites	Humidité pondérale de la surface du sol avant la pulvérisation du conditionneur (%)	Etat granulométrique initial des placettes (fin ou grossier)
C87	3	FG
CS87	3	FG
CL87	2	FG
CP87	1.5	FG
E87	4.5	F
F87	-	FG
I87	3	F
J87	-	F
LR88	-	F
LT88	-	G
AH88	4	G
AB88	5	G
E88	2.5	FG
S88	1.5	F
SB88	1	F
D88	4	F
P88	1.5	F
M88	1.5	FG
LA88	14	G
I89	-	FG
B87	15	G
CE87	8	G
BM87	-	FG
HM87	-	FG
POM88	10	FG
CE88	4	FG
LOR89	1.5	F
BERT89	-	FG

Etat granulométrique initial :

G (grossier) : le taux d'éléments de taille inférieure à 2 mm représente au maximum 20 % de la couverture de la surface des placette ;

F (fin) : le taux d'éléments de taille inférieure à 2 mm représente au minimum 50 % de de la couverture de la surface des placettes ;

FG (intermédiaire) : une large gamme d'éléments couvre la surface.

ANNEXE V

COURBES D'EVOLUTION DU D_{min}
EN FONCTION DE LA PLUIE CUMULEE

