

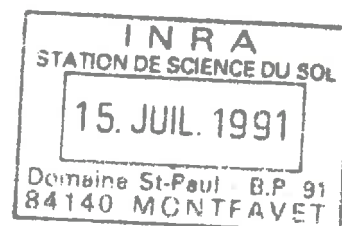
Yves LE BISSONNAIS

D. E. A.

TH - RC 10  
G42

UNIVERSITE D'ORLEANS

Ecole Supérieure de l'Energie  
et des Matériaux



ETUDE EXPERIMENTALE DE L'INFLUENCE DES CONDITIONNEURS DE SOL  
SUR LA MICRO-ORGANISATION ET LES PROPRIETES PHYSIQUES  
DES ARGILES ET DES SOLS

Travail effectué à la Station  
de Science du Sol  
I.N.R.A. - Versailles.

Sous la direction de Michel ROBERT

Mars-Septembre 1985

-----

## AVANT-PROPOS

Le travail a été réalisé dans le cadre de la station de Science du Sol de l'I.N.R.A. à Versailles.

Les essais avec le simulateur de pluie ont eu lieu au service de Cartographie des Sols d'Orléans.

Je tiens à remercier Messieurs M. ROBERT et F. LELONG de m'avoir permis d'effectuer cette étude, Monsieur R. DARTHOUT qui a été à l'origine de l'utilisation du simulateur de pluie, Madame C. NOUGAREDE pour la dactylographie, ainsi que toutes les personnes des Stations de l'I.N.R.A. de Versailles et d'Orléans qui m'ont aidé et encouragé.

Ce travail a été l'occasion d'un premier contact avec les Sociétés C.E.C.A. et ATOCHEM. Je les remercie, et en particulier Monsieur D. PLEE, de leur collaboration.

## **INTRODUCTION**

### **DEFINITION**

On appelle conditionneur de sol, toute substance naturelle ou synthétique, organique ou minérale, qui ajoutée aux sols en petite quantité améliore leurs propriétés physiques : stabilité structurale et propriétés hydriques en particulier (DE BOODT, SCHAMP, GREENLAND).

Cette définition recouvre une gamme très large de produits dont la nature, le rôle et le mode d'action varient considérablement.

Dans cette étude, nous nous intéresserons plus particulièrement à des conditionneurs susceptibles d'être utilisés en agriculture pour améliorer la stabilité structurale de la surface du sol.

### **ACTUALITE DU PROBLEME**

L'utilisation de conditionneurs de sols est liée à la nécessité d'améliorer la productivité agricole, de mettre en culture des sols de propriétés physiques défavorables et de lutter contre la dégradation et l'érosion des sols consécutives à l'intensification de l'agriculture.

Depuis les premiers essais d'utilisation de conditionneurs dans les années 50, ces problèmes se posent de manière de plus en plus aiguë, et les obstacles à un développement de leur utilisation, qui étaient leur coût élevé et le manque de connaissances sur leur mode d'action, disparaissent peu à peu aujourd'hui.

### OBJECTIFS DE L'ETUDE

Devant la relative pauvreté de travaux sur les conditionneurs, en particulier en France, une revue bibliographique sur les différentes recherches et utilisations des conditionneurs est un préalable indispensable à toute étude.

Nous nous proposons ensuite d'étudier une large gamme de produits, d'une part au laboratoire sur des suspensions d'argile constituant une sorte de modèle, et d'autre part en testant leur influence sur la stabilité structurale d'un sol sensible à la dégradation.

### CONTEXTE DE L'ETUDE

La station de science du sol de Versailles a développé depuis quelques années une méthodologie pour étudier l'organisation des matériaux argileux. Il s'agit en particulier des dispositifs de mise à pF, et du microscope électronique à balayage équipé du Cryoscan permettant d'observer les échantillons à une contrainte hydrique donnée (TESSIER et BERRIER, 1979).

De nombreux travaux concernant l'étude des interactions entre argiles et composés organiques ou minéraux, ont été

effectués en utilisant cette méthodologie (ROBERT et al. 83).

La première partie de notre travail expérimental relative aux interactions entre argile et conditionneurs de sols s'inscrit donc logiquement dans ce contexte.

L'autre partie, consacrée au rôle des conditionneurs sur les propriétés structurales d'un sol est à rattacher aux travaux de BOIFFIN (1984), ainsi qu'aux études sur le comportement de la surface du sol utilisant un simulateur de pluie.

## PREMIERE PARTIE

### HISTORIQUE DE L'UTILISATION ET DES RECHERCHES

#### SUR LES CONDITIONNEURS DE SOL

##### A - HISTORIQUE

On ne parle de conditionneurs ou stabilisateurs de sol que depuis une quarantaine d'années, mais "le conditionnement des sols est aussi vieux que l'agriculture", (DE BOODT), "depuis le moment où les premiers nomades se sont installés en Mésopotamie et ont choisi une terre à cultiver, ils ont changé les propriétés physiques du sol.

Lorsqu'ils ont compris que le rendement était d'autant plus élevé que la préparation du sol était bonne, alors le conditionnement du sol était né" DE BOODT (1976).

Dans le même ordre d'idée, on peut considérer que de nombreuses pratiques agricoles anciennes ou modernes contribuent au conditionnement des sols : l'enrichissement du sol en matière organique limite la dégradation de la surface des sols (BOIFFIN et SEBILLOTTE, 1976), de même, certains amendements : chaulage, gypsage peuvent améliorer les propriétés physiques des sols en même temps que leurs propriétés chimiques. Ainsi, la plupart des agriculteurs ont pratiqué et pratiquent le conditionnement des sols.

Cependant, aujourd'hui et depuis quelques dizaines d'années, l'explosion démographique, la diminution des terres susceptibles d'être mises en culture et l'intensification de l'agriculture un peu partout dans le monde font que la "pression" sur les sols est de plus en plus forte et qu'une meilleure utilisation des sols s'impose.

Entre 1958 et 1972 la surface des terres arables a augmenté de 7 % pendant que la population mondiale augmentait de 30 %.

L'augmentation de production agricole a été obtenue en particulier par l'irrigation des terres, par l'utilisation massive d'engrais, par l'utilisation de semences sélectionnées, de pesticides, mais le conditionnement des sols avec des polymères organiques ou minéraux pourrait désormais jouer un rôle dans l'amélioration des propriétés physiques des sols et la lutte contre leur dégradation.

Ce thème a préoccupé un nombre croissant de chercheurs depuis le début des années 50, en particulier aux Etats Unis, en Australie et en Belgique.

En France le problème est particulièrement critique en zones de grandes cultures sur limons (Bassin Parisien, Aquitaine et Massif Armoricain). Pour la betterave, par exemple, plus de 20 000 ha sont concernés. (DE BOODT )

Le premier conditionneur de sol, le Krilium, a été lancé sur le marché par la compagnie Monsanto en 1951. Mais après une période de vif intérêt, le coût élevé du produit et le manque de connaissances sur ses interactions avec le sol l'ont fait abandonner.

Vingt ans plus tard, un regain d'intérêt se développe et quatre congrès se sont tenus entre 1972 et 1976 au sujet des conditionneurs. Les polymères synthétiques sont devenus moins chers, et surtout de nouveaux produits sont apparus sur le marché.

De nombreuses applications sont maintenant envisageables, et il s'agit donc surtout de faire les expérimentations nécessaires, à la mise au point des utilisations les plus intéressantes de ces conditionneurs.

## B - LES DIFFERENTS CONDITIONNEURS ET LEURS UTILISATIONS

### Nature des conditionneurs

A l'état naturel, la stabilité des sols est assurée par la présence de matières humiques, qui sont un mélange de polymères organiques issus de la dégradation des végétaux ou de sécrétions animales, ainsi que par les oxydes et hydroxydes de Fer et d'Aluminium.

Il est logique que la recherche de produits conditionneurs s'inspire de la nature et de la composition chimique de ces "conditionneurs" naturels.

Il s'agit donc essentiellement de polymères, mais dont les propriétés chimiques, et par suite les modes d'actions, sont assez variables. En particulier, ils peuvent être neutres et former des liaisons avec les particules du sol par l'intermédiaire de ponts hydrogènes et des forces de Van der Waals, ou au contraire, être chargés et créer directement des liaisons électrostatiques avec les surfaces chargées des argiles, s'ils sont cationiques, ou avec les cations divalents ou trivalents adsorbés sur les argiles, s'ils sont anioniques (SCHAMP, 1975 ; DE BOODT, 1980).

### Choix des conditionneurs

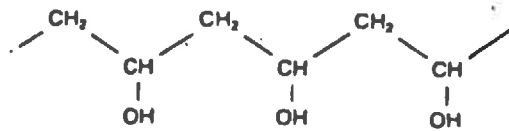
On peut établir une liste de critères pour le choix d'un conditionneur : (SCHAMP, 1975) :

- Le composé doit avoir de bonnes propriétés d'adsorption ou d'adhésion vis-à-vis des particules du sol.
- Les agrégats d'un sol traité doivent être stables dans l'eau.
- Le mode d'application doit être de préférence facile à

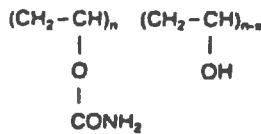


PRINCIPAUX CONDITIONNEURS CONNUS SUR LE MARCHÉ (d'après DE BOODT)

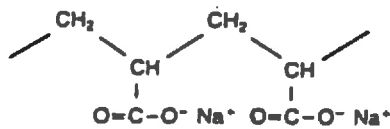
A. Polymers soluble in water: hydrophilic soil conditioners



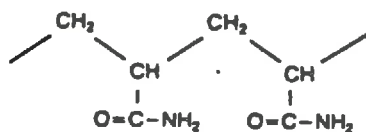
Polyvinyl alcohol (PVA)



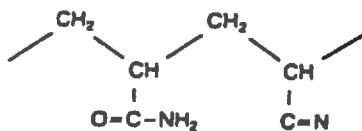
Polyvinyl alcohol, urethanised (PVAu)



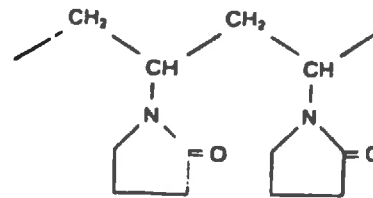
Sodium polyacrylate (SPA)



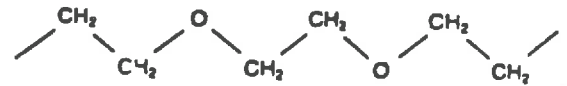
Polyacrylamide (PAM)



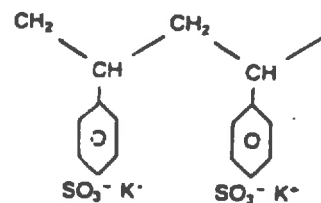
Partially hydrolysed polyacrylonitrile (HPAN)



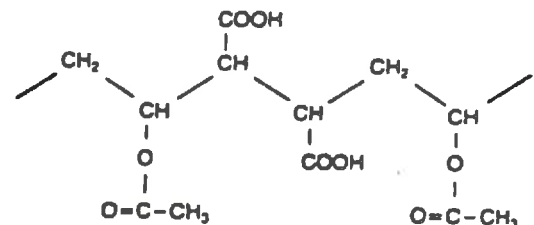
Polyvinylpyrrolidone (PVP)



Polyethyleneglycol (PEG)

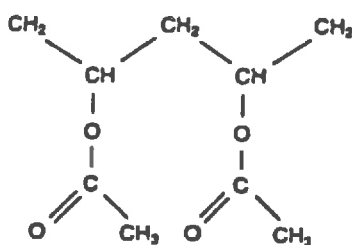


Potassium polystyrenesulphonate (PS)

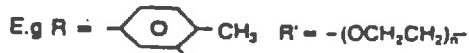
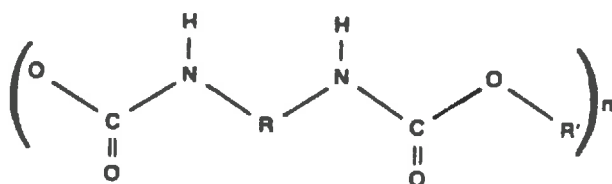


Vinylacetate maleic acid (VAMA) copolymer

B. Polymers emulsifiable in water: hydrophobic soil conditioners



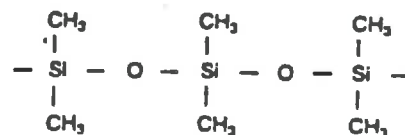
Polyvinylacetate (PVAc)



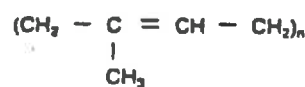
Polyurethane



Polybutadiene (BUT)



Polysiloxane



Natural rubber latex

Asphalt (bitumen)

mettre en oeuvre : par exemple pulvérisation d'émulsions ou de suspensions.

- Les produits ne doivent pas être phytotoxiques.
- La durée de vie des produits dans le sol doit être connue.
- Le prix doit évidemment être le plus bas possible.

Mais il s'agit là de critères d'ordre général et la difficulté réside dans le fait que chaque problème de dégradation des sols est différent et nécessite une recherche spécifique, et de plus l'expérimentation en laboratoire ne permet pas toujours une extrapolation au champ.

Le choix d'un conditionneur doit donc se faire en fonction du problème posé et de la nature du sol : il n'y a pas de conditionneurs universels.

#### Propriétés et rôles des conditionneurs

L'amélioration des propriétés structurales d'un sol implique que les plus petites particules soient rassemblées en agrégats suffisamment stables à l'action de la pluie, des pratiques agricoles et des eaux drainant le sol.

Ceci ne peut se produire que par l'un des deux processus suivants :

- "en provoquant l'agrégation des particules d'argile entre elles et avec les autres particules,

- en ajoutant au sol des substances fibreuses qui peuvent par adhésion à de nombreuses particules les relier entre elles.

La floculation des particules par des solutions salines n'est pas suffisante car elle est réversible, mais elle crée des conditions favorables à une agrégation par un conditionneur" (HALLWORTH, 1976).

Un rôle fondamental des conditionneurs est donc bien de provoquer, et surtout de stabiliser l'agrégation des particules du sol.

Une autre propriété des conditionneurs joue un rôle dans le traitement des sols, c'est le caractère hydrophile ou hydrophobe des produits. Cet aspect est important, car il détermine en partie, avec la granulométrie, les mouvements de l'eau dans les sols : infiltration et évaporation. Et là, deux types de conditionneurs peuvent être envisagés : ceux qui améliorent l'infiltration de l'eau dans les sols et ceux qui limitent l'évaporation. On a ainsi l'exemple de 2 utilisations aux objectifs opposés pour des conditionneurs aux propriétés radicalement différentes.

DE BOODT a effectué une revue des différentes utilisations possibles des conditionneurs en agriculture :

- L'amélioration de la germination et de la levée des semences, en luttant contre la formation des croûtes de battance.

- la lutte contre les conditions arides, il s'agit à la fois de limiter le ruissellement en améliorant l'infiltration lorsqu'il pleut, et de lutter contre l'évaporation de l'eau du sol par capillarité.

- L'accroissement de la percolation des eaux de pluie, en particulier dans les sols argileux et pour les tranchées de drainage (DIERICK, 1976). Cela passe par l'agrégation stable des particules fines du sol.

- La lutte contre l'érosion, en empêchant le ruissellement qui entraîne les éléments du sol, mais aussi les engrais le long des pentes, provoquant à la fois dégradation des sols et pollutions.

## C - ETAT DE LA RECHERCHE SUR LES CONDITIONNEURS

On peut distinguer deux catégories de recherches : les unes portant sur des aspects fondamentaux et théoriques du conditionnement, les autres plus appliquées, ayant pour but l'utilisation de conditionneur dans une situation donnée.

Il faut également considérer les travaux qui traitent de problèmes liés au conditionnement : stabilité structurale des sols, érosion, mouvements de l'eau dans la couche superficielle du sol etc...

### 1/ - Recherches théoriques et fondamentales.

Les études effectuées ne portent pas sur un très grand nombre de produits. Beaucoup de conditionneurs ont été mis sur le marché sans que des études théoriques n'aient été faites à leur sujet ; on s'est le plus souvent attaché à démontrer qu'ils étaient efficaces dans certaines situations en appliquant la bonne recette.

THENG (1982) a effectué une synthèse des connaissances sur les interactions entre argiles et polymères.

On sait que la majorité des sols possède un complexe entre argile et substances humiques (complexe argilo-humique). Qu'en est-il en ce qui concerne les polymères synthétiques neutres ou chargés ?

L'adsorption d'un polymère neutre sur une argile passe par la désorption de molécules d'eau de la surface. Ce phénomène entraîne une augmentation de l'entropie du système. Au total, l'énergie d'adsorption est élevée à cause du nombre important de segments du polymère liés à la surface de l'argile. Il s'agit d'une adsorption à haute affinité et virtuellement irréversible, à cause de la faible probabilité pour que l'ensemble des segments d'une chaîne se détachent en même temps.

INTERACTIONS POLYMERES-CONSTITUANTS MINERAUX DU SOL

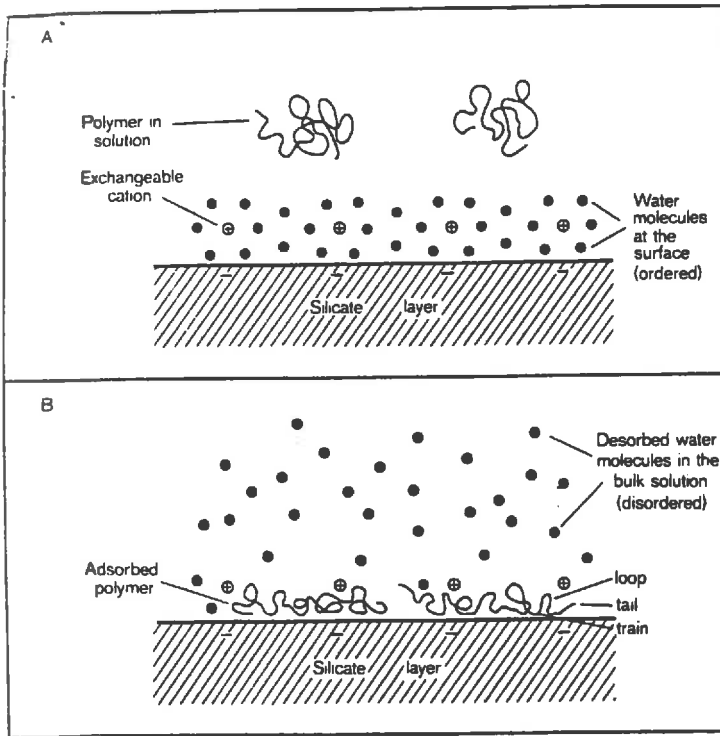
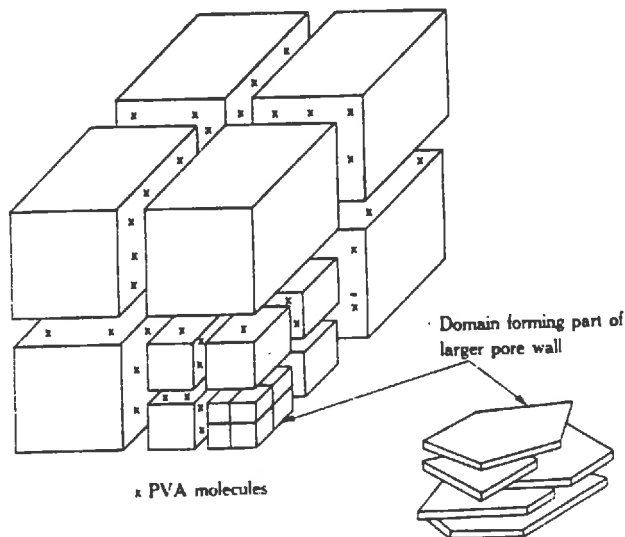


Diagram illustrating the desorption of numerous water molecules from the clay surface during the adsorption of a single uncharged polymer molecule. The change in polymer conformation on adsorption is also indicated.

(THENG)



—A model of soil aggregate structure and the location of adsorbed PVA.

(WILLIAMS, GREENLAND & QUIRK)

La quantité adsorbée augmente avec le poids moléculaire si il n'y a pas de restrictions au niveau de l'accessibilité des surfaces (suspensions diluées de montmorillonite Na), mais on observe un résultat inverse dans un système argile-eau plus condensé : la porosité limite la pénétration des gros polymères.

C'est le polyvinyl alcool (PVA) qui a fait l'objet du plus grand nombre de recherches fondamentales. GREENLAND (1963) a étudié l'adsorption du PVA sur la montmorillonite ; avec WILLIAMS et QUIRK (1967-1968) il a étudié le rôle du PVA sur des agrégats de sol ; avec THENG et QUIRK (1967), il a étudié les modifications des propriétés de gonflement des argiles en présence de PVA. Les résultats montrent que le PVA s'adsorbe très fortement sur les montmorillonites en suspension dispersées jusqu'à former une couche de 10 Å sur toutes les surfaces argileuses, ce qui correspond à une quantité adsorbée de 0,8 g/g d'argile.

Le PVA a un pouvoir de stabilisation des agrégats par recouvrement des surfaces sans qu'il y ait floculation, le poids moléculaire joue un rôle important : plus il est élevé, plus son adsorption est importante, mais moins il pénètre entre les particules de sol.

EMERSON et RAUPACH (1963) ont montré que le PVA formait des liaisons hydrogènes avec les surfaces des argiles, sans que se produisent d'échanges de cations. Le PVA a aussi pour effet de limiter le gonflement des montmorillonites en solution.

En résumé, il semble que les propriétés du PVA soient bien connues et qu'on puisse le prendre comme modèle des polymères neutres, mais d'autres types de produits plus complexes sont également à considérer.

Avec les polymères chargés, le problème est plus

compliqué. La capacité d'échange des argiles peut être affectée par l'adsorption des polymères, et leur charge de surface peut être modifiée.

L'adsorption de polycation ou de polymères positifs, fait intervenir des interactions électrostatiques (forces de Coulomb) entre les groupes cationiques des polymères et les sites chargés négativement sur les feuillets d'argile.

Les polyanions ou les polymères chargés négativement, sont plutôt repoussés par les charges de surface, mais l'adsorption peut être initiée par la présence de cations polyvalents qui servent de ponts. En conditions acides ou de fort potentiel ionique, les charges négatives peuvent être neutralisées par protonisation ou écrantées par l'électrolyte. A pH faible, les polyanions peuvent s'adsorber sur les bords des cristaux d'argile par des interactions électrostatiques avec l'Aluminium de ces sites qui a une charge positive. Les polyanions sont donc adsorbés avec peu de segments à moins que le système ne soit déshydraté. Ils s'opposent aux polycations et polymères neutres par le fait qu'ils ne peuvent pénétrer entre les feuillets d'argile.

En résumé, on peut dire que les polycations semblent être les plus favorables au traitement des sols par le fait qu'ils peuvent à la fois flocculer et stabiliser les particules des sols.

Les polymères neutres peuvent être de bons stabilisants mais sont peu efficaces comme flocculants ; les polyanions peuvent jouer un rôle important essentiellement en présence de cations polyvalents, mais l'ajout de conditionneurs n'est peut être pas nécessaire dans ces conditions.

Actuellement des travaux fondamentaux sur les constituants élémentaires du sol effectués à Versailles apportent des données intéressantes pour l'étude des conditionneurs de sols. En particulier l'étude du rôle des polycations du Fer et de l'Aluminium, des polysaccharides, des amines...

Il paraissait intéressant de reprendre dans ce contexte, avec les mêmes argiles et la même méthodologie, un certain nombre de recherches sur les conditionneurs.

## 2/- Recherches plus appliquées.

Les symposiums de Gent (1972 et 1975) et Las Végas (1973) ont permis de rassembler un grand nombre d'informations sur l'état des recherches appliquées au sujet des conditionneurs.

Les études les plus intéressantes portent sur la limitation de l'érosion par l'eau, de sols traités par des conditionneurs, sur la prévention de la formation de croûtes, sur la stabilité des agrégats de sols traités, sur la modification des propriétés de conductivité hydraulique, rétention en eau et porosité, par des conditionneurs.

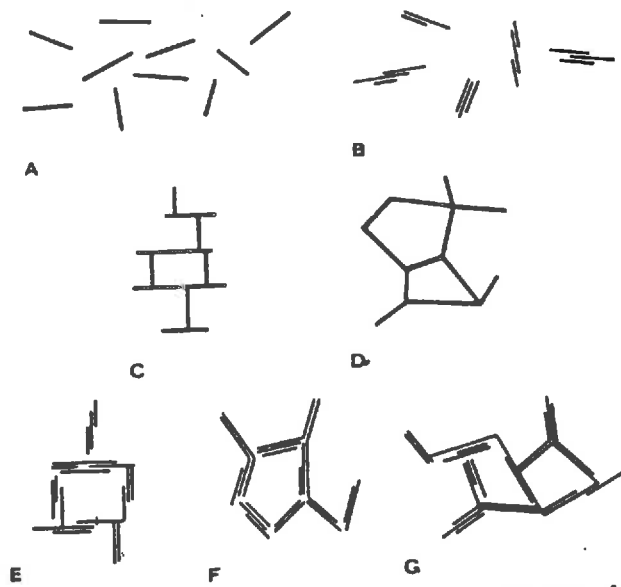
GABRIELS (1973) obtient une nette augmentation de la conductivité hydraulique d'un sol argileux traité avec du PVA ou avec une émulsion bitumineuse ; il a également testé divers produits : PVA, PVAc, émulsion d'asphalte, polysaccharides, avec un simulateur de pluie. Les traitements semblent tous efficaces pour maintenir une bonne infiltration, et prévenir une dégradation des agrégats par la pluie.

Il observe cependant qu'un traitement avec une émulsion bitumineuse, en rendant la surface du sol hydrophobe, entraînait une augmentation de l'entraînement des agrégats par ruissellement. DE BOODT (1975) relate les bons résultats obtenus avec le polyacrylamide (PAM), pour favoriser l'établissement de la végétation sur des talus ou des sols sensibles à l'érosion.

