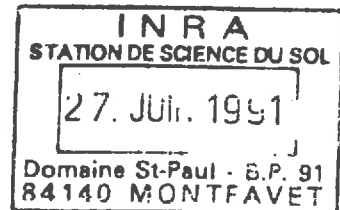


**INSTITUT NATIONAL  
AGRONOMIQUE  
PARIS-GRIGNON**

**INSTITUT NATIONAL DE LA  
RECHERCHE AGRONOMIQUE  
SCIENCE DU SOL  
AVIGNON**

6806

**T H E S E**



TH-L32

Présentée par : **Fernando DE LEON GONZALEZ**

Ingénieur agronome de l'Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (Mexique)

Pour l'obtention du titre de :

**DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE PARIS-GRIGNON**

**MORPHOLOGIE, PROPRIETES PHYSIQUES ET CONDITIONS DE  
FORMATION DES ELEMENTS STRUCTURAUX DE LA COUCHE  
LABOUREE :**

Contribution à l'interprétation du Profil Cultural

Soutenance : le 26 Avril 1991 devant la commission d'examen composée de :

**MM. M.SEBILLOTE**, Professeur INA PG  
**R.CALVET**, Professeur INA PG  
**F.GANRY**, Directeur du laboratoire d'Agronomie IRAT-CIRAD  
**H.MANICHON**, Directeur Scientifique diu CIRAD  
**F.PAPY**, Directeur de Recherches INRA  
**J.GUERIF**, Directeur de Recherches INRA

**Président**  
Rapporteur  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur  
Examineur

*A Oralia, con mucho cariño*



## R E S U M E

Le travail présenté concerne l'interprétation de la classification morphologique des états structuraux des mottes de sols travaillés antérieurement élaborée par Manichon. Son objectif était de répondre à deux questions principales :

- i- Le classement morphologique des mottes est-il corrélé à leurs propriétés physiques et certains types d'état structuraux peuvent-ils être considérés comme indicateur de propriétés limitantes d'un point de vue agronomique ?
- ii- Peut-on attribuer l'origine de ce même type d'état à des tassements en conditions particulières et liés à certaines opérations culturales dont la réalisation et la fréquence dépendent du système de culture ?

Pour aborder ces questions nous avons étudié des populations de mottes naturelles, prélevées dans des parcelles soumises à des systèmes de culture variés d'un sol de limon argileux. Nous avons mis en relation :

- une classification morphologique visuelle de leurs états internes que nous avons dérivée, en la systématisant, de celle de Manichon.
- les composantes du volume poral définies par l'analyse des systèmes de porosité,
- la résistance mécanique à la rupture.

D'autre part, nous avons étudié expérimentalement en laboratoire les conditions de formation des différentes morphologies structurales de la classification : pression appliquée, teneur et potentiel de l'eau, état structural avant compactage.

Il ressort des résultats que la classification des états structuraux des mottes est étroitement corrélée à l'analyse des systèmes de porosité. Les différents types morphologiques correspondent à des niveaux hiérarchisés de porosité structurale. Leur ordre de classement suivant ce critère est conforme aux hypothèses qui sous tendent la classification.

Chaque classe morphologique présente une variabilité importante de la porosité structurale et ses distributions pour les différentes classes ne sont pas disjointes. Enfin, la valeur moyenne et la dispersion de porosité structurale pour une classe morphologique dépendent de l'intensité et de la fréquence des tassements subis par le sol.

La résistance mécanique à la rupture est liée de la même façon à la morphologie structurale des mottes. Mais la porosité structurale apparaît comme la meilleure variable explicative de cette résistance qui dépend également de la morphologie et des conditions de compactage.

Quant aux conditions de formation des différentes classes morphologiques, il a été impossible de définir précisément leurs limites. L'état structural initial, c'est-à-dire la granulométrie des éléments structuraux soumis au compactage, semble être le facteur principal déterminant la morphologie structurale acquise après compactage. En particulier, la classe  $\Delta$ , la moins poreuse, dont la teneur dans la couche labourée est considérée par Manichon comme un indicateur d'effets cumulatifs de systèmes de culture, n'a pu être générée qu'à partir de terre fine.

Cette démarche de classification de l'état structural des mottes peut finalement être utilisée pour comparer les effets des systèmes de culture, sous réserve que la stabilité du contenu des classes morphologiques soit vérifiée par des mesures. La combinaison avec des données obtenues par analyse des systèmes de porosité paraît susceptible d'en élargir et conforter l'interprétation.

## Avant-propos et remerciements

*Agronome mexicain, enseignant à l'UAM-X (Universidad Autonoma Metropolitana-Unidad Xochimilco), j'avais souhaité compléter ma formation par des études universitaires en France, suivant en cela César Turrent et Hermilo Navarro qui avaient, avant moi, pu bénéficier du soutien financier du CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnologia), dans le cadre du programme de formation d'ingénieurs accordé par cet organisme mexicain et le CEFI (Comité d'Etudes sur les Formations d'Ingénieurs), organisme français.*

*J'ai eu la possibilité de m'inscrire au DAA "sciences et techniques des productions végétales" de l'INA-PG et d'en suivre la totalité des enseignements. Le professeur Sebillotte, qui connaît bien le Mexique où il a fait plusieurs missions, m'a accueilli dans la formation de troisième cycle qu'il dirige et a permis mon intégration au sein de l'équipe d'enseignants et de chercheurs qu'il anime.*

*J'ai fort apprécié l'approche que le professeur Sebillotte et la chaire d'Agronomie ont développé sur l'étude des systèmes de culture. Il me paraît important de faire connaître et d'utiliser cette approche (originale et surtout utile) dans le cadre de la recherche latino-américaine.*

*De son côté, le professeur Hubert Manichon m'a initié au concept de profil cultural, dans ses aspects de diagnostic sur les effets des systèmes de culture. J'avais particulièrement apprécié dans cette approche, nouvelle pour moi, l'association des données de laboratoire et des observations de terrain.*

*Le progrès technique de l'agriculture des pays comme le Mexique passe nécessairement par le diagnostic des situations et par la découverte des facteurs et conditions qui, liés aux systèmes de culture et au milieu physique, limitent la production. Je souhaitais réaliser mon travail de thèse de Doctorat sur un sujet qui, tout en assurant le perfectionnement de ma formation scientifique, pourrait déboucher sur des applications de terrain. C'est pour cela que dans ce cadre j'ai choisi de travailler dans le domaine du profil cultural*

*A travers l'enseignement "milieu physique" du DAA j'ai perçu la complémentarité entre deux approches d'étude de l'état physique du sol : celle de la description morphologique du profil cultural et celle de l'analyse de la porosité proposée par les chercheurs de la Station de Science du Sol d'Avignon. J'ai eu l'opportunité de travailler sur l'état structural du sol au cours d'un stage de 6 mois au laboratoire d'Avignon, (sous la direction de Pierre Stengel) pendant lequel j'ai étudié le processus de fissuration des sols à l'humectation.*

*A l'issue de ce premier stage en Avignon j'ai commencé mon travail de thèse au laboratoire de l'INA-PG sous la direction du Professeur Hubert Manichon. Sur le terrain, j'ai été guidé par celui-ci, et j'ai bénéficié de l'aide de Jean-Roger Estrade, assistant à l'INA-PG.*

*J'ai participé dans le groupe de recherche "Profil Cultural" animé par Jacques Caneil, maître assistant à l'INA-PG et j'ai bénéficié de son appui constant. Grâce à lui mon travail de recherche a été intégré dans le cadre d'AIP "travail du sol" de l'INRA, lancée par Hubert Manichon avant son départ pour la Direction Scientifique du CIRAD. François Papy m'a apporté son expérience en assistant à plusieurs réunions de discussion sur les résultats. Les discussions des résultats avec Isabelle Coulomb m'ont toujours été utiles. Christine Aubry (chercheur du SAD) s'est toujours intéressée à l'avancement de mon travail.*

*Pendant la première période de la thèse qui s'est déroulée à Grignon entre novembre 1987 et octobre 1989 j'ai reçu l'aide amicale de :*

*-Catherine Pasquier, technicienne du SAD et avec laquelle j'ai partagé pendant deux ans le même bureau,*

*-Jacques Trozier, responsable technique du centre expérimental de Grignon*

*-Philippe Hamard, technicien du laboratoire "plantes".*

*J'aimerais remercier Mme.Généviève Baudran, Mme.Joëlle Brun et Mme. Odette Tilly (Secrétariat de Grignon) de leur aide et de leur appui moral constant. Merci aussi à Claire Charrier (Secrétariat de la Chaire d'Agronomie à Paris), chargée de mon dossier administratif.*

\*\*\*

*La deuxième période de la thèse (novembre 1989-avril 1981) s'est passée au laboratoire de Science du Sol de l'INRA-Avignon.*

*Dès mon arrivée j'ai bénéficié de l'appui de Jérôme Guérif (Directeur de Recherche) responsable de l'encadrement scientifique de la partie mécanique du sol, et de Pierre Stengel (Directeur de la Station Science du Sol) qui a dirigé la partie de l'analyse de la porosité. Je leur dois ma reconnaissance pour avoir assuré la fin de mon travail de thèse.*

*Jean Royère s'est occupé de m'apprendre à utiliser le matériel du laboratoire de mécanique de sols. Il m'a transmis la rigueur nécessaire aux préparations des expériences et lors des mesures de laboratoire. Il a participé au bon déroulement des expériences de compactages qui nécessitent une attention constante et qui se sont étalées pendant plusieurs mois.*

*Je remercie Jean Claude Fiès pour l'intérêt qu'il a porté à l'avancement de ma thèse et pour les échanges permanents que nous avons eu sur les problèmes d'interprétation des mes résultats. Je dois aussi toute ma reconnaissance à Gérard Monnier pour la part de réflexion qu'il a accordé à certaines étapes clés de mon travail.*

*Michel Bourlet s'est intéressé à mon travail. Il s'est occupé de l'imprégnation à la résine époxy des mottes naturelles et des massifs artificiels, et du travail de photographies des sections polies. La porosimétrie a mercure a été effectuée par Claude Jeandet, technicien du laboratoire de Jean Claude Fies. Ce dont je le remercie.*

*Mes remerciements a Nadia Leitgold pour le travail de frappe d'une partie de la thèse qu'elle a dû faire dans un délai très court.*

*Je remercie tout le personnel scientifique, technique et administratif de la Station de Science du Sol d'Avignon pour l'accueil qui m'a réservé.*

\*\*\*

*Suite à l'expérimentation au laboratoire il aurait été souhaitable de pouvoir tester sur le terrain certaines hypothèses sur la genèse des mottes delta. La fin de la bourse et la nécessité de reprendre mon travail au Mexique n'ont pas permis cette extension de mon travail.*

*En fin de thèse Jérôme Guérif, Pierre Stengel et Hubert Manichon m'ont aidé dans l'élaboration de la version définitive de la thèse en apportant des améliorations tant sur la forme que sur le fond. Je les en remercie.*

*Je remercie tout particulièrement le Professeur Sebillotte d'avoir bien voulu organiser le jury de ma thèse. Tout en le remerciant, ainsi que les personnalités qui ont acceptés de participer à mon jury, je tiens a m' excuser de la trop grande bièveté des délais que la situation a dû imposer.*

# INTRODUCTION GENERALE

## CHAPITRE 1

<b>I. INTRODUCTION</b>	1
<b>II. METHODES DE CARACTERISATION DE L'ETAT STRUCTURAL DES COUCHES TRAVAILLEES - RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE</b>	2
<b>A. Notions de structure et d'état structural du sol</b>	2
<b>B. La méthode du profil cultural</b>	3
1. Objectifs et choix méthodologiques	3
2. Critères de description morphologique	4
3. Limite de validité	6
<b>C. L'analyse des systèmes de porosité</b>	6
1. Motivations et objectifs	6
2. Définitions et méthode	7
3. Porosité structurale et profil cultural	8
<b>III. MATERIELS ET METHODES</b>	9
<b>A. Le site expérimental</b>	9
1. Critères de choix	9
2. Histoire culturale des parcelles	10
3. Constitution des horizons travaillés	14
<b>B. Méthodes d'observation et de prélèvement des échantillons</b>	15
1. Observations de terrain	15
2. Prélèvement des échantillons	16
<b>C. Observations et mesures sur les mottes prélevées</b>	17
1. Mesures de masse volumique	17
2. Caractérisation de l'espace poral	18
3. Classification morphologique de l'état interne des mottes	18
a) Protocole d'observation	18
b) Modification de la classification	19
(1) Motivations	19
(2) Nouvelle classification proposée	20
4. Observations de sections polies	21
<b>IV. RESULTATS</b>	21
<b>A. Caractéristiques morphologiques des populations de mottes étudiées</b>	21
1. Situation dans les profils culturaux	21
2. Représentativité par rapport à l'horizon H <sub>5</sub>	23
3. Fréquence des différents états internes	25
a) Mottes des parcelles	25
b) Mottes des allées	25
<b>B. Relations entre état interne et masse volumique des mottes</b>	27
1. Distribution des masses volumiques	27
2. Relations avec l'état interne	28
a) Mottes des parcelles	28
b) Cas particulier de l'état Δ.	31
c) Comparaison avec les mottes des allées	32
3. Discussion	35

<b>C. Relations entre morphologie structurale et analyse des systèmes de porosité.</b>	36
1. Variations de la masse volumique texturale	36
2. Distribution dimensionnelle des pores texturaux	38
3. Relations entre classification morphologique et porosité structurale	40
a) Distribution des porosités structurales par classe morphologique :	
mottes des parcelles	40
b) Comparaison avec les mottes des allées	44
<b>V. DISCUSSION ET CONCLUSION DU CHAPITRE</b>	48

## CHAPITRE 2

<b>I. INTRODUCTION</b>	50
<b>II. ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES</b>	50
<b>A. Considérations générales</b>	50
1. Etat physique :	50
2. Analyse des systèmes de porosité	51
3. Modalités de compactage :	52
<b>B. Etudes expérimentales du comportement au compactage</b>	54
1. Caractéristiques physiques du matériau	54
2. Conditions d'application des charges	56
a) Intensité	56
b) Durée de la mise en charge	57
c) Nombre de mises en charge	57
3. Conditions de redistribution de l'eau dans l'espace poral, consolidation.	57
<b>III. MATERIELS ET METHODES</b>	60
<b>A. Matériau, états initiaux</b>	60
<b>B. Matériels et modalités de compactage</b>	64
1. Principes communs	64
2. Déformation imposée, effort mesuré	64
3. Effort imposé, chargement cyclique	65
<b>C. Classement morphologique</b>	66
<b>IV. RESULTATS</b>	67
<b>A. Chargement simple</b>	68
1. Non drainé	68
a) Cinétiques de mise en charge	68
b) Effet de l'évolution du taux de saturation	73
c) Etat en fin de chargement, évolution après déconfinement et dessiccation	74
(1) Etats des massifs sous charges, limite de compressibilité	77
(2) Effets du déconfinement et de la dessiccation sur l'état structural	80
2. Effet du drainage	82
<b>B. Effets des chargements cycliques drainés</b>	82
<b>C. Morphologies résultantes</b>	85
<b>V. DISCUSSION ET CONCLUSIONS DU CHAPITRE</b>	89



## CHAPITRE 3

<b>I. INTRODUCTION</b>	94
<b>II. ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES</b>	94
<b>A. Origines de la "cohésion" du sol :</b>	95
<b>B. Aspects théoriques concernant l'évaluation de la résistance mécanique de volumes de sols</b>	95
<b>C. Résistance mécanique et organisation structurale, effet d'échelle</b>	98
<b>D. Facteurs de variations de la résistance en traction texturale.</b>	100
1. Constitution	100
2. Teneur en eau	101
<b>E. Analyse expérimentale des effets des conditions de compactage sur la résistance en traction globale</b>	102
<b>III. MATERIELS ET METHODES</b>	104
<b>A. Prélèvements, profils et blocs, allées ; choix des variables analytiques :</b>	104
1. Mottes naturelles	104
2. Mottes artificielles	104
<b>B. Méthodes de mesures</b>	105
1. Principes communs	105
a) Sollicitations externes et mode de rupture résultant	105
b) Appareils de mesure	107
(1) Agrégats de 2-3 mm	107
(2) Mottes sphériques centimétriques et cylindres compactés Fig.3-14.	107
2. Résistance en traction de sphères	108
a) Préparation des agrégats de 2-3 mm	108
b) Préparation des mottes, observations morphologiques	108
c) Estimation de la résistance en traction	109
3. Résistance en traction de cylindres (test brésilien)	110
a) Préparation des massifs	110
b) Estimation de la résistance en traction	110
<b>IV. PROPRIETES MECANIQUES TEXTURALES</b>	112
<b>A. Résultats</b>	112
1. Distributions	112
2. Analyse des moyennes	114
<b>B. Effet du mode de préparation des agrégats</b>	114
<b>C. Influence de la morphologie des mottes d'origine sur la résistance en traction texturale</b>	117
<b>V. PROPRIETES MECANIQUES DE MOTTES NATURELLES</b>	119
<b>A. Résultats</b>	119
<b>B. Effet de l'état de compacité</b>	121
<b>C. Relation avec la morphologie</b>	123
<b>VI. ETATS PHYSIQUES INITIAUX ET MODALITES DE COMPACTAGE ; APPROCHE EXPERIMENTALE :</b>	125
<b>A. Effet de la compacité induite</b>	125
<b>B. Effet de la teneur en eau</b>	125
<b>C. Effet des modalités d'application des charges</b>	128
1. Intensité des pressions appliquées	129
2. Nombre de mises en charge	130



<b>D. Comparaison avec les mottes naturelles ; Relation avec la morphologie</b>	130
1. Comparaison entre massifs compactés et mottes naturelles	130
2. Morphologies et résistance en traction	131
<b>VII. DISCUSSION ET CONCLUSIONS DU CHAPITRE</b>	132
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	
<b>ANNEXES</b>	

## Abréviations

$\Delta$ $\Phi$ $\Delta/\Gamma$ $\Gamma$	 Voir Tab 1-1 p 5. Typologie des états internes des mottes d'après Manichon.
---	--

$\Delta$ $\Gamma$ $\Gamma_c$ $X$ $Y$ $Y_c$ $Z$	  Voir Fig 1-3 p 20 & Fig. 2-14 p 67. Nouvelle classification proposée, à partir d'observations sur des mottes naturelles, ou des mottes compactées au laboratoire.
--	--

$\rho_d$  : masse volumique sèche des mottes en  $g/cm^3$ .

$\rho_{dt}$  : masse volumique sèche, d'agrégats de 2-3mm, assimilée à la masse volumique texturale en  $g/cm^3$ .

$\rho_s$  : masse volumique de solide (particules élémentaires) en  $g/cm^3$ .

$e_T$  = indice des vides totaux =  $V_{pore}/V_{solide} = \rho_s/\rho_d - 1$  (S.D.).

$e_t$  = indice des vides texturaux (S.D.).

$e_s$  = indice des vides structuraux =  $V_{pores\ structuraux}/V_{solide} = \rho_s (1/\rho_d - 1/\rho_{dt})$  (S.D.).

$n_s$  = porosité structurale =  $V_{pores\ structuraux}/V_{pores} + V_{solide} = 1 - \rho_d/\rho_{dt}$  (S.D.).

$n_{lac}$  porosité lacunaire (%).

W teneur en eau (% pondéral).

$W_{EA}$  teneur en eau au point d'Entrée d'Air (% pondéral).

$W_{EA}$  teneur en eau à la Limite de Retrait (% pondéral).

$W_C$  teneur en eau au compactage (% pondéral).

$W_{SC}$  teneur en eau après compactage et déconfinement (% pondéral).

$|\psi_c|$  Potentiel hydrique au moment du compactage en valeur absolue en  $10^2\text{kPa}$ .

F Force en N.

P pression en  $10^2\text{kPa}$ .

$P_{0.1}, P_{0.2}, P_{0.4}$  Pressions respectivement nécessaires pour atteindre les indices des vides structuraux  $e_s = 0.1, 0.2, 0.4$ , en  $10^2\text{kPa}$ .

$P_{(es, w)}$ , en  $10^2\text{kPa}$ .

${}^aT_0$  résistance en traction texturale à l'état sec en  $10^2\text{kPa}$ .

${}^G T_0$  résistance en traction globale à l'état sec en  $10^2\text{kPa}$ .

d diamètre en cm.

h hauteur en cm.

## INTRODUCTION GENERALE

La caractérisation de l'état du sol en place et de ses propriétés a fait l'objet de nombreux travaux, notamment en Pédologie et en Agronomie. L'école française d'Agronomie est marquée par les travaux de S. Henin et ses collaborateurs qui, dès 1960 ont inventé le concept de "profil cultural". Le sol y est considéré comme support des peuplements végétaux et des engins de culture. C'est un milieu en constante évolution sous l'action des facteurs naturels et des travaux agricoles. Son état, à un moment donné, est donc le résultat d'une histoire : le diagnostic agronomique sur l'état du profil cultural consiste à en rechercher les origines pour définir les moyens de conduire l'évolution du profil cultural par les actions agricoles, dans un sens, si possible, plus favorable. Ainsi les conclusions que l'on tire de la caractérisation du profil ne peuvent être efficaces que si l'on connaît suffisamment les relations sol-outils, en interaction avec l'effet des facteurs naturels (pédologiques et climatiques), d'une part ; les relations entre l'état du sol et les peuplements végétaux, compte tenu du climat, d'autre part.

L'intention qui a présidé à la définition de notre travail se situait uniquement dans le premier de ces domaines. Elle faisait suite à une série de travaux sur la mise au point de moyens de description de la structure des couches travaillées, destinés à améliorer ou à compléter la méthode originale d'observation du profil cultural.

Ceux ci conduits par l'Ecole d'Agronomie de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon, développant les concepts de S. Henin, se placent dans le cadre général de l'existence d'une relation entre la proportion du volume de sol qui est fortement tassé et le niveau des risques d'origine physique encourus par la culture. Vérifiée à plusieurs reprises (Manichon et Sebillotte, 1973, 1975 ; Tardieu, 1984 ; Coulomb et al., 1990), cette hypothèse se différencie de la formulation la plus fréquente dans les publications internationales de physique du sol appliquée à l'agronomie. En effet, par rapport à une attitude dominante qui consiste à relier la compacité moyenne d'un horizon à un type de risque cultural, elle prend en compte explicitement l'hétérogénéité de la structure et se fonde sur la notion de seuil pour exprimer la liaison structure-conséquences pour la végétation.

D'abord validée globalement par enquête sur des populations de parcelles agricoles (Manichon et Sebillotte, 1973), l'intérêt de cette approche a été démontrée expérimentalement par Tardieu (1984). Cet auteur a montré que certaines catégories de mottes très compactes ne sont pas explorées par le système racinaire du maïs et que leur abondance détermine la capacité de la culture à extraire les réserves hydriques du profil.