Mais l'utilisation en agriculture la plus prometteuse, pour les régions d'Europe de l'Ouest, semble être le



ASSOCIATIONS DES PARTICULES D'ARGILES ENTRE ELLES ET AVEC LES AUTRES  
CONSTITUANTS DU SOL



Mode d'association des particules argileuses d'après M. Van OLPHEN (1963)

Modes of particle association after H. van OLPHEN (1963)

- A Dispersé — Déflocculé
- B Agrégé — Déflocculé
- C Flocculé E/F — Dispersé
- D Flocculé E/E — Dispersé
- E Flocculé E/F — Agrégé
- F Flocculé E/E — Agrégé
- G Flocculé E/F et E/E — Agrégé

- A Dispersed, deflocculated
- B Aggregated, deflocculated
- C Edge to face flocculated, but dispersed
- D Edge to edge flocculated, but dispersed
- E Edge to face flocculated, but aggregated
- F Edge to edge flocculated, but aggregated
- G Edge to face and Edge to edge flocculated, but aggregated

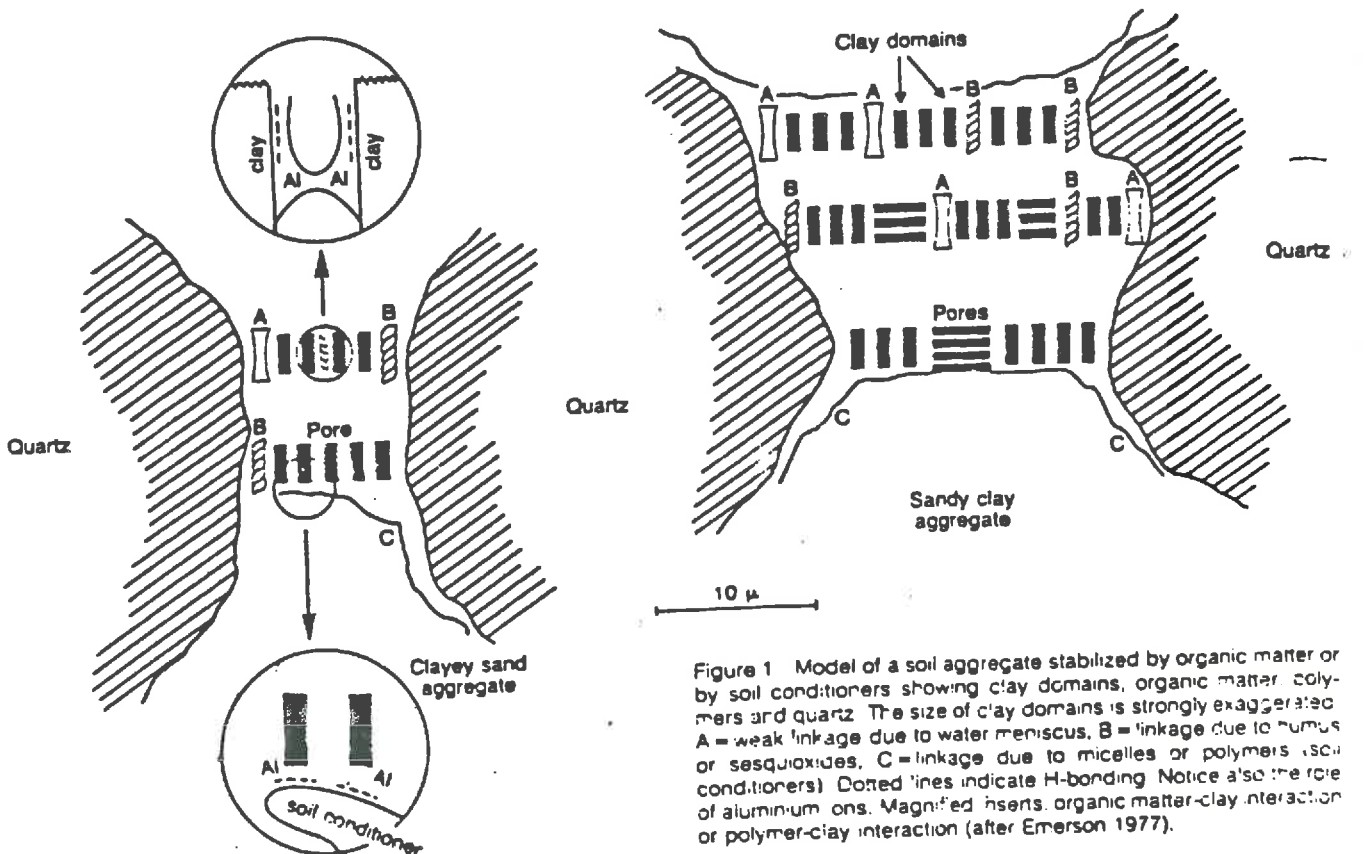


Figure 1 Model of a soil aggregate stabilized by organic matter or by soil conditioners showing clay domains, organic matter, polymers and quartz. The size of clay domains is strongly exaggerated. A = weak linkage due to water meniscus, B = linkage due to humus or sesquioxides, C = linkage due to micelles or polymers (soil conditioners). Dotted lines indicate H-bonding. Notice also the role of aluminum ions. Magnified insets, organic matter-clay interaction or polymer-clay interaction (after Emerson 1977).

traitement des lits de semence dans les sols limoneux battants. Le rendement des betteraves sucrières pourrait être sensiblement amélioré par un traitement contre la formation de croûtes, et l'importance de cette culture justifie des études approfondies sur ce thème (5 % de la surface cultivée en France est concernée).

Dans les pays en voie de développement, les problèmes concernent la lutte contre l'évaporation qui peut être efficace avec un conditionneur hydrophobe, la lutte contre l'érosion et la protection des sols nus sur lesquels on cherche à implanter une végétation.

Ainsi, dans le cas des zones arides, les conditionneurs hydrophobes ont un rôle important à jouer dans l'économie de l'eau, en particulier en association avec des travaux d'irrigation et pour favoriser l'implantation d'une végétation.

Dans les régions tropicales humides, ils doivent contribuer à limiter la dégradation des sols par l'érosion hydrique.

DE BOODT évoque un autre problème : l'entraînement des sels et des engrais. Cette question commence à être préoccupante dans certaines régions où la pollution par les nitrates devient très sensible.

En améliorant la fixation des engrais dans le sol, les conditionneurs pourraient jouer un double rôle : limitation de la pollution et économie sur la quantité d'engrais à utiliser puisque leur efficacité serait augmentée.

PLA (1975) a effectué des études au laboratoire et sur le terrain, sur des sols vénézuéliens ; des solutions de PAM et surtout des émulsions de bitume se montrent très efficaces pour améliorer les propriétés physiques de différents sols, en particulier riches en argiles.

CARR et GREENLAND (1975) ont utilisé le PVA et le PVAc pour améliorer la structure de sols sodiques ; le PVAc améliore la stabilité des agrégats, et des augmentations de rendement, en particulier sur des cultures de tomates, ont été observées. Le PVA a été testé pour 2 poids moléculaires différents et avec ou sans solution de  $\text{CaCl}_2$ . En absence de  $\text{CaCl}_2$ , le PVA de faible poids moléculaire est le plus efficace pour pénétrer le sol sodique, mais en présence de  $\text{CaCl}_2$ , (qui seul n'a aucun effet), le PVA de poids moléculaire élevé est le plus efficace pour améliorer les propriétés physiques de ce sol.

Plusieurs auteurs ont étudié le xanthate de cellulose. PAGE (1980) considère que c'est l'un des conditionneurs les plus prometteurs pour la prévention de la battance, mais il pose des problèmes pratiques d'utilisation : (stockage au froid, manipulation délicate).

Un autre produit, le W.A.C., qui est au départ un floculant pour le traitement des eaux, a été utilisé avec succès au Japon pour des cultures de thé. Le problème avec ce sel d'aluminium est qu'il acidifie le sol, ce qui est défavorable à de nombreuses cultures; cependant ce type de produit semble très intéressant du point de vue de son efficacité, et par analogie aux sols naturels riches en hydroxydes d'Aluminium, qui ont de très bonnes propriétés physiques.

### CONCLUSION

On a ainsi fait un premier tour d'horizon sur les produits étudiés et les recherches faites à propos du conditionnement des sols ; cette revue nous permet de recenser l'ensemble des substances les plus intéressantes comme conditionneurs de sol, en fonction des objectifs d'application que l'on poursuit.

La comparaison des différentes méthodes d'étude nous permet également d'établir le protocole expérimental qui semble le plus intéressant compte tenu des moyens et du temps dont nous disposons pour cette étude.

La démarche adoptée est donc la suivante :

- d'une part, étudier une large gamme de conditionneurs au laboratoire, sur des argiles de référence, et selon un protocole commun avec d'autres études, afin de caractériser les associations entre conditionneurs et argiles, et d'étudier leurs propriétés.

Ce travail devrait permettre de relier les études des modes d'actions des conditionneurs à leur efficacité.

- d'autre part, tester quelques conditionneurs sur un sol sensible à la dégradation de surface, afin de comparer leur efficacité pour cette utilisation particulière, qu'est la lutte contre la formation de croûte de battance.

## DEUXIEME PARTIE

### CARACTERISATION ET ETUDE DES PROPRIETES

#### DES ASSOCIATIONS ARGILES-CONDITIONNEURS

Cette première partie de notre travail expérimental s'appuie sur l'ensemble des méthodes utilisées au laboratoire des sols de Versailles. Ceci permet d'obtenir des résultats directement comparables à de nombreux travaux déjà effectués sur des thèmes voisins (ROBERT - CHENU - JOIGNY).

Elle comporte des études minéralogiques, physiques et morphologiques des associations entre argiles et conditionneurs.

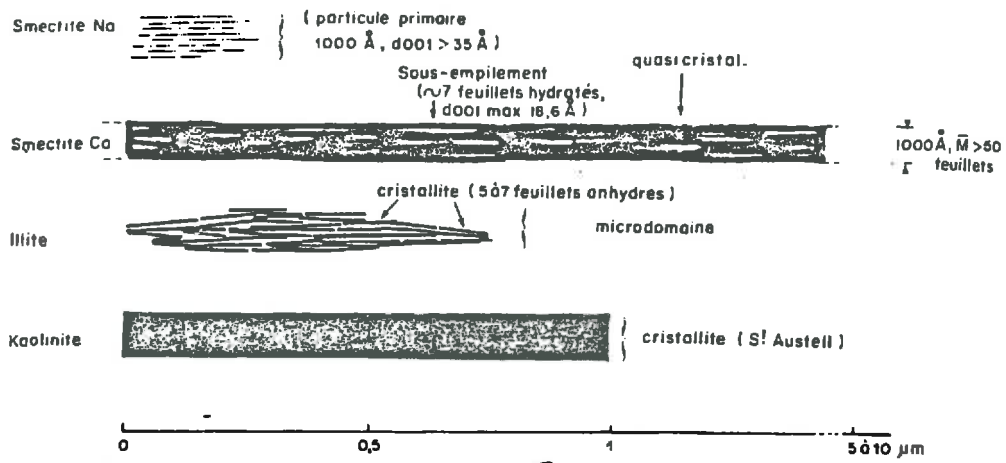
#### A - MATERIAUX ET METHODE DE PREPARATION DES ASSOCIATIONS

##### 1/ - Argiles : choix et caractéristiques

Nous avons utilisé des argiles modèles qui sont bien étudiées par ailleurs. Il s'agit pour l'essentiel d'une argile 1/1 : la kaolinite de St-Austell et une argile 2/1 : la montmorillonite du Wyoming.

Ces argiles appartiennent aux 2 groupes principaux des argiles que l'on rencontre dans les sols et qui présentent des propriétés sensiblement différentes..

REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES GRANDS TYPES DE PARTICULES  
 A FAIBLE CONTRAINTE. (P < 1 bar ) (d'après TESSIER, 1984)



a. Kaolinite de St Austell

Ses caractéristiques sont les suivantes :

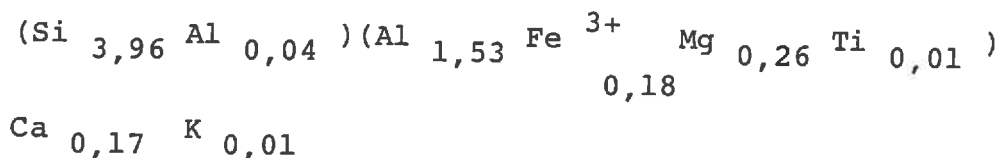
- les cristallites sont des plaquettes de 1  $\mu\text{m}$  d'épaisseur,

- la surface externe est de  $12 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ,  
la capacité d'échange cationique (C.E.C.) est très faible : 1 méq.  $100 \text{ g}^{-1}$  et la masse volumique est de  $2,63 \text{ g} \cdot \text{cm}^3$ .

Pour cette argile, les unités morphologiques de base sont les particules primaires (cristallites).

b. Montmorillonite du Wyoming

Cette argile "gonflante", a la formule structurale suivante :



La surface externe atteint  $200 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ .

La charge du feuillet (2) est de  $-0,35$ , et la capacité d'échange cationique est de  $100 \text{ méq}/100 \text{ g}$ .

Les unités morphologiques sont des associations de particules primaires à large développement planaire, lesquels forment un réseau tridimensionnel par association face-face.

2/ - Conditionneurs

Nous avons testé une large gamme de conditionneurs, certains étant "classiques" et déjà bien étudiés, d'autres n'ayant pas encore fait l'objet d'études en tant que conditionneurs de sols.

LISTE DES CONDITIONNEURS TESTES

\_Polyvinyl Alcool (PVA) :

PM: 86000

\_Polyacrylamide (PAM) :

PM: 5à6000000

\_Polyvinylacétate (PVAc) :

PM: 110000

\_Xanthate de cellulose (X.β):

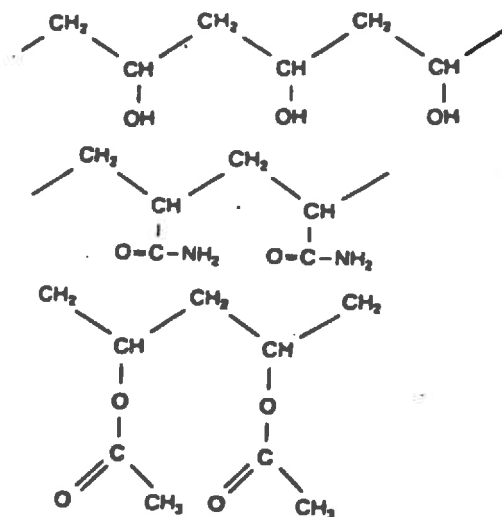
\_W.A.C. :  $Al_n(OH)_m(SO_4)_kCl_{3n-m-2k}$  (Fourni par ATOCHEM)

\*Noramox S11 :  $C_{18}H_{35}-N \begin{cases} (OC_2H_4)_x H \\ (OC_2H_4)_y H \end{cases}$   $x+y=11$

\*Noramox S2 :  $C_{18}H_{35}-N \begin{cases} (OC_2H_4)_x H \\ (OC_2H_4)_y H \end{cases}$   $x+y=2$

\*Stabiram 677 :  $C_{18}H_{35} \cdot NH_3^+, CH_3^3COO^-$

\*Noranium m2 SH :  $C_{18}H_{37}-N^+ \begin{cases} CH_3 \\ CH_3 \end{cases}, Cl^-$



\*Fournis par la C.E.C.A.



- Les conditionneurs classiques sont des polymères organiques à longue chaîne linéaire et dont les groupements latéraux sont des fonctions polaires variées : alcool, amide, acétate...

Leur poids moléculaire est très variable, allant de quelques dizaines de milliers à plusieurs millions. Ils agissent par adsorption des segments sur les surfaces minérales, ce qui stabilise les agrégats du sol.

Les autres produits que nous avons expérimentés sont des molécules organiques diverses :

. le xanthate de cellulose qui a été commercialisé puis abandonné par la firme "Courtaulds", sous le nom de VI-GROW, comme conditionneur de sol en agriculture et en horticulture, et qui a été étudié en particulier par PAGE (1980).

. des amines et des sels d'ammonium produits par le C.E.C.A, et qui sont utilisés dans les travaux publics pour rendre des sols hydrophobes.

. le W.A.C. qui est un polychlorure d'Aluminium fabriqué industriellement par Atochem comme flocculant pour le traitement des eaux. Sa molécule s'apparente à celle d'un polymère minéral de poids moléculaire élevé. Son mécanisme d'action en tant que flocculant est double : il agirait à la fois comme un coagulant minéral, et comme un polyélectrolyte organique par interaction entre le polymère d'aluminium et les colloïdes.

### 3/ - Préparation des associations argiles-conditionneurs

On a effectué les mélanges entre argiles et conditionneurs en suspensions diluées.

Les argiles utilisées sont des matériaux purifiés extraits d'échantillons naturels provenant de gisements.

Il est clair que le mode de préparation des échantillons, et en particulier la réalisation du mélange entre la suspension argileuse et les solutions de conditionneurs peuvent influencer notablement les résultats qui vont être observés au laboratoire.

Il s'agit donc ici de bien préciser le protocole expérimental qui a été adopté.

. L'argile est rendue sodique par agitation au sein d'une solution de NaCl concentré, puis par lavages et centrifugations successives, elle est amenée à une concentration saline donnée. Elle est homogénéisée et maintenue à une teneur en eau qui correspond à un état de gel et stockée au réfrigérateur.

. Le mélange avec les conditionneurs est effectué dans des béchers de 100 ml. Une quantité de gel correspondant à 1 gramme d'argile sèche est mise sous agitation magnétique avec de l'eau distillée pour former une suspension homogène de 50 ml, la solution du conditionneur est ensuite ajoutée progressivement, toujours sous agitation jusqu'à un volume final de 100 ml.

. Nous avons fixé la concentration initiale en conditionneur à 10 % du poids d'argile, ce qui permet d'obtenir des mélanges non saturés en conditionneur, pouvant conduire à des observations intéressantes. L'objectif est

ensuite de diminuer encore cette concentration afin de déterminer les quantités actives minimales : nous sommes ainsi descendus à des concentrations de 0,5 % en poids.

Les mélanges obtenus sont ensuite centrifugés et l'état hydrique est fixé par dessiccation à une contrainte uniforme en utilisant le dispositif des tubes à pF de TESSIER et BERRIER (1979).

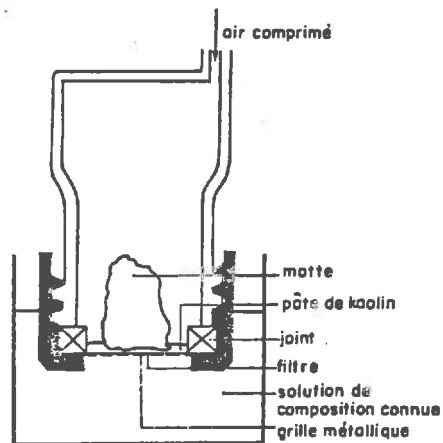
Le potentiel hydrique choisi correspond à pF = 2, soit une pression de 0,1 bar.

C'est donc à partir des échantillons ainsi préparés que nous avons essayé de caractériser les associations entre argiles et conditionneurs, et d'étudier leurs propriétés.

Niveaux énergétiques et modes d'expression des différents états de l'eau dans le sol, relation avec la pression externe appliquée et taille maximale des pores correspondante

Pression gazeuse appliquée (bar) P	pF	Potentiel chimique de l'eau (j.kg <sup>-1</sup> ) $\mu$	Activité de l'eau $a_w$	Abaissement de température °C	Taille maximale des pores remplis d'eau (μm)
0,010	1	- 1	0,999993		150
0,100	2	- 10	0,999927		15
1	3	- 100	0,99927		1,5
10	4	- 1000	0,9927		0,15
15,8	4,2	- 1580	0,9888	- 1,1	
100	5	- 10000	0,927	- 10	0,015
500	5,7	- 50000	0,695		
1000	6	- 100000	0,484	- 90	0,0015
chauffage à 105°C	≠ 7	-	≠ 0	-	-

- Par habitude, l'évaluation des "contraintes" subies par l'eau au sein d'un système argileux hydraté est réalisée par P(bar) ou pF ( $\log_{10} P$  en cm d'eau)
- Quand on parle de "suction", celle-ci correspond à -P(bar)



- Schéma du dispositif de filtration utilisé pour les dessiccations et réhydratations dans le domaine de pression  $\leq 1$  bar

## B - CARACTERISATION MINERALOGIQUE DES ASSOCIATIONS

Les études minéralogiques permettent de préciser la nature et la localisation des composés fixés sur les argiles. Il s'agit d'analyses classiques : diffraction des rayons X et analyses thermiques différentielles et pondérales.

### 1/ - Diffraction des rayons X

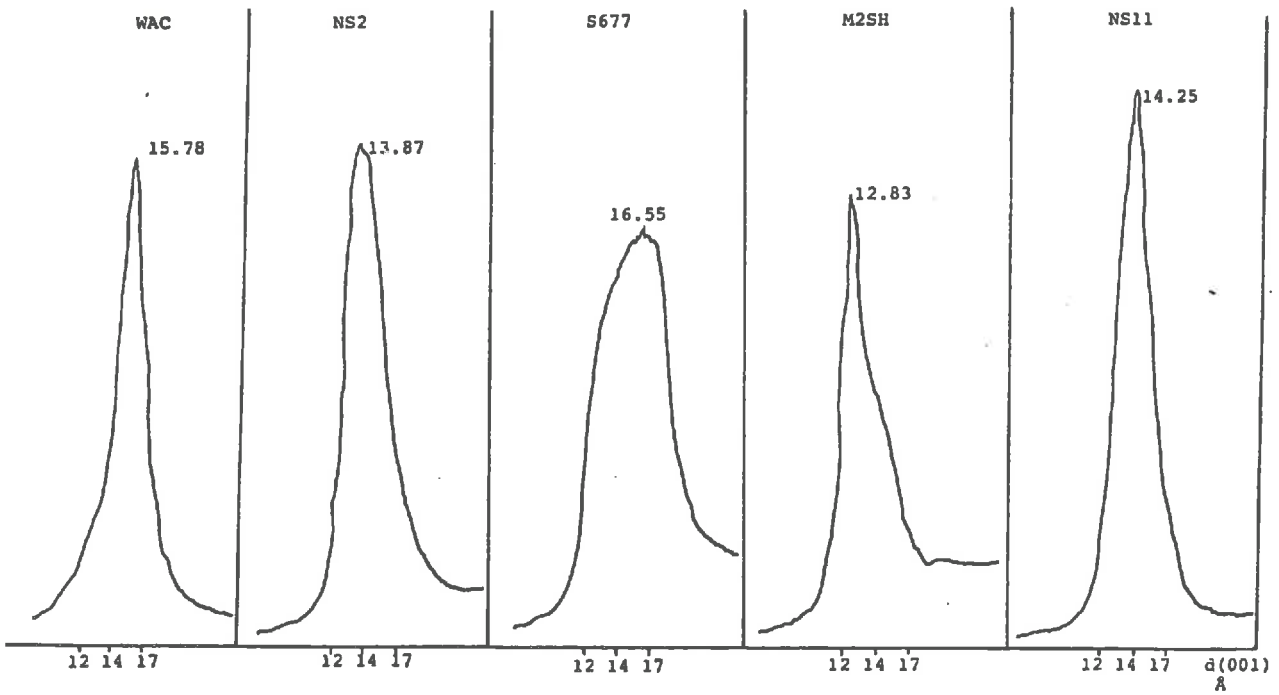
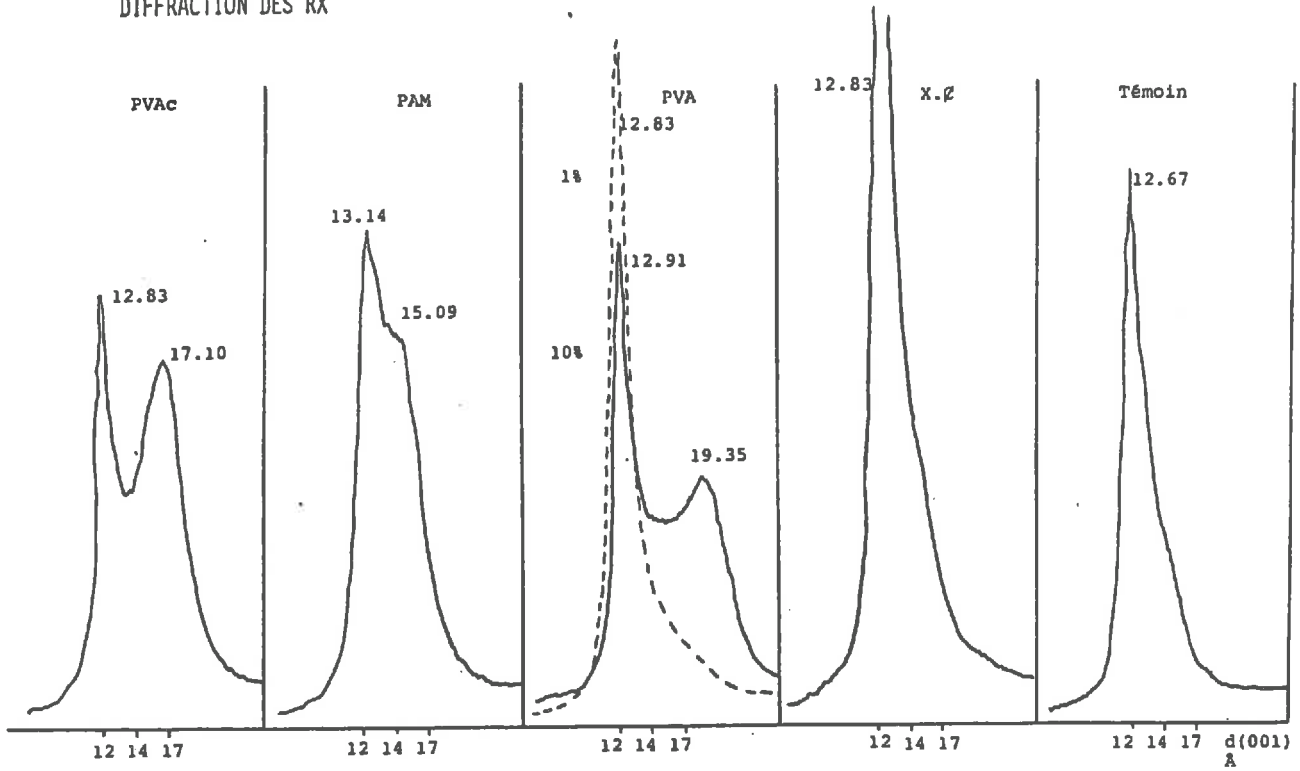
Les résultats des diagrammes de RX permettent de préciser l'existence de polymères en position interfoliaire.

La montmorillonite Na a normalement une distance interfoliaire  $d(001)$  de 12,5 Å. Les valeurs obtenues montrent que plusieurs des composés pénètrent entre les feuillets d'argile, et l'étude de la forme des pics des diagrammes de diffraction permet de préciser le mode d'association de ces composés avec les argiles.

Le Stabiram S 677, les Noramox S 2 et S 11 et le W.A.C. présentent une distance  $d_{001}$  supérieure à 12,5 Å avec un pic simple, ce qui indique un phénomène d'interstratification : c'est-à-dire présence au sein de toutes les particules d'une alternance de Na et de polymères entre les feuillets. On aurait donc, dans ce cas une répartition uniforme du polymère au sein des argiles. Le remplissage des espaces interfoliaires se faisant en fonction de la quantité de polymère présente.

Le PVA, le PVAc et le PAM ont un diagramme montrant un dédoublement du pic, ou un épaulement. On peut l'interpréter par une démixtion : c'est-à-dire une ségrégation de particules entièrement saturées, soit par du Na, soit par le conditionneur. Dans ce cas la fixation des polymères se ferait

DIFFRACTION DES RX



de manière hétérogène; sur des sites préférentiels.

Il faut bien noter que l'observation de ces phénomènes est certainement due à la concentration faible de conditionneur au sein du mélange. En effet, si la saturation avait été atteinte, l'ensemble des espaces interfoliaires aurait été occupé par le polymère, et ces différences masquées.

Ainsi, les mesures effectuées permettent la mise en évidence de plusieurs mécanismes d'action, pour des conditionneurs différents, du point de vue de leur association avec les argiles. Par contre, lorsque l'on diminue encore la concentration (1 % de PVA), le diagramme ne montre plus de particularités par rapport à l'argile de référence.

## 2/ - Analyses thermiques

Les analyses thermiques différentielles et pondérales donnent des indications sur les quantités de produits fixés sur les argiles.

Sur les courbes thermo-pondérales, on observe une augmentation des pertes de poids à haute température (> 460°C), qui correspond à la décomposition des polymères fixés sur les argiles.

L'interprétation quantitative est difficile à faire, mais il serait intéressant de confronter ces résultats avec des dosages chimiques des quantités de conditionneurs fixés.

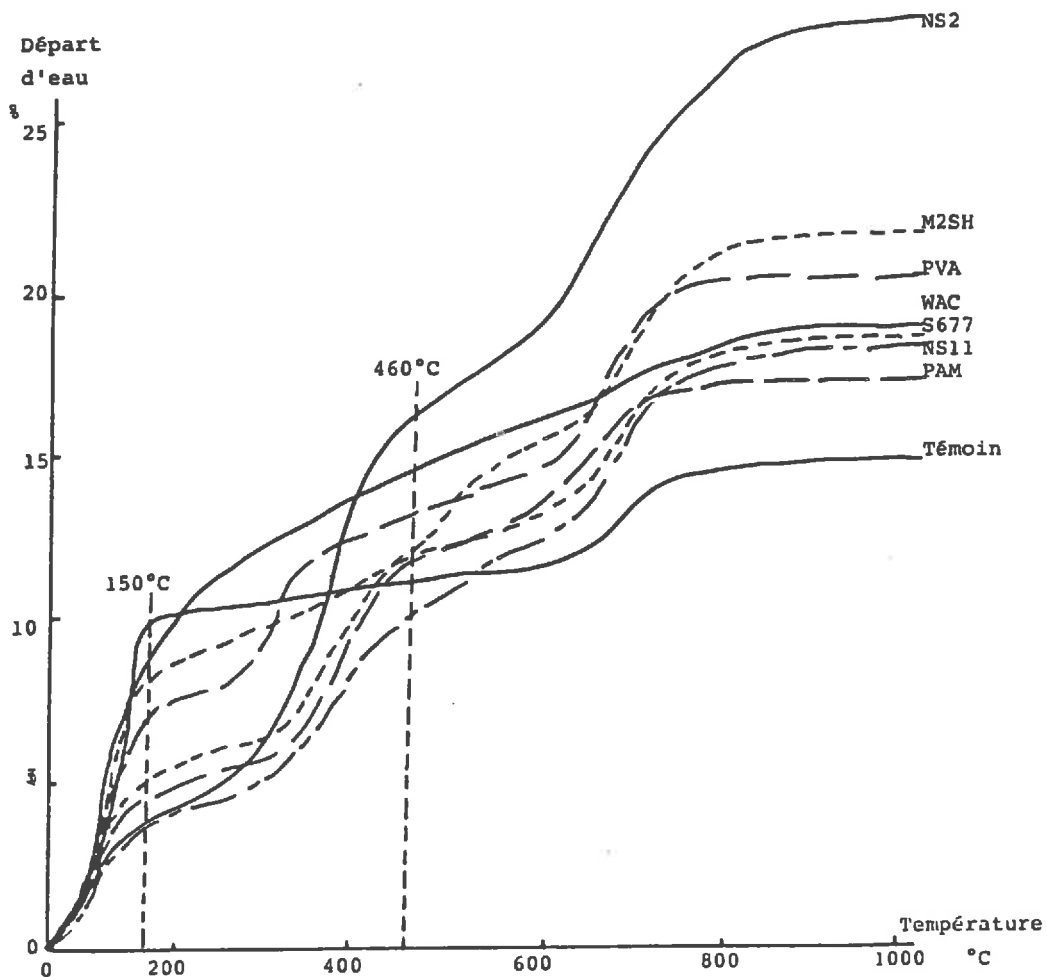
Le premier palier (à 150°C) des courbes thermo-pondérales correspond au départ d'eau hygroscopique, alors que les suivants concernent l'eau de constitution et les composés organiques fixés.

Or, les courbes obtenues montrent un net abaissement du

premier palier pour les quatre produits hydrophobes de la C.E.C.A., ce qui traduit une diminution de l'eau interfoliaire, qui est bien en accord avec les propriétés de ces produits.

La courbe obtenue pour le traitement avec le W.A.C. est caractérisée par l'absence de palier, ce qui, tout en étant difficile à interpréter, montre une modification des propriétés de l'argile traitée : l'eau interfoliaire est probablement très liée au polymère minéral (Al) et le départ de cette eau se fait plus progressivement.

### ANALYSE THERMIQUE PONDERALE





C - CARACTERISATION MORPHOLOGIQUE DES ASSOCIATIONS AU MICROS -  
COPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE (M.E.B.)

L'observation d'associations argile-conditionneurs au M.E.B. constitue une démarche assez nouvelle par rapport aux travaux publiés et peut permettre, avec la méthodologie utilisée, de visualiser le mode d'action de ces produits, à l'état humide, c'est-à-dire sans déformation de la structure tridimensionnelle des échantillons.

1/ - Méthodologie

Le dispositif "cryoscan" qui équipe le microscope Jeol JSM 35 permet d'observer des échantillons dont l'organisation a été fixée par congélation instantanée dans du fréon 22 refroidi par de l'azote liquide à une température  $< - 40^{\circ}\text{C}$ .

L'échantillon est introduit ensuite dans un sas à  $-40^{\circ}\text{C}$ , puis fracturé et métallisé avec de l'or. Il est enfin introduit dans la colonne du microscope refroidi à  $- 100^{\circ}\text{C}$  et observé directement.

La fracturation ayant lieu sur l'échantillon gelé, le plan de fracture est normalement indépendant des discontinuités internes de l'échantillon.

Les observations ont été faites sur des échantillons à des teneurs en eau correspondant à  $pF = 2$  (méthode des tubes à  $pF$ ).

Cette contrainte hydrique a été choisie car d'une part, elle permet d'observer des différences morphologiques qui n'apparaîtraient plus à une contrainte plus forte, et d'autre part, parce qu'une hydratation plus importante entraîne des problèmes d'artéfacts liés à la congélation (TESSIER, 1984).

Les photos réalisées de cette manière sont comparables à celles réalisées au laboratoire sur d'autres associations : argiles-polycations de fer et aluminium, argiles-amines, argiles-polysaccharides.

Ces confrontations sont particulièrement intéressantes en particulier pour l'interprétation des propriétés de ces associations.

### Caractérisation

#### a. Montmorillonite

Les quasi-cristaux ou tactoïdes de la montmorillonite forment normalement, avec une saturation Na, un réseau continu tridimensionnel souple.

Pour la plupart des associations, la morphologie des argiles est modifiée : modification due à l'adsorption des polymères.

On peut distinguer différents cas :

. avec le PVA, le WAC et dans une moindre mesure le Xanthate de cellulose, se produit un changement important : sans qu'aucune dessiccation intervienne, il y a rupture du réseau continu, apparition de fissures, et même individualisation d'agrégats de forme grossièrement sphérique (PVA), dont la taille est comprise entre 5 et 20  $\mu\text{m}$ . Si la porosité intra-agrégat reste inférieure à 1  $\mu\text{m}$  comme pour le témoin, la porosité interagrégats est plus importante (5 à 10  $\mu\text{m}$ ).

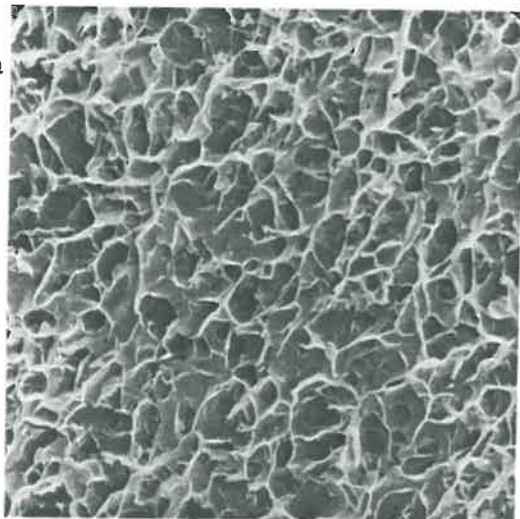
Cependant cette porosité ne paraît pas toujours continue, pour le WAC et le Xanthate de cellulose notamment.

L'effet des conditionneurs semble donc bénéfique dans ces cas, pour les propriétés physiques ; cela reste à vérifier, en particulier par des mesures de conductivité hydraulique.

CARACTERISATION DES ASSOCIATIONS ARGILE-CONDITIONNEURS AU M.E.B-CRYOSCAN

1: Témoin pF 2  
Montmorillonite Na

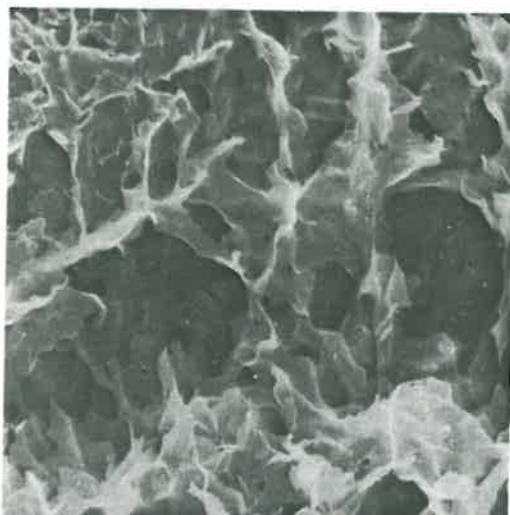
2µm ———



2: Montmorillonite + Xanthate de cellulose pF 2

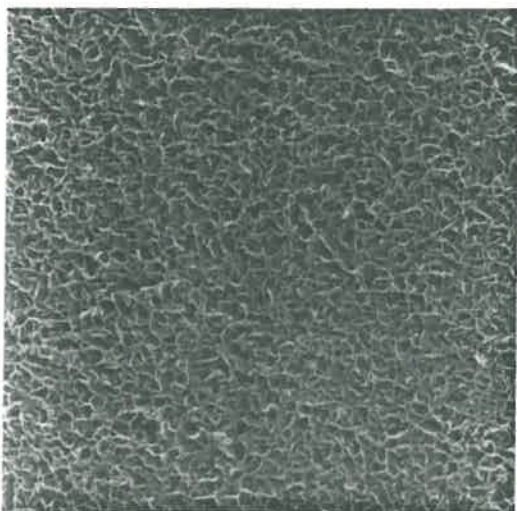


2a 20µm ———

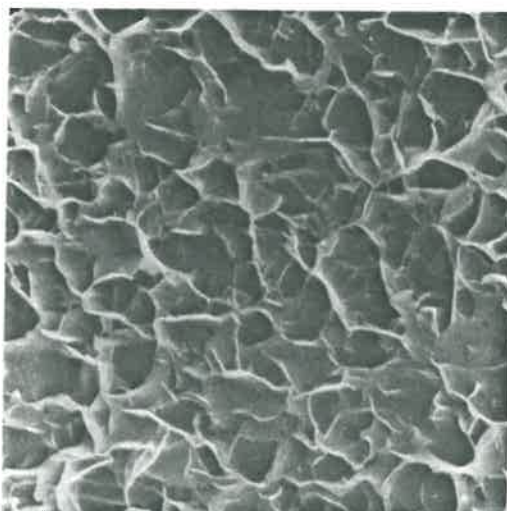


2b 2µm ———

3: Montmorillonite + PAM pF 2



3a 10µm ———



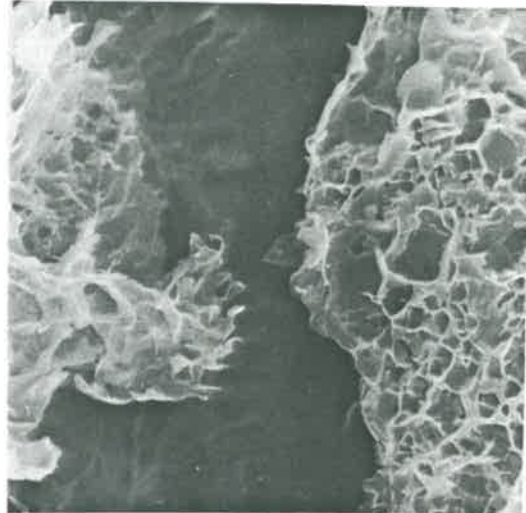
3b 1µm ———

CARACTERISATION DES ASSOCIATIONS ARGILE-CONDITIONNEURS AU M.E.B-CRYOSCAN

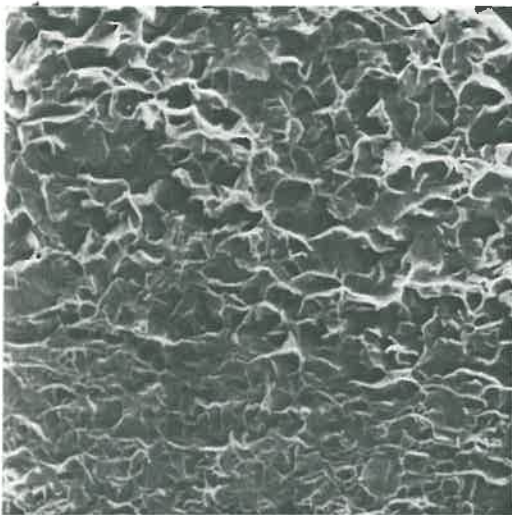
4:Montmorillonite + PVA pF 2



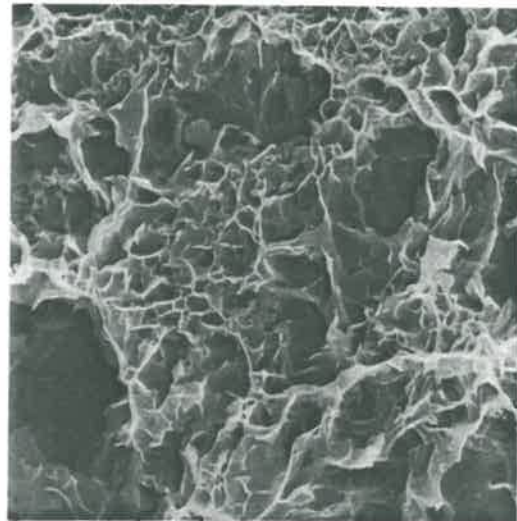
4a 20µm



4b 2µm

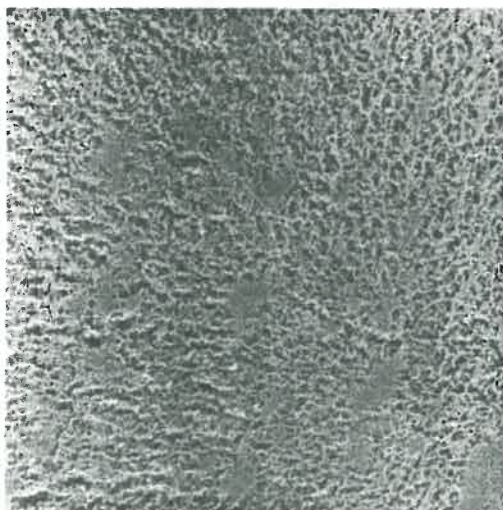


4d pF 3 2µm

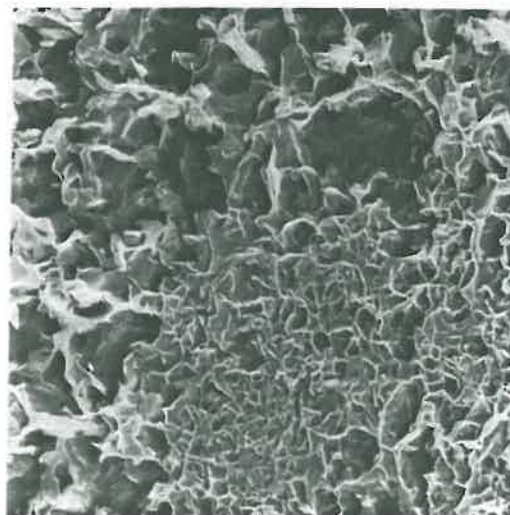


4c 2µm

Montmorillonite + PVA 1%



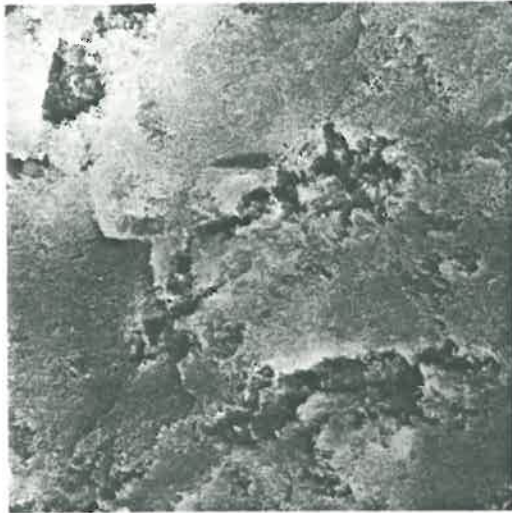
4e 20µm



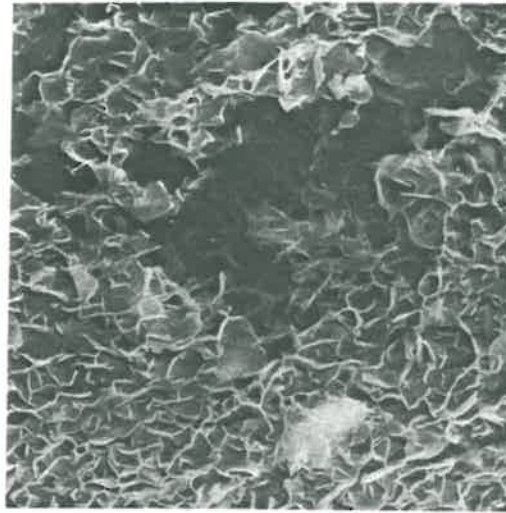
4f 2µm

CARACTERISATION DES ASSOCIATIONS ARGILE-CONDITIONNEURS AU M.E.B-CRYOSCAN

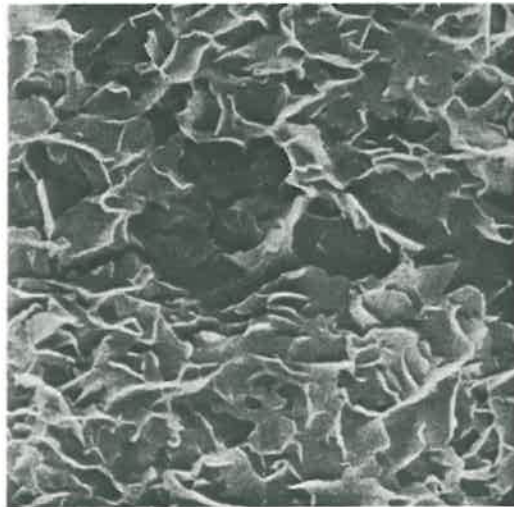
5:Montmorillonite + WAC pF 2



5a 20µm

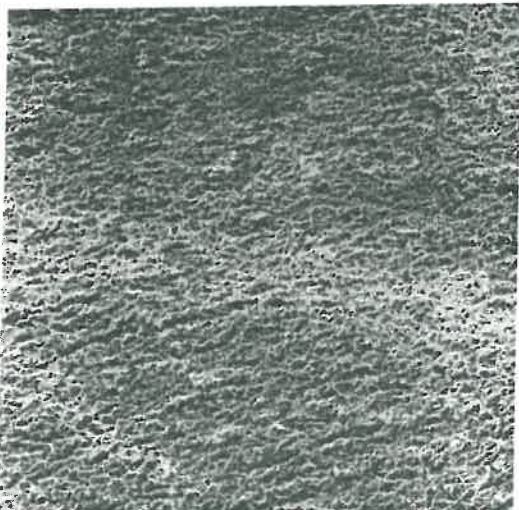


5b 2µm

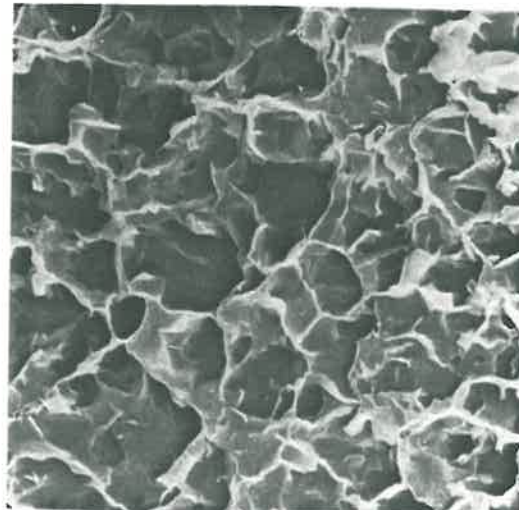


5c 1µm

6:Montmorillonite + PVAc pF 2



6a 20µm



6b 2µm

. Avec le PAM et le PVAc, les modifications morphologiques ne sont pas très nettes, peut être y-a-t-il un léger relâchement du réseau (PVAc).

. Les produits hydrophobes agissent très nettement sur l'organisation du réseau. Il n'y a pas de fissuration, mais au contraire une contraction de la structure (diminution de la taille des pores). Les tactoïdes semblent s'accoler les uns aux autres, par endroits, pour former des figures, par exemple en "boutons de rose" (NS 11, NS 2) et la porosité est inférieure à  $0,4 \mu\text{m}$ .

En présence de  $\text{M}_2\text{SH}$ , se forment des figures spectaculaires, correspondant à des accolement linéaires de particules en "flammes", comme sous l'effet de contraintes locales très intenses.

Le S 677 entraîne, quant à lui, l'apparition de lacunes discontinues au sein du réseau qui semble également contracté.

Pour le PVA, nous avons étudié l'influence du pF en faisant une observation du même échantillon à pF = 3.

L'augmentation de la contrainte entraîne la fermeture de la porosité interagrégats : on observe des zones où le réseau est continu, et des zones où il semble rompu, qui peuvent correspondre à la "cicatrice" des fissures qui existaient à pF = 2.

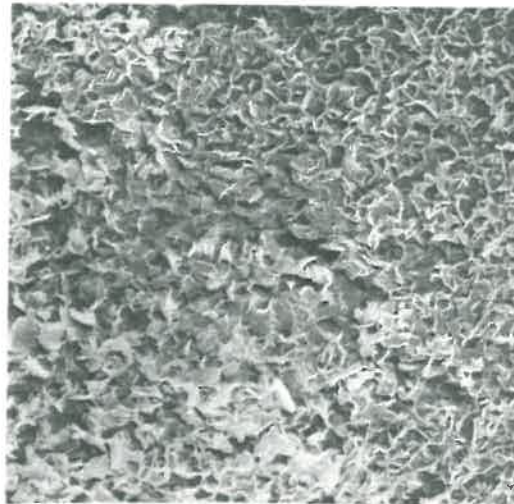
Ceci met en évidence l'importance du choix de la contrainte hydrique, pour ces observations avec le cryoscan, en fonction de ce que l'on veut observer : une contrainte trop importante aurait sans doute masqué les modifications apportées par les conditionneurs. D'autre part, cela montre que le rôle joué par ceux-ci est fonction de la contrainte à laquelle est soumis le matériau.

CARACTERISATION DES ASSOCIATIONS ARGILE-CONDITIONNEURS AU M.E.B-CRYOSCAN

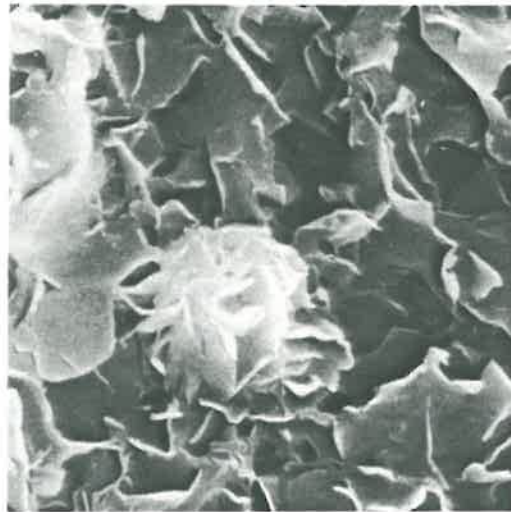
7:Montmorillonite + NS 11 pF 2



7a 20µm

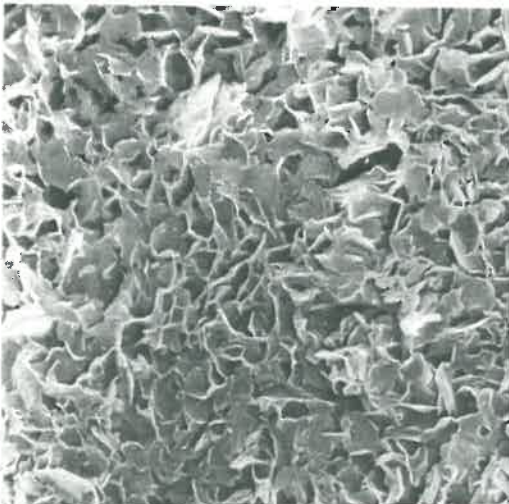


7b 10µm

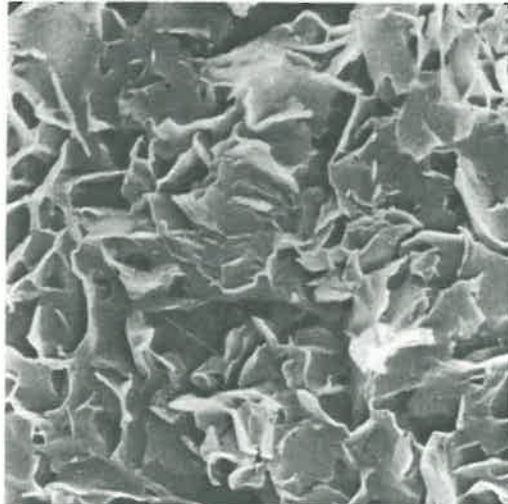


7c 1µm

8:Montmorillonite + NS 2 pF 2



8a 2µm



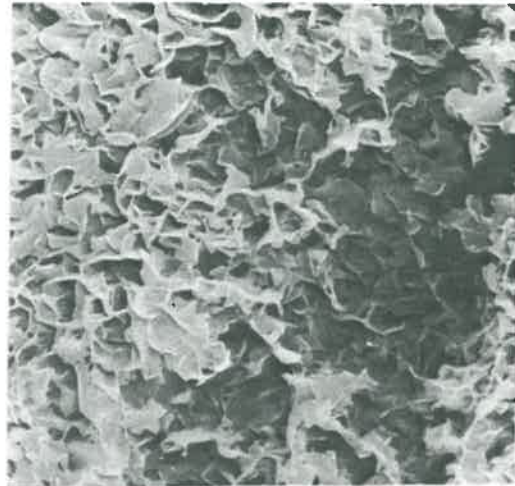
8b 1µm

CARACTERISATION DES ASSOCIATIONS ARGILE-CONDITIONNEURS AU M.E.B-CRYOSCAN

9:Montmorillonite + S 677 pF 2

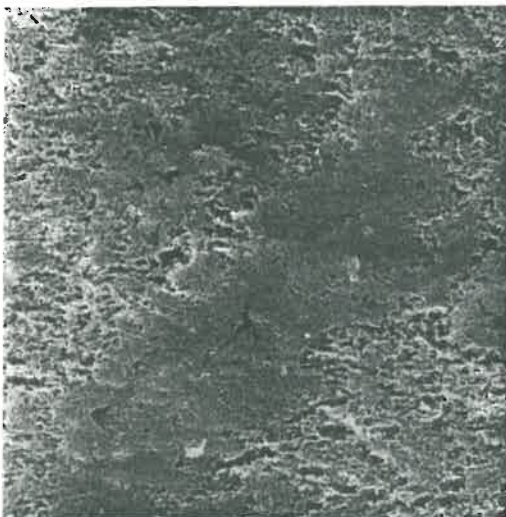


9a 20µm

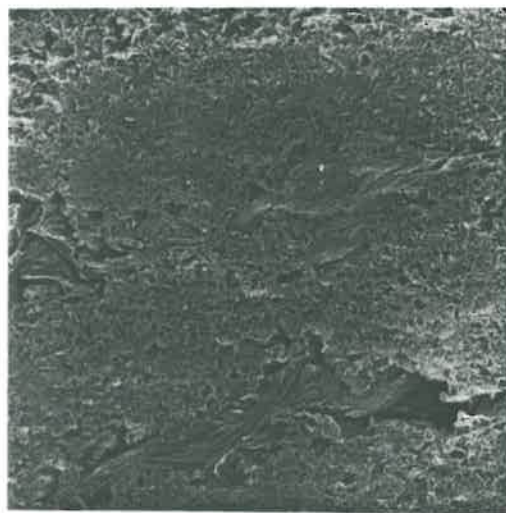


9b 2µm

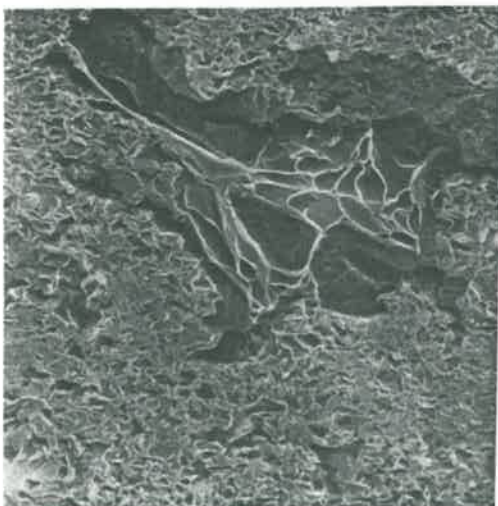
10:Montmorillonite + M2 SH pF 2



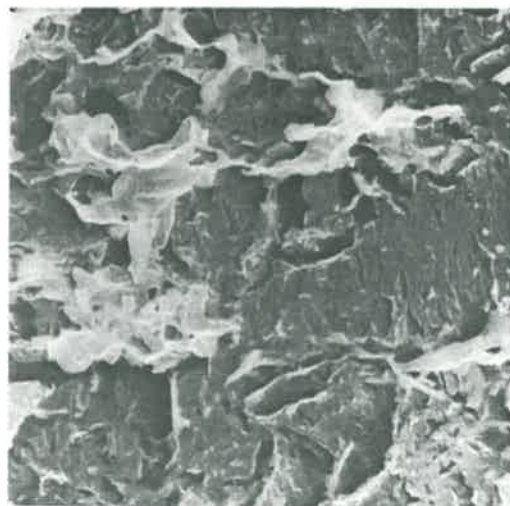
10a 20µm



10b 10µm



10c 10µm



10d 2µm



Nous avons également observé l'effet de la diminution de la quantité de PVA sur un échantillon à 1 % de PVA à  $pF = 2$  : les fissures n'apparaissent plus, mais on remarque des plages sphériques où le réseau est condensé, entourées par des zones beaucoup plus lâches. Cette morphologie semble préfigurer celle observée avec 10 % de PVA.