La mise au point de méthodes fiables d'estimation de l'abondance des volumes les plus compacts apparaît ainsi comme une priorité pour les spécialistes de la description du

profil cultural. C'est cette préoccupation qui était déterminante dans la conception initiale de notre programme, dont l'objet était donc en premier lieu, la mise au point et l'évaluation d'une méthode. Elle conduisait à privilégier le compactage, en interaction avec le travail du sol, comme facteur déterminant les variations de la structure ayant des conséquences agronomiques quantifiables.

Un développement de la méthode du profil structural visant à discriminer, dans les couches travaillées, des volumes de compacités variées, a été proposé par Manichon (1982). Cet auteur, conformément à l'esprit initial de la méthode, privilégie une approche principalement morphologique. Deux motivations justifient ce choix :

- l'une, technique, consiste à rechercher des outils efficaces pour une description au terrain, réalisable par observation directe et sans recours à un matériel spécialisé,
- l'autre, plus fondamentale, est l'hypothèse que la morphologie peut fournir les indicateurs les plus pertinents et diversifiés des conditions de genèse d'un état structural.

La morphologie est alors le support d'une analyse déterministe de la variabilité spatiale et temporelle de la structure, de façon très analogue à cette démarche largement utilisée en pédologie. Dans le domaine qui nous intéresse, cette approche déterministe consiste à relier les différents états structuraux observés aux successions de sollicitations mécaniques appliquées au sol par le roulage des engins agricoles ou le travail du sol, et à leurs conditions d'application, en particulier l'humidité des couches concernées.

Dans ce but, Manichon a proposé :

- d'ajouter à la stratification verticale du profil (distinction des différents horizons anthropiques créés par les outils de travail du sol) une stratification latérale suivant la localisation des roulages et leur position chronologique au sein de l'itinéraire technique (Sebillotte, 1978). On aboutit ainsi à une définition de compartiments qui se distinguent par l'histoire des contraintes mécaniques subies.
- de distinguer deux niveaux d'organisation structurale pour décrire des volumes homogènes : l'état interne des mottes et leur assemblage.

Manichon avait pu vérifier, dans les situations qu'il avait étudiées, que le premier de ces niveaux apparaissait comme relativement stable au cours de l'année culturale, au moins après réalisation des derniers travaux et dans l'horizon labouré mais non repris par les façons superficielles. Au contraire, le second niveau était très sensible aux actions climatiques, en particulier celle des pluies.

L'organisation interne des mottes devait donc être considérée comme l'indicateur le plus stable d'actions de compactage passées, et une composante de la structure ayant des conséquences culturelles pendant toute la durée du cycle végétatif.

Ayant identifié un état interne, l'état  $\Delta$ , comme étant, au moins hypothétiquement, issus des compactages les plus sévères subis par le profil cultural au cours de son histoire, Manichon supposait que la teneur en mottes  $\Delta$  serait révélatrice des effets cumulés du système culture, compte tenu des interactions entre le climat et les propriétés texturales (Manichon, 1987). Dans un schéma des relations entre états internes, cet état pouvait apparaître comme résultant d'actions antagonistes :

- de compactages d'origine anthropique ou climatique : compactage par les pluies, prise en masse par excès d'eau ou retrait,
- de fragmentation par le travail du sol, la fissuration par retrait-gonflement au gel, éventuellement en interaction avec des agents biologiques.

La teneur en état  $\Delta$  pouvait alors être interprétée comme caractérisant le bilan de ces actions antagonistes, résultant du système de culture et éventuellement spécifique de ce système dans la mesure où l'on acceptait l'hypothèse que cette teneur tendait au cours du temps vers un niveau d'équilibre. Les travaux préliminaires de Manichon et Roger-Estrade (1990) sur la comparaison de systèmes de cultures comportant des fréquences variées de culture de maïs allaient effectivement en ce sens. La fréquence de la culture de maïs était associée à l'accroissement de teneur en mottes d'état  $\Delta$ , ce fait étant attribué au compactage provoqué par la récolte de cette espèce dans les conditions climatiques généralement humides qui prévalent dans le Bassin Parisien.

Dans la continuité de ces travaux, notre objectif initial était donc d'évaluer l'intérêt de cet indicateur de l'influence du système de culture sur l'état structural. Pour cela, il était en premier lieu nécessaire de préciser ses modalités d'évaluation : classification de l'état interne des mottes et échantillonnage dans une parcelle permettant d'estimer des teneurs. Les résultats que nous allons présenter concernent uniquement le premier de ces deux aspects. En effet, avant d'aborder le problème de l'échantillonnage pour l'estimation d'une variable caractéristique de la structure sur une surface cultivée, nous devons préciser la définition physique de cette variable et son adéquation aux objectifs poursuivis.

Cela consistait d'abord à vérifier qu'un tri des mottes, fondé sur des critères morphologiques visuellement observables et autant que possible objectivés, permettrait de classer leurs états internes suivant des niveaux de propriétés physiques mesurés.

Ce sont les caractéristiques de volume poral, quantifiées par l'analyse des systèmes de porosité (Stengel, 1979) et la résistance mécanique à la rupture (Guérif, 1990) qui ont été choisies parmi les diverses variables possibles. On peut les considérer comme partie

intégrante de la définition de la structure. Cette partie de notre travail constitue de ce point de vue une analyse des corrélations entre différentes caractéristiques de l'état structural. On peut également les percevoir comme des conséquences de l'organisation structurale qui elles mêmes déterminent ses conséquences agronomiques en terme notamment de croissance et de fonctionnement racinaire. A ce titre, elles permettent d'aborder de façon critique la relation entre certains états internes et l'existence ou le niveau de certains risques pour la culture.

Ce travail d'analyse du classement morphologique des états internes des mottes et de l'information qu'il peut fournir sur l'état et les propriétés physiques de la couche travaillée ne pouvait être réalisé que sur des échantillons naturels. Il porte donc sur des populations de mottes prélevées dans des parcelles cultivées ayant subie des histoires culturelles diversifiées et de texture différente.

Par rapport à l'objectif d'interprétation de l'état interne en terme d'origine et de relation avec des interventions culturelles bien identifiées dans chaque système de culture, il était complémentaiement nécessaire d'étudier les conditions de formation des différents états internes. Celles-ci font intervenir différents ensemble de facteur, intensité et durée des effets appliqués à la surface du sol, état physique du sol au moment de cette application (teneur en eau, organisation structurale, ...). A défaut de modèles de déformations efficaces, la totalité des modèles mécaniques de tassement négligeant le rôle de la morphologie structurale initiale, ce travail relevait d'une approche essentiellement expérimentale. Compte tenu du nombre de facteurs à prendre en compte, elle ne pouvait, pour des raisons évidentes de faisabilité, être réalisée qu'en condition de laboratoire.

Ces deux voies d'interprétation des données morphologiques de l'état interne des mottes ayant été explorées, il était souhaitable à partir du bilan obtenu de revenir à une tentative de quantification plus rigoureuse de l'effet des systèmes de culture.

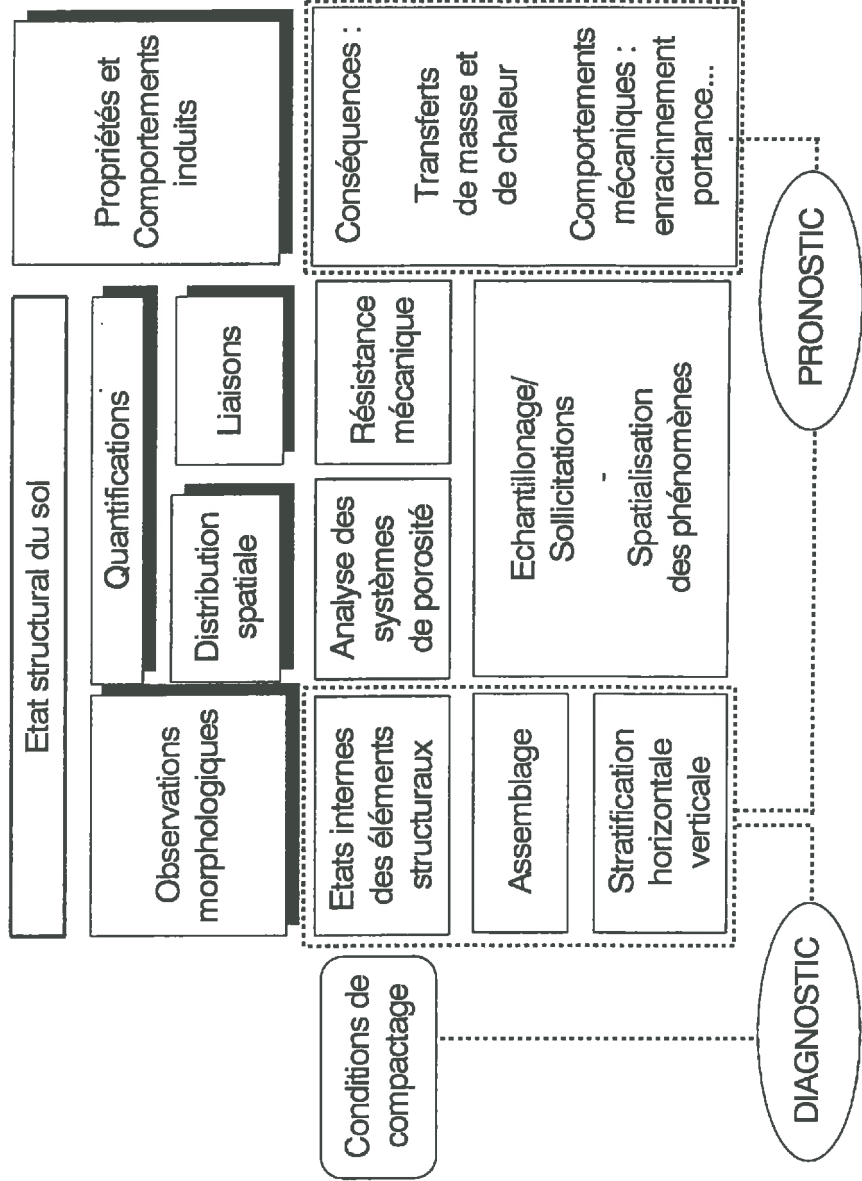
Cela n'a pas été possible dans le cadre de cette thèse. Son objet se limite donc presque exclusivement à l'analyse critique d'une méthode de caractérisation de l'état structural.

Nous présenterons dans une première partie les relations que nous avons établies entre tri morphologique des états internes des mottes naturelles et analyse des systèmes de porosité. Nous pouvons ainsi discuter les performances de tri morphologique pour discriminer des volumes ayant des propriétés physiques d'un niveau défini, et leur stabilité.

A la lumière de ces résultats, nous aborderons ensuite l'étude expérimentale des conditions de formation de ces différents états et des caractéristiques de l'espace poral qui leur correspondent. Une troisième partie décrira les variations de résistance mécanique associées aux différents états internes. Elle permettra d'étudier l'étude des relations état interne-propriétés physiques, mais aussi d'aborder l'étude du rôle respectif du volume poral et de la morphologie structurale dans le déterminisme de la résistance à la rupture.



La conclusion nous permettra d'établir les limites de l'interprétation de l'abondance des états internes les plus compacts comme indicateur de l'effet cumulatif de système de culture et de situer son apport par rapport aux autres moyens de caractérisation de l'état structural utilisé. Elle montrera également que cette approche particulière a apporté des éléments nouveaux sur les processus de compactage.



## CHAPITRE 1

## I. INTRODUCTION

La classification morphologique de Manichon établit un ensemble de critères macroscopiques discriminant, variables dans les populations de mottes issues des couches cultivées et permettant de classer chacune d'entre elles. Associer les différents types d'état interne ainsi définis à des conditions mécaniques de formation particulière, pour analyser leur fréquence en fonction des systèmes de culture suppose une étude expérimentale du tassement en terme de déformation de la structure. Or, on sait que la majorité des travaux d'analyse du compactage expriment les déformations en terme de variation du volume poral, considéré globalement ou fractionné en différents compartiments (Soane et al., 1981). La nécessité apparaît donc d'établir préalablement les relations existant entre classification morphologique et variations du volume poral et de ses différentes fractions. On peut espérer ainsi établir la cohérence des variations morphologiques observées avec les lois connues de déformations mécaniques du sol. En outre, la limitation de l'échelle d'observation à celle de la structure macroscopiquement observable impose de savoir dans quelle mesure chaque type de motte peut être considéré comme homogène à une échelle d'organisation plus fine. C'est seulement à cette condition qu'on peut le considérer comme résultant de conditions de compactage définies en terme d'état initial du sol au moment de l'application de la charge, de nature et intensité de cette charge.

Plus généralement, l'intérêt de connaître les modalités de formation des différents états internes, et même de les différencier, dépend de la possibilité d'affecter à chaque état un niveau des propriétés physiques qui gouvernent le fonctionnement du profil. La plupart de ces propriétés, qu'elles concernent des capacités pour la phase liquide ou gazeuse, des transferts ou des déformations dépendent de la porosité et de sa topologie. Pour évaluer les perspectives d'utilisation de la classification d'état interne des mottes en terme de diagnostic sur l'effet du système de culture, le préalable d'une analyse de ses relations avec les caractéristiques de l'espace poral s'impose donc.

En premier lieu pour aborder cette question à un niveau suffisamment général, on doit considérer les caractéristiques globales de cet espace : volume total ou partition de ce volume en grands ensembles. Les variables qui correspondent à ces caractéristiques sont :

- la porosité totale ou la masse volumique d'une part,
- l'importance relative des sous classes de porosité d'autre part.

L'intérêt de retenir en priorité ces caractéristiques globales est d'abord qu'elles sont corrélées à un grand nombre de propriétés physiques de nature diverses, paramètres de transfert, résistance mécanique notamment (Guérif, 1990). Mais elles constituent également,

du fait de la facilité de leur mesure, des moyens courants de description de l'état du profil cultural et des mottes qu'il contient.

Ce premier chapitre portera donc sur l'étude des relations entre classification morphologique et porosité, considérée uniquement sous l'aspect d'un bilan en volume. Quant à la partition de ce volume, nous avons choisi la méthode de l'analyse des systèmes de porosité (Stengel, 1979) qui permet d'estimer le volume des pores dits structuraux.

Ce volume poral structural inclut majoritairement dans le cas des sols travaillés les pores déterminés par l'assemblage des éléments structuraux observables à l'échelle macroscopique. Il est donc a priori comparable à une description visuelle de la morphologie structurale. Nous analyserons donc, sur des populations de mottes prélevées dans des couches travaillées les variations de masse volumique et de porosité structurale en fonction de l'état interne.

Auparavant, nous rappellerons les principes des deux méthodes : classification de l'état interne des mottes et analyse des systèmes de porosité.

## **II. METHODES DE CARACTERISATION DE L'ETAT STRUCTURAL DES COUCHES TRAVAILLEES - RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE**

### **A. Notions de structure et d'état structural du sol**

Bien qu'il soit universellement utilisé, le concept de structure ne fait pas l'objet d'une définition unique et généralement acceptée. Les deux méthodes qui seront présentées ont en commun une attitude analytique qui conduit à le réduire à deux composantes :

- la disposition spatiale des particules constitutives du sol,
- la nature et l'intensité des liaisons qui existent entre elles.

Ce faisant, elles donnent au concept une compréhension restrictive par rapport à des conceptions plus globales, dans lesquelles sont intégrées des propriétés du sol qui résultent de la disposition spatiale des particules ou la déterminent (Dexter, 1988). Cette définition ne préjuge nullement de l'échelle d'assemblage des particules. Or, depuis l'assemblage des particules d'argile, à celle des microfissures de certains sols argileux, celle-ci recouvre une gamme qui s'étend de l'ordre de grandeur du nm à celui du m. A l'exception des méthodes d'intrusion ou d'extraction d'un fluide (mercure, eau) qui couvrent un large spectre dimensionnel, les méthodes de description de la structure sont adaptées à une échelle déterminée. Dans les cas qui nous intéressent -description du profil cultural et analyse des systèmes de porosité- il s'agit de l'échelle macroscopique. Les particules dont l'assemblage

défini la structure sont alors les mottes ou les agrégats qui les constituent. En utilisant ces méthodes pour analyser les effets de système de culture ou des itinéraires techniques qui leur sont associés on se place dans l'hypothèse que ceux-ci affectent principalement cette échelle d'organisation.

Le terme d'état structural est fréquemment utilisé par les auteurs de ces méthodes (Stengel, 1990). Il est équivalent à celui de structure, mais a l'intérêt d'en souligner les aspects suivants :

- la structure n'est qu'une des composantes de l'état physique d'un volume de sol à un instant donné. Celui-ci est caractérisé en outre par un ensemble de variables, parmi lesquelles la teneur et l'état énergétique de l'eau,
- la structure est rapidement évolutive, tout particulièrement dans les couches travaillées superficielles et passe successivement par des états différents.

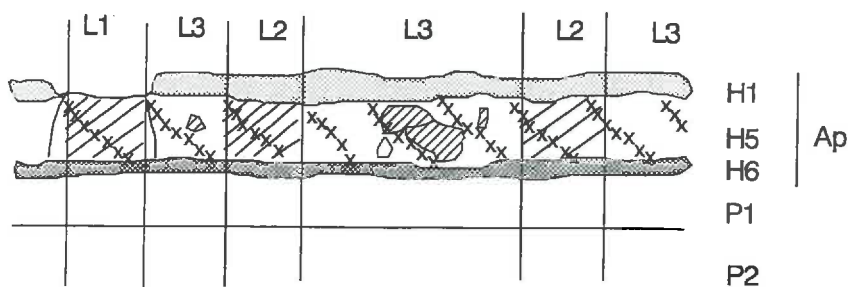
## **B. La méthode du profil cultural**

### **1. Objectifs et choix méthodologiques**

Par rapport à la méthode originale de Henin et al. (1969), les développements proposés par Manichon (1982) s'inscrivent dans le cadre d'un objectif plus précis. Il s'agit de décrire la structure des couches travaillées de façon à observer et quantifier les effets des systèmes de culture et des itinéraires techniques et d'en analyser les mécanismes. Cette approche déterministe implique deux choix :

- décrire séparément les volumes ayant subi des successions de sollicitations différents, de façon à pouvoir relier un état observé à des facteurs explicatifs,
- retenir uniquement des critères morphologiques de description, les traits morphologiques étant supposés a priori être les plus directement reliables à une origine particulière en terme de nature, intensité et conditions d'application d'une sollicitation.

Du premier de ces choix découle la partition verticale et horizontale du volume de sol étudié (Fig.1-1). On voit dans cette stratification une évolution importante de la notion d'horizon : ceux-ci sont définis par les actions anthropiques qu'ils ont subies, qu'ils soient physiquement différenciés ou non. Son intérêt principal est que la variabilité spatiale de la structure est ainsi prise en compte de façon explicite. L'approche en est en principe causale, sous réserve que la localisation des roulages soit connue, et que les effets des autres facteurs de variabilité spatiale (circulation de l'eau par exemple) aient des intensités plus faibles.



Nomenclature des différents horizons :

	H0	Surface du sol
Horizon labouré	H1-H4	Horizons de reprise du labour
Ap	H5	Horizon labouré non repris
	H6-H7	Bases d'horizons labourés anciens
	H8	Horizons partiellement ameublés par des outils profonds (sous soleuse)
	P1-P2	Horizons pédologiques

Partition latérale :

L1	Passages de roues après reprise superficielle
L2	Passages de roues avant reprise superficielle
L3	Sans passage de roues durant les travaux préalables à l'implantation de la dernière culture

Fig. 1-1 Partition verticale et horizontale du profil cultural (Manichon, 1982).

## 2. Critères de description morphologique

La méthode de description de la structure retenue a été établie après comparaison d'un ensemble de critères possibles sur la base de la fiabilité de leur détermination, de leur capacité de discrimination des états structuraux et de leur indépendance relative. Elle comporte deux niveaux ou échelles principales d'observation :

- l'état interne des éléments structuraux, c'est-à-dire principalement des mottes individualisées par le travail du sol,
- les modalités d'assemblage de ces éléments structuraux.

Nous ne développerons pas ici ce dernier aspect étranger à notre travail qui ne porte que sur le premier, pour des raisons exposées dans l'introduction. Au sujet de l'état interne des mottes, nous noterons en premier lieu que ce terme doit être considéré comme une abréviation de "état structural interne" qui en serait la formulation complète. Dans un souci de simplicité, nous conserverons ici le vocabulaire de Manichon, consacré par les utilisateurs.

L'observation de cet état interne est réalisée après rupture des mottes, la morphologie structurale étant observée sur les faces de rupture obtenues.



La classification est fondée sur deux types de critères (Tab.1-1) :

- un critère mécanique : c'est la résistance à la rupture appréciée manuellement,
- des critères morphologiques qui sont de différentes natures.

Les premiers concernent la forme de la surface de rupture : courbure et rugosité. Les seconds portent sur sa continuité, c'est-à-dire la capacité à discerner des limites d'éléments structuraux constituant la motte, ou l'existence de fissures divisant cette même motte. Le dernier est l'abondance des pores visibles. La notion de pore exclut donc ici les pores fissuraux et inclut principalement des pores arrondis d'assemblage d'agrégats ou d'origine biologique.

Tableau 1-1 Typologie des états internes des mottes d'après Manichon (1982, 1987)

Critères descriptifs				Type
Résistance mécanique	Rugosité de la face de rupture	Forme et aspect de la face de rupture	Porosité visible	
Forte	Très faible	Conchoïdale continue	Très faible	$\Delta$
		Conchoïdale fissurée	Très faible	$\Phi$
Faible	Faible à forte	Plane ou irrégulière Localement conchoïdale	faible	$\Delta/\Gamma$
		Plane ou irrégulière	abondante	$\Gamma$

Deux grands types se différencient par la résistance mécanique et la rugosité de la face observée. Ils se subdivisent ensuite en quatre en considérant les critères de présence de discontinuités fissurales et de porosité visible. On distingue ainsi finalement :

- des mottes résistantes mécaniquement et d'apparence très compacte, les types  $\Delta$  et  $\Phi$ ,

- des mottes mécaniquement plus fragiles, et d'apparence plus poreuses  $\Delta/\Gamma$  et  $\Gamma$ , la porosité plus forte étant suggérée par l'aspect rugueux et l'existence de pores visibles.