#### b. Kaolinite

En ce qui concerne les kaolinites, les choses sont moins nettes.

L'organisation de l'argile est ici réalisée à partir de cristallites isolés ou de paquets de quelques cristallites, comme l'a observé TESSIER. Ceux-ci sont disposés parallèlement les uns aux autres.

Les modifications observées avec les conditionneurs concernent principalement la formation de gros paquets de cristallites associés face à face, qui sont plus ou moins individualisés suivant les cas.

La taille des agrégats ainsi formés varie entre 5 et 20  $\mu m$ . C'est avec le PAM et le PVA que ces agrégats s'individualisent le mieux, et qu'il apparaît une porosité interagrégats.

Ici encore, il faut tenir compte du  $pF$  auquel sont faites ces observations, peut-être aurait-il été intéressant de diminuer encore la contrainte.

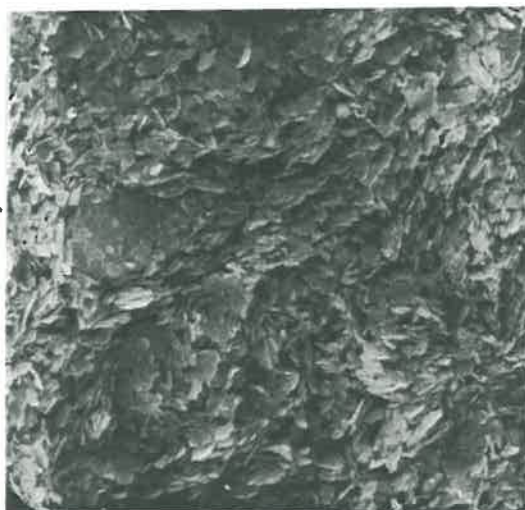
Il faut noter l'observation avec le PAM d'un réseau de filaments entre les agrégats, qui semble relier les cristallites entre eux. Ces filaments correspondent certainement à des faisceaux de chaînes de ce polymère de poids moléculaire très élevé (2 à 3 000 000).

CARACTERISATION DES ASSOCIATIONS ARGILE-CONDITIONNEURS AU M.E.B-CRYOSCAN

11:Kaolinite  
témoin

pF 2

10 $\mu$ m

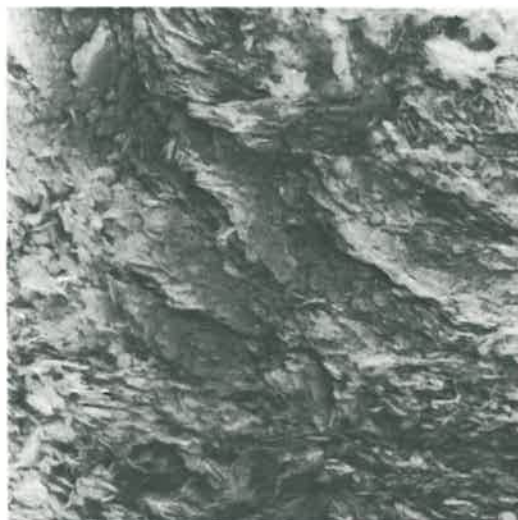


12:Kaolinite + X.Ø pF 2



2 $\mu$ m

13:Kaolinite + M2 SH pF 2



10 $\mu$ m

14:Kaolinite + NS 2 pF 2



14a

2 $\mu$ m



14b

1 $\mu$ m

CARACTERISATION DES ASSOCIATIONS ARGILE-CONDITIONNEURS AU M.E.B-CRYOSCAN

15:Kaolinite + WAC pF 2



15a 10μm



15b 2μm



15c 1μm

16:Kaolinite + PVA pF 2



16a 20μm



16b 2μm

Dans ce cas, le M.E.B. permet la visualisation directe de l'interaction entre l'argile et le polymère.

### Discussion

On peut récapituler les différentes observations effectuées en distinguant bien les deux cas : Montmorillonite et Kaolinite.

. En ce qui concerne la montmorillonite, il s'agit :

- d'une part, de la rupture du réseau continu avec, soit individualisation d'agrégats et apparition d'une porosité interagrégats (PVA), soit simplement fissuration locale (WAC - Xanthate de cellulose) ;

- et d'autre part, d'une contraction de la structure avec des figures d'accolement des tactoïdes entre eux (Amines - Sels d'ammonium).

On peut donc s'attendre à une influence marquée des conditionneurs sur les propriétés des argiles. Les effets pourraient être particulièrement bénéfiques dans le cas des premiers produits (WAC - PVA), alors que les produits hydrophobes devraient avoir des effets contraires.

. En ce qui concerne la kaolinite, les effets les plus nets correspondent à la formation d'agrégats de cristallites associés face-face.

Cet état agrégé des particules s'oppose à l'état floculé que peuvent adopter naturellement les kaolinites (PEDRO, 1976).

Il pourrait s'expliquer par une fixation des conditionneurs sur les faces basales des particules, annulant les possibilités de liaisons bord-face.

CARACTERISATION DES ASSOCIATIONS ARGILE-CONDITIONNEURS AU M.E.B-CRYOSCAN

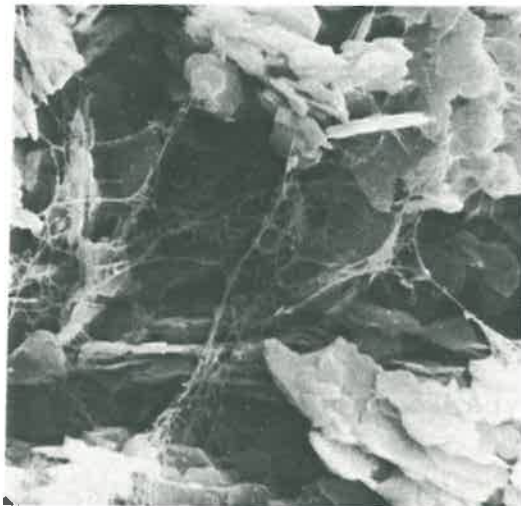
17:Kaolinite + PAM

pF 2

10 $\mu$ m ———



17b 2 $\mu$ m ———



17c 1 $\mu$ m ———

18:Kaolinite + PVAc pF 2



18a 2 $\mu$ m ———



18b 1 $\mu$ m ———

L'influence de ces effets sur les propriétés, n'est pas évident à prévoir. La kaolinite n'ayant pas de propriétés de gonflement, ne pose pas les mêmes problèmes que la montmorillonite. On a une diminution de la porosité intra-agrégat au profit d'une porosité interagrégats. Mais on ne peut pas en tirer de conclusions quant au comportement global. Il est probable que le choix d'une Kaolinite ou Illite de plus petite taille aurait permis des effets plus visibles.

Si on compare ces observations à celles effectuées sur d'autres systèmes, dans les mêmes conditions, on peut dégager plusieurs points :

- Les échantillons correspondant aux produits hydrophobes (amines et sels d'ammonium) présentent de bonnes similitudes morphologiques avec ceux observés par C. JOIGNY (communication personnelle) qui a utilisé l'hexadécylamine (amine en C<sub>16</sub>). Il y a contraction du réseau et formation de figures résultant de l'accolement des tactoïdes.

- De même, le mécanisme de fissuration observé pour le WAC et le PVA, se retrouve pour les polycations du Fer et de l'Aluminium ( $2 < r < 2,8$ )

On peut donc dire que ces morphologies observées au M.E.B. ne sont pas le fruit du hasard, mais correspondent à des mécanismes précis liés à la structure et aux propriétés des substances présentes.

## D - INFLUENCE DES CONDITIONNEURS SUR LES PROPRIETES DES ARGILES

Après avoir caractérisé les associations entre argile et conditionneur, il nous faut choisir des critères mesurables de la modification des propriétés de ces argiles. Nous avons retenu 3 paramètres importants, eu égard au rôle joué par les argiles dans les sols :

- la teneur en eau à une contrainte donnée,
- la granulométrie, qui permet de mesurer si il y a agrégation,
- la conductivité hydraulique, qui est une mesure directe de l'efficacité des conditionneurs à modifier le comportement des argiles.

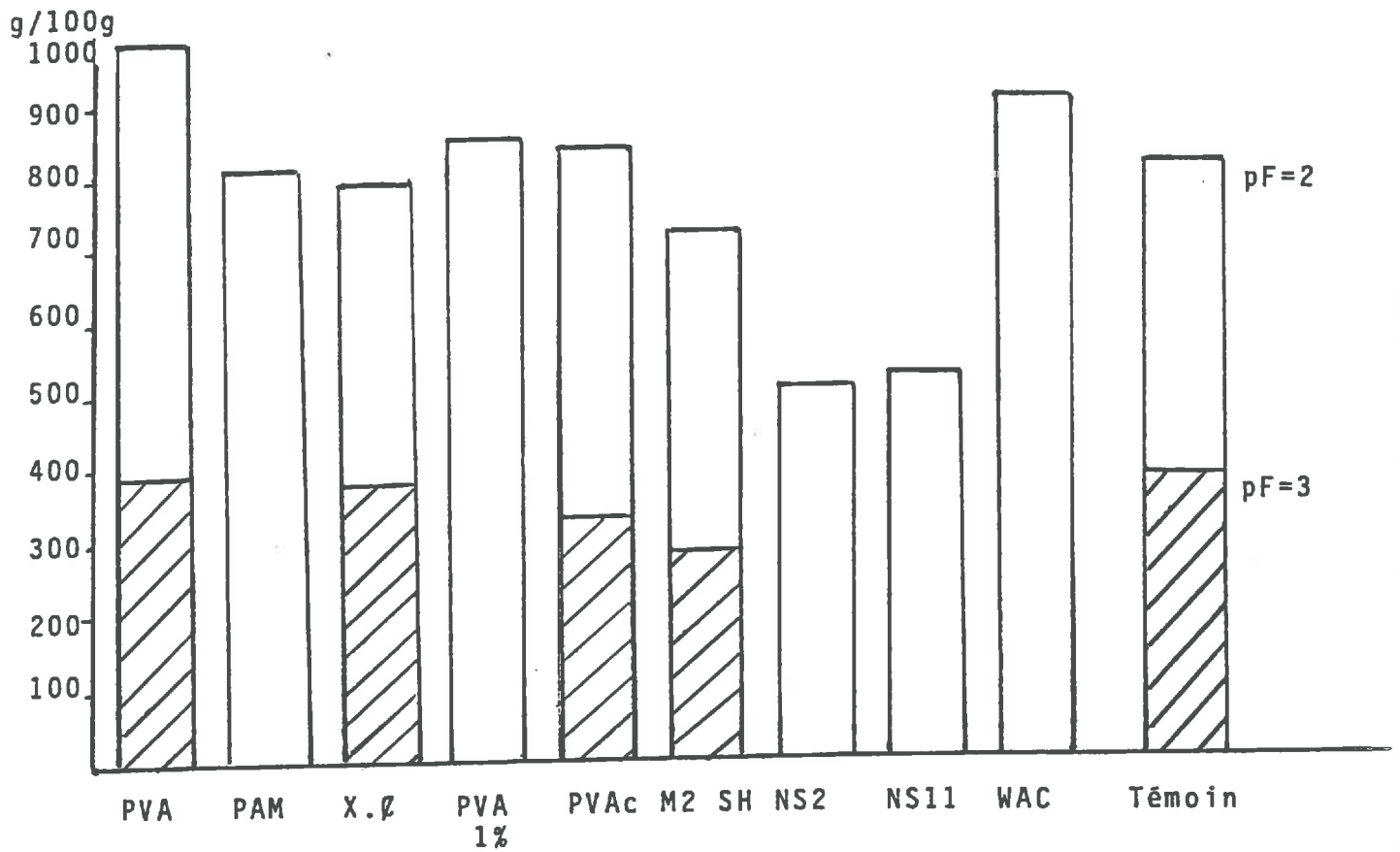
### 1/ - Rétention en eau des complexes argiles-conditionneurs

La mesure de la teneur en eau d'une argile à une contrainte donnée, est un point particulièrement important pour l'étude de l'organisation et du comportement d'un matériau argileux.

Nous avons effectué des mesures seulement à  $pF = 2$  et  $pF = 3$  sur les mêmes échantillons que ceux ayant été observés au M.E.B.

On pèse les échantillons immédiatement après leur sortie des tubes à  $pF$ , puis on les met à l'étuve pendant 24 h à  $110^{\circ}C$ , on a ainsi une valeur de la teneur en eau pondérale. Les mesures de teneur en eau volumique n'ont pas pu être effectuées compte tenu des difficultés pour calculer les densités réelles des associations.

# RETENTION EN EAU DES MONTMORILLONITES





Résultats :

La rétention en eau des argiles semble relativement peu modifiée par les conditionneurs.

- Avec la montmorillonite, on note cependant une nette diminution de celle-ci, dans le cas de Noramox S<sub>2</sub> et S<sub>11</sub>, et plus légère avec le Stabiram 677.

Le PVA et le W.A.C. semblent au contraire augmenter cette rétention d'eau.

Les valeurs sont comprises entre 500 g/100 g d'argile pour le Noramox et 950 g/100 g pour le PVA, alors que le témoin a une teneur en eau de 800 g/100 g.

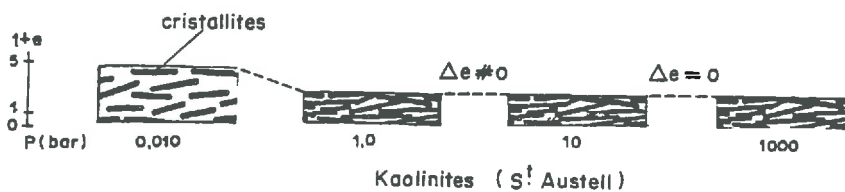
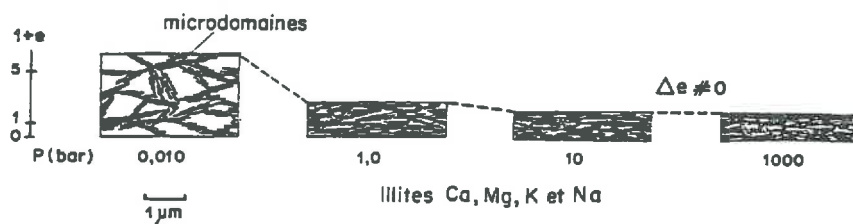
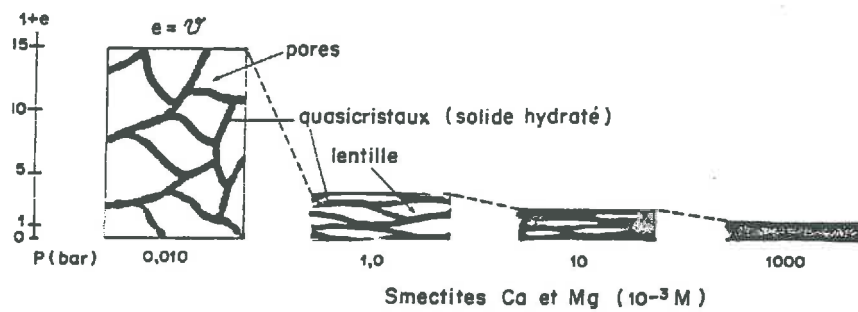
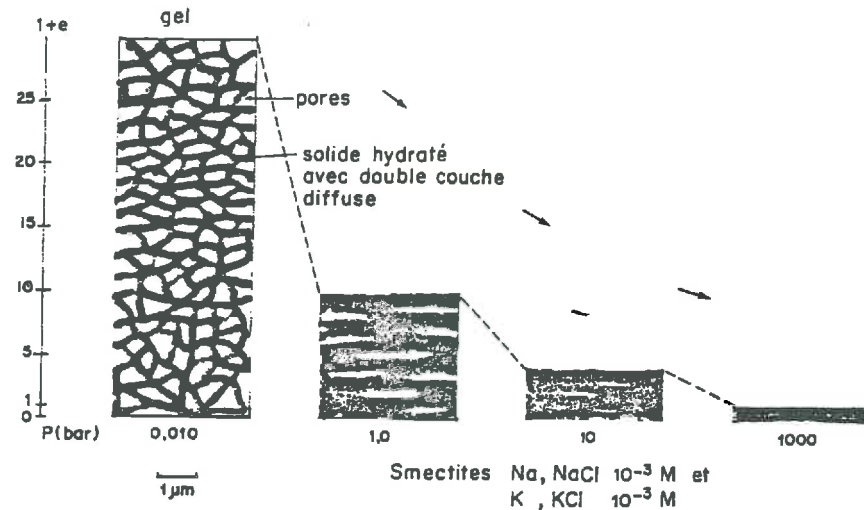
A pF = 3 ces différences s'atténuent, et on a des valeurs comprises entre 300 et 400 g/100 g.

- Avec la kaolinite, toutes les valeurs obtenues sont voisines et proches de 100 g/100 g. Il est donc plus difficile de conclure sur l'influence des conditionneurs sur la rétention en eau de ces argiles.

Il serait intéressant de compléter ces mesures en réalisant les courbes complètes de la teneur en eau en fonction de la contrainte hydrique, en déshydratation et en réhumectation (TESSIER, 1980).

En effet, on peut imaginer que des modifications de l'organisation des argiles provoqués par les conditionneurs n'apparaissent qu'après une dessiccation très poussée (ROBERT) (associations argile-Fer ou Al).

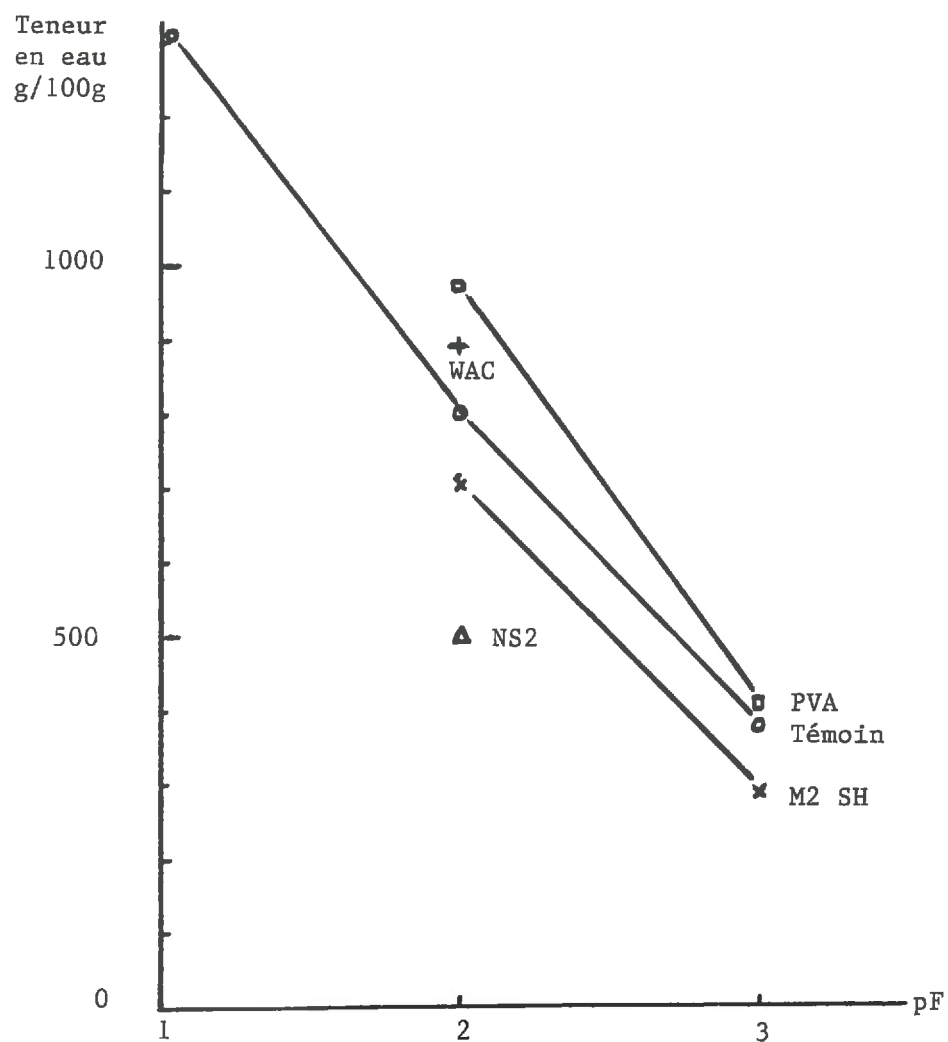
De plus, cela permettrait d'étudier le comportement des associations au cours du cycle dessiccation-réhumectation, processus auquel est soumise en permanence la surface des sols.



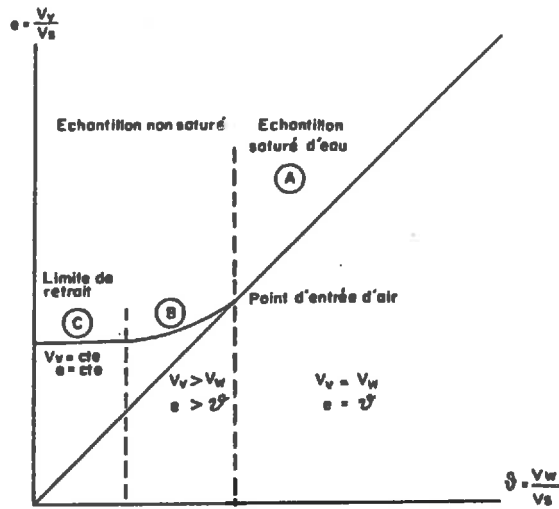
- Représentation schématique de l'évolution du volume apparent ( $1 + e$ ) et de l'organisation générale des grands types de matériaux argileux au cours de la première dessiccation depuis  $P = 0,010$  bar ( $pF 1$ ) jusqu'à  $P = 1000$  bars ( $pF 6$ )

( d'après TESSIER, 1984)

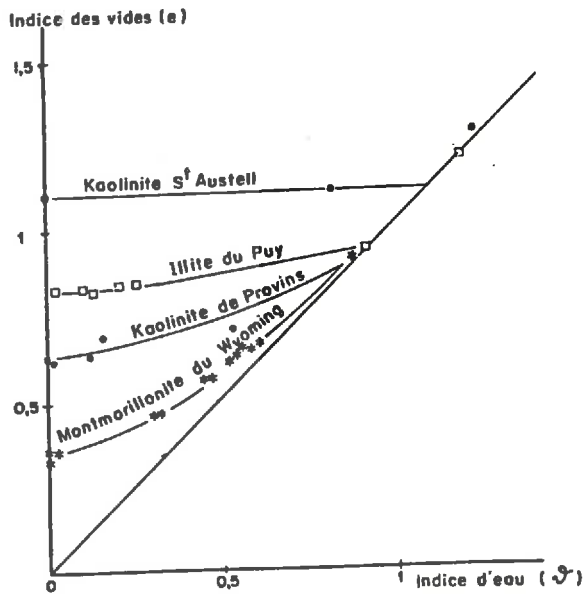
EVOLUTION DE LA RETENTION EN EAU DES MONTMORILLONITES AU COURS DE LA DESSICATION



PROPRIETES HYDRIQUES DES ARGILES  
 LA LIMITE DE RETRAIT (d'après TESSIER)



- Représentation schématique de la courbe de retrait  
 obtenue à partir d'une argile



- Courbes de retrait obtenues à partir des différentes argiles

## Discussion

La signification de la rétention en eau n'est en fait pas la même pour les deux types d'argile. En particulier, les propriétés de gonflement de la montmorillonite font que la limite de retrait n'est atteinte que pour des contraintes très élevées, c'est-à-dire que tout départ d'eau au cours de la dessiccation, s'accompagne d'une diminution de volume, alors que pour la kaolinite, le volume ne diminue plus à partir de pF 4.

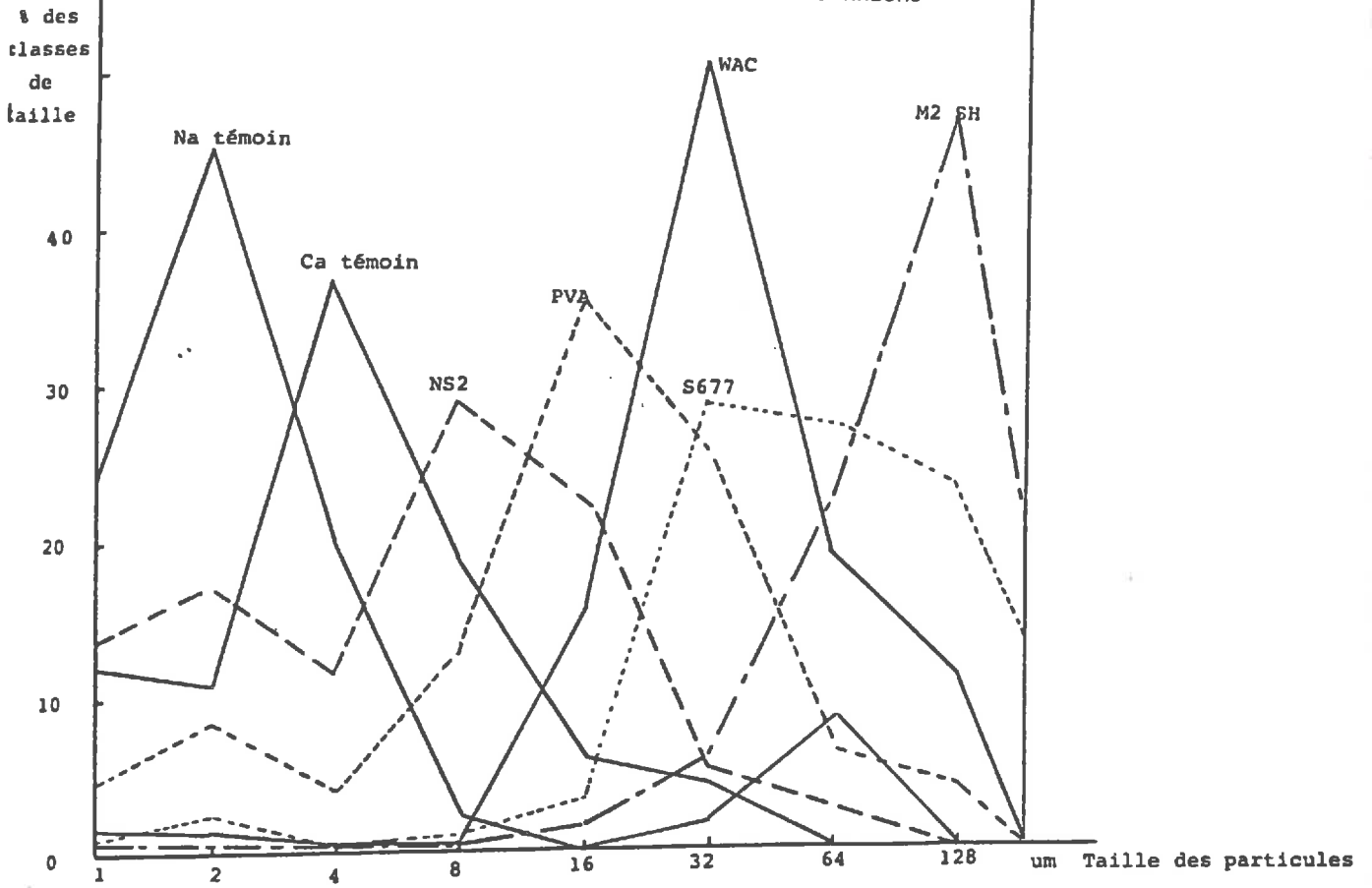
Ceci étant dit, dans la gamme de pF que nous avons considérée (pF. 2 à 3), tous les échantillons sont saturés. On retrouve les résultats classiques : à pF 2, la montmorillonite retient 10 fois son poids d'eau, c'est-à-dire environ 10 fois plus que la kaolinite, mais ces valeurs correspondent à une première dessiccation et TESSIER a montré qu'après une réhumectation, la kaolinite retrouvait une teneur en eau comparable, alors que les smectites se réhumectaient d'autant moins que la dessiccation avait été forte.

Et c'est peut-être à ce niveau que les conditionneurs pourraient jouer un rôle : en modifiant l'organisation du matériau, ils risquent de modifier son comportement hydrique au cours de la dessiccation et de la réhumectation.

Les résultats obtenus permettent simplement de distinguer deux catégories d'échantillons :

- les produits hydrophobes qui diminuent la rétention en eau ; ce qui peut s'expliquer par cette propriété d'hydrophobie : la tension superficielle de l'eau sur les argiles étant plus faible, elle est mobilisable plus rapidement lorsque l'on applique une contrainte. On peut mettre ce résultat en relation avec les observations au M.E.B., où la diminution de porosité est bien visible.

# GRANULOMETRIE DE SUSPENSIONS MONTMORILLONITE-CONDITIONNEURS



- Les autres produits modifient peu ou augmentent légèrement cette rétention en eau, et on observe au M.E.B. une augmentation de la porosité (PVA - wac).

La bonne corrélation observée entre les valeurs de rétention en eau et la morphologie de l'espace poral, à un même pF est un point très intéressant de cette étude ; il apporte une certaine confirmation de la validité des observations effectuées au M.E.B.

## 2/ - Granulométrie des suspensions de complexes argile-polymères

Une telle étude a pour but de déterminer le pouvoir flocculant et agrégeant des conditionneurs. On cherche à mesurer la taille, l'homogénéité et surtout la stabilité des agrégats formés.

### Matériel et méthode

Nous avons pu utiliser le granulomètre à laser qui se trouve au centre de recherche de la C.E.C.A.

Les suspensions des mélanges à analyser sont préparées de la même manière que pour la mise à pF ; mais sans centrifugation, afin de conserver des suspensions diluées.

L'analyse granulométrique utilise la diffraction d'un faisceau de rayon laser au cours de son passage à travers la solution, elle est basée sur un modèle qui considère les particules comme des petites sphères, ce qui est assez loin de la réalité surtout dans le cas d'argile dispersée.

Les résultats sont donc fonction de ce modèle, et les valeurs obtenues sont donc relatives. Cela permet néanmoins d'effectuer de manière satisfaisante, des comparaisons entre les différents traitements.

## Résultats

L'appareil permet d'obtenir la granulométrie relative en 16 classes granulométriques comprises entre 1 et 192  $\mu\text{m}$ .

On observe pour tous les mélanges argile-conditionneurs, une augmentation de la taille des constituants.

Le pic à 2  $\mu\text{m}$  de la montmorillonite Na témoin passe à 8 16 - 32 -128  $\mu\text{m}$ , pour respectivement, le  $\text{NS}_2$ , le PVA, le WAC et le  $\text{M}_2$  SH.

Ainsi, il apparaît que les différents produits ont un pouvoir flocculant et/ou agrégeant, très important puisque l'on obtient des agrégats qui font jusqu'à cinquante fois le diamètre des particules du témoin.

La granulométrie est plus ou moins homogène suivant les produits : on a par exemple un pic assez net à 32  $\mu\text{m}$  pour le WAC, alors que pour le  $\text{NS}_2$  on a un plateau de 32 à 128  $\mu\text{m}$ .

Avec le PVA et le  $\text{NS}_2$  on observe un "résidu" à 2  $\mu\text{m}$ , qui peut indiquer que toutes les particules n'ont pas été mobilisées par le conditionneur : cela peut s'expliquer, soit par un mélange insuffisant, soit par une concentration du produit trop faible pour agir sur la totalité des particules.

## Discussion

Des restrictions sont à apporter à ces résultats :

- Il s'agit de valeurs relatives, qui sont fonction du modèle "particules sphériques" adopté, lequel est évidemment peu adapté à des argiles qui se présentent sous forme de plaquettes.

Ainsi, des anomalies apparaissent : par exemple près de 10 % d'agrégats de 64  $\mu\text{m}$  pour le témoin Na, ces agrégats n'existent certainement pas.



- D'autre part, on obtient des mesures pour une certaine valeur d'agitation mécanique : il s'agit donc des agrégats stables pour une agitation et une concentration donnée. Le résultat serait différent si on faisait varier ces paramètres.

En définitive, il paraît difficile de relier ces mesures de granulométrie aux autres résultats obtenus (sur pâte), en particulier parce que l'argile se trouve en suspension.

Cependant, ce test révèle une propriété importante des conditionneurs : le pouvoir flocculant. Les résultats traduisent donc indirectement l'intensité des interactions que peuvent entraîner les conditionneurs entre les particules.

### 3/ - Conductivité hydraulique

L'étude de ce paramètre est particulièrement importante pour mettre en relation l'organisation des matériaux argileux et leur comportement hydrique.

#### Principe de la méthode :

Nous avons utilisé un dispositif permettant des mesures à un état de contrainte donné, en régime saturé (PROST, 1984).

La loi de Darcy permet de déterminer la perméabilité :

$$D = \frac{P}{e} \quad D = \text{débit en g/cm}^2 \text{ S}$$

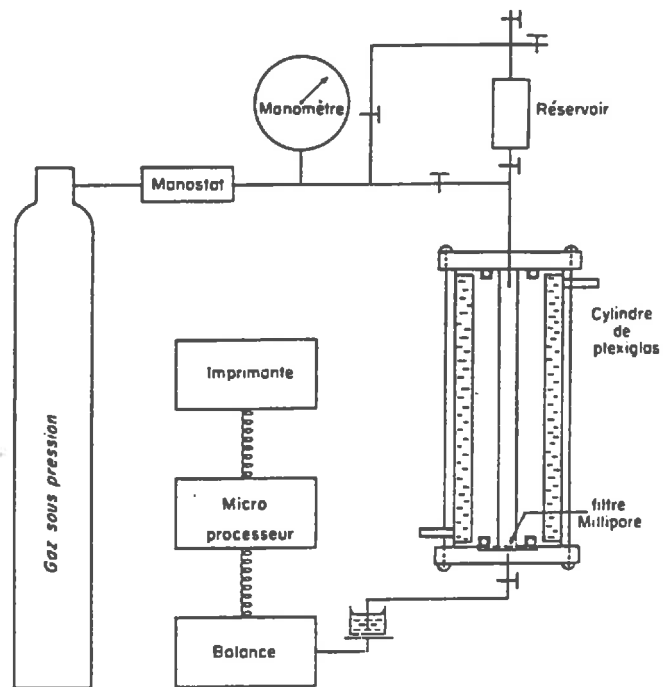
$$\frac{P}{e} = \text{gradient de pression hydrostatique en g/cm}^2 \text{ S}^{-1}$$

K est la conductivité hydraulique du milieu en  $\text{cm}^3 \text{S/g}$

$$\text{On tire } K_m = \frac{D e}{P} \quad K_m = \text{conductivité mesurée}$$

$$W = \text{flux d'eau mesuré}$$

SCHEMA DU DISPOSITIF UTILISE POUR FAIRE LES MESURES  
DE CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE. (PROST, 1984)



Les mesures se font dans une cellule cylindrique en plexiglas (cf. figure) reliée

- à sa partie supérieure à un manomètre permettant d'appliquer une pression hydrostatique (pF 2, pF 3) et à une bouteille d'alimentation en eau.

- à sa partie inférieure à un conduit assurant l'évacuation de l'eau recueillie dans une boîte de pétri.

Les quantités d'eau écoulées sont pesées automatiquement à intervalles réguliers et l'on a

$$K_m = \frac{Q \times e}{3 \times P}$$

S = section de la cellule en cm<sup>2</sup>

e m = épaisseur du milieu poreux en cm (pâte argileuse plus filtre)

P = charge en g/cm s<sup>r</sup>

La section de la cellule est connue, l'épaisseur du milieu poreux est déduite de la mesure du volume apparent par la méthode au pétrole, et on trouve donc le gradient de pression hydrostatique en divisant la pression de gaz appliquée par la hauteur de l'échantillon.

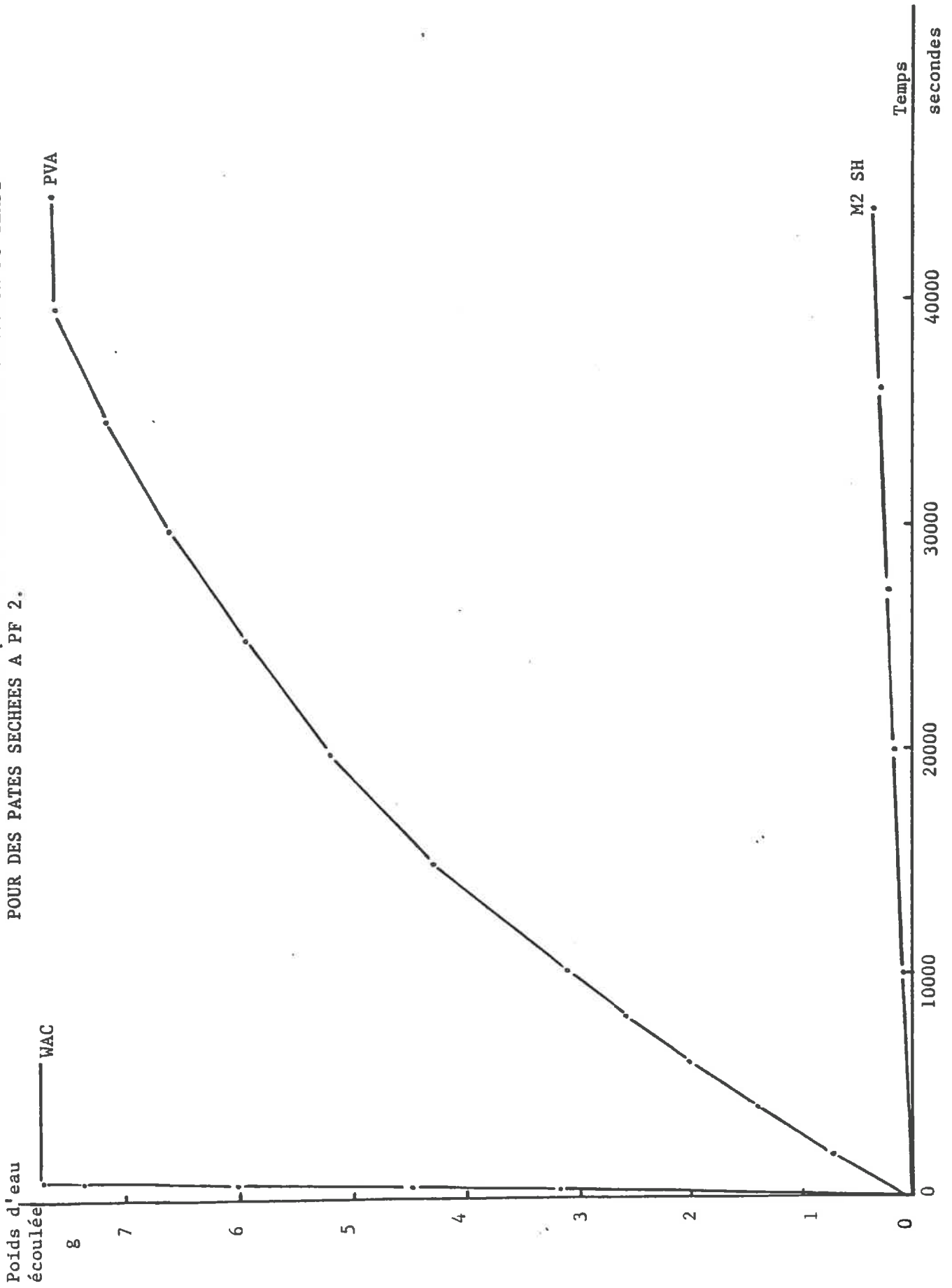
On calcule le débit en traçant les courbes représentant les quantités d'eau écoulée en fonction du temps, en tenant compte, pour les écoulements les plus lents, de l'eau perdue par évaporation.

### Résultats et discussion

Les résultats sont particulièrement spectaculaires puisque l'on trouve des différences d'un facteur 1000 entre les différents échantillons.

Il s'agit donc d'un test extrêmement sensible.

COURBES REPRESENTANT LA QUANTITE D'EAU ECOULEE EN FONCTION DU TEMPS  
POUR DES PATES SECHEES A PF 2.



Par rapport au témoin, la valeur de la conductivité hydraulique est multipliée par 60 pour le PVA, et par 3000 pour le WAC.

Par contre, le  $M_2SH$  ne modifie pratiquement pas la conductivité hydraulique.

On peut donc dire que le WAC rend perméable la montmorillonite, qui initialement est quasiment imperméable à pF 2.

Il devrait théoriquement être possible de calculer le rayon hydraulique des pâtes à partir des résultats obtenus, et par suite d'en tirer des indications sur l'arrangement des particules.

En fait, il faut noter que nous n'avons pas vérifié la loi de Darcy sur nos systèmes. De plus, avec un matériau gonflant, il n'est pas sûr que l'addition d'eau sur la pâte à l'équilibre ne modifie pas l'organisation de l'argile, même si la hauteur de la colonne d'eau est négligeable par rapport à la pression appliquée.

En définitive, les ordres de grandeurs sont suffisamment différents pour que l'on puisse utiliser les résultats de manière satisfaisante, en semi-quantitatif.

Si l'on compare ces mesures aux observations faites au M.E.B., un problème se pose : comment expliquer la différence de conductivité hydraulique entre le PVA et le WAC, alors qu'ils présentent des morphologies voisines et qu'ils ont pratiquement la même rétention en eau?

Si l'on considère en plus les résultats de la granulométrie, on constate que le WAC forme des agrégats 2 fois plus gros que le PVA ; mais ceci n'est quand même pas suffisant pour entraîner de tels écarts. On peut alors penser à des différences dans les propriétés de gonflement des argiles traitées, ou bien dans leurs propriétés de mouillabilité, mais cela reste à vérifier.

### Conclusion 2me partie

La prise en compte des études minéralogiques, de la caractérisation morphologique des associations argile-conditionneurs, conjointement aux résultats obtenus concernant les propriétés physiques, et hydriques de ces associations permet de dégager plusieurs points :

- Les interactions entre conditionneurs et argiles ne sont pas de même type et n'induisent pas les mêmes propriétés suivant les produits ; les analyses en diffraction des RX en particulier, indiquent que certains des composés pénètrent entre les feuillets d'argile, et que parmi ceux-ci on peut distinguer différents modes d'association : interstratification ou démixtion.

- Les caractérisations morphologiques permettent de différencier très nettement deux groupes de produits : les hydrophobes qui entraînent une diminution de porosité par contraction du réseau, et les autres polymères qui créent des discontinuités au sein de ce réseau. Ces deux groupes se différencient très bien vis-à-vis de la rétention en eau et de la conductivité hydraulique.

- On peut donc mettre en relation la morphologie des argiles à l'état humide et certaines de leurs propriétés hydriques : rétention en eau et conductivité hydraulique.

- Il est difficile de relier les résultats de la granulométrie aux observations morphologiques et aux autres résultats. On peut l'imputer aux conditions expérimentales très différentes des autres manipulations. En effet, le comportement des argiles en suspension diluée n'est pas comparable à celui des pâtes.

Cependant, ce test de granulométrie révèle une propriété importante des conditionneurs qui n'est pas prise en

compte dans les autres expériences : c'est le pouvoir flocculant qui traduit indirectement l'intensité des interactions que peuvent créer les conditionneurs entre les particules d'argile.

Il faut enfin noter la bonne convergence des résultats montrant l'efficacité spectaculaire du WAC : conductivité hydraulique multipliée par un facteur mille par rapport au témoin et granulométrie moyenne passant de 2 à 32  $\mu\text{m}$ .

Le PVA agit dans le même sens, mais de manière moins marquée.

Les produits hydrophobes induisent un comportement et des propriétés très différentes : diminution de la rétention en eau, mauvaise conductivité hydraulique et granulométrie variable.

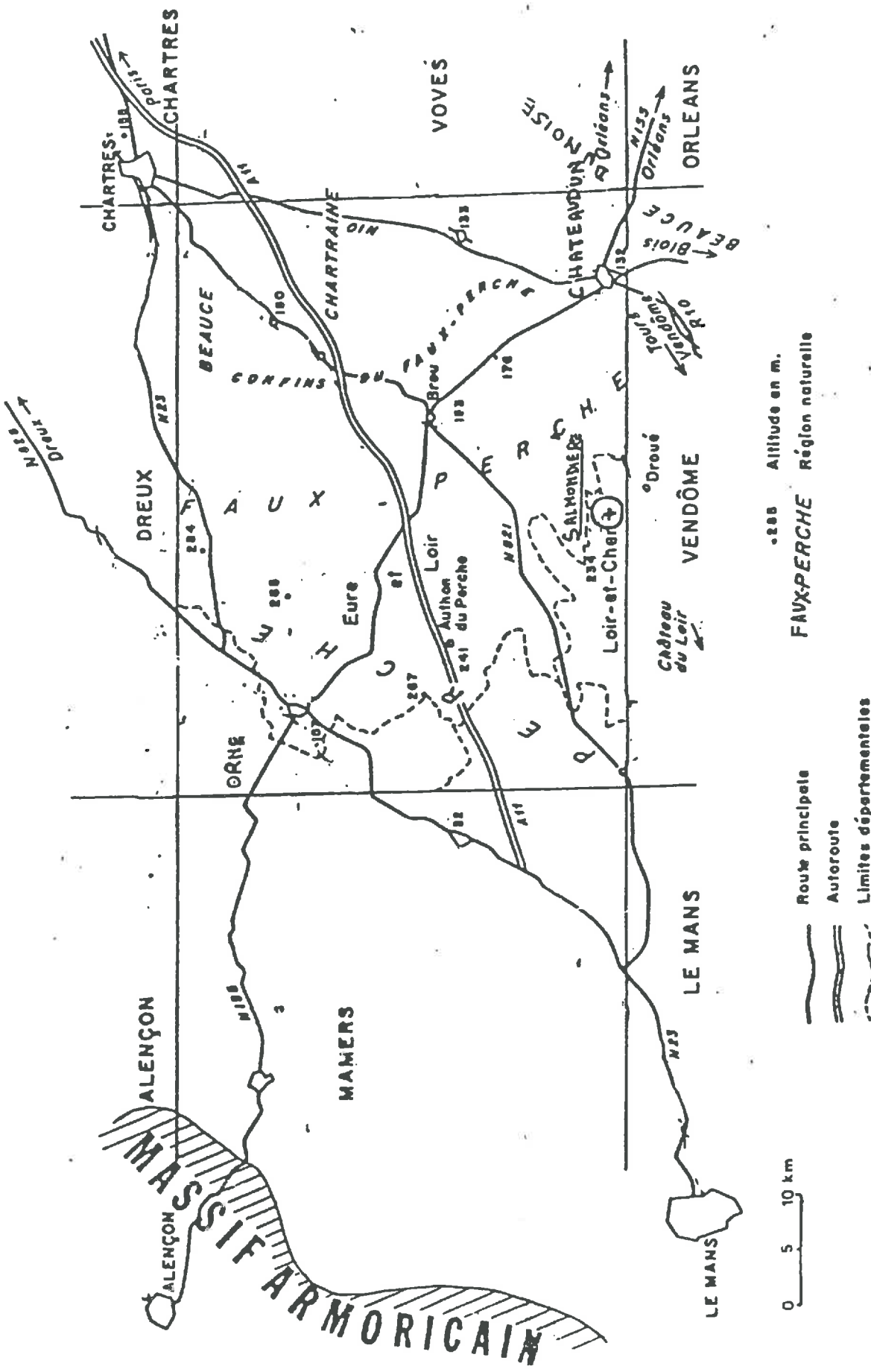
Quant aux autres substances, l'ensemble des tests n'a pas été effectué, mais leurs études morphologiques n'ont pas montré de modification de la structure de l'argile.

L'ensemble de ce travail expérimental apporte donc des éléments nouveaux concernant l'étude des interactions argile-conditionneurs.

Le M.E.B. permet en particulier une caractérisation morphologique des associations formées.

Il est possible d'effectuer un classement des différents produits en fonction de leur efficacité.

Ces résultats ont un intérêt d'un point de vue fondamental, mais on peut certainement les étendre, dans un but appliqué, à des sols très argileux, par exemple pour des traitements au niveau des tranchées de drainage.



SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA SALMONDIERE



## TROISIEME PARTIE

### INFLUENCE DES CONDITIONNEURS DE SOL

#### SUR LA STABILITE STRUCTURALE : EXEMPLE D'UN SOL

#### LIMONEUX BATTANT DU FAUX PERCHE

La deuxième partie de notre travail expérimental porte sur l'étude de la stabilité structurale d'un sol traité avec des conditionneurs.

Elle comporte deux volets développés en parallèle :

- l'étude au laboratoire de la stabilité d'agrégats de sol remaniés et traités, à l'aide du test de HENIN,
- l'étude de l'influence des conditionneurs sur le comportement en surface du sol, sous pluie simulée.

Ces travaux sont complémentaires de ceux portant sur les associations argiles-conditionneurs, et constituent la première étape d'une étude de l'utilisation des conditionneurs sur le terrain.

#### A - LE SOL DE LA SALMONDIERE

Nous avons utilisé un sol limoneux provenant du Faux-Perche qui a été étudié en particulier par ISAMBERT et par TREVISANT, et qui est un bon exemple de sol sensible à la dégradation structurale.

- PROFIL DE SOL

UNITE 51  
classique net

(ISAMBERT)

Analyse granulométrique

Horizon	Prof. cm.	Couleur MUNSSELL	Arg. 0-2 u	Limos		Sables					T. fine T. vel. %	2xC % M.O. %	C %	N %	C/N
				2-20 u	20-50 u	50-100	100-200	200-500	500-1000	1000-2000					
ApG	23		11,4	35,8	39,7	5,7	2,2	2,0	1,6	1,6	100,0	1,9	9,6	1,02	9,4
A2G	32		13,1	36,0	37,0	6,0	2,2	1,8	2,2	1,7	100,0	0,7	3,3	0,44	7,5
A&B <sub>G</sub>	44		17,9	32,5	33,4	5,4	2,7	3,3	3,1	1,7	100,0	0,4	2,0	0,36	5,6
Bcd <sub>G</sub>	64		26,9	31,5	30,0	5,4	2,4	1,6	1,3	0,9	100,0	0,3	1,5	0,29	5,2
CI B <sub>3</sub> cgx	100		33,8	27,7	25,3	5,2	2,2	1,4	1,4	3,0	85,37	0,2	1,1	0,24	4,6
II B <sub>3</sub> gx	140		40,1	24,7	22,6	4,3	2,1	1,6	1,4	3,2	67,6	0,2	1,2	0,26	4,6

Analyse chimique

Horizon	pH		Calc. %	Al lib. %	méq. / 100 g de terre à pH 7,0					S/T %	TA %	Fe lib. %	Fe tot. %	Fe 115 %	Ma fac. %	Acide phosph. %
	eau	KCl			T	Ca	Mg	K	Na							
ApG	5,8	5,0	0	0,13	6,6	4,8	0,28	0,14	0,06	80,0	25	1,21	1,84	1,66	0,21	0,06
A2G	6,5	5,4	0	0,19	5,8	5,0	0,36	0,11	0,05	95,2	34	1,50	2,39	63	0,64	0,00
A&B <sub>G</sub>	6,9	5,7	0	0,28	8,0	7,1	0,69	0,16	0,07	sat.	40	2,28	3,21	71	1,03	0,00
Bcd <sub>G</sub>	6,9	5,8	0	0,37	11,3	0,1	1,50	0,24	0,11	sat.	40	2,51	3,74	67	0,29	0,00
CI B <sub>3</sub> cgx	5,6	4,5	0	0,49	13,1	9,2	2,67	0,25	0,12	93,5	38	3,80	5,43	70	0,07	0,00
II B <sub>3</sub> gx	5,3	4,1	0	0,55	14,7	8,7	3,37	0,25	0,13	84,7	36	4,05	5,81	70	0,10	0,00

Caractéristiques physiques

Horizon	Densité		Poros. %	C.R. pF	P.F. pF 4,2	Hum. équival %	Accréditables			log 10 ls	log 10 K				Pénétr. Kg/cm
	app.	réelle					alc.	beau.	équ		1h	2h	3h	24h	
ApG						19,6	7,9	5,0	6,8	1,95	1,10	0,99	0,92	0,59	
A2G						19,2	9,0	5,9	8,3	2,14	1,06	0,93	0,83	0,59	
A&B <sub>G</sub>						22,3	16,7	10,6	14,8	1,91	1,20	1,17	1,11	1,03	
Bcd <sub>G</sub>						24,2	20,7	5,9	14,7	1,75	1,22	1,16	1,13	1,03	
CI B <sub>3</sub> cgx						24,0	23,8	4,4	14,9	1,64	1,36	1,36	1,28	1,22	
II B <sub>3</sub> gx						25,7	24,8	6,5	21,7	1,60	1,47	1,47	1,38	1,33	

1/ - Condition de prélèvement

Nous avons prélevé l'horizon superficiel (Apg 0-25 cm) du sol, sur une parcelle drainée et récemment labourée, occupée les années précédentes par des cultures de céréales.

L'humidité du sol au moment du prélèvement était voisine de 18 %.

Une partie a été conservée au réfrigérateur à cette humidité, et l'autre partie a été mise à sécher à l'air. On a brisé les mottes pour obtenir un matériau relativement homogène ne comportant pas d'éléments supérieurs à 2 cm.

2/ - Caractéristiques du sol

L'horizon Apg est décrit de la manière suivante (d'après ISAMBERT) :

limoneux - mis en culture - assez organique - brun - cailloux rares - battance fréquente - tassements dus aux façons culturales souvent très nets (structure lamellaire) à la base de l'horizon.