### 3. Limite de validité

Les types ainsi définis peuvent permettre de classer des mottes si des seuils concernant les différents critères permettent d'assimiler chaque motte à un des types, de façon stable et non arbitraire. Manichon (1982) tente de situer ces seuils de résistance mécanique et de porosité visible par rapport aux notations quantitatives mises au point par Hodgson (1974) pour la description de profils pédologiques. Néanmoins, la définition des classes reste surtout comparative. Dans les exemples étudiés par Manichon, ceci ne soulevait pas de problème majeur dans la mesure où les critères apparaissaient fortement corrélés ce qui réduisait les difficultés d'assimilation à un type. On pouvait cependant supposer qu'à défaut de fournir un système de référence absolue en terme de limites de classe, l'application de la méthode à des sols ou des systèmes de culture différents risque d'aboutir à des contenus variables de chaque classe.

D'autre part, pour que la classification ait un caractère général, il fallait qu'on ait la certitude d'avoir inventorié tous les états internes existant dans une couche de sol travaillé. Cette certitude n'est accessible que par une accumulation d'expériences très diversifiées. Les tentatives réalisées par Manichon sur des sols de texture variée paraissent confirmer la généralité de la méthode. Néanmoins une des limitations vraisemblables était l'existence d'états hétérogènes dans lesquels pourraient coexister des zones appartenant à l'un ou l'autre type. Nous verrons que nous avons été conduit à proposer une typologie modifiée pour surmonter cette difficulté.

## C. L'Analyse des systèmes de porosité

### 1. Motivations et objectifs

Complémentaire de la description de la structure, celle de l'espace poral doit également être adaptée à des objectifs particuliers qui permettent de choisir les variables pertinentes de cette description. Ainsi, suivant qu'on cherche à estimer des coefficients de transfert ou à analyser des phénomènes de déformation mécanique, on privilégiera des critères de dimension et continuité des pores, ou des variations de leur volume total.

Quant à ce dernier aspect, les variables les plus fréquemment retenues pour caractériser le volume poral sont la masse volumique, la porosité totale ou l'indice des vides.

Elles quantifient exclusivement son importance relative. En particulier, elles permettent, couplées à des mesures de teneur en eau, d'établir le bilan en volume des trois phases solide, liquide et gazeuse qui occupent généralement le volume du sol.

La nécessité de compléter cette caractérisation très globale pour quantifier les effets des systèmes de culture et de travail du sol a toujours été ressentie par les physiciens du sol. C'est principalement vis-à-vis des propriétés de transfert qu'ils se sont préoccupés d'introduire des variables plus déterminantes. Ceci s'est traduit notamment par la partition de l'espace poral en micro et macro porosité, et l'exploitation de la relation potentiel-teneur en eau pour estimer la distribution dimensionnelle des pores.

La motivation qui a présidé au développement de l'analyse de systèmes de porosité (Monnier et al., 1973 ; Stengel, 1979) était autre. Il s'agissait de séparer l'influence sur le volume poral des différents ensembles de facteurs :

- les facteurs anthropiques d'une part : travail du sol et actions de compactage,
- la constitution du matériau sol et la teneur en eau d'autre part.

Pour la teneur en eau, son influence résulte des phénomènes de retrait et gonflement qui associent à chaque variation d'humidité une modification du volume poral et/ou de sa distribution dimensionnelle. Depuis Haines (1923), ils ont donné lieu à un ensemble important de travaux parmi lesquels on peut citer ceux de Tessier (1984) sur les argiles. De même, de nombreux résultats montrent qu'à des sols de constitution différente correspondent des valeurs de masse volumique différentes pour des états d'hydratation et de conditions culturales identiques. Ce fait déjà mentionné par Demolon (1932) avait conduit Childs (1969) à formuler l'hypothèse d'un déterminisme textural de la porosité. L'influence des teneurs en argile et matière organique était à cet égard les plus manifestes.

## 2. Définitions et méthode

L'analyse des systèmes de porosité est fondée sur l'hypothèse que dans le volume poral du sol existent deux ensembles de pores d'origines différentes :

- la porosité texturale : l'assemblage des particules constitutives du sol, argile, limon, sables, du fait de leur forme et de leur rigidité ménage un certain volume de pores. Celui-ci est lié à la teneur et à la nature de ces particules et varie avec leur hydratation si le matériau est gonflant.

- la porosité structurale : le travail du sol, les facteurs climatiques (dessèchement, humectation, gel), les organismes vivants, génèrent un volume de pore supplémentaire. Les pores qui délimitent les éléments structuraux que l'on observe lors de la description du profil

cultural font partie de ce second ensemble. C'est ce qui explique l'appellation de porosité structurale. Ce qualificatif fait référence à une échelle particulière de la structure, qui est l'échelle macroscopique.

L'intérêt d'une telle analyse et sa validité ne sont établies qu'à partir d'un critère de séparation des deux types de porosité. La méthode retenue est fondée sur l'hypothèse que des agrégats suffisamment petits, extraits par rupture d'un échantillon de sol, contiennent une porosité qui est essentiellement d'origine texturale (Fies et Stengel, 1981). En mesurant la porosité de tels agrégats dont on fixe pour la plupart des matériaux la dimension entre 2 et 3 mm, on estime donc la porosité texturale. La porosité structurale n'est alors mesurée et n'est fondamentalement définie, que par différence avec la porosité totale. Les mesures pouvant être pratiquées à différentes teneurs en eau, le gonflement est directement pris en compte dans l'analyse.

### 3. Porosité structurale et profil cultural

La porosité structurale est hétérogène dans son origine. Cependant, les résultats de l'analyse appliquée à l'étude du travail du sol (Stengel, 1986) ont montré que :

- seule la porosité structurale était modifiée par le travail du sol, au moins pour des textures suffisamment fines,
- le travail du sol était le principal facteur d'accroissement du volume de pores structuraux.

Ceci justifiait que la porosité structurale soit utilisée comme variable pour quantifier les effets de travail du sol et qu'on cherche à établir sa complémentarité avec les descriptions morphologiques de la structure, en particulier celle du profil cultural. A cet égard, les auteurs (Monnier et Stengel, 1982) ont souligné l'intérêt relatif des deux méthodes en montrant :

- l'utilité des données du profil cultural pour interpréter la variabilité spatiale de la porosité structurale en relation avec la localisation systématique des états structuraux générés par les techniques culturales,
- la nécessité des critères morphologiques pour discriminer les origines des pores structuraux ou relier des propriétés physiques à un volume de pores structuraux donné.

En particulier, pour ce dernier point, l'analyse des systèmes de porosité n'apporte pas d'information dimensionnelle sur les éléments structuraux. Or la taille de ces éléments a une

influence déterminante sur les propriétés physiques de la couche travaillée pour un même niveau de porosité.

Cette complémentarité orientait a priori notre choix quant à la méthode de quantification du volume poral à associer à la description morphologique des états internes. Celui-ci était en outre guidé par

- la nécessité de se limiter à des méthodes rapides pouvant être appliquées à un grand nombre d'éléments structuraux,
- l'existence de résultats suffisamment abondants sur les relations entre porosité structurale et propriétés physiques, et plus particulièrement mécaniques (Guérif, 1984, 1988, 1990).

### III. MATERIELS ET METHODES

#### A. Le site expérimental

##### 1. Critères de choix

Le site retenu pour les observations de terrain devait présenter un ensemble de caractéristiques concernant :

- la juxtaposition de parcelles soumises à des systèmes de culture différents, associés à des itinéraires techniques susceptibles de générer une variabilité la plus grande possible des états structuraux,
- la texture de la couche de surface et l'homogénéité de sa constitution.

A priori, la meilleure adéquation des situations étudiées à l'objectif poursuivi eût été garantie par la mise en place d'un dispositif expérimental spécifiquement adapté.

Deux raisons importantes s'y opposaient. En premier lieu, l'objectif général d'évaluation des effets physiques des systèmes de culture sur le sol implique l'existence de parcelles conduites en fonction de cet objectif pendant plusieurs années. En second lieu, un tel dispositif expérimental, nécessairement géré de façon différente de la pratique agricole risquerait de restreindre la diversité des états structuraux rencontrés. Plus favorable à la préparation des états types de la classification, il pouvait contribuer à masquer les difficultés de son application. Or un des principaux critères d'évaluation des méthodes de description de l'état structural est la généralité de cette application. Pour les classifications morphologiques, le problème d'existence générale des types, d'aptitude à classer exhaustivement toutes les

morphologies rencontrées et de stabilité du contenu des classes sont décisifs vis-à-vis de leurs perspectives d'utilisation. Il était donc souhaitable d'éviter des situations dans lesquelles ils auraient pu être partiellement dissimulés.

Nous avons ainsi recherché des parcelles ayant porté depuis un nombre d'années suffisant des successions culturales dont les études antérieures (Manichon, 1987) permettaient de supposer qu'elles induisaient des différences de structure de la couche de surface et plus particulièrement de l'état interne des mottes.

Ces différences sont liées principalement à la fréquence de la culture de maïs dans la succession. Dans les conditions climatiques du Bassin Parisien, la récolte mécanique de cette culture a lieu fréquemment en conditions humides et provoque un tassement qui affecte toute l'épaisseur de la couche travaillée. Au contraire, la récolte des céréales d'hiver n'a généralement pas cet effet.

En incluant dans l'échantillonnage des parcelles portant des successions à forte fréquence de maïs ou de blé, on a donc une forte probabilité d'étudier des éléments structuraux ayant subi des compactages d'intensités diverses dans des conditions d'humidité variées et depuis des temps différents. D'autre part, en se plaçant dans des parcelles où l'ensemble des passages de matériel sont effectués dans la même direction, on pouvait s'assurer que des coupes transversales par rapport à cette direction recouperent des volumes soumis à ces différentes histoires mécaniques.

Quant à la texture, la majeure partie des expériences antérieures (Manichon, 1982 ; Papy, 1984) de mise au point ou d'utilisation de la méthode de description de la structure ont été conduites sur des horizons limoneux et limono-argileux. Il était donc souhaitable de se placer sur des matériaux de même constitution pour aborder une analyse des relations entre la classification morphologique et des variables physiques.

## 2. Histoire culturelle des parcelles

Les parcelles ont été choisies en deux emplacements du domaine de Grignon de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon dont nous utiliserons les appellations cadastrales : Chantepie et Plateau.

Les successions culturales qui y ont été pratiquées durant les huit années précédant nos observations sont présentées au tableau 1-2. Dans le cas de Plateau, deux monocultures de blé et maïs sont juxtaposées.

Pour Chantepie, toutes les parcelles ont un passé plus ou moins ancien de monoculture de blé d'hiver, avec interruption ou non par 2 ou 3 cultures de maïs dans les années récentes. Si l'on privilégie, comme cause d'apparition de volumes fortement tassés, la

récolte de maïs, les parcelles 8 (monoculture de blé) et 6 (récoltes de maïs avant le blé présent en 1988) constituent les situations les plus opposées ; les parcelles 9, 11 et 10 portant du maïs au moment des observations, sont dans des situations intermédiaires (respectivement : 1 récolte de maïs avant les observations pour les deux premières, 2 pour la dernière).

Tableau 1-2 Successions culturales pratiquées sur les parcelles étudiées. \*

Localisation	N° profil	Culture							
		81	82	83	84	85	86	87	88
Plateau	13	B	B	B	B	B	B	B	B
	14	B	B	B	B	B	B	B	B
	12	M	M	M	M	M	M	M	M
	15	M	M	M	M	M	M	M	M
Chantepie	6	O	B	O	B	M	M	M	B
	8	B	B	B	B	B	B	B	B
	9	B	B	B	B	B	M	M	M
	10	B/BS	B/BS	B/BS	B	B	E	M	M
	11	B/BS	B/BS	B/BS	B	B	E	M	M

**B (Blé)-O(Orge)-M (Maïs)-E (Escourgeon)-B/BS (Blé/Betterave Sucrière)**

(\*) Les parcelles sont identifiées par le n° des profils qui y ont été observés. Pour la localisation des parcelles dans les dispositifs expérimentaux du domaine de Grignon, se reporter à l'annexe 2.

La réunion des deux situations permet donc de disposer d'un ensemble de cas où les roulages lors des récoltes, répétés depuis un nombre d'années variables, peuvent avoir induit des états structuraux différents, incluant la manifestation d'effets cumulatifs du tassement ou d'évolution structurale de durée variable des volumes tassés.



Pour compléter la diversité de ces situations, des prélèvements ont été effectués dans les allées du dispositif. Dans le cas de Chantepie, il s'agit d'une allée permanente non travaillée. Pour Plateau, l'allée subit périodiquement un travail superficiel pour le désherbage. Les prélèvements ont été effectués dans les zones roulées. La fréquence des roulages et les charges supportées par le sol de ces allées ne sont pas connues de façon précise. On peut seulement affirmer qu'elles subissent une fréquence de compactage très supérieure à celle des parcelles, sans action profonde du travail du sol.

Les éléments principaux des itinéraires techniques pratiqués sur les parcelles durant les trois années précédant les observations sont fournis au tableau 1-3. L'ensemble des parcelles est labouré chaque année, ceci étant vrai pour toutes les années antérieures.

Cette condition était impérative pour l'identification univoque de l'horizon  $H_5$  affecté par le labour, mais non repris par les façons superficielles, dans lequel ont été prélevées toutes les mottes.

Dans tous les cas, l'implantation du blé est réalisée après une séquence d'opérations très brève. Elle comporte le labour, des façons superficielles variables mais réalisées en une seule journée, et le semis, le délai maximal étant d'une semaine. Pour la culture de maïs, le labour intervient à une date comprise entre la dernière décade de Novembre et la première de Janvier, les façons superficielles et le semis durant la dernière décade d'Avril.

Dans tous les cas, le tracteur effectuant les travaux après le labour (reprises superficielles, désherbages chimiques, apports d'engrais, semis) avait une voie de 1.75 m, largeur correspondant à celle de la planche de semis. La faible largeur de ces parcelles expérimentales (4 à 6 planches de semis pour le maïs comme pour le blé) impose, dans la pratique, de réaliser tous les roulages sensiblement aux mêmes endroits après le labour de l'année, et d'une année à l'autre. Seuls les emplacements des roulages de récolte du maïs font exception, ils concernent de plus une proportion importante de la surface de chaque parcelle (la récolteuse étant monorang, chaque intervalle entre lignes de maïs est compacté à deux reprises). Enfin les emplacements des compactages dus à la remorque qui suit latéralement la récolteuse ne peuvent être connus a posteriori, pour une planche de semis donnée, dans la mesure où l'on ne connaît pas le sens dans lequel la machine a opéré. De plus, les tassements occasionnés par cette remorque peuvent être plus ou moins importants selon la charge qu'elle porte, qui varie constamment au cours de l'opération de récolte. Pour ces différentes raisons, la récolte de maïs est vraisemblablement, dans les systèmes étudiés, une cause importante de variabilité de l'état structural, tant au sein d'une même planche qu'entre planches de semis d'une même parcelle, ou entre les parcelles ayant porté du maïs.

Tableau 1-3. Description des itinéraires techniques pratiqués sur les parcelles au cours des années précédant l'observation. HR-TA-RJ : Herse rotative - tasse avant - roues jumelées. 4r : 4 rangs. MB : moissonneuse batteuse

Plateau :	Op.cult.	1985-1986	1986-1987	1987-1988
Profil 15	Labour		25 Nov 86 ( <i>Souchu</i> )	03 Déc 87 ( <i>Trisoc</i> )
	Reprises		16 Avr 87 ( <i>Vibro+RH</i> )	15 Mars 88 <i>Vibro+HRTA</i>
	Semis	<u>Maïs</u>	22 Avr 87 <u>Maïs</u> <i>Naudet, 4r</i>	18 Mars <u>Maïs</u> <i>Naudet 4r</i>
	Récolte	09 Nov 86 <i>Corn picker</i>	12 Nov 87 <i>Corn picker</i>	11 Oct 88 <i>Corn picker</i>
Profil 13	Labour		10 Oct 86 <i>Souchu</i>	21 Oct 87 <i>Trisoc</i>
	Reprise		13 Oct <i>Crosskill+RH</i>	21 Oct 87 <i>HR-TA-RJ</i>
	Semis	<u>Blé</u>	14 Oct 86 <u>Blé</u> ( <i>Isaria</i> )	22 Oct <u>Blé</u> ( <i>Isaria</i> )
	Récolte	29 Juill 86 <i>MB Hege-...</i>	04 Août 87 <i>MB Hege-Brand</i>	29 juill 88 <i>MB Hege...</i>

Chantepie :	Op.cult.	1985-1986	1986-1987	1987-1988
Profil 10	Labour	19 mars 86 <i>Souchu</i>		09 Déc 87 <i>Souchu-Pinet</i>
	reprise	05 mai 86 <i>Vibro+RH</i>	23 avril 87 <i>Herse rot.</i>	02 Mai 88 <i>TrisocHRTARJ</i>
	semis	05 mai <u>Maïs</u> <i>Naudet 4r</i>	<u>Maïs</u>	02 Mai <u>Maïs</u> <i>Naudet 4r</i>
	Récolte	27 Oct 86 <i>Corn picker</i>	27 Oct 87 <i>Corn picker</i>	27 Oct 88 <i>Corn ..</i>
Profil 6	Labour	19 Mars 86 <i>Souchu-Pinet</i>	03 Avril 87 <i>Souchu-Pinet</i>	05 Nov 87 <i>Trisoc</i>
	reprise		23 Avril 87 <i>HR+TARJ</i>	06 Nov 87 <i>HR</i>
	semis	<u>Maïs</u>	23 Avril <u>Maïs</u> <i>Naudet 4r</i>	06 Nov <u>Blé</u> <i>Naudet 1.75m</i>
	récolte	27 Oct 86 <i>Corn picker</i>	27 Oct <i>Corn picker</i>	04 Août 88 <i>MB Brand</i>

### 3. Constitution des horizons travaillés

Les données analytiques concernant les couches de surface des parcelles étudiées sont présentées au tableau 1-4. On constate que dans tous les cas, les échantillons prélevés appartiennent à la classe texturale des limon-argileux. Le matériau de Chantepie possède une teneur en argile plus élevée que celle de Plateau. L'écart de 5 à 6 % en teneur massique est suffisant dans cette classe texturale pour impliquer des comportements structuraux sensiblement différents, notamment en matière de gonflement-retrait et de fissuration (Stengel et al., 1985). Les données concernant les deux sites devront être traitées comparativement pour tenir compte de cet éventuel effet de la texture.

Tableau 1-4 Constitution des horizons travaillés.

Localisation	Plateau			Chantepie		
	13	15	Allée	6	10	Allée
<2 mm	23.8	23.5	24.2	29.4	28.5	30.3
2-20 mm	22.1	26.1	24.8	23.3	24.1	22.3
20-50 mm	45.4	40.3	35.7	32.6	29.8	29.8
50-200 mm	6.9	6.8	10.8	10.3	12.1	11.5
200-2000 mm	1.8	3.3	4.5	4.4	5.5	6.1
C organique % masse sèche	1.53	1.31	1.15	1.25	1.50	1.78
CaCO <sub>3</sub> total % masse sèche	0.8	1.9	4.5	4.4	8.2	10.5
C.E.C. meq/100 g	13.5	15.5	14.6	-	--	16.9

On enregistre d'autre part une certaine variabilité de la distribution dimensionnelle du squelette limoneux et sableux, de la teneur en matières organiques et en carbonate de

calcium. Bien que modérées, ces variations peuvent induire des variations de propriétés physiques, notamment de la porosité texturale, qui pourrait intervenir dans l'interprétation des données sur l'espace poral.

## B. Méthodes d'observation et de prélèvement des échantillons

### 1. Observations de terrain

Dans chacune des parcelles, on a choisi une zone de prélèvement, suffisamment éloignée des bordures pour ne pas présenter de biais systématique quant à la fréquence des roulages ou les conditions d'action des outils. Dans cette zone, des fosses (environ 2 m de long et 50 cm de profondeur approximativement) ont été ouvertes, perpendiculairement à la direction du travail du sol. La longueur des fosses a été adaptée de façon à pouvoir observer une planche de semis en blé comme en maïs. Celle-ci a été choisie au hasard en excluant les planches des bordures de chaque parcelle.

Suivant ce que nous avons dit plus haut, opérant ainsi, nous avons la certitude d'inclure dans le profil observé les zones roulées ( $L_1$ ) ou non roulées ( $L_3$ ) depuis le labour. Dans les parcelles de blé les positions  $L_1$ , correspondant à l'opération de semis, étaient très marquées, tant par l'enfoncement de la surface que par l'absence de rangs de semis à ces endroits. Rappelons que les roulages intervenus entre le labour et cette dernière opération avaient pris place sensiblement aux mêmes endroits. L'identification de la stratification latérale se faisait donc sans difficulté. Dans les parcelles de maïs, la distinction des positions  $L_1$  à partir de l'observation de la surface du sol et de la végétation était moins nette ; nous avons dû nous aider de la description du profil cultural suivant la méthode de Manichon (1982) pour préciser la stratification latérale. Lors de ces descriptions, nous avons délimité les différents horizons culturaux en portant une attention particulière à l'horizon  $H_5$ . Puis les contours des zones dont l'apparence correspondait à un état interne  $\Delta$  ont été déterminés à partir des critères suivant :

- résistance mécanique élevée à la pénétration et à l'arrachement par la pointe du couteau,
- faible rugosité et absence de porosité visible sur la face d'arrachement.

La cartographie des différents horizons et de la morphologie  $\Delta$  a ensuite été tracée sur une feuille de plastique transparent tendue devant la face du profil.

## 2. Prélèvement des échantillons

Après réalisation de cette opération, la face du profil a été subdivisée en bandes de 17.5 cm de large, correspondant à la moitié de la largeur d'une bande de labour. Les limites de ces bandes ont été localisées conformément au schéma de la figure 1-2. Enfin, on a découpé à l'aide du couteau, l'horizon H<sub>5</sub> en blocs de 17.5 cm de largeur et environ 10 cm d'épaisseur (Fig.1-2).

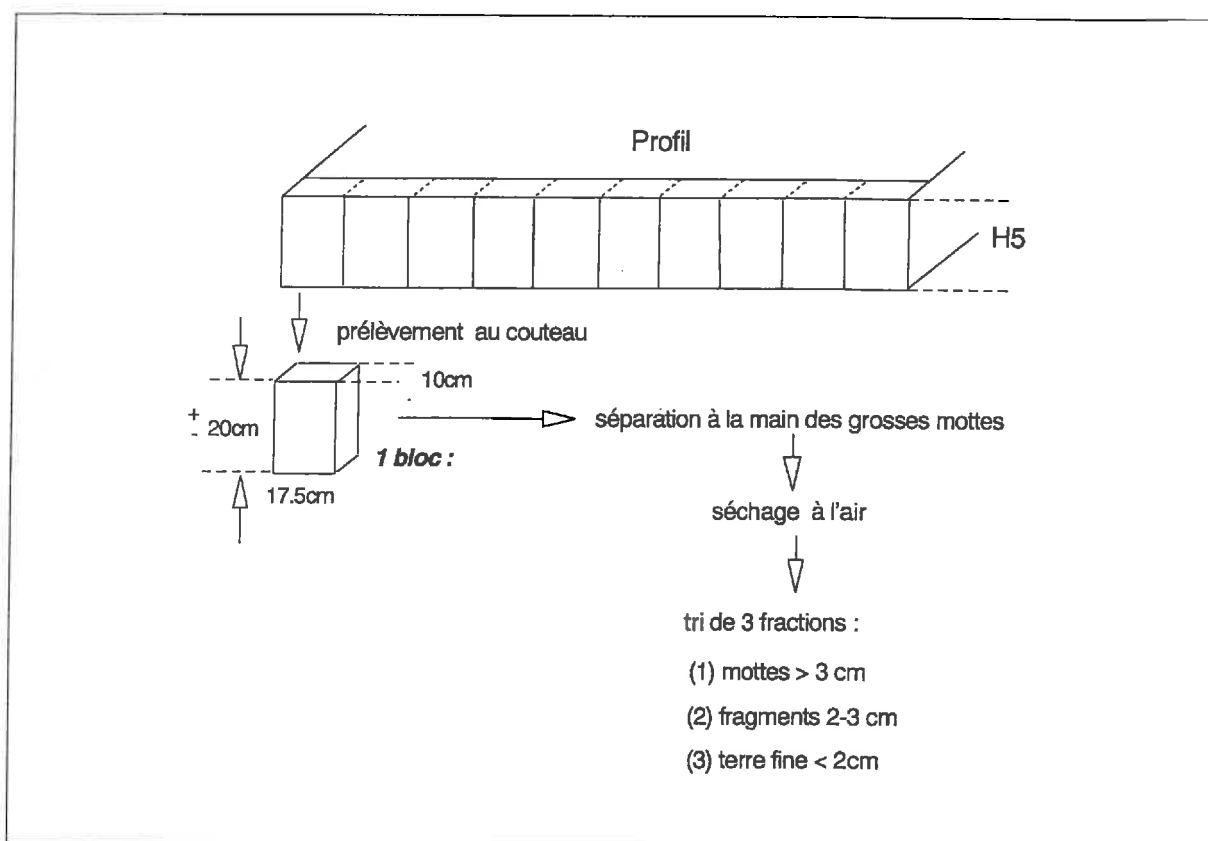


Fig. 1.2 Schéma de prélèvement des blocs des profils.

La grande variabilité spatiale, perpendiculairement à la direction des travaux, de la présence des mottes  $\Delta$ , imposait de prélever la totalité de la largeur du compartiment. Nous avons choisi de privilégier cette direction, pour lesquelles les causes de variation sont, ou connues, ou suggérées par les travaux antérieurs, plutôt que de répéter les fosses dans le sens du travail. Dans ces parcelles, les observations au champ (Ph. Leterme, comm. person.) incitent en effet à penser que la variabilité de l'état structural dans le sens longitudinal est faible, ou liée à des causes accidentelles, qui adviennent le plus souvent dans les "fourrières" des parcelles, zones que nous avons exclues de nos contrôles. Etant données ces précautions, nous postulons pour la suite que les profils cultureux que nous avons observés sont suffisamment représentatifs des effets des systèmes de culture.

L'ensemble de chacun des volumes de terre prélevés a été stocké dans des sacs plastiques hermétiquement fermés et transportés au laboratoire.

La terre contenue dans les sacs a ensuite été étalée sur des tables de façon à séparer la terre fine et les différents fragments individualisés. Les fragments ou mottes les plus grossières ont été brisés à la main, éventuellement à l'aide du couteau pour les plus résistants, de façon à obtenir une dimension maximale de l'ordre de 6 cm.

L'ensemble a ensuite séché dans l'atmosphère du laboratoire pendant plusieurs semaines. A l'issue de cette période de séchage, on a séparé par tamisage trois classes dimensionnelles de fragments :

$\varnothing > 3$  cm : cette classe regroupe des mottes naturelles et des fragments issus de mottes plus grossières par rupture après prélèvement. C'est sur cette population que porte l'étude postérieure. Malgré l'hétérogénéité de son origine, nous utiliserons par commodité le terme de motte pour désigner ses éléments.

$2 \text{ cm} < \varnothing < 3 \text{ cm}$  : ces fragments à dimension plus faible sont nécessairement eux aussi d'origine hétérogène.

$\varnothing < 2$  cm : cette fraction est appelée terre fine

Nous avons ensuite constitué un sous-échantillon à partir des 90 blocs prélevés :

- dans deux parcelles du Plateau (13- monoculture de blé et 15- monoculture de maïs), nous avons retenu par tirage au sort respectivement 5 et 4 blocs ;
- dans deux parcelles de Chantepie (6- blé sur 3 maïs successifs et 10- 3ème maïs sur monoculture de blé) nous avons fait de même.

Ce sous-échantillon de 18 blocs, recouvrant la gamme de variation des situations étudiées, a été utilisé, ainsi que les mottes prélevées dans les allées, pour l'ensemble des mesures et observations présentées dans la suite de notre texte. Nous ne reviendrons sur les autres blocs prélevés qu'en conclusion.

## **C. Observations et mesures sur les mottes prélevées**

### **1. Mesures de masse volumique**

La masse volumique sèche des mottes a été mesurée par mesure de la poussée hydrostatique dans l'eau, après enrobage à la paraffine. La technique est décrite en détail par Stengel (1987). Cependant, le nombre considérable de mottes à étudier a conduit à rechercher

une simplification du protocole permettant d'accroître sa productivité. Celui ci est présenté à l'annexe 1.

## 2. Caractérisation de l'espace poral

Les calculs de volume poral, exprimés en porosité ou en indice des vides nécessitent la connaissance de la masse volumique de solide  $\rho_s$ . Celle ci a été déterminée par la méthode du pycnomètre à eau, suivant le protocole décrit par Stengel (1984). Les mesures de masse volumiques d'agrégats, permettant d'estimer le volume poral textural ont été réalisées par mesure de la poussée hydrostatique dans le pétrole, suivant la méthode décrite par Monnier et al. (1973). Les variables utilisées pour exprimer l'importance relative du volume des pores sont les suivants :

$$\text{indice des vides} \quad e = V_{\text{pore}}/V_{\text{solide}} = \rho_s/\rho_d - 1$$

$$\text{porosité} \quad n = V_{\text{pore}}/V_{\text{pore}} + V_{\text{solide}} = 1 - \rho_d/\rho_s$$

indice des vides structural =

$$e_s = V_{\text{pores structuraux}}/V_{\text{solide}} = \rho_s (1/\rho_d - 1/\rho_{d\tau})$$

porosité structurale =

$$n_s = V_{\text{pores structuraux}}/V_{\text{pores}} + V_{\text{solide}} = 1 - \rho_d/\rho_{d\tau}$$

avec  $\rho_d$  : masse volumique sèche des mottes

$\rho_{d\tau}$  : masse volumique sèche d'agrégats, assimilée à la masse volumique texturale

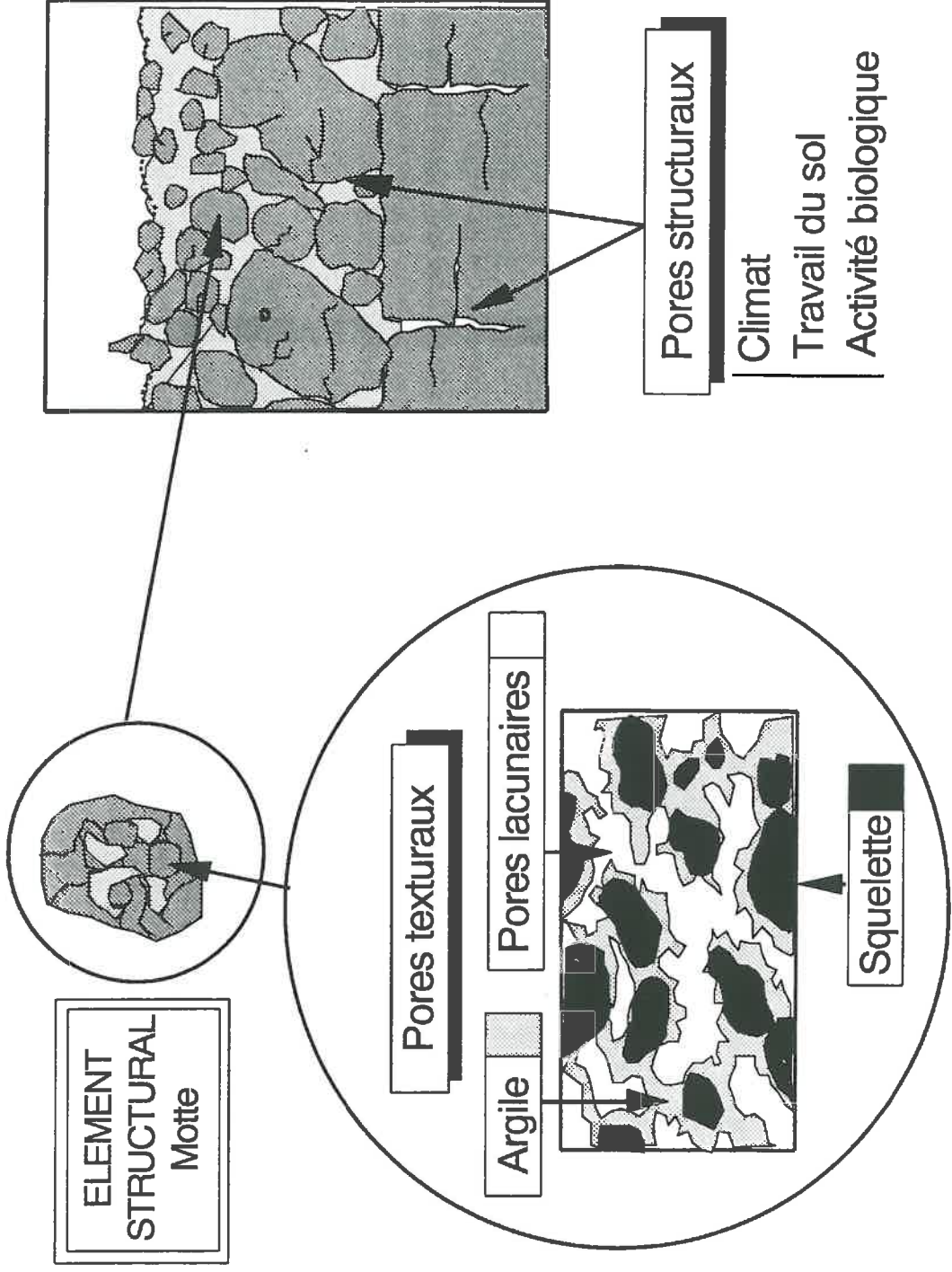
La distribution dimensionnelle des pores des agrégats a été étudiée par la méthode d'intrusion de mercure suivant le protocole décrit par Fies (1984).

## 3. Classification morphologique de l'état interne des mottes

### a) Protocole d'observation

L'état interne des mottes, tel qu'il a été défini par Manichon (1982) est observé après rupture de ces mêmes mottes. Sa définition tient compte à la fois de la résistance à la rupture, appréciée à la main, et de la morphologie de la face de rupture. Pour permettre d'étudier les relations entre volume poral et état interne, les observations ont donc été réalisées après mesure de la masse volumique de chacune des mottes. La rupture des mottes a été provoquée





Pores structuraux

- Climat
- Travail du sol
- Activité biologique

ELEMENT  
STRUCTURAL  
Motte

Pores texturaux

Argile

Pores lacunaires

Squelette

en exerçant une pression dans une section "médiane" à l'aide d'une lame métallique. Ce choix impliquait que la section de rupture était vraisemblablement moins liée à la localisation d'éventuelles zones de fragilité dans la motte que dans le cas des ruptures manuelles. La zone de rupture était en effet assez généralement déterminée par le point d'application de la pression. Il supposait en outre qu'on renonce à utiliser la résistance à la rupture comme critère de classification des états internes compte tenu de la difficulté à l'apprécier avec la technique employée.

#### b) Modification de la classification

Nous avons dû compléter cette première modification apportée à la méthode de classification des états internes en :

- modifiant les critères morphologiques de classification des états observés sur les faces de rupture,
- définissant de nouveaux types permettant de classer sans ambiguïté toutes les faces observées.

##### (1) Motivations

Au niveau le plus élevé la classification de Manichon repose sur la définition d'un seul type d'état interne, l'état  $\Delta$ . L'état  $\Gamma$  s'en déduit par simple complémentarité portant sur les trois critères : résistance à la rupture, aspect lisse de la surface, absence de pores visibles. Secondairement, l'introduction du critère de continuité permet de distinguer l'état  $\Phi$ , fissuré, de l'état  $\Delta$  dont il est une modalité particulière. De même, l'abondance de pores visibles établit la distinction entre états  $\Gamma$  et  $\Gamma/\Delta$ .

Du fait du rôle prééminent de la définition de l'état  $\Delta$ , la typologie est surtout adaptée à la reconnaissance des mottes d'apparence la plus compacte. Ceci est conforme à l'interprétation que son auteur donne de leur origine et à l'importance qu'il leur accorde comme indice de l'effet physique des systèmes de culture (Manichon, 1987). En revanche, elle ne propose qu'une différenciation très grossière des morphologies observées dans les autres mottes.

D'autre part, la définition de chacun des états types admet l'hypothèse d'homogénéité des mottes. Aucun critère explicite ne permet de classer des mottes composites, comportant par exemple des variations importantes de l'abondance de pores visibles. Du fait de l'abondance de mottes hétérogènes dans la population que nous avons étudiée, il a été nécessaire d'élaborer une classification permettant de surmonter cette difficulté. Nous avons simultanément cherché à préciser la classification des états non  $\Delta$  notés en augmentant le nombre des classes morphologiques.

## (2) Nouvelle classification proposée

L'hétérogénéité interne des mottes a été prise en compte en utilisant la possibilité de distinguer sur la face de rupture des sous-ensembles d'états internes différents. On y observe en effet (Fig.1-3) :

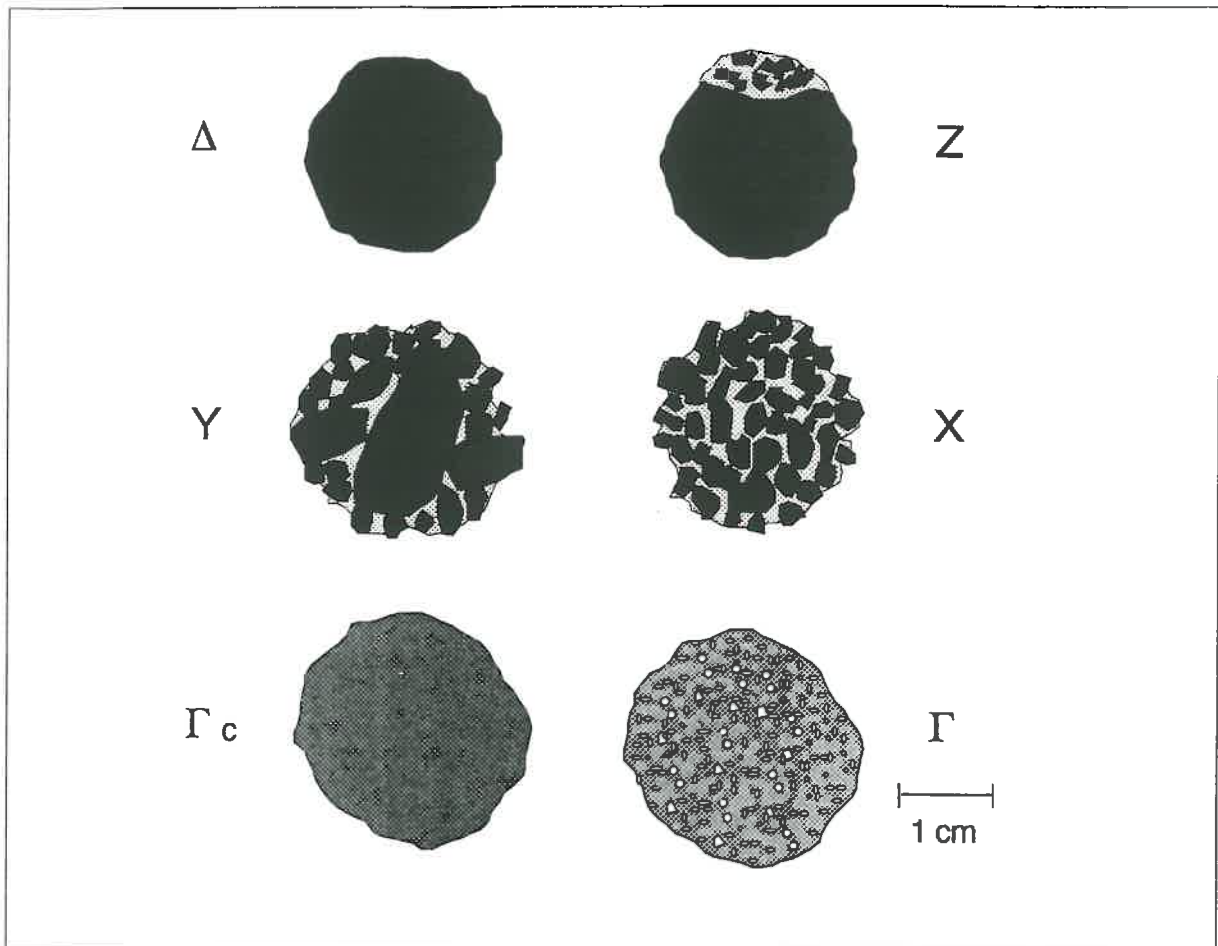


Fig. 1-3. Typologie des différents états morphologiques des mottes.

- les faces d'éléments structuraux d'apparence  $\Delta$
- des zones rugueuses de morphologie  $\Gamma$ .

L'évaluation de leur importance relative fournit un critère de définition des classes par fixation de seuils arbitraires, évaluables visuellement.

Il a été complété en introduisant la dimension des éléments structuraux identifiables qui constituent la motte.

Ces deux variables sont fortement corrélées lorsque ces éléments structuraux sont de grande dimension par rapport à celle de la motte. En revanche, en deçà d'un certain seuil de

taille, l'oeil n'est plus capable de distinguer les morphologies des différentes plages présentes sur la face de rupture, mais peut établir une estimation de leur dimension dominante.

On aboutit ainsi à la typologie présente à la figure 1-3.

Les types  $\Delta$ , Z et Y sont différenciés par la proportion d'état  $\Delta$  visible sur la face de rupture et conjointement la diminution de taille des éléments structuraux  $\Delta$  qu'elle contient.

Les types X,  $\Gamma_c$  et  $\Gamma$  se définissent principalement par la dimension des éléments structuraux décelables qui les constituent. La différence entre  $\Gamma$  et  $\Gamma_c$  est fondée sur l'abondance des pores visibles et la facilité à discerner les éléments fins constitutifs. Cette comparaison fondée explicitement sur un critère de compacité est facilitée par l'homogénéité de l'état interne des deux types, qui représentent deux variantes plus ou moins tassées d'une même structure.

#### 4. Observations de sections polies

L'observation visuelle de la face de rupture des mottes a été complétée par la description de sections polies obtenues après imprégnation par une résine epoxy. L'imprégnation des mottes sèches a été réalisée sous vide, la résine contenant un traceur fluorescent sous éclairage ultra-violet. La technique a été décrite par Bourlet et Fies (1981). Après tronçonnage et polissage, les sections obtenues ont été photographiées sous illumination par une lampe U.V.. Dans ces conditions, seuls les pores imprégnés par la résine apparaissent éclairés.

## IV. RESULTATS

### A. Caractéristiques morphologiques des populations de mottes étudiées

#### 1. Situation dans les profils culturaux

Les mottes étudiées ont été prélevées dans le sous échantillon de 18 blocs issu des quatre profils culturaux décrits dans deux parcelles de chaque site.

Deux exemples de descriptions ainsi obtenues sont présentés à la figure 1-4. On peut constater :

- l'importance plus grande des mottes  $\Delta$  dans les positions  $L_1$ ,
- l'existence de mottes  $\Delta$  de plus faible calibre dans les positions  $L_3$ , avec une répartition assez homogène dans le sens latéral (cas de la parcelle 6, en blé sur maïs) ou au contraire très localisée à un seul côté du profil (cas de la parcelle 13, en monoculture de blé).