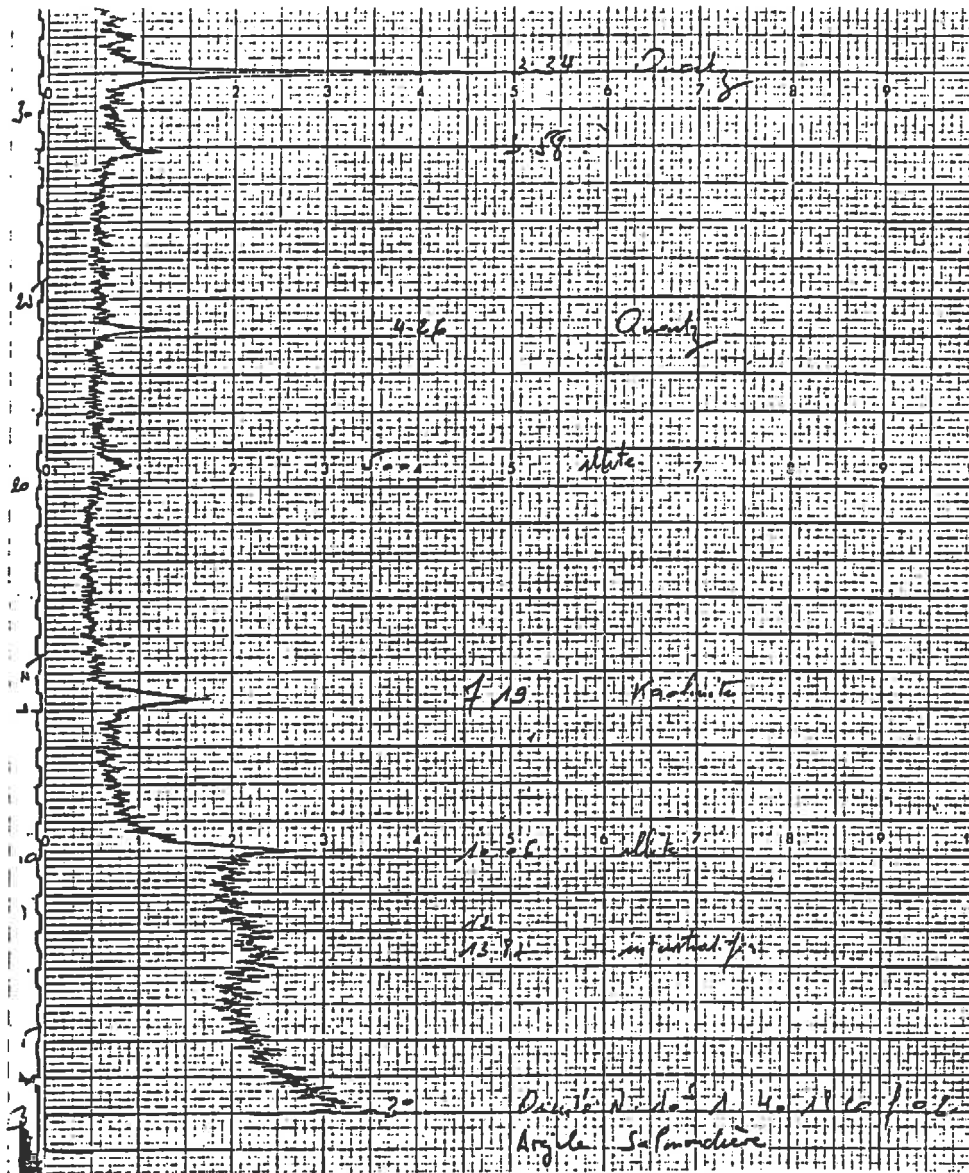
Les parcelles non drainées sont marquées par une hydromorphie qui remonte jusqu'à cet horizon.

Les résultats analytiques (tableaux) permettent de dégager les caractéristiques physico-chimiques essentielles du profil de ce sol limoneux sous culture :

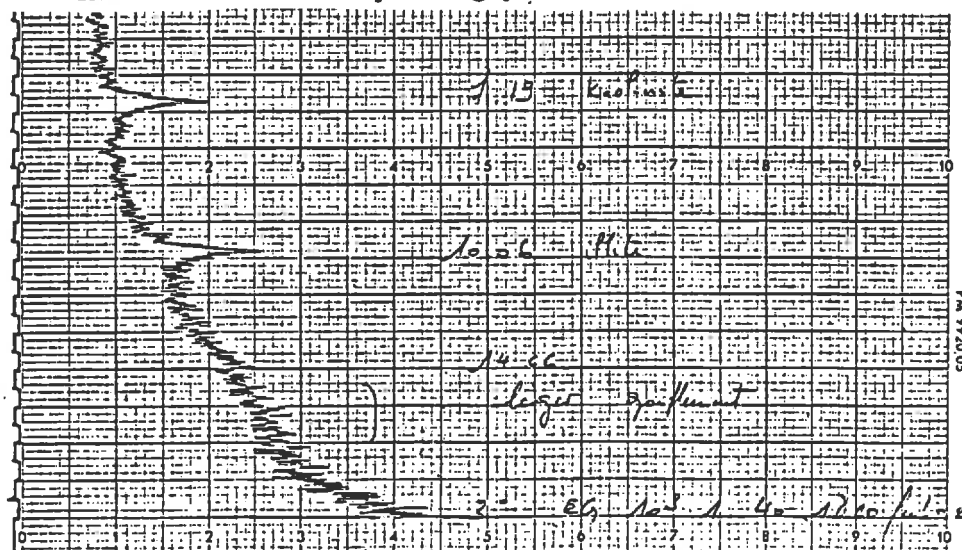
- le taux d'argile est faible en surface et augmente avec la profondeur,
- les fractions limoneuses sont très dominantes,
- le taux de matière organique est moyen en surface et décroît rapidement en profondeur,
- le pH est inférieur à la neutralité en surface,
- la capacité d'échange est faible dans la partie lessivée du profil.

ANALYSE MINÉRALOGIQUE DE LA FRACTION ARGILEUSE DU SOL DE LA SALMONDIÈRE  
 PAR DIFFRACTION DES RAYONS X

Echantillon naturel séché à l'air



Echantillon saturé à l'éthylène glycol



De plus, il existe des niveaux peu perméables à l'eau qui contribuent, sous ce climat très humide, à l'engorgement du sol en hiver : ce sont en particulier la croûte de battance superficielle due à la faible stabilité structurale de l'horizon Ap, et la semelle de labour à la base de Ap.

Nous avons également réalisé une analyse aux rayons X de la fraction argileuse de l'horizon Ap.

Elle montre qu'il s'agit essentiellement d'illite, d'interstratifiés 10-14 Å, gonflants et d'un peu de kaolinite. Il s'agit là d'une composition minéralogique relativement classique pour les sols développés sur limons dans le Bassin Parisien.

DONNEES RELATIVES A LA STABILITE DES AGREGATS. (d'après HENIN)

NATURE DE LA TERRE	AGRÉGATS STABLES > 0,2 MM (%)	
	Mouillé sous air	Mouillé sous vide
Limon rouge . . . . .	18	76
Sablère Hor. B . . . . .	10	32
Versailles (cultivé) . . . . .	20	62,5
Versailles 42 parcelles. Fumier . . . . .	6,0	37,0
Terre argilo-calcaire . . . . .	50	71,0
Versailles 42 parcelles. NaNO <sub>3</sub> . . . . .	2,0	9,0

Mouillabilité et stabilité structurale

NATURE DE LA TERRE	TRAITEMENT	AGRÉGATS STABLES > 0,2 MM (%)	
		Témoin	Traité
Limon blanc . . . . .	Acide oléique	7	21,0
Limon blanc . . . . .	Huile de lin	7	78
Horizon B Versailles . . . . .	Huile de lin	12	23
Terre sodique (42 parcelles)	Acide oléique	1,5	21,5

— Gonflement et stabilité

Indice de gonflement	4,2	3,5	2,5	1,71	1,52	1,38
Agrégats stables (%)	88,8	38,8	77,6	4,7	6,2	1,7

— Influence de la texture sur la stabilité structurale

Argile %	60,7	29,0	16,8	14,2
Limon %	28,7	20,0	19,5	20,6
Agrégats stables > 0,2 mm %	38,8	10,9	2,2	1,7

## B - ETUDE DE LA STABILITE STRUCTURALE DES AGREGATS TRAITES

Nous avons utilisé le test de HENIN qui semble être l'un des plus représentatifs parmi les nombreux tests existant, pour évaluer la stabilité de la surface d'un sol (PAUWELS et al. 1976).

Nous l'avons adapté, en particulier, pour tester l'influence des différents conditionneurs sur la stabilité des agrégats.

### 1/ - Théorie de la stabilité de la structure

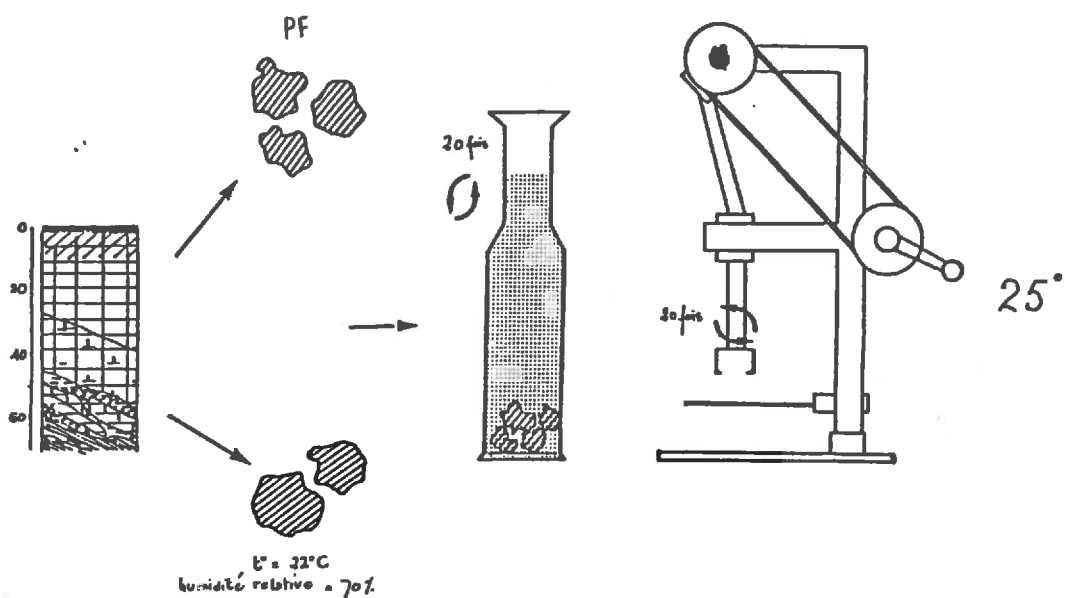
De nombreux auteurs ont étudié ce problème. Les travaux de HENIN (1939 et 48), de MONNIER (1965) et de CONCARET (1967) en particulier, ont permis de décrire et d'expliquer les processus de dégradation de la structure.

Nous rappellerons simplement que l'essentiel de la destruction des agrégats au contact de l'eau doit être attribué au phénomène d'explosion consécutif au piégeage de l'air dans les particules ; des effets de gonflement-dispersion peuvent intervenir de manière secondaire.

Les principaux facteurs de stabilité de la terre vis-à-vis de l'eau sont :

- une faible mouillabilité, qui dépend de la matière organique et des cations fixés : elle est importante avec le Na, elle décroît avec le Ca et elle est faible avec les ions Al et Fe<sup>3+</sup>.
- la cohésion à l'état humide qui est liée à la texture (notamment la teneur en argile), mais les cations échangeables interviennent également.

SCHEMA DU DISPOSITIF DE MESURE DE LA STABILITE DES AGREGATS  
APPAREIL DE FEODOROFF





- les matières organiques interviennent également de manière importante, en particulier les longues molécules qui servent de pont entre les particules d'argile.
- Enfin, la taille des particules et la présence de fissures jouent un rôle dans le délitement des agrégats.

Ces recherches ont conduit à mettre au point un test d'évaluation de la stabilité de la structure, qui tiennent compte de l'ensemble des facteurs mis en cause.

## 2/ - Description du test utilisé

Nous nous sommes inspiré des prétraitements (benzène et alcool) mis au point par HENIN et MONNIER (1969), en effectuant un prétraitement analogue des échantillons, avec les différentes solutions de conditionneurs.

Le test est effectué sur la fraction comprise entre 0,5 et 2 mm.

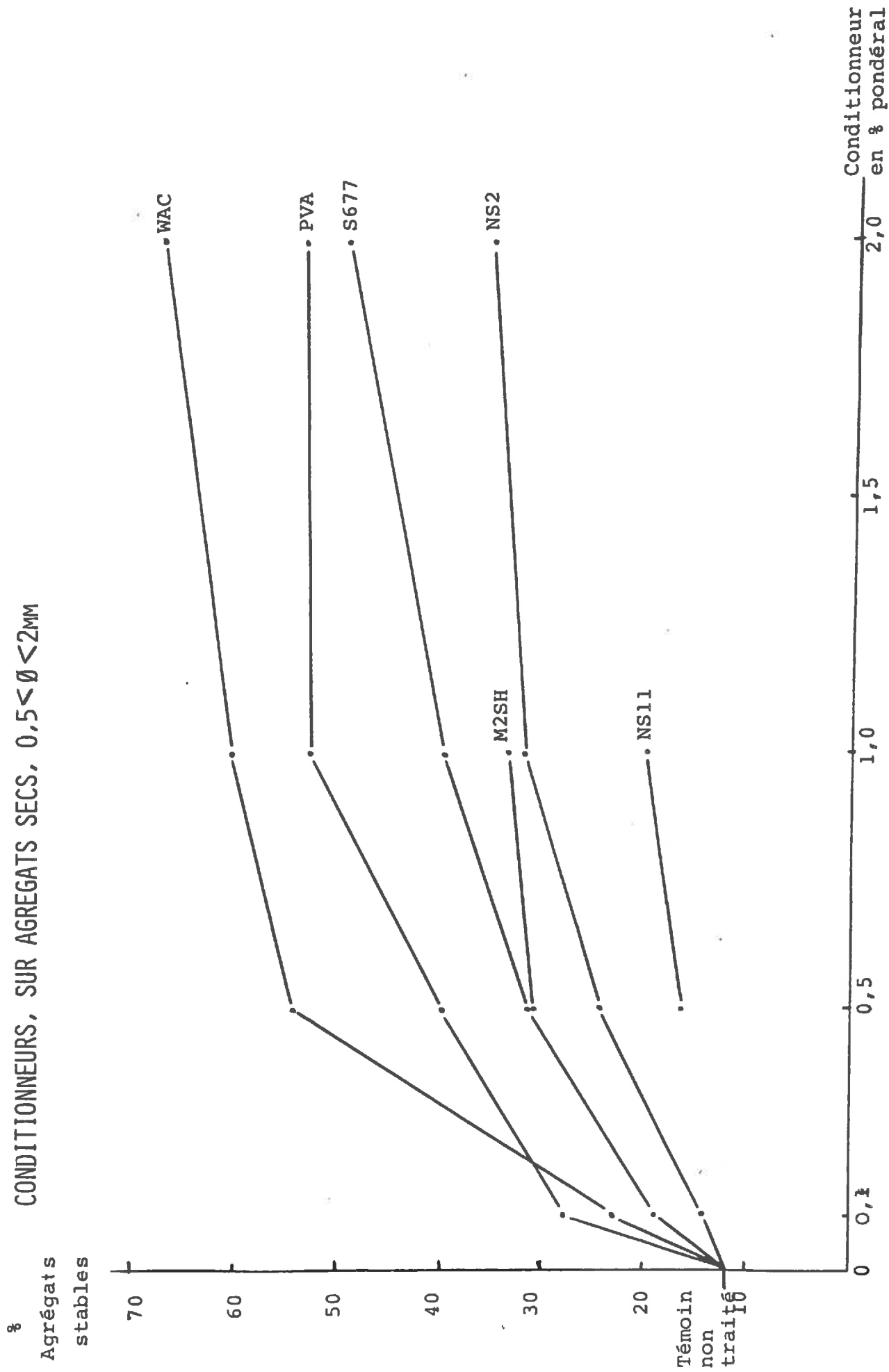
Les prises de 10 g de cette fraction de terre sèche sont immergées dans 25 ml de solution de conditionneur, puis l'ensemble est laissé au repos 1 heure.

Le bécher est ensuite rempli d'eau distillée à 250 ml. Au bout de 30 mn la contenu est transvasé dans un erlenmeyer de 750 cm<sup>3</sup>, le volume amené à 300 cm<sup>3</sup>, l'erlenmeyer bouché et on agite 20 fois par retournement.

Le contenu est alors jeté sur un tamis à mailles de 0,2 mm disposé dans l'appareil de FEODOROFF.

Le tamis immergé subit alors 20 agitations,

TEST DE STABILITE DES AGREGATS AVEC "PRETRAITEMENT"  
 CONDITIONNEURS, SUR AGREGATS SECS,  $0,5 < \emptyset < 2\text{mm}$



correspondant à la superposition d'un mouvement de rotation en va et vient autour de l'axe vertical du tamis, destiné à répartir les agrégats sur la toile, et un mouvement vertical destiné à faire passer les agrégats à travers les mailles.

On pèse ensuite les agrégats recueillis sur le tamis : ce sont les agrégats stables.

On corrige la valeur obtenue pour tenir compte des sables grossiers, ce qui conduit au calcul :

$$\% \text{ Agrégats stables} = \frac{(\text{Poids de la fraction restée sur le tamis}) - (\text{sables grossiers})}{10 - \text{sables grossiers}} \times 100$$

ce sont ces valeurs que nous avons retenues. En effet, s'agissant d'un test comparatif, il n'était pas nécessaire de calculer l'indice complet d'instabilité.

### 3/ - Résultats

On mesure pour le sol non traité une valeur voisine de 12 % d'agrégats stables ce qui est faible, mais normal compte tenu de la granulométrie de ce sol.

Tous les échantillons traités ont un pourcentage d'agrégats stables supérieur au témoin et celui-ci augmente avec la concentration des solutions en conditionneur.

Le meilleur résultat est obtenu avec le W.A.C. où l'on a plus de 65 % d'agrégats stables avec une solution à 2 %.

Les solutions semblent avoir le meilleur rendement pour des concentrations voisines de 1 %. Les courbes tendent vers un palier au-delà de cette valeur.

On a étudié l'influence de la durée d'immersion des agrégats dans les solutions.

Après 48 h, le résultat est légèrement supérieur mais très voisin de celui obtenu avec seulement 1 h d'immersion. L'effet est donc très rapide, on peut penser que l'adsorption du conditionneur sur les agrégats se fait dès l'immersion.

On a également étudié la durée et la persistance de cette stabilisation après séchage des agrégats recueillis sur le tamis.

Les résultats sont très concluants, puisque 90 % de ceux-ci sont stables si on leur fait subir un nouveau test (cas du W.A.C.).

#### DISCUSSION

Il est certain que le déroulement du test, en particulier le fait d'immerger les agrégats dans les solutions influe beaucoup sur les résultats.

En effet, la viscosité de ces solutions est assez forte et CONCARET (1967) a nettement mis en évidence la diminution du mécanisme d'éclatement des particules avec des liquides visqueux : la vitesse de pénétration dans les pores est plus faible, ce qui a pour effet de diminuer la compression de l'air en lui permettant de s'échapper, et la pression critique de rupture a moins de chance d'être atteinte.

Cependant, les résultats sont suffisamment nets, pour que l'effet stabilisant des conditionneurs soit incontestable. De plus, le fait que les agrégats, après séchage, restent stables à un test à l'eau montre bien l'efficacité propre des produits et tout particulièrement du W.A.C.

#### CONCLUSION

Le test apparaît bien adapté et particulièrement démonstratif pour étudier le rôle des conditionneurs, il est très discriminant et la répétitivité est bonne. Le classement

que l'on peut établir à partir de ce test, met en tête le W.A.C. suivi du P.V.A. puis du Stabiram 677 et des autres produits hydrophobes.

Mais le mode opératoire fait que l'on est assez éloigné des conditions réelles des sols et donc également du mode d'action in-situ des conditionneurs : ici les particules de sol sont individualisées et chacune réagit sur toute sa surface avec le produit.

Ce test seul ne permet donc pas d'extrapoler au comportement des sols traités en surface sur le terrain.

C'est pourquoi nous avons cherché à mettre au point une expérimentation se rapprochant des conditions normales d'utilisation des conditionneurs, à l'aide d'un simulateur de pluie.

C - ETUDE DU COMPORTEMENT SUPERFICIEL DU SOL TRAITÉ AVEC  
DES CONDITIONNEURS, SOUS PLUIE ARTIFICIELLE

A la station de l'I.N.R.A. d'Orléans nous avons pu utiliser un simulateur de pluie et mettre au point un protocole d'étude du comportement de la surface des sols en serre.

La simulation de pluie, en maîtrisant le maximum de paramètres, permet une analyse précise des phénomènes de dégradation des surfaces et un gain de temps considérable par rapport aux études en parcelles en temps réel.

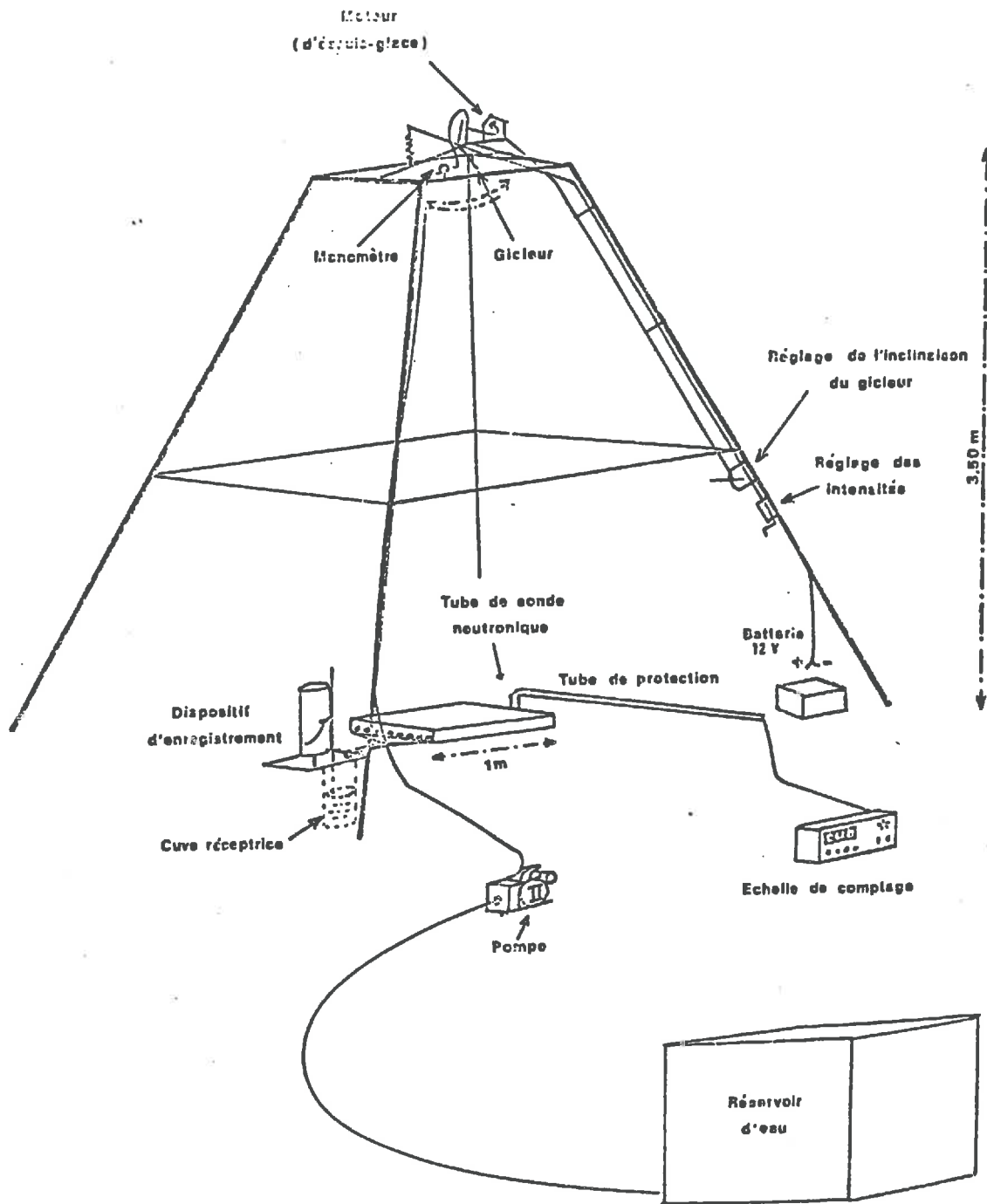
Les appareils habituellement utilisés ont pour objectif l'étude de l'érosion hydrique, ce qui implique l'obtention d'un régime de ruissellement.

Dans notre cas, les phénomènes étudiés : destruction des agrégats, tassement, fermeture de la surface, se produisent avant l'établissement du ruissellement, ce qui nécessite une plus grande maîtrise des paramètres de la pluie elle-même (intensité, énergie cinétique, durée).

1/ - Rappels bibliographiques sur les phénomènes de battance

Si l'érosion des sols a fait l'objet de nombreuses recherches (FOURNIER, 1960 ; ELLISON, 1944, 1947 ; HUDSON, 1973 ; FEODOROFF, 1965 ; GABRIELS, 1973), l'étude de l'évolution de la surface des sols sous l'action des pluies avant érosion est plus récente et est souvent le fait d'agronomes BOIFFIN et SEBILLOTTE (1976), BOIFFIN (1984). VALENTIN (1981) a contribué à introduire le concept d'organisations pelliculaires superficielles (O.P.S.) qui permet une approche beaucoup plus fine pour l'étude de

# SCHEMA DE L'INFILTROMETRE A ASPERSION



l'évolution de la surface du sol. Il appelle ainsi, "la surface du sol considérée comme un volume de faible épaisseur, organisée en micro-horizons et représentant une microdifférenciation pédologique superficielle".

La caractérisation morphologique et l'étude du comportement des O.P.S. constituent une bonne approche pour déterminer l'influence et l'efficacité des conditionneurs.

En effet, "on peut définir la battance comme étant la dégradation de la surface d'un sol en place caractérisée par la désagrégation des mottes et de la terre fine accompagnée de la formation de dépôts à très faible perméabilité et à structure feuilletée horizontale" (BOIFFIN et SEBILLOTTE, 1976), la rugosité de la surface diminue au cours de cette dégradation.

Cette évolution a plusieurs origines :

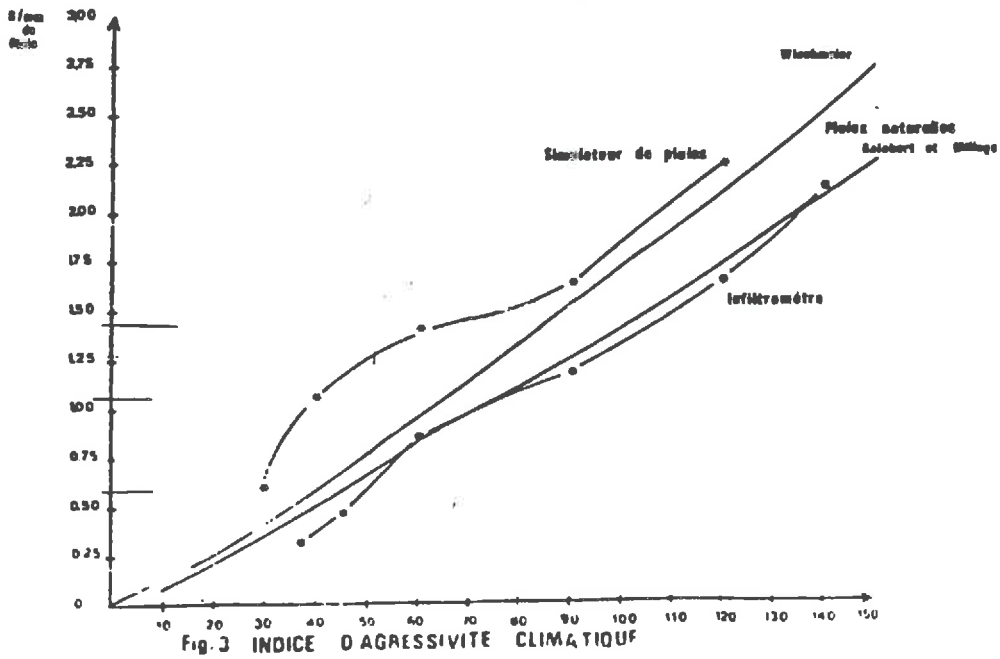
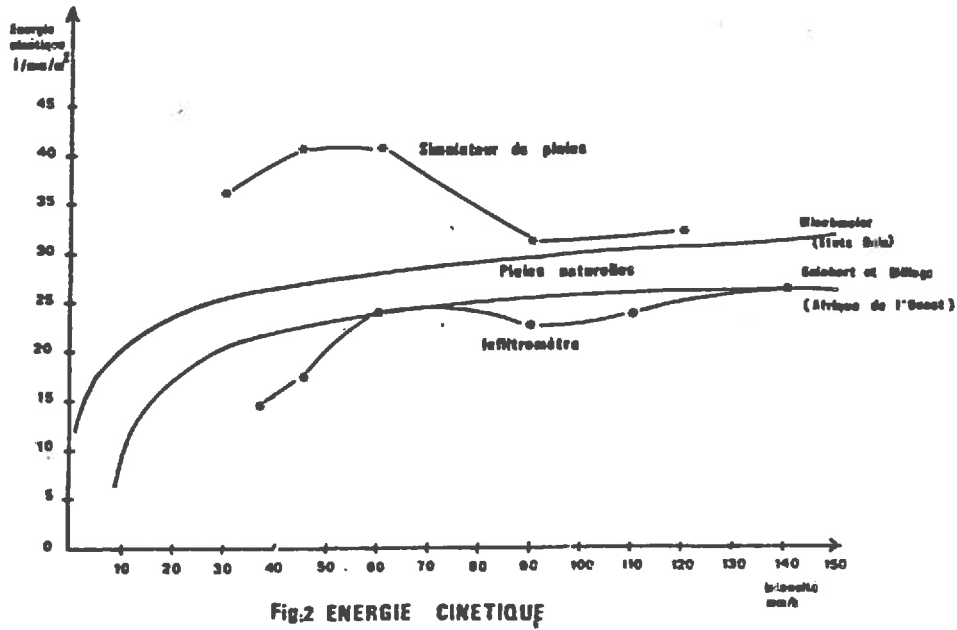
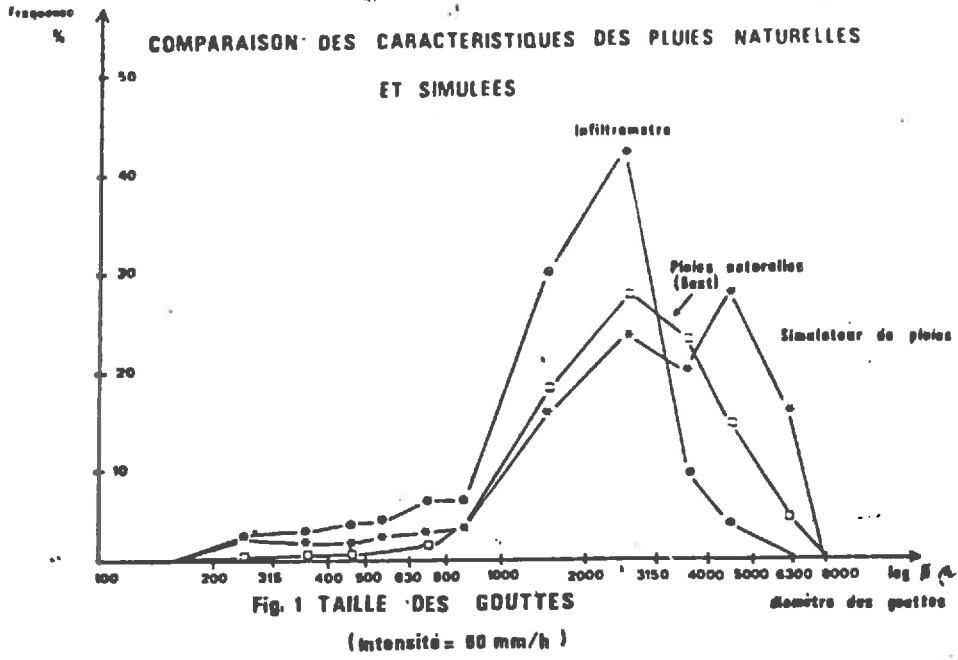
- une action mécanique directe des gouttes de pluie qui dépend de leur énergie cinétique,
- une diminution de la cohésion des éléments structuraux, en surface et en profondeur.

Dans le cadre de cette étude, l'objectif a été de mettre au point un protocole expérimental simple permettant de tester l'influence des conditionneurs sur l'ensemble de ces processus, pour un sol particulièrement sensible.

## 2/ - Problèmes méthodologiques

Deux sortes de problèmes se posent : les uns concernant l'appareil lui-même et les caractéristiques des pluies, les autres relatifs aux observations et aux paramètres que l'on veut mesurer.





a. La simulation de pluie :

- l'utilisation d'un simulateur de pluie réclame certaines conditions :

- . les caractéristiques des pluies artificielles (taille, vitesse des gouttes...) doivent être aussi proches que possible de celles des pluies naturelles ; elles doivent être maîtrisables et surtout reproductibles.
- . elles doivent être de plus, uniformes sur la surface de la parcelle arrosée.

Le protocole que nous avons adopté, en s'inspirant d'ELLISON (1944), utilise des capsules de faible surface dans lesquelles est disposée la terre. Ces capsules sont ensuite réparties sur la parcelle arrosée.

Pour que les mesures effectuées sur chaque capsule soient comparables, il faut évidemment qu'elles aient toutes reçu la même pluie.

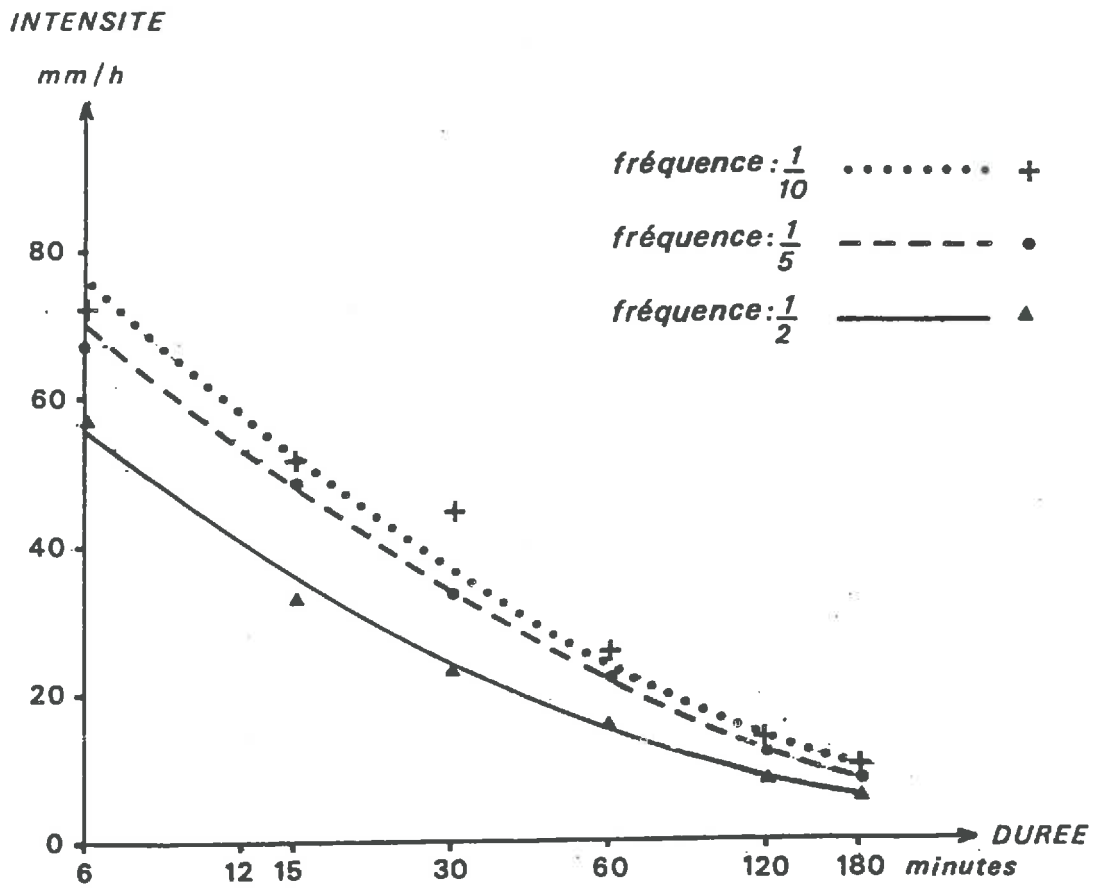
En ce qui concerne les caractéristiques des pluies, il a été montré que l'on se trouve dans la gamme des pluies réelles (VALENTIN, 1979), bien que la taille des gouttes (et donc leur énergie cinétique) reste encore difficile à maîtriser.

Par contre nous nous sommes rendus compte, au cours des expériences, que la reproductibilité des pluies était difficile à obtenir et surtout qu'il n'y avait pas uniformité de l'intensité de la pluie sur la surface de la parcelle.

Ceci signifie donc que l'on doit utiliser ce simulateur avec précaution, en particulier pour ce type d'étude. Pour des expériences ultérieures, il semble nécessaire d'envisager l'utilisation d'un appareil de conception différente assurant une aspersion uniforme de la parcelle.

CARACTERISTIQUES DES PLUIES DANS LA REGION D'ORLEANS

INTENSITE-DUREE-FREQUENCE



b. Etude de la battance :

L'autre catégorie de problèmes rencontrés concerne l'établissement de critères, et la mesure de paramètres représentatifs des phénomènes étudiés.

En effet, si pour l'étude de l'érosion, il est assez simple de trouver des paramètres pertinents (ruissellement, poids de terre transportée...), par contre, l'étude de la battance est plus complexe.

On retient souvent la détachabilité et le rejaillissement ("splash"), (ELLISON, 1947 ; GABRIELS et de BOODT, 1973 ; BOIFFIN, 1984...), mais outre les difficultés pour mesurer ces paramètres, leur relation directe avec le comportement du sol n'est pas évidente. La granulométrie, en particulier, joue un rôle portant dans ces phénomènes.

En combinant une étude morphologique et une étude de la dynamique des phénomènes de dégradation, BOIFFIN a largement contribué à éclaircir ce problème.

Il distingue trois principaux régimes de division des fragments :

- une microfissuration, liée aux alternances d'humectation-dessiccation,
- une désagrégation par éclatement, liée à l'imbibition d'eau,
- une désagrégation mécanique résultant de l'impact des gouttes.

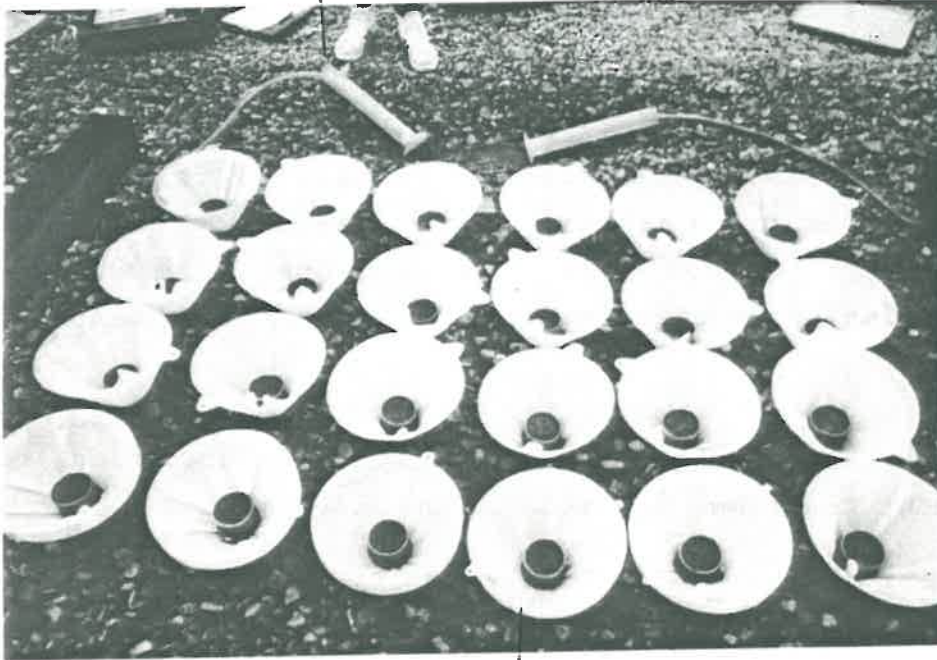
Et on peut relier ces modalités de division des fragments au déplacement consécutif des particules. Deux cas se présentent :

- Si les liaisons entre particules sont préalablement remplies, les projections dues à l'impact des gouttes peuvent se faire à longue distance, la mesure du splash serait alors un bon indicateur.

- Si la désagrégation s'effectue par éclatement, le déplacement primaire est faible et le recueil des projections n'est plus un bon indicateur.

DISPOSITION DES CAPSULES SOUS LE SIMULATEUR DE PLUIE

Contrôle de l'intensité de la pluie



Entonnoir et filtre de réception des projections ("splash")

D'autre part, la diminution progressive de l'infiltrabilité, est un point fondamental. "Elle est sans doute à la fois une conséquence et un moteur de la dégradation structurale, et lui confère son caractère irréversible" (BOIFFIN, 1984).

Il semble donc judicieux de combiner des observations de surface à des mesures du splash et de l'infiltrabilité. Compte tenu de ce qui vient d'être dit, nous avons établi un protocole inspiré d'ELLISON, en utilisant l'infiltromètre à aspersion mis au point à l'ORSTOM (ASSELIN et VALENTIN, 1977) et modifié par différentes personnes.

### 3/ - Description du protocole

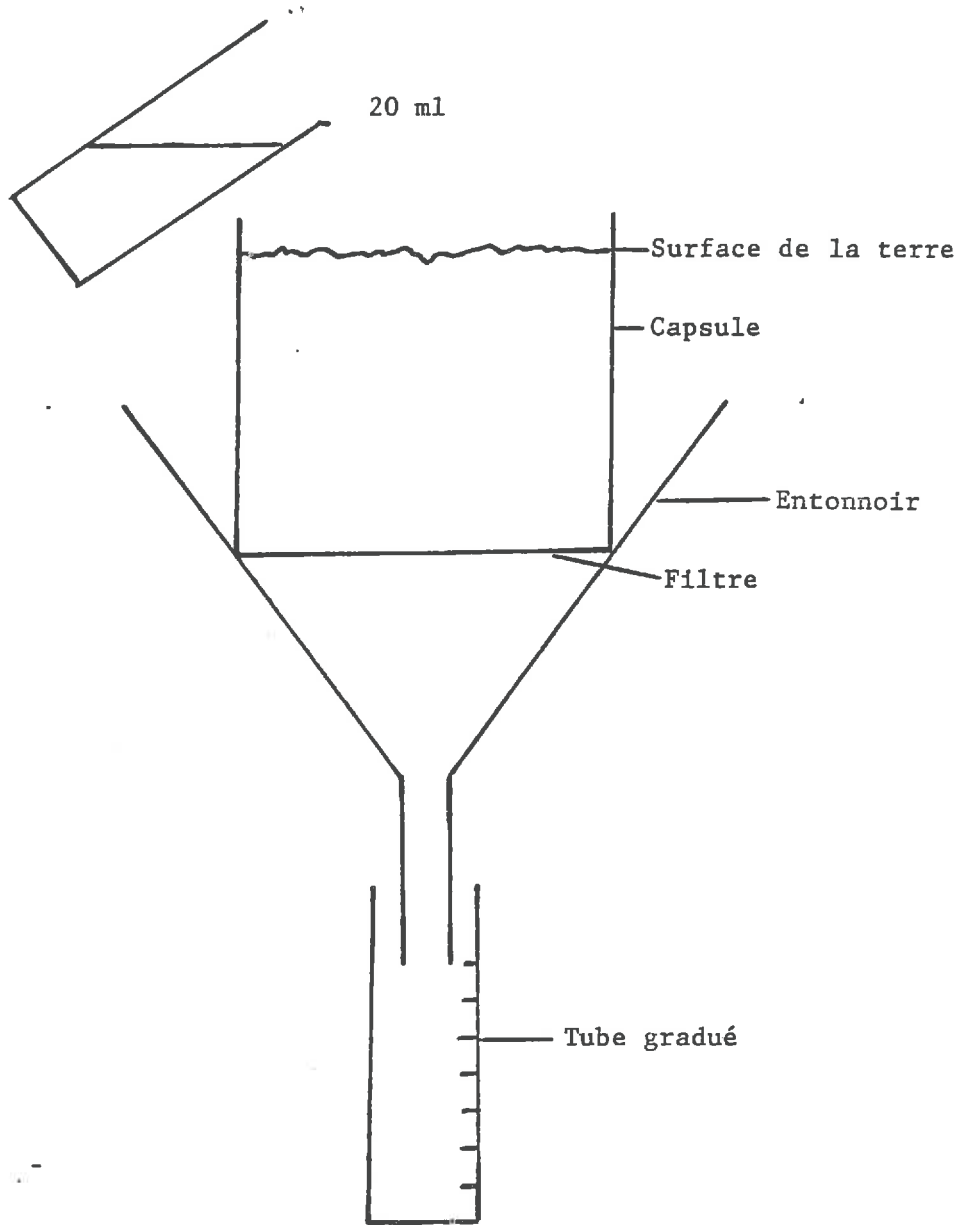
Le simulateur de pluie a été installé sous une serre, à la station de l'INRA d'Orléans. La parcelle arrosée a une surface de 1 à 2 m<sup>2</sup>. On dispose sur cette surface les capsules remplies de terre, traitée en surface par pulvérisation avec les différents conditionneurs.

Les capsules sont des cylindres de 5 cm de diamètre et 4 cm de hauteur dont le fond est constitué par un filtre métallique doublé d'un papier filtre qui permet l'écoulement de l'eau tout en retenant les solides.

On remplit ces capsules de terre tamisée à 2 cm, jusqu'à ras bord, et de manière homogène. On pulvérise ensuite les solutions de conditionneur sur les surfaces à un taux donné.

Nous avons utilisé 4 à 6 capsules par traitement, ce qui permet de vérifier la reproductibilité des résultats. Comme on peut disposer 24 capsules sur la parcelle, cela correspond à 4 à 6 traitements différents par pluie.

SCHEMA DU DISPOSITIF UTILISE POUR LE TEST DE PERCOLATION



Pour mesurer le splash, nous avons mis au point un protocole original, en disposant les capsules dans des entonnoirs munis d'un filtre : l'eau s'écoule et les particules projetées de la capsule dans l'entonnoir (25 cm de diamètre) sont recueillies dans le filtre. La différence de poids du filtre sec avant et après la pluie correspond au poids des projections.

La réalisation de photos de la surface des capsules avant et après les pluies, permet de comparer l'évolution de la surface pour les différents traitements.

Il n'a pas été matériellement possible au cours de ce travail de D.E.A. d'effectuer des lames minces des différentes surfaces, mais cela serait certainement un apport très intéressant, par exemple l'étude des micro-horizons formant la croûte de battance, en fonction du traitement, que l'on pourrait relier aux mesures effectuées.

Une dizaine de pluies ont été réalisées sur sols secs et humides, correspondant à des traitements avec le WAC, le PVA, le 677, le NS 2, des polycations de fer et un polymère cationique.

Les pluies appliquées sont des pluies assez fortes : 40 à 50 mm/h pendant 20 à 30 mm, qui correspondent à des fréquences quinquennales dans la région.

Nous avons cherché une méthode pour mesurer l'infiltrabilité. Au cours de la pluie, nous avons chronométré le temps de formation d'une flaque en surface des capsules, ce qui correspond à la fermeture de la surface du sol (forte diminution de l'infiltrabilité). Cela donne déjà une indication, mais elle n'est que semi-quantitative.

Nous avons donc, en complément, mis au point un test de percolation sur les capsules après une pluie.



RESULTATS OBTENUS LORS DES PLUIES SIMULEES : (SOLS TRAITES SECS)

	Témoin	WAC	PVA	S 677	NS <sub>2</sub>	Fe (r = 0)	Fe ( = 2,5)	Polymère cationique
<u>Splash :</u> poids de terre projetée pendant 10 mn de pluie	0,40 g	0,15 g	0,20 g	0,50 g	0,45 g	0,30 g	0,35 g	0,2 g
<u>Temps de formation de flaques :</u> début de tassement et de fermeture de la surface	5 mn	intact	10 mn	< 5 mn	< 5 mn	10 mn	10 mn	10 mn
-----								
flaquage	10 mn	-	-	8 mn	8 mn	20 mn	15 mn	-
<u>Vitesse de percolation dans les capsules</u> On passe de 0,6 ml/mn avec le témoin à 2 ml/mn avec le WAC.								

Les échantillons étant saturés en eau, on place les capsules sur un dispositif formé d'un entonnoir et d'un flacon gradué. On verse brutalement 20 ml d'eau sur la capsule et on mesure la vitesse de percolation en relevant le niveau d'eau dans les flacons régulièrement, jusqu'à restitution des 20 ml.

Il ne s'agit pas d'une mesure de conductivité hydraulique, dans la mesure où la loi de Darcy n'est pas vérifiée; et la charge appliquée n'est pas constante. Il s'agit plutôt d'un test, qui dans la mesure où tous les échantillons sont saturés et ont la même épaisseur, permet de comparer le comportement de ces échantillons vis-à-vis de l'infiltrabilité, en donnant des ordres de grandeur des vitesses de percolation dans les capsules.

#### 4/ - Résultats

A partir des observations visuelles on constate que tous les produits testés améliorent la stabilité structurale du sol, sauf les produits hydrophobes (Stabiram 677, Noramox S<sub>2</sub>), qui ont au contraire tendance à accélérer la dégradation de la surface.

##### Influence de l'état initial

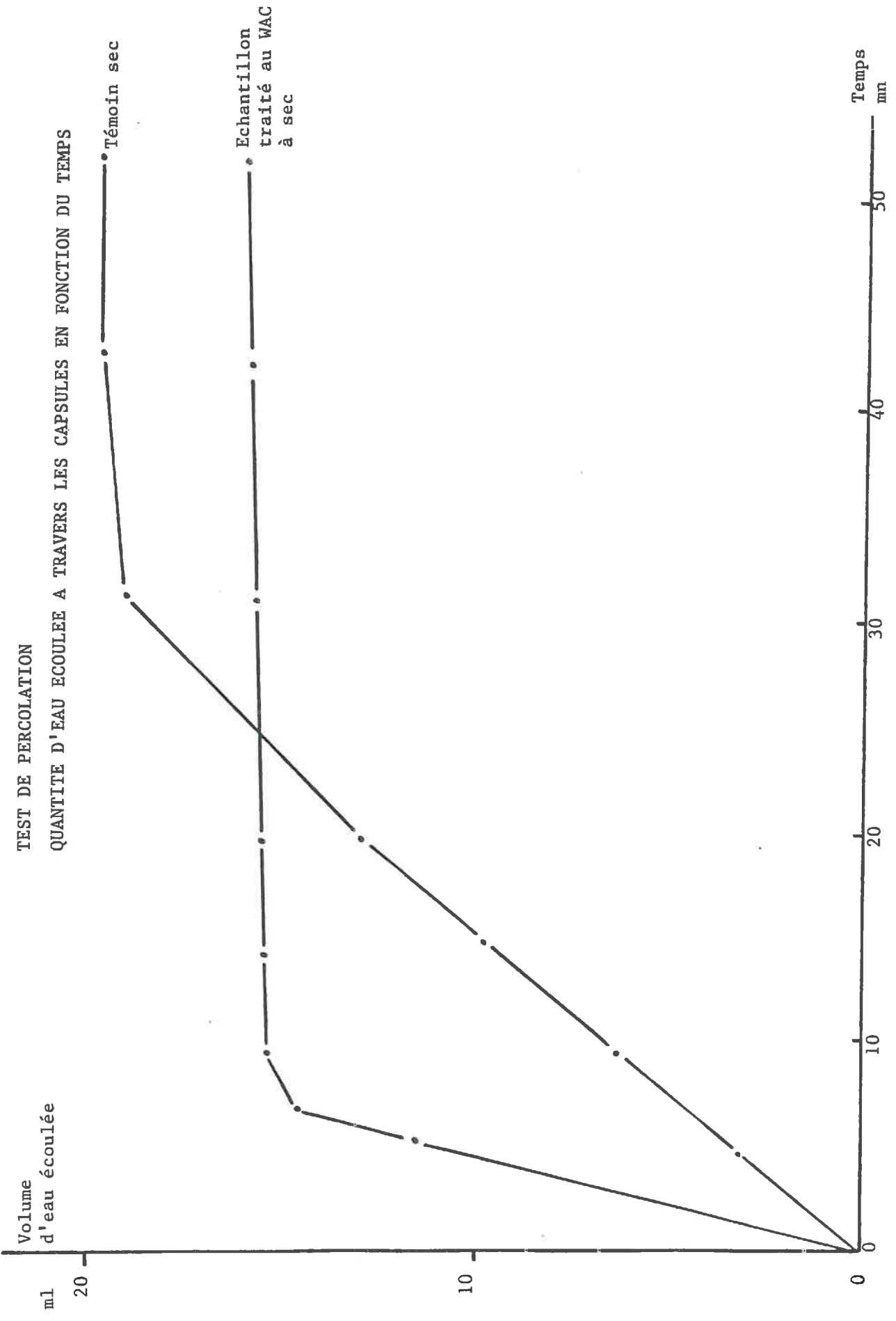
Dans tous les cas, l'effet des conditionneurs s'est montré plus efficace lorsque l'on a traité des sols secs.

##### Influence de l'intensité de la pluie

On observe une large dépendance du splash vis-à-vis de l'intensité de la pluie et plus probablement de l'énergie cinétique des gouttes : une forte pluie peut faire rejaillir de gros agrégats.

Mais il semble que l'évolution de la surface soit plus fonction de la hauteur des précipitations que de leur intensité, c'est simplement la vitesse du phénomène qui est modifiée.

TEST DE PERCOLATION  
QUANTITE D'EAU ECOULEE A TRAVERS LES CAPSULES EN FONCTION DU TEMPS



### Effet des différents conditionneurs

A chaque essai, le WAC s'est montré le plus efficace pour protéger la surface du sol : les agrégats de terre restent intacts, et il n'y a donc pas de formation de plaques qui conduisent normalement à l'apparition des flaques.

Par contre, il peut y avoir un splash relativement important, sous forme d'agrégats millimétriques.

Les autres traitements avec le PVA, le polycation du fer et un polymère cationique ont également donné une amélioration sensible du comportement physique. Au contraire, le S 677 et le NS<sub>2</sub> entraînent une accélération des phénomènes de dégradation.

### 5/ - Discussion

Il n'a pas été possible au cours de ce travail de donner des résultats véritablement quantitatifs, compte tenu des délais et des problèmes de maîtrise des caractéristiques des pluies.

Il est cependant possible de discuter des résultats qualitatifs que nous avons obtenus, ainsi que de l'intérêt de l'étude effectuée.

. Tout d'abord, la simulation de pluie permet d'observer instantanément le comportement de la surface du sol sous une pluie donnée, et sur ce point l'influence des différents traitements est déjà spectaculaire.

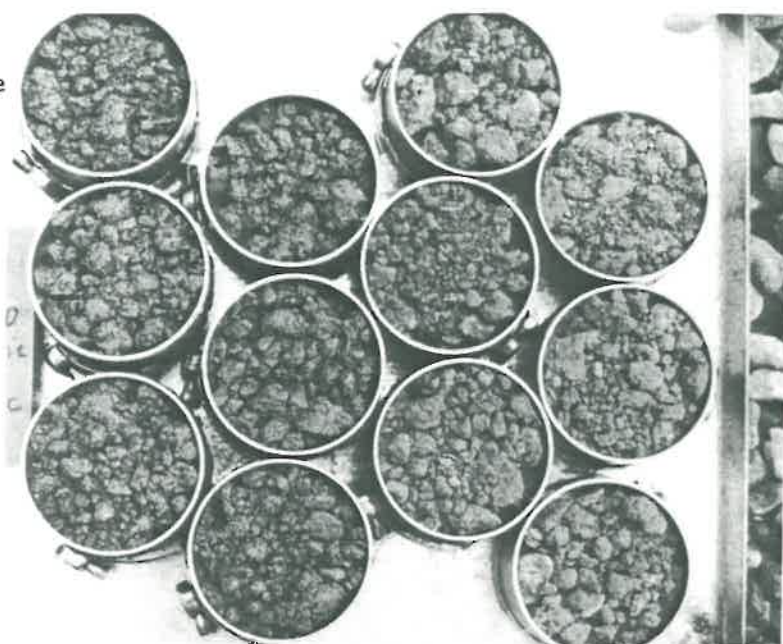
A ce niveau, il semble que l'étude de l'évolution morphologique de la surface doive être complétée par une étude de l'évolution structurale au sein du profil (micromorphologie des O.P.S.)