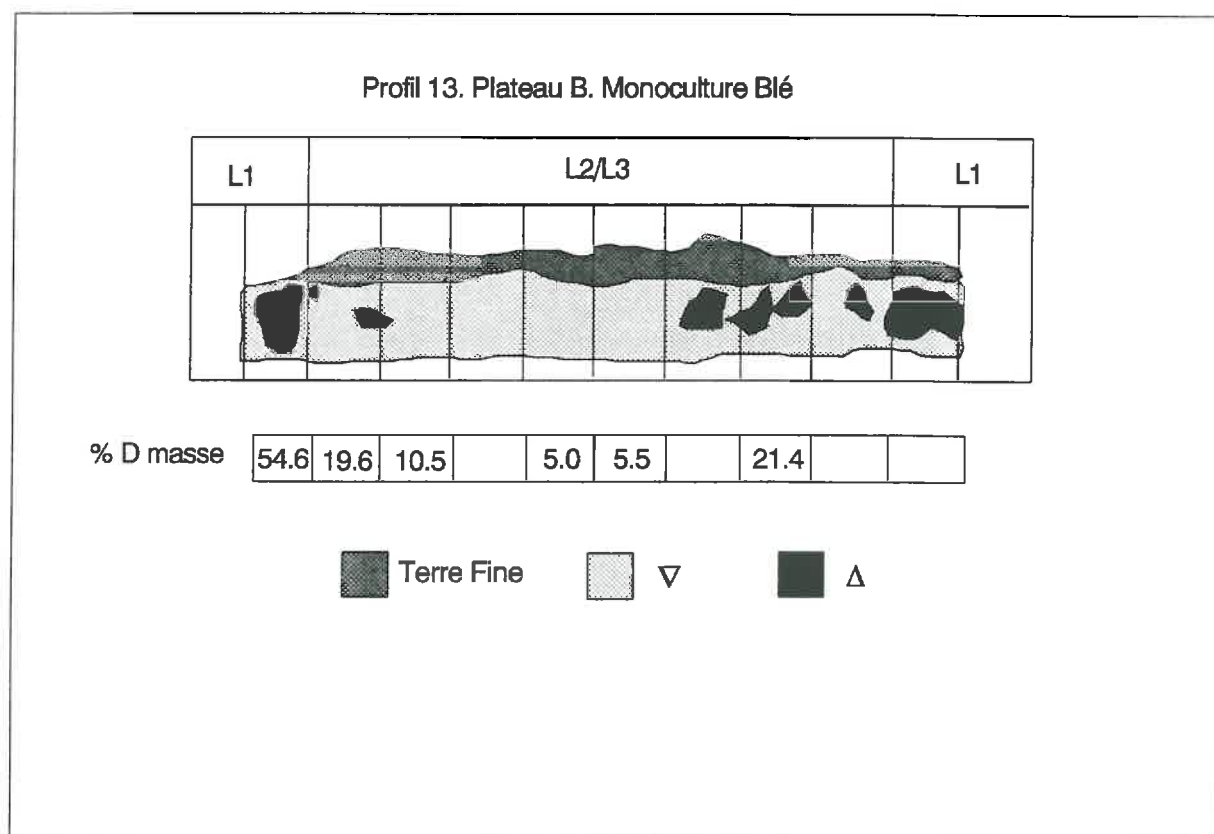
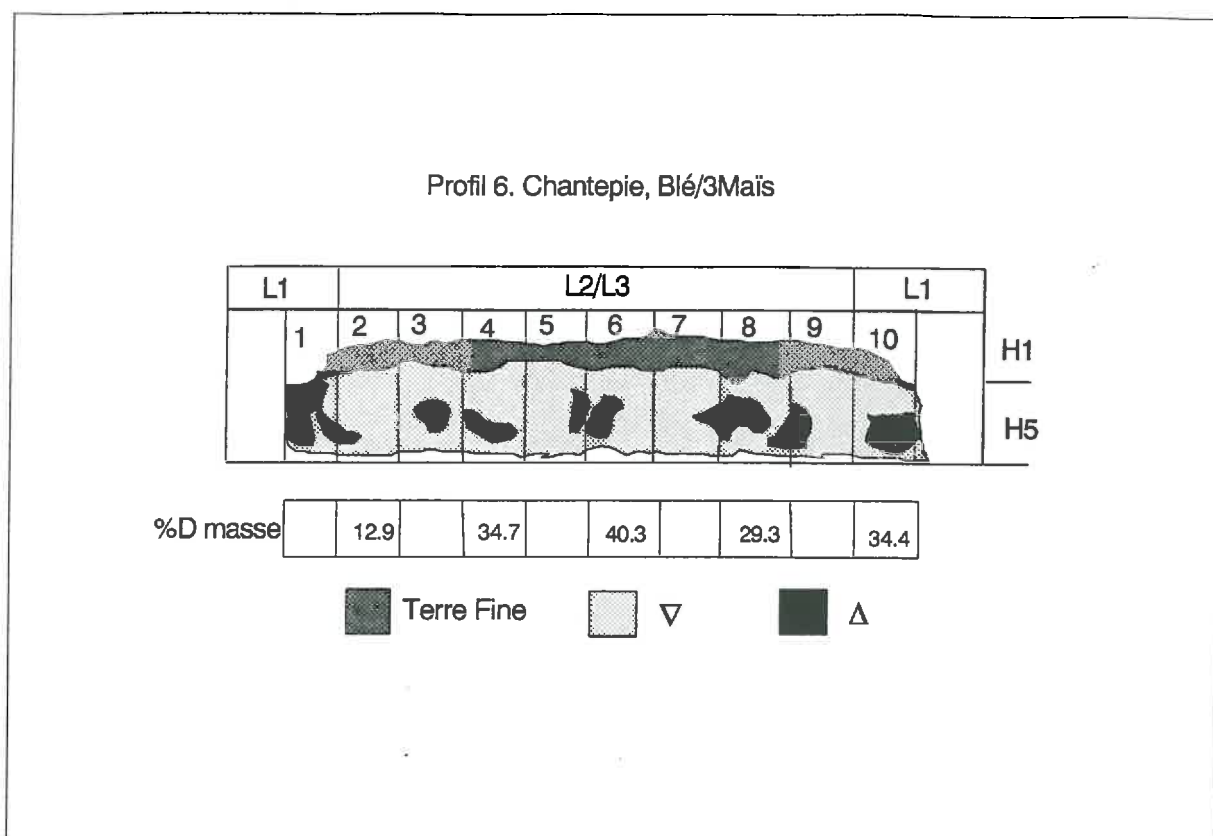


Fig. 1-4. Cartographie des profils 6 (Chantepie) et 13 (Plateau)

Ces faits sont convergents avec les observations réalisées antérieurement dans des parcelles analogues (Manichon, 1988). Ils tendent à confirmer, par ces traits visibles, les éléments de description des itinéraires techniques que nous avons présentés plus haut, en effet l'interprétation suivante à ces différences peut être avancée :

- dans les parcelles en monoculture de blé, les compactages sont réalisés tous les ans aux mêmes endroits ; c'est le basculement latéral par la charrue des volumes tassés qui entraîne l'apparition des mottes  $\Delta$  dans le compartiment  $H_5-L_3$ ,

- il en va de même pour les parcelles ayant porté du maïs, en ce qui concerne les travaux culturaux avant la récolte ; mais celle-ci peut créer, nous l'avons exposé plus haut, des tassements supplémentaires de localisation plus aléatoire, qui entraînent alors la présence de mottes  $\Delta$  dans l'ensemble du compartiment.

Pour chaque profil, l'un des blocs choisis provient d'une position  $L_1$ . Dans ce cas, on peut admettre que l'état interne résulte d'un roulage postérieur aux opérations de travail du sol. Les autres zones  $\Delta$  au contraire sont plus vraisemblablement héritées d'un état antérieur au labour.

On peut affirmer finalement que la population de mottes  $\Delta$  étudiée comporte en proportion non évaluables :

- des mottes produites par des roulages postérieurs aux travaux d'implantation du blé,
- des mottes héritées de compactages antérieurs.

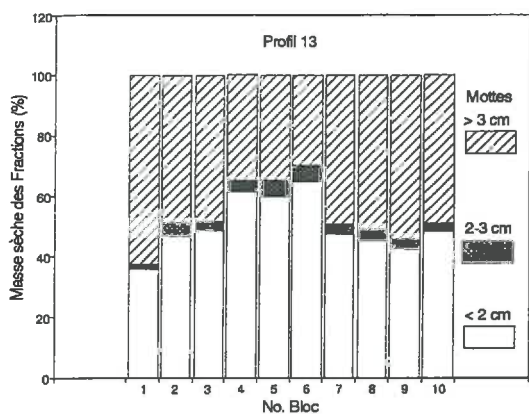
Ceci constitue la seule indication sur la date d'acquisition de l'état  $\Delta$  dans les volumes observés.

## 2. Représentativité par rapport à l'horizon $H_5$

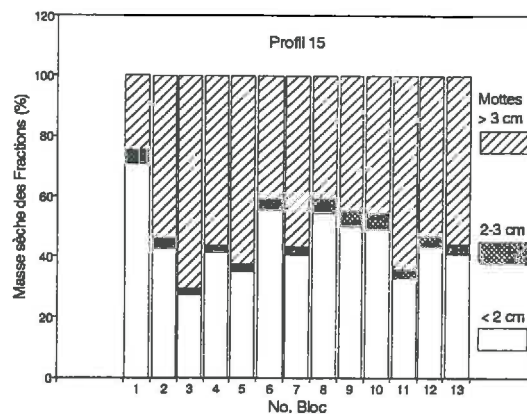
Les mottes extraites des différents blocs suivant la procédure décrite précédemment représentent des proportions variables du volume total des blocs. En fait, nous n'avons pas calculé cette proportion volumique puisque nous ne disposons pas des différentes mesures nécessaires : masse volumique des blocs et des différentes fractions séparées. Nous nous sommes limités à la mesure de la fraction massique. Les valeurs obtenues sur les différents blocs étudiés sont présentées figure 1-5.



## Plateau

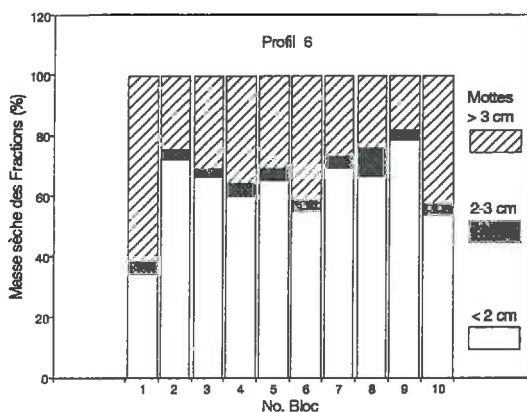


a- Profil 13 (Plateau, blé)

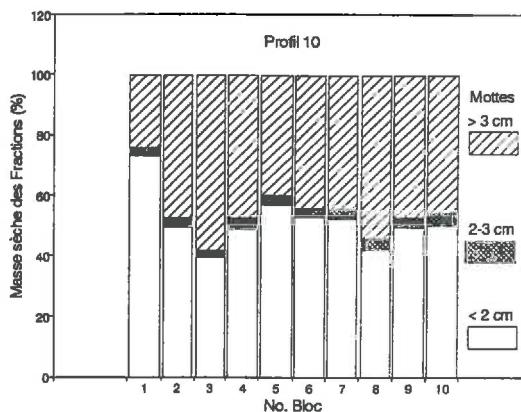


b- Profil 15 (Plateau, maïs)

## Chantepie



c- Profil 6 (Chantepie, blé/3 maïs)



d- (Chantepie, maïs)

Fig. 1-5. Teneur massique des fractions dimensionnelles d'éléments structuraux.

On constate en premier lieu que les mottes de calibre supérieur à 3 cm représentent une fraction variable, mais dans la plupart des cas inférieure à 50 % de la masse totale des blocs. Si l'état interne de ces mottes est une caractéristique de l'état structural de la couche étudiée, son importance en termes de conséquences globales sur les propriétés physiques est évidemment à pondérer en tenant compte de cette teneur et de sa variabilité.

Par ailleurs, les fragments de taille comprise entre 2 et 3 cm représentent une fraction généralement faible (< 5 %) de la masse totale. Le choix du seuil arbitraire de 3 cm retenu pour trier les mottes étudiées n'est donc pas un facteur auquel la distribution en fréquence des

caractéristiques des mottes peut être très sensible, au moins lorsqu'elle est exprimée en masse ou en volume.

Cette remarque ne s'applique pas aux distributions en nombre de mottes, évidemment beaucoup plus élevés pour une même masse quand la taille des fragments décroît.

### 3. Fréquence des différents états internes

#### a) Mottes des parcelles

Les fréquences en nombre absolues et relatives des différents états internes des mottes rencontrées dans les deux sites de prélèvement sont présentées au tableau 1-5. Dans ce cas les fréquences en nombre diffèrent peu des teneurs volumiques, les volumes moyens des mottes étant indépendant de leur état interne.

Tableau 1-5 Fréquences numériques des différents états internes dans les populations étudiées.

		$\Delta$	Z	Y	X	$\Gamma_C$	$\Gamma$	TOTAL
Plateau	Nombre	322	134	81	21	56	85	699
	%	46.1	19.2	11.6	6.1	8.0	12.2	-
Chantepie	Nombre	421	107	81	40	2	6	657
	%	64.1	16.3	12.3	6.1	0.3	0.9	-

On note l'importance relative pour les deux sites des états  $\Delta$  et Z pour lesquels les effectifs autorisent l'analyse statistique des caractéristiques des populations étudiées. En revanche, d'autres états,  $\Gamma_C$ , X sont faiblement représentés. Il ne sera légitime d'étudier leur variabilité interne qu'au prix d'un regroupement des individus provenant des deux sites et/ou de différentes classes d'état interne.

#### b) Mottes des allées

Les mottes extraites des allées ont été utilisées pour l'étude des relations entre état interne et propriétés mécaniques (cf. Chapitre 3). Le test mécanique permettant la mesure de leur résistance à la rupture implique d'imposer une forme sphérique à l'échantillon soumis à



l'application d'une charge. Ces mottes ont donc été arrondies par limage de leur périphérie. L'état interne a ensuite été classé par observation des faces de rupture après réalisation du test.

Ce protocole de préparation a donc comporté l'élimination d'une partie du volume initial des mottes qui ne sont plus de ce fait strictement assimilable aux mottes naturelles. Si l'on accepte malgré ce biais possible de comparer la fréquence des différents types sous les allées et dans les parcelles on constate (tableau 1-6) qu'elle diffère peu. En regroupant pour traiter des effectifs suffisants :

- les états à structure continue prédominante  $\Delta$  et Z
- les états à structure agrégée discernable Y, X,  $\Gamma_c$  et  $\Gamma$

l'importance relative de chacun de ces grands types est très voisine dans les deux situations.

Tableau 1-6 Fréquence relative (% numérique) des différents types d'état dans les populations étudiées : comparaisons parcelles-allées.

Etat interne	$\Delta$	Z	Y	X	$\Gamma_c$	$\Gamma$
Parcelles	54.8	17.8	12.0	4.5	4.3	6.7
	72.6		27.5			
Allées	58.1	10.7	15.6	6.3	7.8	2.9
	68.8		32.6			

On ne peut en tirer aucune conclusion sur la distribution des états internes dans les différentes surfaces de prélèvement, zone roulée des allées et parcelles, la représentativité des blocs étudiés n'étant pas vérifiée. En revanche, cette similitude globale :

- apporte un argument en faveur de la possibilité d'extension de la méthode à des couches de sol dont l'état structural résulte de processus très différents,

- permet d'aborder la question de la stabilité de caractéristiques d'un type morphologique donné, pour des mottes formées dans des conditions contrastées.

## B. Relations entre état interne et masse volumique des mottes

### 1. Distribution des masses volumiques

La distribution des masses volumiques pour les deux sites de prélèvement (Fig.1-6) montre dans les deux cas la variabilité très élevée qui existe dans les couches travaillées. Les valeurs extrêmes sont de 1.22 et 1.88  $\text{g.cm}^{-3}$  pour les parcelles Plateau, 1.44 et 1.96  $\text{g.cm}^{-3}$  pour les parcelles Chantepie. Un tel intervalle de variation et des écarts types voisins (Tab.1-7) ont déjà été mis en évidence par Campbell (1973). Ils sont nécessairement des indicateurs d'organisations structurales très diversifiées et motivent la recherche des relations entre ces organisations et la compacité.

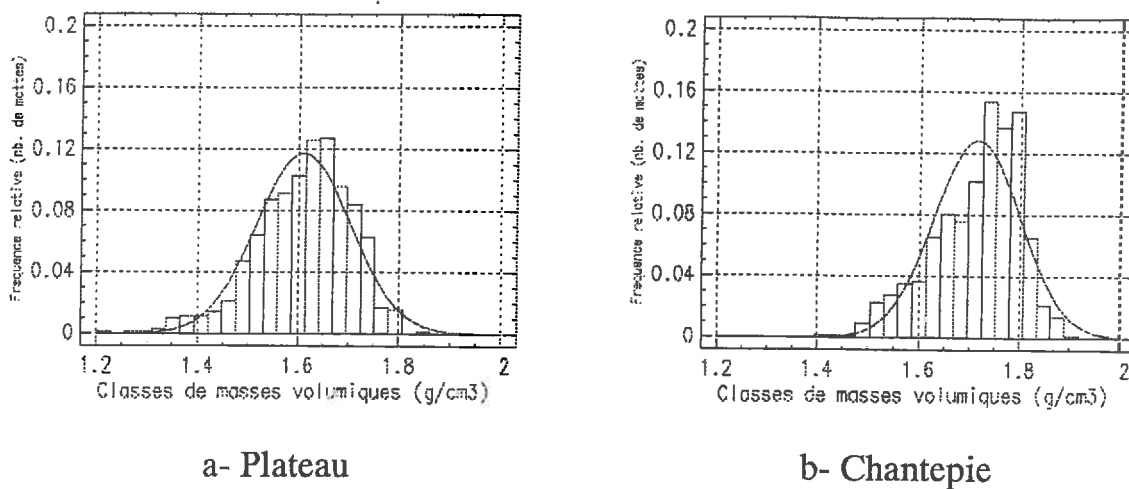


Fig. 1-7. Fréquence relative de mottes par classe de masse volumique (tous types morphologiques confondus). Mottes extraites des parcelles (Plateau, profils 13 et 15 ; Chantepie, profils 6 et 10).

Tableau 1-7 Caractéristiques de distribution des masses volumiques des mottes

	PARCELLES		ALLEES		
	Plateau	Chantepie	Campbell (1973)	Plateau	Chantepie
Moyenne	1.610	1.714	-	1.864	1.846
Ecart-type	0.094	0.086	0.096	0.067	0.073

Dans les deux cas, l'allure des distributions suggère l'existence de deux modes et la nécessité de rechercher les moyens de distinguer des sous populations dans cet ensemble hétérogène. L'écart type, significativement plus élevé pour la parcelle Plateau, semble dû essentiellement à la fréquence supérieure de masse volumique très faible par rapport à la moyenne, qu'on peut rapprocher de la fréquence plus grande des mottes  $\Gamma$ . Enfin, la différence significative (sous hypothèses de normalité) des valeurs moyennes entre sites, le décalage apparent des valeurs "modales" et des valeurs maximales, ne peuvent être interprétés sans référence à des valeurs de masse volumique texturale. Les mottes de Chantepie sont statistiquement plus denses que celle de Plateau, mais on ne peut globalement en inférer des différences dans leur organisation macroscopique sans tenir compte des écarts à une échelle plus fine.

Les mottes des allées apparaissent sensiblement plus denses et la dispersion des masses volumiques est plus faible, alors que la fréquence des différents états internes était voisine de celle rencontrée dans les parcelles. Le commentaire précédent s'applique au décalage des valeurs moyennes. La diminution de la dispersion laisse supposer une plus grande homogénéité de chacun des états internes.

## 2. Relations avec l'état interne

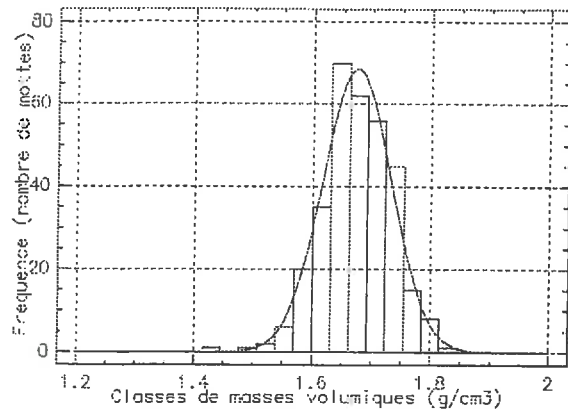
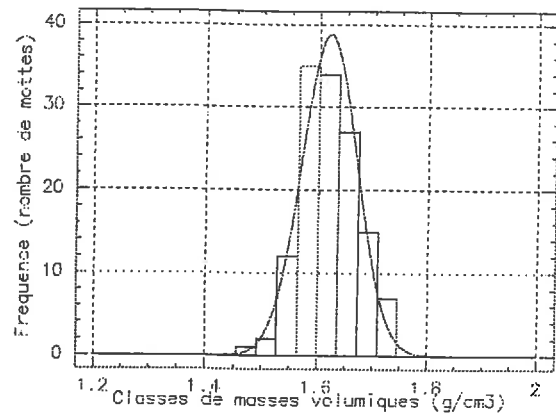
### a) Mottes des parcelles

Au sein de cette distribution le tri morphologique appliqué aux deux populations de mottes (Fig.1-7 et 1-8) permet de différencier des sous-populations dont la variabilité des masses volumiques est réduite et la valeur moyenne apparaît hiérarchisée en fonction de l'état interne. Ces sous-populations ne sont pas disjointes : la mesure de masse volumique d'une motte ne permet pas de déterminer son appartenance à un type morphologique et réciproquement.

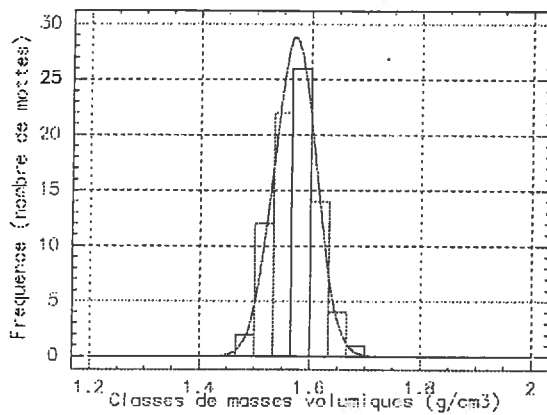
En revanche, le classement des valeurs moyennes de masse volumique de chaque type est conforme aux hypothèses que l'on peut formuler sur les variations de porosité associées aux définitions morphologiques. Elles seront discutées plus loin. Pour les deux populations, on vérifie l'ordre décroissant  $\Delta$ , Z, Y, X,  $\Gamma_c$ ,  $\Gamma$ .

Pour les mottes de Chantepie, l'écart-type des masses volumiques (Tab.1-8) est peu et non significativement variable entre les classes. Dans ce cas, le tri morphologique aboutit à distinguer des sous populations presque équidistantes en masse volumique moyenne et de variance très voisine. Bien que non fondée directement sur l'appréciation d'une porosité visible, la classification morphologique est alors assimilable à un classement des masses volumiques.

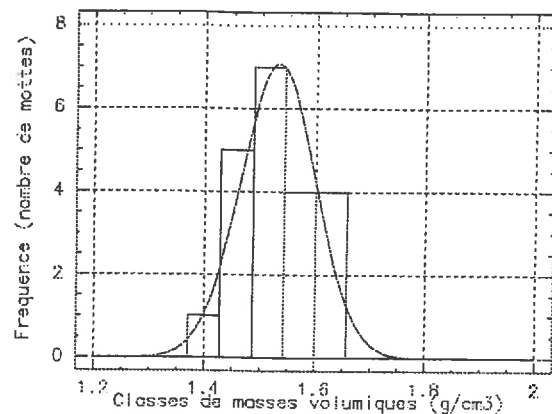
## Plateau. Masse volumique

a-  $\Delta$ 

b- Z



c- Y



d- X

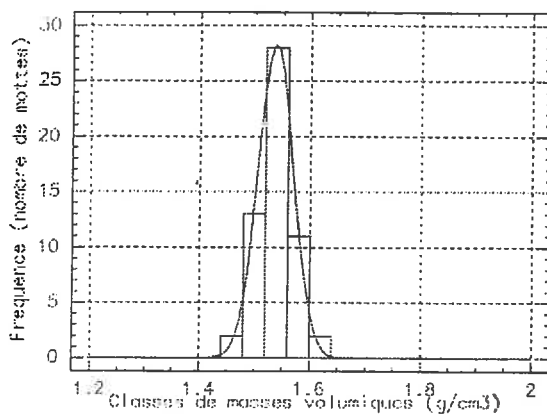
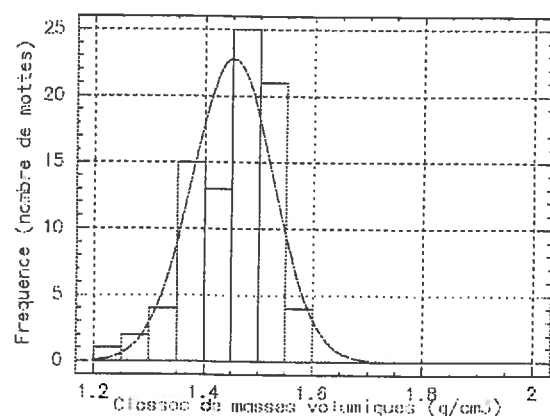
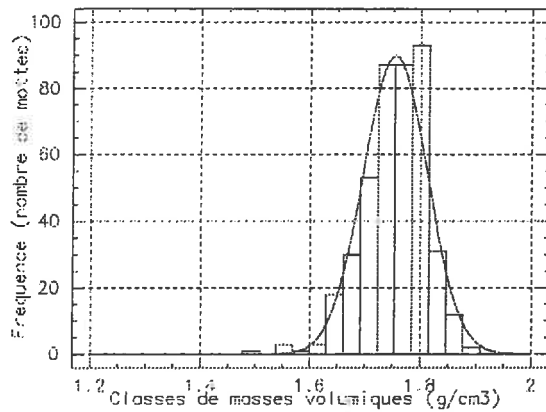
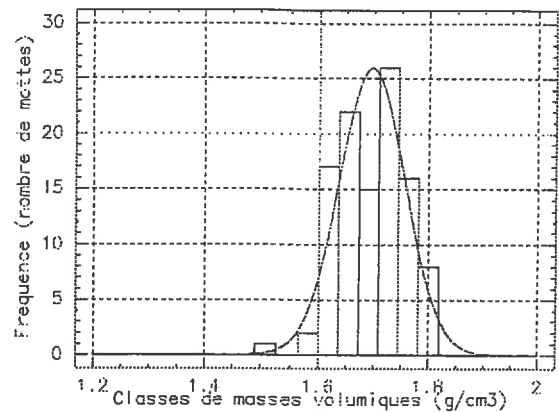
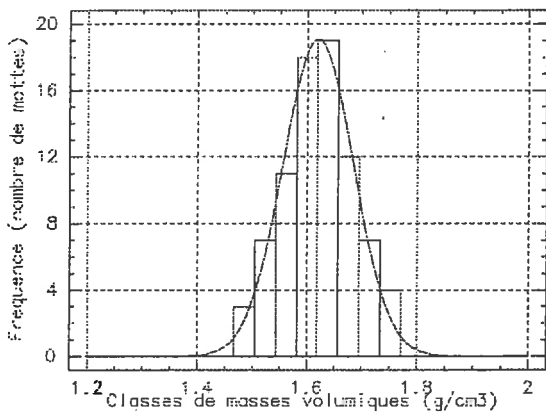
e-  $\Gamma_c$ f-  $\Gamma$ 

Fig. 1-7. Fréquence (nombre de mottes) pour chaque classe de masse volumique des mottes extraites des parcelles de Plateau.

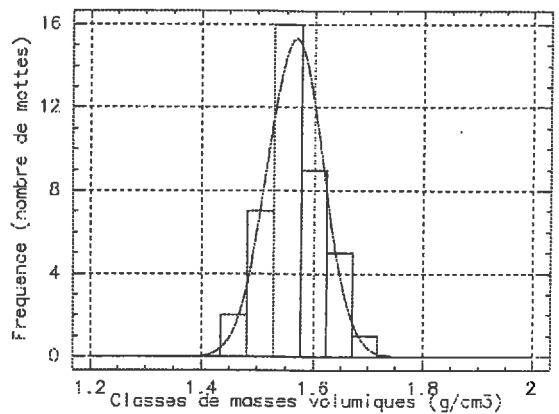
## Chantepie. Masses volumique

a- $\Delta$ 

b-Z



c-Y



d-X

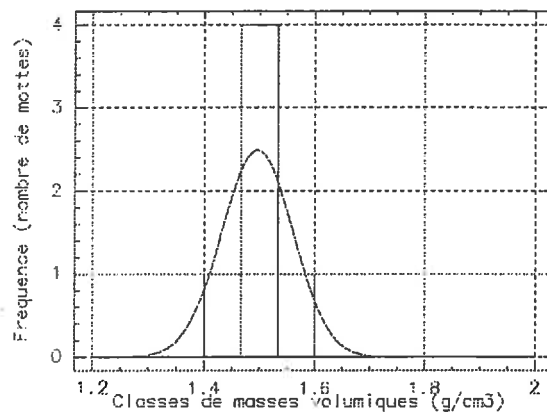
e- $\Gamma$ 

Fig. 1-8. Fréquence (nombre de mottes) pour chaque classe de masse volumique des mottes extraites des parcelles de Chantepie.

Tableau 1-8 Caractéristiques des distributions de masses volumiques des différentes classes morphologiques - Mottes des parcelles.

		$\Delta$	Z	Y	X	$\Gamma_c$	$\Gamma$
Plateau	Moyenne	1.674	1.620	1.572	1.531	1.538	1.452
	Ecart type	0.058	0.050	0.037	0.068	0.032	0.074
Chantepie	Moyenne	1.754	1.697	1.620	1.567	---	1.496
	Ecart type	0.057	0.060	0.064	0.049	---	0.064

Dans le cas des parcelles Plateau, la quasi équidistance des moyennes reste vérifiée, à l'exception des classes X et  $\Gamma_c$  sur lesquelles nous reviendrons. En revanche, l'homogénéité des variances entre classes ne l'est plus. Les classes  $\Gamma_c$  et  $\Gamma$  se singularisent de ce point de vue. Définies par l'homogénéité dimensionnelle des agrégats qui les constituent, elles diffèrent par le niveau de porosité visible, ou le caractère plus ou moins compact de l'arrangement de ces agrégats. La classe  $\Gamma_c$  est nécessairement bornée vers les masses volumiques élevées : lorsque cet arrangement devient suffisamment compact, les agrégats deviennent indiscernables. Deux seuils de masse volumique doivent donc limiter sa dispersion, ce qui peut expliquer un écart type réduit. Sa localisation par rapport à la masse volumique moyenne de l'état X n'est pas prévisible à partir de la définition de ce dernier qui ne comporte pas de critère comparatif de niveau de porosité par rapport à  $\Gamma_c$ . Quant à la classe d'état  $\Gamma$ , elle rassemble toutes les mottes formées d'agrégats fins dont l'assemblage est plus poreux que  $\Gamma_c$ . Elle est donc non bornée dans le domaine des densités les plus faibles et doit de ce fait présenter une dispersion supérieure à celle de  $\Gamma_c$ .

#### b) Cas particulier de l'état $\Delta$ .

Pour les deux ensembles de parcelles, l'état  $\Delta$  présente un écart type qui n'est pas inférieur à celui des autres classes morphologiques. Or cet état est celui dont la définition paraît a priori être la plus étroitement associée à un niveau de porosité. D'apparence continue sur la totalité de la section observée, il ne peut comporter qu'une abondance réduite de pores visibles, ce qui implique une masse volumique élevée, mais également peu variable. En effet,

les données obtenues par analyse des systèmes de porosité sur des textures limono argileuses (Stengel, 1986) ont montré que la porosité non visible est très majoritairement texturale, et qu'elle est également peu variable à une humidité donnée.

Les résultats semblent infirmer cette hypothèse. Ceci peut être expliqué par l'hétérogénéité des mottes et le caractère plus ou moins représentatif des faces observées ainsi que l'application plus ou moins stricte par l'observateur du seuil séparant les états  $\Delta$  et  $Z$ . Mais on peut également invoquer la persistance dans les mottes d'un volume de pores non visibles à l'oeil et non texturaux, microfissures entre agrégats très fins notamment. Dans les matériaux de cette texture, les pores texturaux ont des dimensions de l'ordre du  $\mu\text{m}$ , évidemment très inférieures au seuil de détection visuel (Fies, 1984).

### c) Comparaison avec les mottes des allées

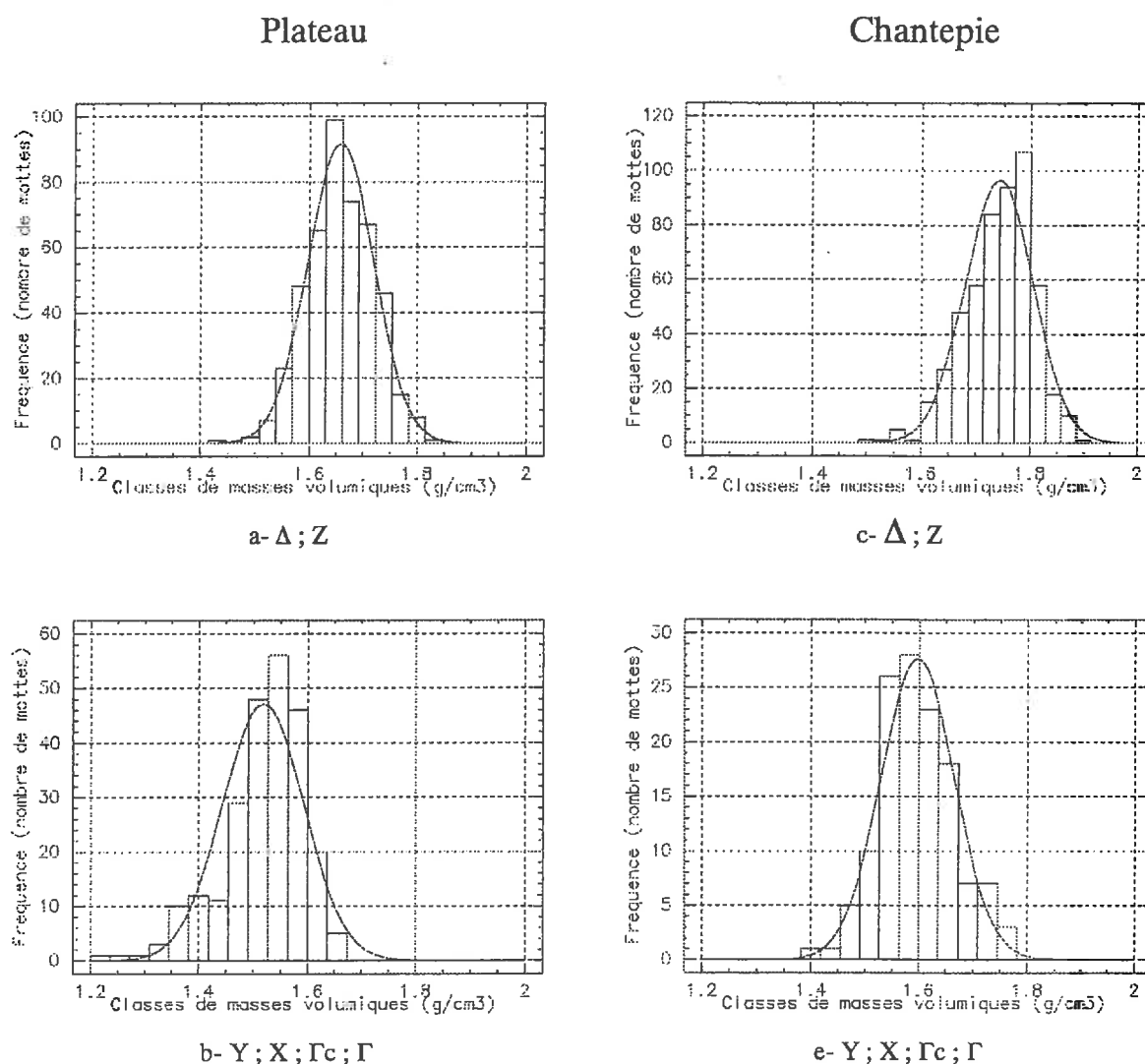


Fig. 1-9. Fréquence (en nombre de mottes) des classes de masses volumiques pour chaque regroupement des types morphologiques. Parcelles.

Cette comparaison ne peut s'effectuer qu'en regroupant comme précédemment les données concernant différents types morphologiques. Les distributions correspondantes pour les mottes des parcelles (Fig.1-9) montrent la différenciation statistique des deux sous populations qui a déjà été observée et de façon plus marquée par Manichon et Roger-Estrade (1989).

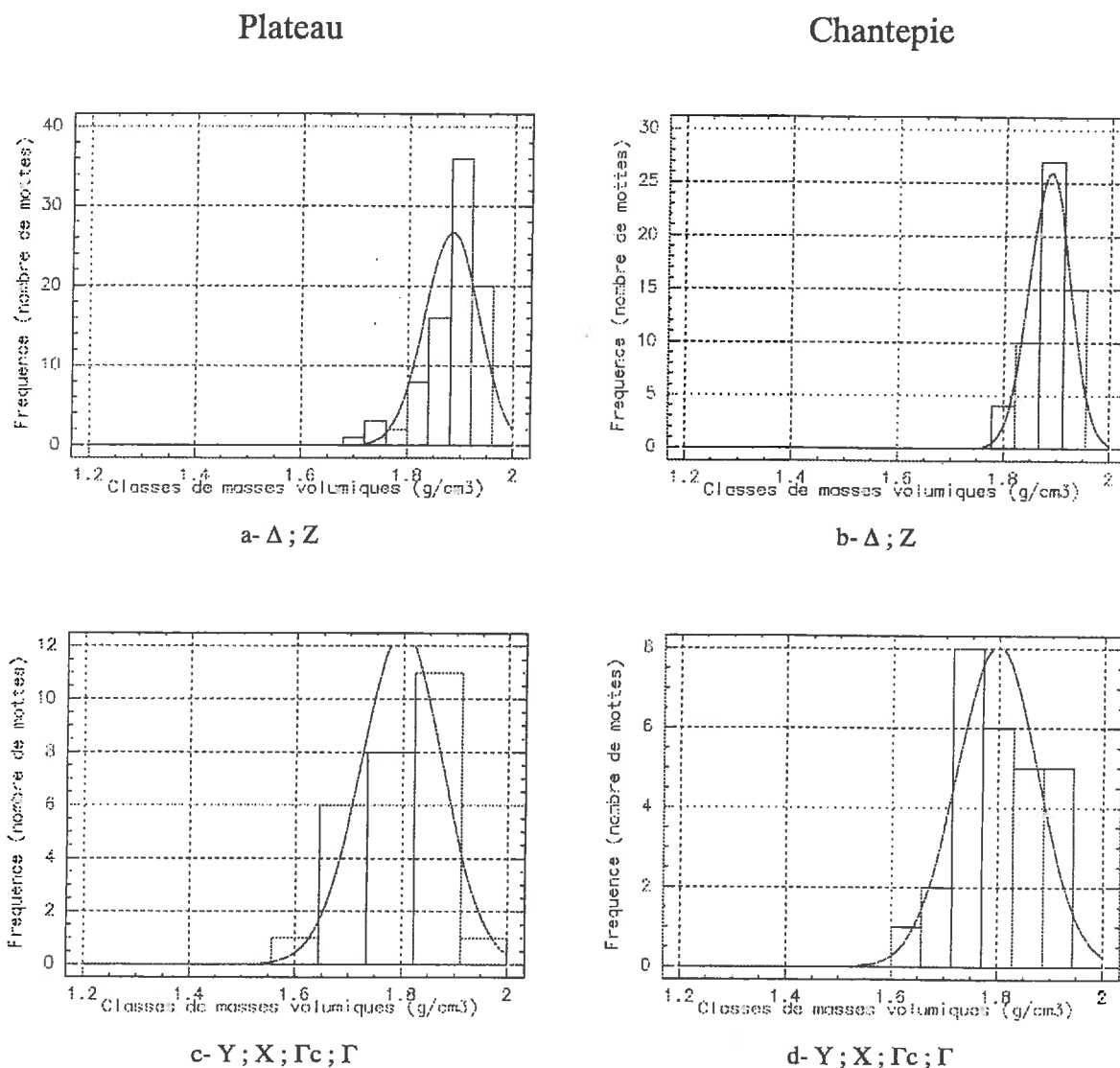


Fig. 1-10. Fréquence (en nombre de mottes) des classes de masses volumiques pour chaque regroupement de types morphologiques. Allées.

Pour les mottes des allées (Fig.1-10), les écarts entre valeurs moyennes correspondant aux types morphologiques regroupés sont peu différents de ceux qu'on enregistre dans les parcelles. En revanche, les valeurs moyennes de masses volumiques des



allées sont de façon hautement significatives supérieures à celles des parcelles, alors que les dispersions sont nettement plus réduites.

Ce dernier résultat peut être interprété comme une conséquence de l'instabilité des critères de définition des classes morphologiques lorsqu'ils sont appliqués à des populations d'état interne moyens différents. On peut supposer que l'observateur adapte les seuils discriminant les classes, par exemple entre ce qu'il juge continu ou discontinu, en fonction de l'état moyen et des contrastes rencontrés dans une population donnée. L'état  $\Delta$  aurait ainsi un contenu plus relatif qu'absolu et caractériserait les mottes les plus compactes rencontrés dans un horizon particulier. Dans ce cas, les mottes de l'allée auraient pu être classées différemment si elles avaient été mêlées aux prélèvements de la parcelles. Cette hypothèse ne serait réfutable que par comparaison avec des données morphométriques strictement objectives. Le caractère purement relatif de la définition des classes n'apparaît pas corroboré par la persistance de l'écart des masses volumiques entre classes, qui est peu différent pour les mottes des allées et celles des parcelles.

Tableau 1-9 Caractéristiques des distributions de masses volumiques des différentes classes morphologiques - Mottes des allées.

		$\Delta$	Z	Y	X	$\Gamma_c$	$\Gamma$
Plateau	Moyenne	1.894	1.840	1.809	1.720	1.861	1.781
	Ecart type	0.042	0.055	-	-	-	-
Chantepie	Moyenne	1.891	1.865	1.803	1.740	1.874	1.735
	Ecart type	0.033	-	0.041	-	-	-

Bien que la faiblesse des effectifs impose une grande prudence, la stabilité des variations de  $\rho_d$  entre classes (Tab.1-9) semble en effet vérifiée, à l'exception de la classe  $\Gamma_c$  dont nous avons déjà souligné la particularité.

A l'exception de ce cas, les différences entre classes seraient donc peu dépendantes de la densité moyenne de chaque classe et de sa dispersion. Elles pourraient donc être la manifestation de différences constantes entre les organisations structurales des classes à une

échelle particulière. Les variations de l'organisation à une autre échelle expliqueraient alors la variation de masse volumique moyenne de chacune des classes dans les populations de mottes provenant des allées ou des parcelles. Cette hypothèse sera discutée à partir des données de l'analyse des systèmes de porosité.

### 3. Discussion

Ces premiers résultats montrent que l'application de la classification morphologique permet d'établir un classement par masse volumique d'une population de mottes d'un horizon cultivé.

Ce classement aboutit dans les deux cas présentés à séparer des sous populations dont les masses volumiques moyennes sont ordonnées en fonction de la dimension des plus gros éléments structuraux de type  $\Delta$  visibles sur les faces de rupture des mottes. Les relations entre la masse volumique et ce critère morphologique peut alors s'expliquer par les deux effets suivants, qui sont nécessairement corrélés :

- d'une part, la taille de ces éléments structuraux est liée à la fraction des mottes occupée par des volumes dépourvus de porosité visible et donc les plus denses,
- d'autre part, l'étalement dimensionnel des éléments structuraux constituant les mottes est un facteur d'arrangement plus compact de ces éléments, suivant les lois d'arrangement des particules rigides (Fies, 1978).

Le premier de ces effets serait le facteur prépondérant des variations de masse volumique des classes  $\Delta$ , Z, Y et X, qui peuvent s'interpréter comme une variation de teneur en éléments  $\Delta$  entre les différents types. Le second expliquerait la différence entre les états X et  $\Gamma$ .

La modification apportée à la classification de Manichon apparaît donc pertinente pour en améliorer la capacité de discrimination. Cette modification consiste à remplacer l'appréciation directe d'une abondance de pores ou de l'indicateur indirect que constitue la rugosité, par une évaluation de l'abondance des éléments structuraux  $\Delta$  constituant la motte. L'hétérogénéité interne de la motte est ainsi prise en compte.

Ceci permet de surmonter la difficulté importante que rencontre un observateur à classer les porosités de volumes présentant des structures différentes, en particulier lorsque ces différences portent sur les dimensions des éléments structuraux et leur étalement.

A l'intérieur d'une des classes, l'homogénéité accrue de l'organisation structurale permet de comparer plus efficacement l'abondance des pores visibles, comme le montre la distribution de  $\rho_d$  des populations  $\Gamma_c$  et  $\Gamma$ . Cependant, il n'est pas certain que ce résultat puisse être étendu aux structures plus hétérogènes que  $\Gamma$ , telles que Y ou X.

Finalement, le principe de classement retenu revient à systématiser l'utilisation du concept d'état  $\Delta$  en considérant deux niveaux d'organisation : celui de la motte et celui des éléments structuraux qui la constituent. C'est à ce dernier niveau que s'effectue la partition entre état  $\Delta$  et  $\nabla$ .

La validité de la méthode et l'interprétation de ces résultats reposent ainsi fondamentalement sur la définition de l'état  $\Delta$ , la connaissance de ses caractéristiques d'organisation et de leur stabilité.

Ceci confère une importance accrue à la question de la relation entre état  $\Delta$  et organisation texturale. On voit, en effet, apparaître un parallélisme étroit entre les modèles d'organisation structurale des couches travaillées qui sous tendent la classification morphologique et l'analyse des systèmes de porosité. En simplifiant, on suppose dans cette dernière qu'à une échelle suffisamment fine, l'organisation de tous les éléments structuraux est déterminée par leur texture : leur porosité est la porosité texturale. La structure résulte de l'assemblage suivant des modalités variées d'éléments structuraux de taille variée, présentant cette organisation. La classification morphologique définit les différents états internes comme des assemblages d'éléments structuraux de type  $\Delta$ , associées à une fraction fine, dans laquelle l'oeil ne peut plus distinguer les éléments structuraux. Cette limite d'échelle est la principale différence entre les deux modèles. Elle disparaît si l'on fait l'hypothèse que la fraction fine est elle même un assemblage de micro volumes de type  $\Delta$ . La comparaison entre les résultats des deux méthodes s'impose donc pour évaluer leur cohérence relative.