Nos observations concordent avec le schéma établi par BOIFFIN ; on peut distinguer deux phases de dégradation :

- une phase initiale de fermeture de la surface, pendant laquelle l'infiltrabilité décroît mais reste

COMPORTEMENT DE LA SURFACE DU SOL SOUS PLUIE SIMULEE

Capsules  
Avant pluie



Capsules  
Après pluie



Echantillons  
traités au WAC

Témoins

supérieure à l'intensité pluviométrique.

- une phase ultérieure, au cours de laquelle s'opère une séparation et un tri des constituants, et se forment des croûtes stratifiées. Ces processus sont à la fois la cause et le résultat de la diminution de l'infiltrabilité.

On peut considérer que c'est le début de flaquage qui déclanche le passage à la deuxième phase.

Les traitements avec les conditionneurs modifient le comportement des sols en accélérant ou en ralentissant le déroulement de ce schéma.

Ainsi, les produits hydrophobes favorisent un passage rapide à la deuxième phase de dégradation. On peut l'expliquer par une diminution de la conductivité hydraulique liée aux propriétés hydrophobes du produit.

Au contraire, les autres produits retardent le déclanchement de cette deuxième phase. Le WAC maintient même la surface du sol parfaitement stable dans les conditions de l'expérience.

Comment expliquer ces modifications de comportement ?

Le WAC en particulier, semble augmenter la cohésion des agrégats. Il n'y a pas de désagrégation par éclatement des fragments, et le délitement mécanique sous l'impact des gouttes est largement diminué.

On peut donc dire que ce produit agit à la fois comme un ciment et en modifiant les propriétés physiques des agrégats (voir le test de HENIN).

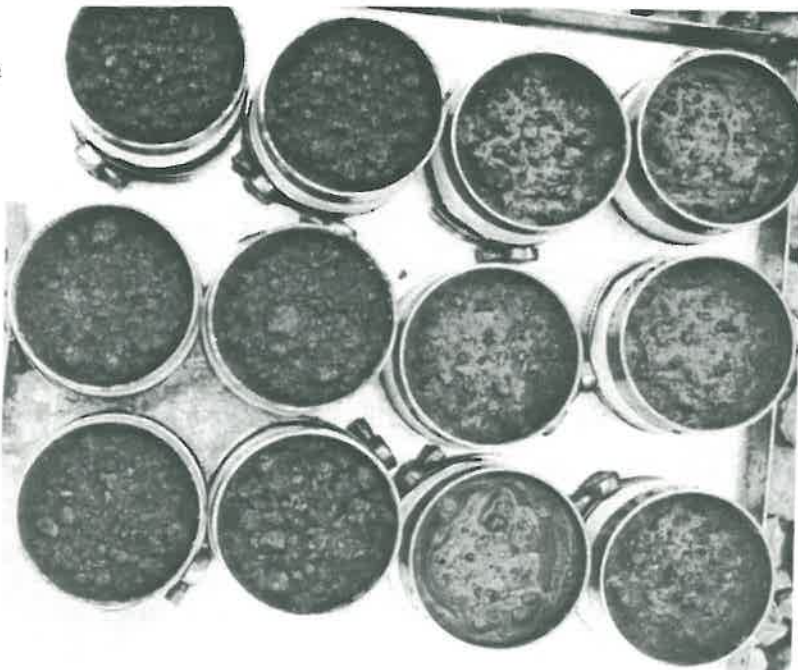
. En ce qui concerne la mesure du splash, il apparaît que ce critère est particulièrement difficile à interpréter ; le poids de matière projetée, est en effet fonction de la granulométrie du sol concerné, de la taille des particules mobilisées...

COMPORTEMENT DE LA SURFACE DU SOL SOUS PLUIE SIMULEE

Capsules  
avant pluie



Capsules  
après pluie



Echantillons  
traités au PVA

Echantillons  
traités au S 677

Il n'est pas toujours lié à une dégradation structurale de la surface du sol : un sol très stable peut avoir des agrégats projetés sans être désagrégés, on mesurera pourtant un splash important : même chose avec un sol sableux.

Au contraire, sur un sol dégradé dont les agrégats sont délités, les gouttes de pluie ne mobiliseront que de fines particules d'argile, les déplacements principaux se faisant sur de courtes distances.

La comparaison de sols de composition différente est donc difficile, et pour un sol donné, la mesure du splash seul ne permet aucune interprétation.

De plus, les valeurs obtenues sont strictement dépendantes du protocole adopté, et ne sont donc pas comparables entre elles en l'absence d'un protocole standard (surface considérée, taille du dispositif destiné à recueillir les particules...).

. Les mesures d'infiltrabilité sont d'un intérêt évident. Le protocole mis au point est pratique et constitue un bon test, mais il nécessitera encore d'être amélioré pour mieux maîtriser les paramètres expérimentaux : il faudrait en particulier utiliser un dispositif à charge constante.

Les résultats obtenus constitueraient alors un bon indice de l'état de dégradation du sol : en effet, la diminution de l'infiltrabilité au cours de cette dégradation est progressive et continue (BOIFFIN).

On peut conclure ce chapitre en disant que la simulation de pluie au laboratoire est une méthode particulièrement bien adaptée pour tester les conditionneurs de sol, avec les restrictions suivantes :

- le simulateur doit être modifié, pour que la maîtrise des caractéristiques des pluies soit plus grande :



uniformité de l'intensité sur la parcelle et reproductibilité de cette intensité et de l'énergie cinétique des gouttes, d'une pluie à l'autre.

- il faudrait compléter les observations par des études micromorphologiques en lames minces.

- le test de percolation doit être amélioré pour devenir réellement exploitable.

Ceci dit, un tel protocole n'exclut pas, et au contraire suggère l'utilisation du simulateur de pluie au champ, sur des parcelles expérimentales recevant des cultures. C'est seulement ainsi, que l'on pourra préconiser une utilisation précise d'un conditionneur, pour un sol et une culture donnée.

Conclusion 3ème partie : corrélation entre le test de HENIN et le comportement avec simulation de pluie.

La confrontation d'un test de comportement "intrinsèque", et d'une étude du comportement sous pluie simulée du même sol révèle plusieurs points :

- On note tout d'abord des convergences dans les résultats : très bon comportement du sol traité avec le WAC dans les deux cas, et bons résultats également avec le PVA.

- Par contre des divergences apparaissent avec les produits hydrophobes : le taux d'agrégats stables augmente sensiblement pour les échantillons traités avec le NS<sub>2</sub>, le S 677, le M<sub>2</sub>SH, alors que ces mêmes substances, pulvérisées sur la surface du sol, provoquent une accélération des phénomènes de dégradation.

Cette observation est intéressante à double titre :

- d'une part, cela fixe la limite de validité du test de HENIN tel qu'il est effectué,

- d'autre part, cela apporte des éléments nouveaux concernant la stabilité structurale et le mode d'action des produits concernés.

En effet, cette divergence peut s'expliquer assez aisément :

avec le test de stabilité, les agrégats sont remaniés et sont mis individuellement en contact avec la solution de conditionneur, et c'est dans ce cas, la viscosité des solutions qui a été le facteur principal de l'augmentation de stabilité des agrégats ; dans les capsules, au contraire, le traitement de surface a surtout un effet hydrophobant. Le sol est alors encore plus sensible à l'impact des gouttes et l'infiltrabilité diminue rapidement.

Cependant, il faudrait effectuer des essais complémentaires en diminuant les quantités pulvérisées : l'influence négative du traitement pourrait éventuellement être due à un excès du produit.

Malgré cette restriction, la bonne corrélation observée pour les autres traitements montre que la mesure du taux d'agrégats stables peut être un bon indicateur du comportement du sol sous pluie, si l'on ne considère pas uniquement les résultats bruts.

## CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail était, d'une part d'étudier les interactions entre différents conditionneurs de sols et des argiles modèles, et d'autre part de tester l'influence de ces conditionneurs sur la stabilité structurale des sols.

Cette approche à différentes échelles et l'utilisation de méthodologies originales constituent l'intérêt de cette étude.

### TRAVAUX ENTREPRIS :

Nous avons pu suivre les organisations caractéristiques des différents systèmes argiles-conditionneurs à partir d'échantillons préparés à potentiel hydrique fixé (pF 2 et 3), grâce au microscope électronique à balayage équipé du dispositif cryoscan (TESSIER et BERRIER, 1979), et par des méthodes indirectes (diffraction des rayons X, analyse thermique).

Nous avons caractérisé le comportement physique des associations par des mesures de rétention en eau (à pF 2 et 3), de conductivité hydraulique en régime saturé à pF 2 (PROST, 1982) et par analyse des suspensions au granulomètre à Laser.

On peut noter que l'utilisation conjointe de ces différentes techniques pour l'étude des conditionneurs n'avait pas encore été faite : elle permet de relier les propriétés des associations à leur organisation, et donc de mieux caractériser les interactions.

Il faut aussi préciser, et c'est une autre originalité du travail, que le choix d'une concentration des produits (10 à 0,5 % du poids d'argile) inférieure aux quantités maximales pouvant être fixées, a permis déjà de se rapprocher des conditions réelles de traitement des sols.

Nous avons ensuite testé ces produits sur un sol limoneux instable, en utilisant parallèlement le test de stabilité structurale de HENIN, et un dispositif de simulation de pluie sur des échantillons de sol, traités en surface.

Au cours de cette étude, nous avons eu l'occasion de mettre au point un protocole original, adapté à la comparaison de l'influence des différents traitements sur la stabilité des sols, et cela nous a également permis de fixer certaines limites de validité du test de HENIN tel qu'il a été utilisé.

#### RESULTATS ET PERSPECTIVES

En ce qui concerne les argiles, l'observation des échantillons "humides" révèle une profonde modification de l'organisation des argiles, et on peut distinguer plusieurs types d'effets :

- Une fissuration systématique du réseau continu de la montmorillonite pouvant conduire à l'individualisation d'agrégats (PVA), et qui s'accompagne d'une très forte augmentation de la conductivité hydraulique (WAC) ;

- Au contraire, une contraction de la microstructure, avec diminution de la taille des pores, liée à une rétention en eau plus faible, pour les produits hydrophobes ;

- Une agrégation des kaolinites, par association face-face des particules.

Les méthodes indirectes montrent que certains polymères pénètrent entre les feuillets en créant parfois une interstratification ou une démixtion.

Les études de la granulométrie révèlent en outre le fort pouvoir flocculant de certains composés.

En ce qui concerne le sol, l'étude du comportement du sol traité montre une forte augmentation de la stabilité des agrégats pour l'ensemble des produits. Sous pluie simulée, par contre, les résultats divergent : nette stabilisation de la structure avec le PVA, un hydroxyde de Fer et surtout le WAC ; et accélération de la dégradation avec les produits hydrophobes.

L'ensemble des travaux effectués apporte donc des données nouvelles sur le rôle et l'efficacité des conditionneurs de sols. Les résultats convergent et montrent en particulier qu'une substance minérale comme le WAC peut être plus efficace que des polymères organiques déjà réputés très actifs (PVA).

L'étude conjointe au laboratoire et sur le terrain, sur des argiles et sur des sols, semble intéressante voire indispensable, car il s'agit d'une part, de mieux comprendre le mécanisme d'action des conditionneurs, et d'autre part, de tester leur effet sur la structure du sol.

Ce travail permet de proposer une méthodologie et un programme pour une étude plus approfondie sur les conditionneurs :

- Un travail sur les argiles, avec en particulier, l'étude du comportement des associations au cours d'un cycle complet déshydratation-réhumectation ; l'utilisation du microscope électronique à transmission permettrait de plus, de caractériser les associations au niveau des interfaces feuillets d'argile-polymères.

- Un travail sur les sols, avec le simulateur de pluie qui offre de nombreuses possibilités d'études ; en serre, il serait possible de tester les conditionneurs sur de nombreux sols et en faisant varier tous les paramètres : caractéristiques des pluies, dosage des traitements, état initial des sols... ; au champ, on peut penser à un suivi, en conditions naturelles et sous culture, de parcelles traitées.

Il semble qu'avec ces compléments d'étude on puisse envisager une utilisation en grande culture des conditionneurs minéraux expérimentés : dans les fossés de drainage, en surface pour les semis précoces (betteraves), dans la lutte contre l'érosion.

Cette utilisation pourrait également remédier aux dégradations physiques entraînées par la diminution de la restitution en matière organique des sols cultivés...

BIBLIOGRAPHIE

- BILQUIN E. et HECK J.P. (1974) - Les conditionneurs de sols et leurs incidences sur la stabilité structurale et la végétation en conditions naturelles. *Pédologie*, XXIV,3, 256-265
- BISAL F. (1950) - Calibration of splash cup for soil erosion studies. *Agric. Eng.* , 621-622
- BOIFFIN J. et SEBILLOTE M. (1976) - Climat, stabilité structurale et battance. Essai d'analyse d'un comportement du sol au champ. *Ann. Agron.* 27 (3) 295-325
- BOIFFIN J. (1984) - La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle Univ. Paris VII, 229 p
- BOLT G.H. & KOENIGS F.F.R. (1973) - Physical and chemical aspects of the stability of soil aggregates. *Proceedings symposium on the fundamentals of soil conditioning.* Ghent. Ed : De Boodt M. 955-973
- CHISCI G. et al. (1978) - Effects of a ferric conditioner on clay soils. *Modification of soil structures.* Ed : Emerson W.W., Bond R.D. and Dexter A.R. 309-314
- CONCARET J. (1967) - Etude des mécanismes de destruction des agrégats de terre au contact de solutions aqueuses. *Ann. Agron.* 18 (1) 65-90
- COULIBALY G. (1984) - Influence des lipides sur les propriétés physiques des sols. Formation de complexes agilo-lipidiques. Thèse 3<sup>e</sup> cycle. Univ. Poitiers
- DAVIDSON D.T. et al. (1962) - Mechanism of stabilization of cohesive soils by treatment with organic cations. *Clays and clay minerals*, N° 9, 585-591
- DE BOODT M. (1975) - Use of soil conditioners around the world. *Proc. of the Symp. : Experimental methods and uses of soil conditioners.* Las Vegas, 1973. *Soil Sc. Soc. of Am.* 13-24
- DE BOODT M. (1976) - Soil conditioning : its roots and its meaning for the future. *3rd Int. Symp. on soil conditioning;* Ghent. Ed : De boodt M. & Gabriels D. 1-2
- DE BOODT M. (1980) - Application of polymers for stabilisation of aggregates in agricultural soils. Non publié
- DE LA PENA E. & GABRIELS D. (1976) - Evaluation of soil conditioners for protection of steep slopes from water erosion. *3rd Int. Symp. on soil conditioning;* Ghent. Ed : De boodt M. & Gabriels D. 327-334



- DIERICKX W. & GABRIELS D. (1976) - Stabilizing backfill of drain pipes and drainage efficiency. 3rd Int. Symp. on soil conditioning; Ghent. Ed : De boodt M. & Gabriels D. 293-300
- ELLISON W. D. (1944) - Studies of raindrop erosion. Agr. Eng.; 131-182
- ELLISON W. D. (1947) - Soil erosion. Soil Sc. Soc. Proc.; 479-484
- EMERSON W. W. & RAUPACH M. (1964) - Reaction of polyvinyl alcohols with montmorillonite. Austr. J. Soil Res., 2. 46-55
- EMERSON W. W. (1967) - A classification of soil aggregates based on their coherence in water. Austr. J Soil Res., 5. 47-57
- 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
- FINK D. H. et al. (1971) - Demixing of exchangeable cations in free-swelling bentonite clay. Soil Sc. Soc. Am. Proc., vol. 35, 552-555
- FREE G. R. (1952) - Soil movement by raindrop. Agric. Eng. 491-496
- FRENKEL H. et al. (1978) - Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. Soil Sc. Soc. Am. J., vol 42, 32-39
- GABRIELS D. (1973) - Response of different soil conditioners to soils. Proc. Symp. on the fundamentals of soil conditioning. Ghent, 1972. Ed : De boodt M. 1014-1034
- GABRIELS D. & DE BOODT M. (1975) - Erosion reduction for chemically treated soils: a laboratory experiment. Proc. of the Symp. : Experimental methods and uses of soil conditioners. Las Vegas, 1973. 95-102
- GABRIELS D. & DE BOODT M. (1978) - Evaluation of soil conditioners for water erosion control and sand stabilisation. Modification of soil structures. Ed : Emerson W.W., Bond R.D. & Dexter A.R. 341-348
- GARDNER W. H. (1973) - Use of synthetic soil conditioners in the 1950's and some implication in their further development. Proc. Symp. on the fundamentals of soil conditioning. Ghent, 1972. Ed : De boodt M. 1046-1061
- GLASER R. & MERING J. (1954) - Isothermes d'hydratation des montmorillonites bi-ioniques (Na-Ca). Clay Min. Bul. 2. 188-193
- GREENLAND D. J. (1963) - Adsorption of polyvinyl alcohol by montmorillonite. J. Colloid Sc. 18, 647-664

GREENLAND D. J. (1973) - Interactions between organic polymers and inorganic soil particles.

- Adsorption of polyvinyl alcohol by oxides and clays with non-expanding lattices. Proc. Symp. on the fundamentals of soil conditioning. Ghent, (1972). Ed : De boodt M. 897-922

GREENLAND D. J. (1975) - Class of english and welsh soils, using a water coherence test. J. Soil Sc. vol. 26, N°3

GREENE R. S. B., POSNER A. M. & QUIRK J. P. (1978)

- A studies of the coagulation of montmorillonite and illite suspensions by calcium chloride using the electron microscope.  
- Interactions of suspensions of Ca-illite with PVA and  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .  
Modification of soil structures. Ed : Emerson W. W., Bond R. D. & Dexter A. R. 35-40 & 157-164

HENIN S., GRAS R. & MONNIER G. (1969) - Le profil cultural. Masson

HENIN S. (1976) - Cours de physique du sol. Vol. I et II. O.R.S.T.O.M.-EDITEST.

HUDSON N. W. (1973) - Soil conservation. Ed : Batsford London. 320p

KAVANAGH B. G. et al. (1978) - Adsorption of PVA on soil colloids. Modification of soil structures. Ed : Emerson W. W., Bond R. D. & Dexter A. R.

KHERABI D. & MONNIER G. (1968) - Etude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. Ann. Agron. 19.2, 129-152

LETEY J. (1975) - The use of nonionic surfactants on soils. Proc. of the Symp. : Experimental methods and uses of soil conditioners. Las Vegas. 145-154

LEVY R. & FRANCIS C. W. (1975) - Demixing of sodium and calcium ions in montmorillonite crystallites. Clays and clay minerals, vol. 23, 475-476

MAUSBACH M. J. & SHRADER W. D. (1975) - Influence of surface treatment of selected subsoil materials on infiltration and erosion. Proc. of the Symp. : Experimental methods and uses of soil conditioners. Las Vegas. 83-94

MCATEE J. L. (1956) - Determination of random interstratification in montmorillonite. Am. Mi. 41, 627-631

MCBRIDE M. B. & MORTLAND M. M. (1973) - Segregation and exchange properties of alkylammonium ions in a smectite and vermiculite. Clays and clay minerals, vol. 21, 323-329

MCINTYRE D. S. (1958) - Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact.

METZGER L. & ROBERT M. (1985) - A scanning electron microscopy study of the interactions between sludge organic components and clay particles. Géoderma, 35-159-167

- MOLDENHAUER W. C. & GABRIELS D. (1973) - Some uses of soil stabilizers in the USA. Proc. Symp. of the fundamentals of soil conditioning. Ghent. Ed : De boodt M.
- MONNIER G. (1965) - Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. Ann. Agron. 16, 327-340 , 471-534
- NIMAH M. N. et al. (1983) - Effect of synthetic conditioners on soil water retention, hydraulic conductivity, porosity and aggregation. Soil Sc. Soc. Am. J., vol. 47, 742-745
- OADES J. M. (1976) - Prevention of crust formation in soil by PVA. Austr. J. Soil Res., 14, 139-148
- PAGE E. R. (1979) - The effect of PVA on the crust strength of silty soils. J. Soil Sc., 30, 643-651
- PAGE E. R. (1980) - Cellulose xanthate as soil conditioner : field trials. J. Sci. Food Agric. 31, 718-723
- PAUWELS J. M. et al. (1976) - Evaluation of different criteria to assess the stability of the soil surface. 3rd Int. Symp. on soil conditioning. Ghent. Ed : De boodt M & Gabriels D. 135-140
- PEDRO G. (1976) - Sols argileux et argiles. Sc. du Sol. N°2, 69-84
- PLA I. (1975) - Effect of bitumen emulsion and polyacrilamide on some physical properties of venezuelan soils. Proc. of the Symp. : Experimental methods and uses of soil conditioners. Las Vegas. 35-46
- PONS Y. & MARTINEAU G. (1983) - Description d'un test de comportement à l'eau pour déterminer la classe de stabilité structurale des sols argileux des marais de l'ouest. Note de laboratoire, INRA-DRSAD.
- PROST R. (1979) - Application de mesures de conductivité hydraulique à l'étude de la structure des gels d'argile. Clay Min. 14, 173-
- PROST R. (1984) - Etude de la conductivité hydraulique des pâtes de kaolinite en fonction de l'enthalpie libre du système eau-argile. Agronomie. 4(1) 29-36
- QUIRK J. P. (1978) - Some physico-chemical aspects of soil structural stability : a review. Modification of soil structure. Ed : Emerson W. W. , Bond R. D. & Dexter A. R. 3-16
- ROBERT M. (1977) - Quelques exemples d'utilisation de l'analyse thermique en minéralogie. Conf. CNRS
- ROBERT M., VENEAU G. & HERVIO M. (1983) - Influence des polycations du fer et de l'aluminium sur les propriétés des argiles. Sc. du Sol. N°3-4 , 235-251
- ROSAUER E. A. et al. (1963) - X-ray diffraction studies of organic cation-stabilized bentonite. Clays & clay Min. N°10, 235-248

- SADONES M. et al. (1976) - The effect of surfactants on the distribution of soil conditioners in soil. 3rd Int. Symp. on soil conditioning, Ghent. Ed : De boodt M. & Gabriels. 193-200
- SCHAMP N. et al. (1975) - Adhesion and adsorption phenomena in soil conditioning. Proc. of the Symp. : Experimental methods and uses of soil conditioners. Las Vegas 13-24
- SCHAMP N. (1976) - Chemicals used in soil conditioning. 3rd Int. Symp. on soil conditioning, Ghent. Ed : De boodt M. & Gabriels D.
- SCHAMP N. et al. (1978) - Optimization of polymer emulsions as soil conditioners. Modification of soil structure. Ed : Emerson W. W., Bond R. D. & Dexter A. R. 151-156
- STEFANSON R. C. (1978) - Polyvinyl alcohol as a stabilizer of soil surface. Soil Sc., vol. 115 N°6
- THENG B. K. G., GREENLAND D. J. & QUIRK J. P. (1967) - The swelling in water of complexes of montmorillonite with PVA. Austr. J. Soil Res. 5, 69-75
- THENG B. K. G. (1982) - Clay-polymers interactions : summary and perspectives. Clays & Clay Min. ,Vol. 30, N°1, 1-10
- TESSIER D. & BERRIER J. (1979) - Utilisation de la microscopie à balayage dans l'étude des sols. Sc. du Sol, 67-82
- TESSIER D. (1980) - Sur la signification de la limite de retrait dans les argiles. C. R. Ac. des Sc., T.291, Serie D, 337-380
- TESSIER D. & PEDRO G. (1980) - Sur les propriétés de gonflement des argiles dans les sols. C. R. Ac. des Sc. ,T.291, Série D, 461-464
- TESSIER D. (1984) - Méthode d'approche de l'organisation des argiles et des matériaux argileux. C. R. Conseil de département Sc. du Sol. INRA
- TESSIER D. (1984) - Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Thèse, Univ. Paris VII . INRA 361p
- VALENTIN Ch. (1981) - Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de régions subdésertiques. Thèse 3ème cycle Univ. Paris VII . 229p
- VICENTE M.A. & ROBERT M. (1981) - Rôle des acides fulviques et humiques dans la micro agrégation des particules argileuses. C.R. Ac. des Sc. Paris, t 292 Serie II, 1161-1166
- WILLIAMS B. G., GREENLAND D. J. & QUIRK J. P. (1967) - The effect of PVA on the nitrogen surface area and pore structure of soils. Austr. J. Soil Res. 5, 69-75

WILLIAMS B. G., GREENLAND D. J. & QUIRK J. P. (1968)  
- The water stability of natural soil aggregates containing PVA.  
Austr. J. Soil Res. 6, 59-66

- The adsorption of PVA by natural soil aggregates.

WOOD J. D. & OSTER J. D. (1985) - The effect of cellulose xanthate and PVA on infiltration, erosion and crusting at different sodium levels. Soil Sc. Vol. 139, N°3

WUSTAMIDIN & DOUGLAS L. A. (1985) - Aggregate breakdown in relation to raindrop energy. Soil Sc. Vol. 135 .N°3

TABLE DES MATIERES

	Page
<b>INTRODUCTION</b> .....	1
Définition.....	1
Actualité du problème.....	1
Objectif de l'étude.....	2
Contexte de l'étude.....	2
<b><u>PREMIERE PARTIE : HISTORIQUE DE L'UTILISATION ET DES RECHERCHES SUR LES CONDITIONNEURS DE SOL</u></b> .....	5
A - Historique.....	5
B - Les différents conditionneurs et leur uti- lisations.....	7
- Nature des conditionneurs.....	7
- Choix des conditionneurs.....	7
- Propriétés et rôles des conditionneurs.	9
C - Etat de la recherche sur les conditionneurs.	11
1/ - Recherches théoriques et fondamen- tales.....	11
2/ - Recherches plus appliquées.....	15
Conclusion de la lère partie.....	18

**DEUXIEME PARTIE : CARACTERISATION DES PROPRIETES DES ASSOCIATIONS ARGILES-CONDITIONNEURS..... 21**

**A - Matériaux et méthode de préparation des associations..... 21**  
1/ - Argiles : choix et caractéristiques 21  
2/ - Conditionneurs..... 23  
3/ - Préparation des associations..... 24

**B - Caractérisation minéralogique et chimique des associations..... 29**  
1/ - Diffraction des RX..... 29  
2/ - Analyses thermiques..... 31

**C - Caractérisation morphologique des associations au M.E.B..... 33**  
1/ - Méthodologie..... 33  
2/ - Caractérisation..... 36  
3/ - Discussion..... 44

**D - Influence des conditionneurs sur les propriétés des argiles..... 46**  
1/ - Rétention en eau..... 46  
2/ - Granulométrie..... 55  
3/ - Conductivité hydraulique..... 57

**Conclusion de la 2me partie..... 62**

<b>TROISIEME PARTIE : <u>INFLUENCE DES CONDITIONNEURS</u></b>	
<b><u>SUR LA STABILITE : CAS D'UN SOL LIMONEUX</u></b>	
<b><u>BATTANT</u>.....</b>	<b>65</b>
A - Le sol de la Salmondière.....	65
1/ - Conditions de prélèvement.....	67
2/ - Caractéristiques.....	67
B - Etude de la stabilité structurale des	
agrégats traités.....	71
1/ - Théorie de la stabilité de la	
structure.....	71
2/ - Description du test de HENIN.....	73
3/ - Résultats.....	75
4/ - Discussion.....	76
5/ - Conclusion.....	76
C - Etude du comportement superficiel du sol	
traité, sous pluie simulée.....	79
1/ - Rappels bibliographiques sur les	
phénomènes de battance.....	79
2/ - Problèmes méthodologiques.....	81
3/ - Description du protocole.....	87
4/ - Résultats.....	91
5/ - Discussion.....	92
Conclusion de la 3me partie.....	99
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>101</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>105</b>