### **C. Relations entre morphologie structurale et analyse des systèmes de porosité.**

#### **1. Variations de la masse volumique texturale**

Pour pouvoir appliquer l'analyse des systèmes de porosité aux différentes populations de mottes, il était préalablement nécessaire d'étudier les relations éventuelles entre morphologie structurale et masse volumique texturale. En effet, on peut supposer que des intensités de compactage différentes, déterminant l'état interne des mottes, provoquent également une modification de l'assemblage textural. Des travaux antérieurs (Fies et Zimmer, 1982) conduits sur des matériaux de même texture ont montré que les modifications de porosité texturale provoquées par l'application des pressions allant jusqu'à 0.8 MPa sont très limitées. Cependant, Papy (1984) a mis en évidence des écarts de masse volumique significatifs entre agrégats extraits de mottes  $\Delta$  et agrégats extraits de mottes  $\Gamma$ . Fies (1990) en étudiant par porosimétrie à mercure la distribution dimensionnelle des pores dans ces mêmes agrégats a montré qu'on pouvait interpréter ces variations de porosité comme résultant de la persistance dans des agrégats de morphologie  $\Gamma$ , d'un volume de pores structuraux.

L'assemblage textural ne serait donc pas différent, mais la technique d'estimation de la masse volumique texturale par mesure sur des agrégats tamisés entre 2 et 3 mm serait biaisée pour les agrégats  $\Gamma$ , leur porosité n'étant pas exclusivement texturale. Cette interprétation conduit à adopter la masse volumique d'agrégats issus des mottes  $\Delta$  comme masse volumique texturale, indépendamment de la morphologie des mottes.

Nous avons comparé les masses volumiques d'agrégats extraits de mottes  $\Delta$  d'une part, d'un échantillon de mottes des autres types (à l'exclusion de Z) d'autre part. Ce travail a été conduit sur les mottes des parcelles Plateau qui, du fait de leur texture moins argileuse, sont a priori les plus susceptibles de subir des modifications de leur arrangement textural (Fies et Stengel, 1981).

Les résultats sont présentés au tableau 1-10. On constate qu'il existe un écart systématique de  $\rho_{dt}$  entre les agrégats extraits des deux populations de mottes, mais que son amplitude est très réduite. Il est en particulier inférieur à l'incertitude sur l'estimation de la masse volumique des mottes (annexe 1) qui, compte tenu de la précision de la méthode de mesure à la paraffine, est de l'ordre de plus ou moins 2 %. Nous avons donc retenu pour tous les états internes la même valeur de masse volumique texturale qui est celle de l'état  $\Delta$ .

On constate en revanche qu'il existe des variations importantes de  $\rho_{dt}$  en fonction du lieu de prélèvement. Celles-ci vont dans le sens d'un accroissement de la masse volumique d'agrégats en fonction de l'intensité ou de la fréquence supposée des compactages associées à l'histoire de chacun des emplacements. Parmi les facteurs de constitution, seules les différences de teneur en Carbone organique (Tab.1-4) paraissent susceptibles de contribuer à expliquer les modifications de  $\rho_{dt}$  les teneurs en argile et la composition du squelette étant très proches (Fies et Stengel, 1981). Les équations de régression fournies par ces auteurs indiquent que les effets des variations de la granulométrie seraient très inférieurs aux différences mesurées de  $\rho_{dt}$ . Quant à la teneur en matières organiques, son influence a été signalée par Stengel (1979) qui propose une équation de régression entre porosité texturale et teneur en carbone libre. Or, pour les échantillons sur lesquels nous avons pratiqué le dosage, les teneurs en Carbone libre sont égales à la précision près (profil 13 : 2,8 %<sub>o</sub> ; allée : 3,0 %<sub>o</sub>).

Sans pouvoir faire la part de l'influence de la teneur en Carbone total, nous enregistrons une variation de la densité d'agrégats suivant les situations culturales qui peut résulter en partie de contraintes mécaniques.

Tableau 1-10 Masses volumiques d'agrégats de 2-3 mm secs extraits des différents types de mottes

Origine des mottes		Type morphologique	
		$\Delta$	Autres Z exclu
	Profil 13	1.773	1.757
PLATEAU	Profil 15	1.871	1.865
	Allée	1.911	1.895
	Profil 6	1.899	-
CHANTEPIE	Profil 10	1.902	
	Allée	1.923	-

## 2. Distribution dimensionnelle des pores texturaux

Les résultats de la porosimétrie par injection de mercure (Fig.1-11) permettent de compléter ces données. Rappelons que suivant le modèle de Fies (1984) la porosité texturale comprend deux compartiments :

- les pores de l'argile : déterminés par l'organisation des particules d'argile, ils présentent à l'état sec des diamètres d'intrusion qui, pour les argiles de matériaux voisins de ceux étudiés ici, sont inférieurs à un seuil d'environ 50 nm.

- les pores lacunaires : résultant de l'interaction argile-squelette et possédant des diamètres d'intrusion plus proches des dimensions des particules les plus fines de ce squelette.

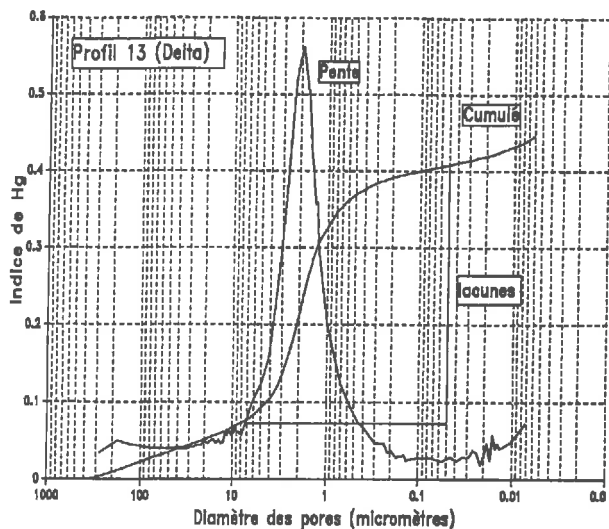
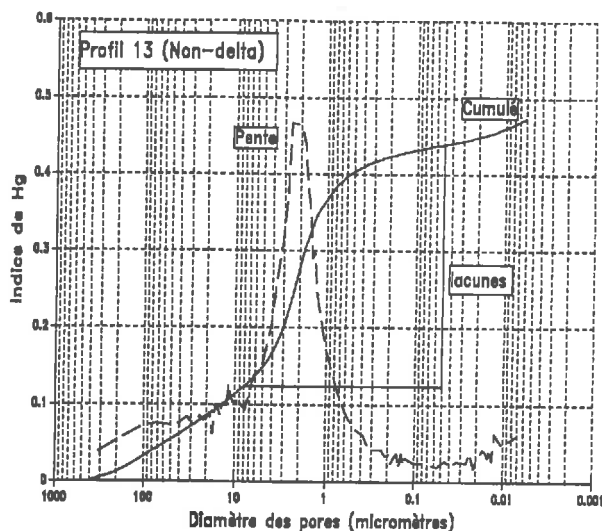
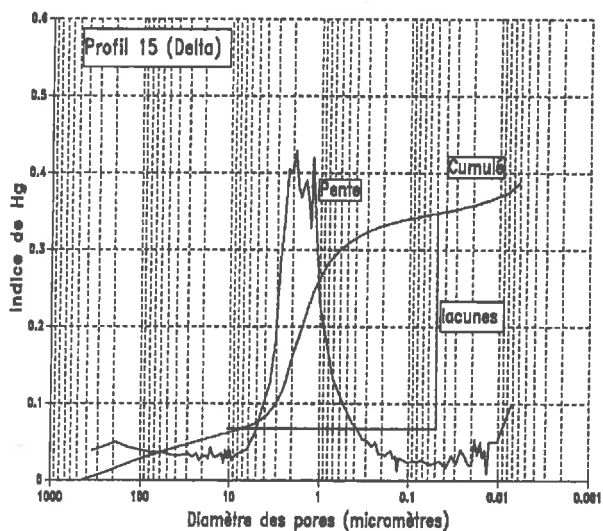
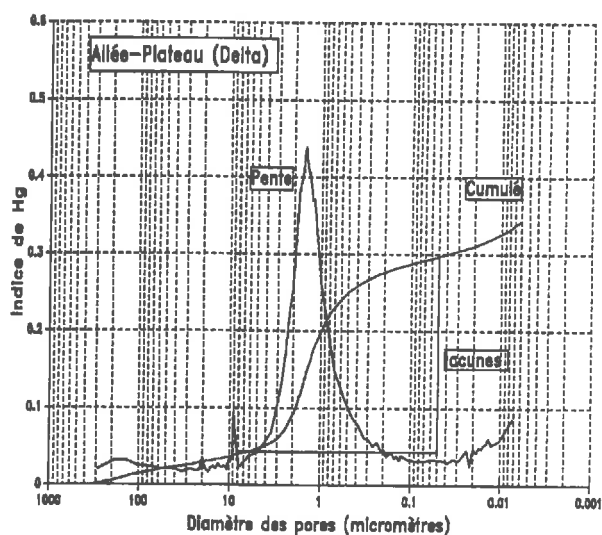
a- Profil 13 (de : mottes  $\Delta$ )b- Profil 13 (de : mottes  $\nabla$ )c- Profil 15 (de : mottes  $\Delta$ )d- Allée-Plateau (de : mottes  $\Delta$ )

Fig. 1-11. Porosimétrie à Hg de différents agrégats de Plateau

On retrouve effectivement l'existence de ces deux compartiments sur chacune des courbes porosimétriques de la figure 1-11. L'intrusion dans les pores lacunaires est marquée par le pic de la courbe représentant l'incrément du volume intrudé rapporté à l'incrément de pression correspondant. L'intrusion de mercure dans les pores de l'argile se manifeste par la remontée de cette même courbe pour les diamètres d'intrusion très petits, entre 0.1 et 0.01 nm.

Tableau 1-11 Estimation des volumes de pores lacunaires à partir des données de porosimétrie à mercure

Echantillon	Plateau 13 ▽	Plateau 13 △	Plateau 15 △	Plateau Allée △
Volume des lacunes (rapporté au volume de solide)	0.34	0.36	0.28	0.28

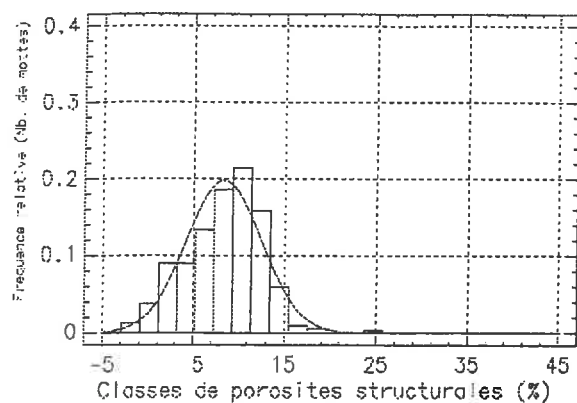
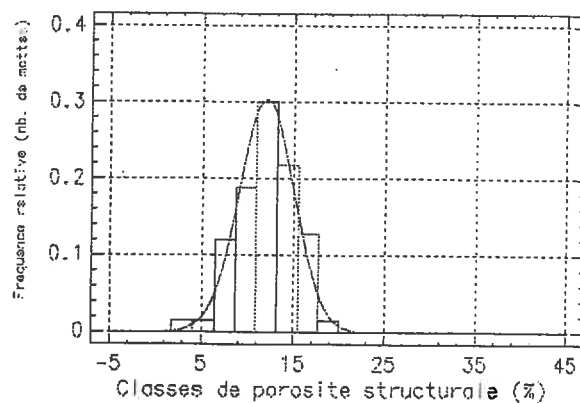
Une modification de l'arrangement textural affectant le volume des pores texturaux devrait se traduire sur ces courbes par la diminution du volume correspondant au pic d'entrée dans les pores lacunaires. Le tableau 1-11 montre que, conformément aux données densimétriques, cette diminution n'existe pas entre les agrégats issus de mottes  $\Delta$  et  $\nabla$ . Il semble en revanche exister un volume réduit de pores de grande dimension (entre 10  $\mu\text{m}$  et 100  $\mu\text{m}$ ) dans les agrégats extraits de mottes  $\nabla$ , ce qui serait conforme à l'hypothèse de Fies déjà citée. La comparaison entre les différents sites de prélèvement confirme les résultats des mesures de masses volumiques. Les agrégats de l'allée et du profil 15 ont une porosité lacunaire moindre que ceux du profil 13. On peut donc bien affirmer que les porosités texturales sont différentes, sans préciser davantage l'origine de ces variations.

### 3. Relations entre classification morphologique et porosité structurale

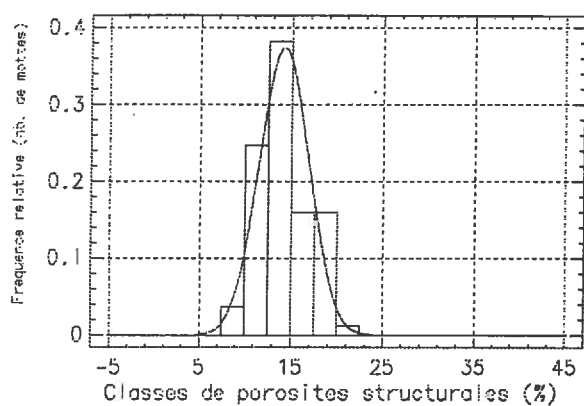
A partir des données de masse volumique texturale de chaque site, considérée comme indépendante de l'état interne des mottes, la porosité structurale de chaque motte a été calculée.

#### a) Distribution des porosités structurales par classe morphologique : mottes des parcelles

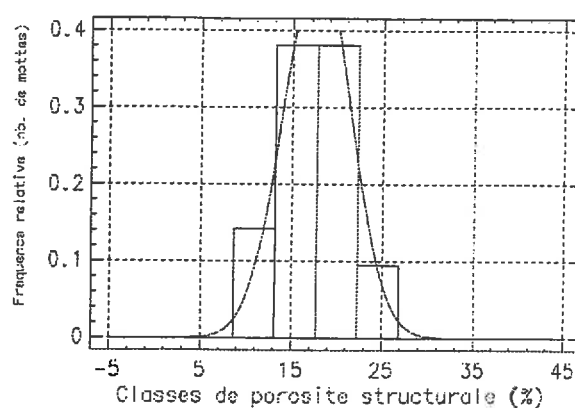
Les résultats des figures 1-12 et 1-13, résumés au tableau 1-12 confirment rigoureusement, en la précisant, l'interprétation des données de masse volumiques. La classification morphologique permet d'établir un tri des mottes par niveau de compacité et plus exactement par niveau de porosité structurale.

a-  $\Delta$ 

b- Z



c- Y



d- X

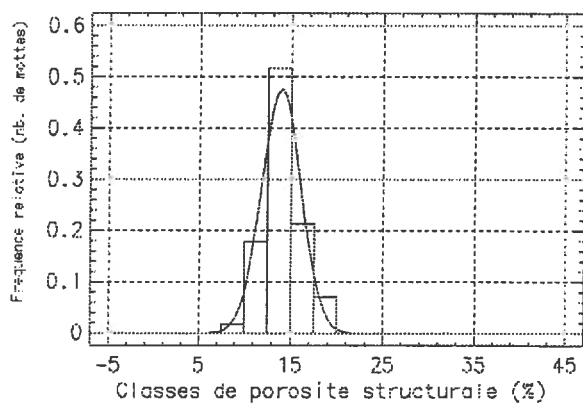
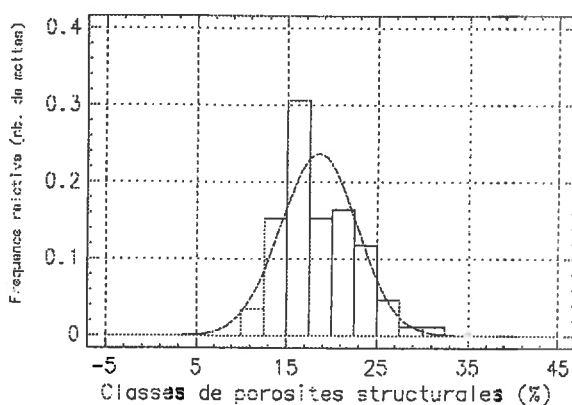
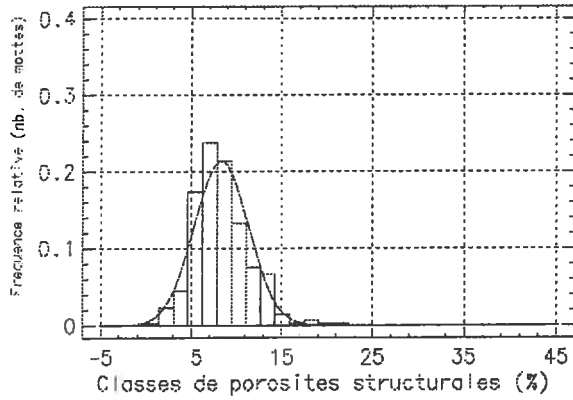
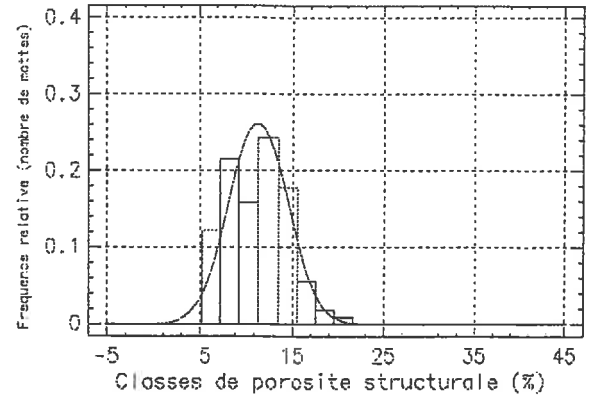
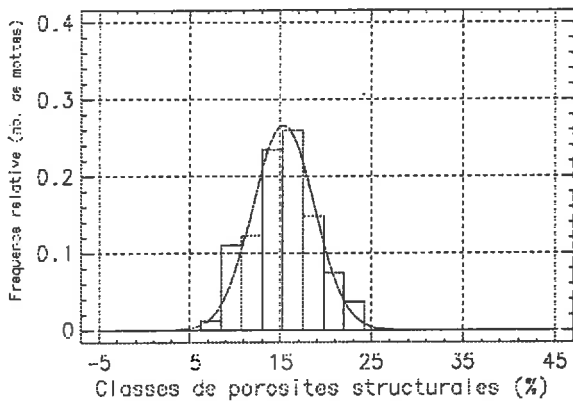
e-  $\Gamma_c$ f-  $\Gamma$ 

Fig. 1-12. Fréquence (nombre de mottes) pour chaque classe de porosité structurale des mottes extraites des parcelles de PLATEAU.

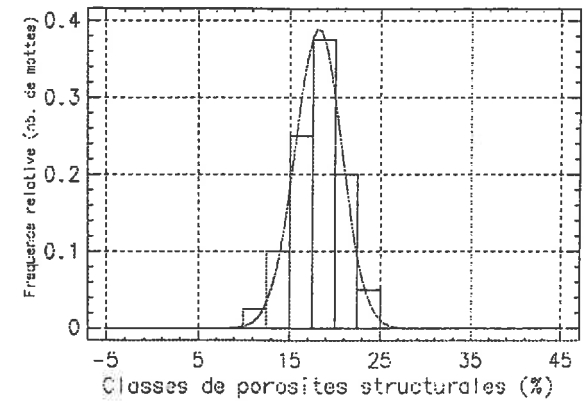


a-  $\Delta$ 

b- Z



c- Y



d- X

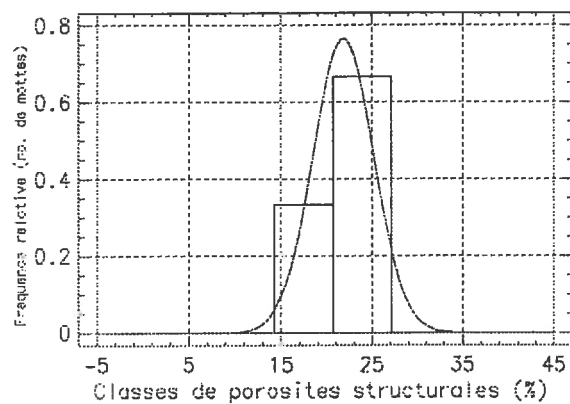
f-  $\Gamma$ 

Fig. 1-13. Fréquence (nombre de mottes) pour chaque classe de porosité structurale des mottes extraites des parcelles de CHANTEPIE.

Tableau 1-12 Caractéristique des distributions en nombre des porosités structurales par classe morphologique (Parcelles).

Classes morphologiques		$\Delta$	Z	Y	X	$\Gamma_c$	$\Gamma$
Plateau	Moyenne	8.3	12.0	14.1	17.7	14.0	18.5
	Ecart type	4.1	3.0	2.7	3.7	2.1	4.2
Chantepie	Moyenne	8.3	11.4	15.4	18.1	-	21.8
	Ecart type	3.0	3.1	3.4	2.6	-	3.3

Les écarts de masse volumique qui existaient pour chacune des classes entre les deux sites étaient dus principalement aux différences des masses volumiques texturales : les porosités structurales correspondant à chaque classe sont très voisines pour les deux ensembles de parcelle. Pour ces deux teneurs en argile, les mêmes critères morphologiques semblent donc bien permettre de reconnaître des organisations structurales semblables. Seule la classe de mottes  $\Gamma$  paraît contredire cette affirmation. Ses effectifs dans la population de Chantepie sont cependant insuffisants pour comparer sa valeur moyenne à celle de Plateau.

Réciproquement, ces résultats confortent l'intérêt de l'analyse des systèmes de porosité en lui conférant la capacité de fournir une indication sur la morphologie structurale, au moins dans ce cas précis des couches travaillées de matériaux limono-argileux.

La principale question qu'ils soulèvent est l'explication du niveau moyen élevé de la porosité structurale de l'état  $\Delta$  et sa variabilité. Compte tenu de la fonction particulière de l'état  $\Delta$  dans la définition des types, ses répercussions concernent toutes les autres classes.

Ce niveau pourrait résulter en partie de l'existence d'une porosité, non visible et non texturale, c'est-à-dire non incluse dans les agrégats de 2-3 mm sur lesquels la porosité texturale est estimée. Dans ce cas, elle devrait être systématiquement localisée en périphérie d'éléments structuraux constituant la motte. L'hypothèse la plus vraisemblable est alors qu'elle soit formée de micro fissures. L'épaisseur réduite compatible avec l'incapacité à discerner à l'oeil ces micro fissures et leur volume important impliquent qu'elles développent une grande surface volumique. Ces conditions sont peu compatibles avec l'apparence continue de la face d'observation.

Outre ce type de pores très fin, des pores tubulaires ou arrondis, non connectés, peuvent être visibles et ne pas affecter l'appréciation de continuité de la surface de rupture par l'observateur. Il faudrait qu'ils soient très abondant pour expliquer la porosité structurale des mottes  $\Delta$ .

On est donc conduit à attribuer celle-ci à deux causes principales :

- l'hétérogénéité de l'état interne des mottes par rapport à celui de la face de rupture observée,
- l'imprécision de la définition de critère de continuité qui fonde le concept d'état  $\Delta$ .

Cette cause est seule capable d'expliquer que des mottes dont la porosité structurale est voisine de 15 à 20 % soient considérées comme d'état interne  $\Delta$ .

#### b) Comparaison avec les mottes des allées

Les mottes des allées, qu'elles appartiennent aux classes des mottes compactes,  $\Delta$  et Z, ou non, se différencient de celles des parcelles par des porosités structurales plus faibles et moins dispersées (Fig.1-14). Les états  $\nabla$  des allées ont des porosités structurales en moyenne plus proche des mottes  $\Delta$  des parcelles (Fig.1-15).

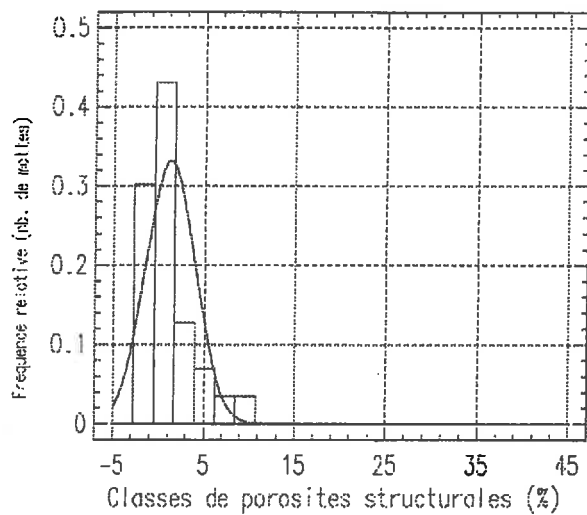
On peut supposer que dans cette situation les différentes causes de variabilité de l'état  $\Delta$  sont réduites par des tassements répétés :

- la porosité correspondant à l'état  $\Delta$  tend vers la porosité texturale. Les morphologies intermédiaires entre la face lisse d'un élément structural très compact, bien connue dans ce sol de limon (Stengel, 1986), et l'assemblage de petits agrégats discernables, tendent à disparaître ;
- les volumes uniformément compacts de plus grande dimension sont plus fréquents : les mottes de type  $\Delta$  homogènes sont plus abondantes et la face de rupture observée a une représentativité meilleure ;
- les pores arrondis, notamment les résidus de porosité d'assemblage d'agrégats sont éliminés.

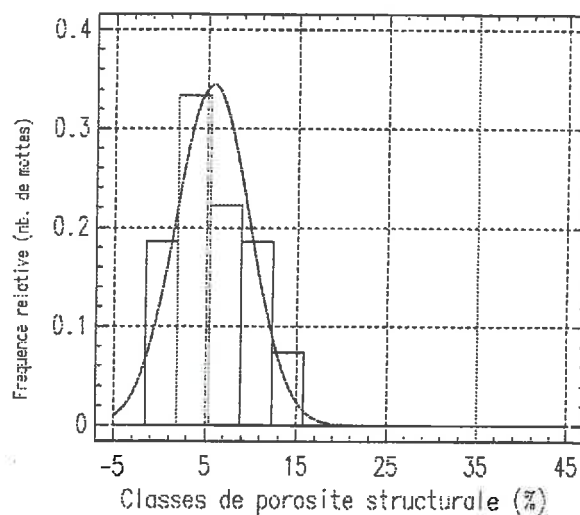
Ces deux dernières hypothèses sont bien conformes à l'observation des images de la figure 1-16. La coupe de la motte  $\Delta$  de l'allée apparaît strictement dépourvue de pores visibles macroscopiquement. Sur celle de la motte  $\Delta$  d'une motte de la parcelle, on note la persistance d'un volume de pores structuraux de forme arrondie. On constate également l'existence de zones plus poreuses et finement structurés, préférentiellement localisées en périphérie. Cette localisation peut traduire un effet de fissuration par les facteurs climatiques, alternance

d'humectation et de dessiccation notamment, qui peut s'exercer différemment dans les couches travaillées des parcelles et dans l'allée. Toutefois, l'abrasion de la périphérie des mottes de l'allée interdit la comparaison sur ce point.

### Plateau

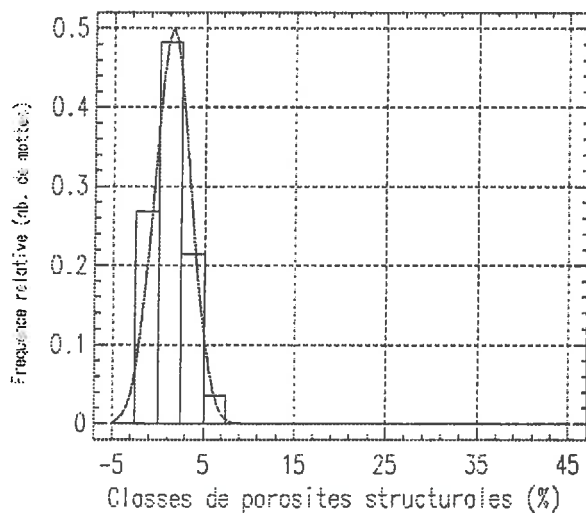


a-  $\Delta$  ; Z

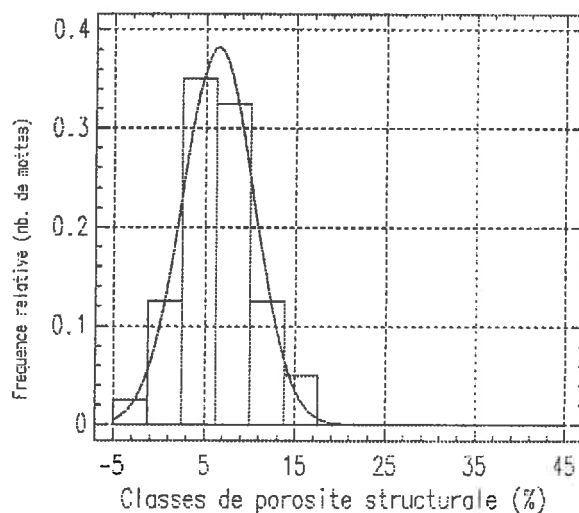


b-  $\Delta$  ; Z

### Chantepie



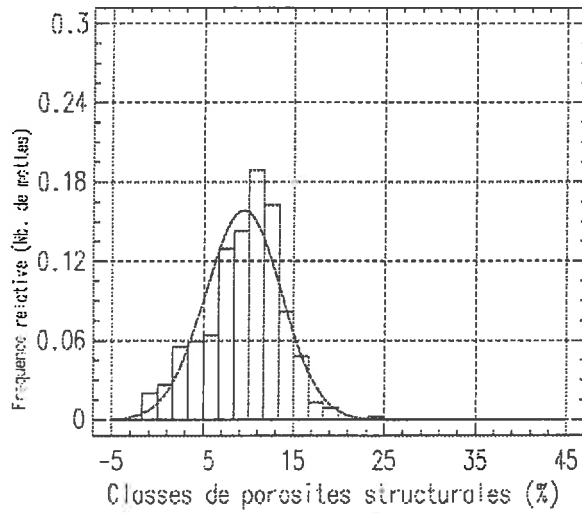
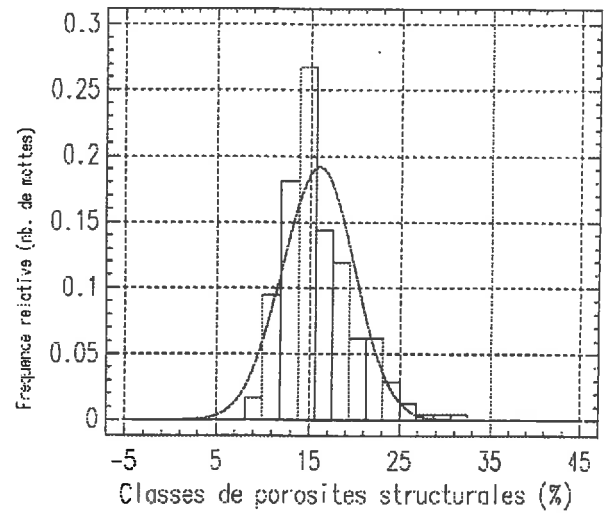
c- Y ; X ;  $\Gamma_c$  ;  $\Gamma$



d- Y ; X ;  $\Gamma_c$  ;  $\Gamma$

Fig. 1-14. Porosité structurale de mottes de l'allée. Fréquence relative (en nombre de mottes) pour les types morphologiques regroupés.

## Plateau

a-  $\Delta$  ; Zb- Y ; X ;  $\Gamma_c$  ;  $\Gamma$ 

## Chantepie

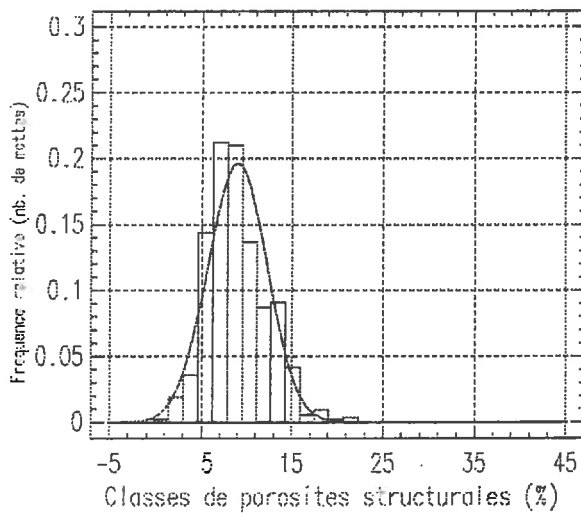
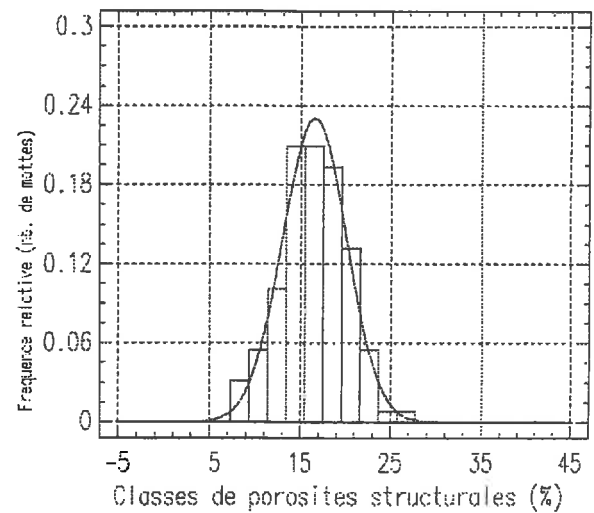
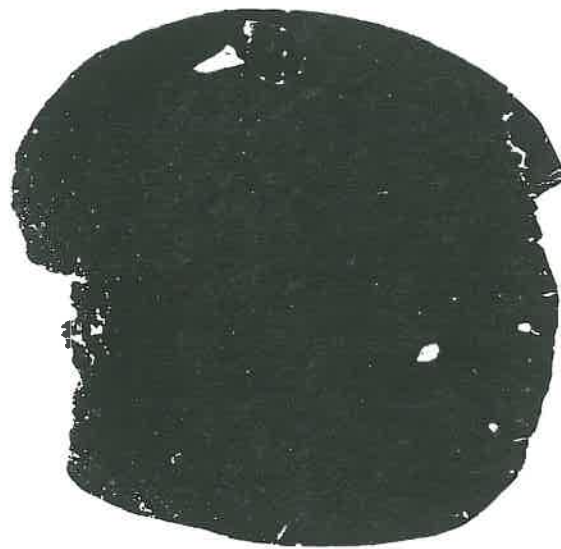
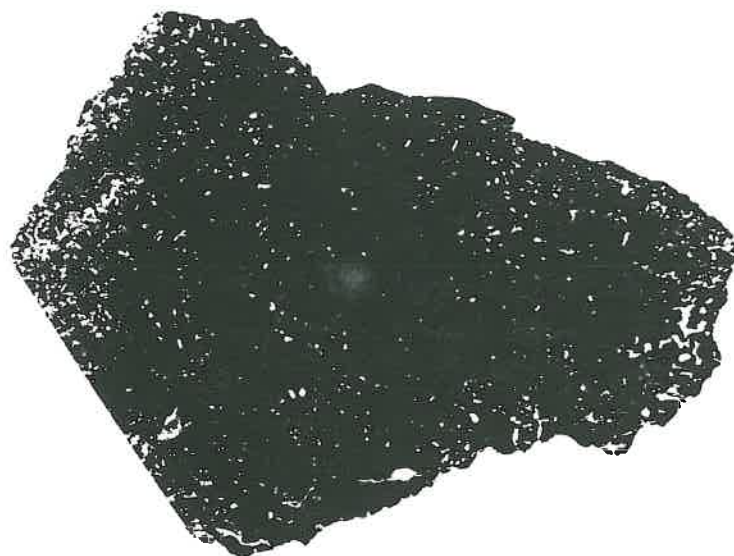
c-  $\Delta$  ; Zd- Y ; X ;  $\Gamma_c$  ;  $\Gamma$ 

Fig. 1-15. Porosité structurale de mottes des parcelles. Fréquence relative (en nombre de mottes) pour les types morphologiques regroupés.



Plateau (allée)  
 $\Delta$   $\rho=1.92$   $\eta_S=0$



Plateau (13)  
 $\Delta$   $\rho=1.72$   $\eta_S=3.0$

Fig. 1-16 Mottes  $\Delta$  imprégnées à la résine epoxy.

## V. DISCUSSION ET CONCLUSION DU CHAPITRE 1ER

Au vu de ces premiers résultats, on peut conclure positivement quant à la capacité que confère la classification morphologique de différencier les assemblages plus ou moins poreux de volumes  $\Delta$  et  $\Gamma$  qui constituent les mottes. Elle permet d'établir un classement des porosités structurales qui a été vérifié dans tous les cas, et qui est conforme dans l'ordre qu'il établit entre les classes morphologiques aux prévisions résultant des principes de classification. En effet :

- la teneur en état  $\Delta$  de la surface de rupture est une évaluation de l'importance des volumes à porosité structurale minimale au sein de la motte,
- l'étalement de la granulométrie des éléments structuraux constituant la motte favorise leur arrangement plus serré et donc la diminution de la porosité structurale.

En combinant ces deux critères, on pouvait prévoir le sens des variations de porosité structurale entre classes.

La correspondance qui est ainsi établie entre classement morphologique et analyses des systèmes de porosité autorise à affirmer le caractère objectif et quasi quantitatif du premier. Elle contribue à élargir les possibilités d'interprétation de l'un et de l'autre. Elle permet potentiellement de relier à la description d'un profil cultural des propriétés physiques dépendant de la porosité structurale.

Cette perspective apparaît cependant limitée par :

- la variabilité des états internes d'une classe morphologique dans une couche de sol travaillée,
- l'instabilité de la relation état-interne porosité structurale en fonction des régimes de contraintes mécaniques qu'elle subit. Ainsi par exemple, d'après Richard et Guérif (1988), la dispersion de porosité structurale de l'état  $\Delta$  impliquerait des variations relatives du coefficient de diffusion gazeuse de deux à trois ordres de grandeurs entre les valeurs extrêmes de cette porosité.

Pour réduire cette variabilité on devrait en premier lieu mieux assurer la qualité du tri morphologique en tenant compte de la plus ou moins grande représentativité de la face de rupture observée. Les moyens de progresser dans cette direction apparaissent difficiles à mettre en oeuvre. Augmenter le nombre de faces observées alourdirait sensiblement le travail

de l'observateur, mais surtout compliquerait la procédure d'établissement d'un jugement synthétique lorsque ces faces présenteraient des morphologies différentes.

L'autre direction d'amélioration consisterait à définir plus rigoureusement les critères distinctifs de l'état  $\Delta$ . On pourrait ainsi proposer de rechercher les indicateurs de rugosité et de forme de la surface de rupture s'appliquant plus spécifiquement aux états  $\Delta$  des allées par rapport à ceux des parcelles. Appliqués aux mottes des parcelles, les critères élaborés permettraient d'extraire une population plus homogène. On voit immédiatement les limites d'une telle démarche :

- l'état  $\Delta$  mieux précisé pourrait être représenté de façon très réduite dans l'ensemble des mottes, voire complètement absent,
- les critères actuels de définition des autres types pourraient de ce fait devenir inopérant. On serait alors contraint de définir un type intermédiaire entre apparence continue et discontinue et donc de multiplier les classes.

Une telle évolution de la classification s'avère donc a priori assez complexe et contradictoire avec l'intention de fournir une méthode simple de description du profil cultural. En son état actuel, compte tenu de la variation du contenu des classes enregistrées entre les allées et les parcelles, on doit s'interroger sur sa pertinence pour établir des relations entre un état interne et les conditions de sa formation. L'état  $\Delta$  des allées et des parcelles ne manifeste pas l'application du même régime de contraintes mécaniques. Dans chacun des cas, on peut supposer qu'il révèle les volumes qui ont subi les compactages les plus intenses au sein d'une couche de sol où les applications des charges sont variables dans l'espace. La classification morphologique conserverait alors le caractère d'indicateur de l'effet physique des systèmes de culture que lui attribue Manichon (1987), mais il devrait être précisé. L'abondance de l'état  $\Delta$  traduirait la fréquence spatiale des zones affectées par les opérations provoquant les plus forts tassements dans un système donné. La comparaison entre systèmes fondés sur la teneur en mottes  $\Delta$  de la couche travaillée impliquerait donc qu'on vérifie préalablement que les intensités de tassement maximales sont identiques dans chacun d'eux.

Pour poursuivre ce bilan sur l'intérêt de la classification morphologique, il est essentiel d'aborder l'étude des conditions de formation des différents états internes. Ce sera l'objet du chapitre suivant.



## CHAPITRE 2

## I. INTRODUCTION

L'objectif de ce deuxième Chapitre consiste à rechercher quelles sont les conditions d'états physiques du matériau et les modalités de compactage susceptibles de donner lieu à des volumes de sol présentant un état continu, et/ou une morphologie de type  $\Delta$ .

Les conditions d'états physiques du matériau retenues concernent principalement la distribution granulométrique des agrégats soumis au compactage, ainsi que leur capacité à se déformer sous charge. Cette dernière est en grande partie définie par la teneur en eau au moment du compactage.

On considère généralement que les mottes présentant in situ une morphologie  $\Delta$  sont le fait d'un compactage en conditions humides par des engins lourds munis de pneumatiques à pressions de gonflage moyennes à fortes. Elles peuvent aussi probablement résulter de compactage successifs et/ou d'histoires hydriques variées. Les modalités de compactage, d'un point de vue analytique, font référence au mode d'application des charges (intensité, durée, répétition) et à une éventuelle mobilité de l'eau.

Après avoir passé en revue les connaissances actuelles sur l'effet de ces différents facteurs, combinés ou non, on décrira les méthodes de laboratoire utilisées pour évaluer les pressions, et les modalités d'application des charges requises pour atteindre une morphologie donnée, en fonction des états physiques du matériau.

On analysera ensuite les processus de compression et les mécanismes qui conduisent à une augmentation de compacité dans les différentes conditions, en ayant recours à l'analyse du système de porosité et à la classification morphologique présentées au Chapitre 1.

On cherchera à dégager des règles d'occurrence des différents états structuraux induits par le compactage, aussi bien d'un point de vue quantitatif (répartition volumique des différentes fractions de l'espace poral)) que qualitatif (apparition de traits morphologiques).

## II. ELEMENTS BIQBLOGRAPHIQUES

### A. Considérations générales

Deux ensembles principaux de facteurs conditionnent les processus de compactage, l'intensité des tassements ainsi que l'état structural des zones compactées. L'un concerne l'état physique des couches de sol avant, pendant et après le processus de compactage, l'autre concerne les modalités mécaniques du compactage ; ils sont généralement interactifs.

## 1. Etat physique :

L'humidité du sol apparaît classiquement comme le premier facteur responsable du comportement au compactage et de l'état de compacité induit, il a été beaucoup étudié en génie civil ou en science du sol. L'étude de l'influence de l'état structural initial est relativement plus récente (Papy, 1987), du fait de sa difficulté méthodologique notamment ; en effet l'état structural ne peut être traduit exclusivement par des variables physiques quantitatives. Pour la même raison l'état structural atteint n'est que très rarement décrit.

La teneur en eau est une variable expérimentalement facile à utiliser que ce soit pour sa mesure ou sa maîtrise, mais elle n'a de signification, comme variable explicative d'un comportement, que pour un matériau donné. Le potentiel hydrique est implicitement lié à la texture du matériau, et permet donc de comparer des matériaux entre eux. Ainsi donc d'un point de vue expérimental on préférera utiliser le potentiel comme variable explicative des comportements mécaniques. La généralisation des résultats est ainsi rendue possible. Mais l'utilisation du potentiel hydrique présente aussi un intérêt théorique car il contribue aux contraintes qui se développent dans le matériau par l'intermédiaire des phénomènes de tension superficielle qui se développent au niveau des ménisques dans les pores du sol, son expression est homogène avec les pression d'ordre mécanique. En milieu non saturé, cet intérêt reste encore limité, vis à vis de la modélisation, car il n'existe pas de relation biunivoque satisfaisante entre les sollicitations mécaniques extérieures et le potentiel de l'eau dans un volume poral déformable sous charge.

La prise en compte de l'état structural nécessite l'utilisation conjointe :

- de variables quantitatives, caractérisant des éléments structuraux ou des horizons : densité, volume de l'espace poral et de ses différentes fractions, distributions des tailles ou volumes des éléments structuraux, des longueurs cumulées de fissures par unités de surface etc...

- de variables qualitatives, permettant de décrire l'organisation du profil et la distribution spatiale des éléments structuraux ou des fractions de l'espace poral, d'en décrire et d'en classer les morphologies (formes et continuité...) etc...

## 2. Analyse des systèmes de porosité

On a vu au Chapitre 1 l'intérêt d'utiliser l'analyse des systèmes de porosité dans l'étude quantitative de l'espace poral du sol et de ses relations avec les caractéristiques morphologiques.

Le compactage des sols affecte semble-t-il uniquement l'espace poral structural. En effet des expériences de laboratoire mettant en jeu des chargements répétés, d'intensités compatibles avec les pressions rencontrées dans les sols cultivés, n'ont pas permis de mettre

en évidence l'apparition d'un tassement au niveau de l'organisation texturale (Fiès et Zimmer, 1982; Fiès, 1984; Guérif, 1988, Angers, 1987). Des tassements expérimentaux effectués sur des massifs exclusivement texturaux ne révèlent apparemment qu'une diminution du volume de l'espace poral due à la consolidation (tassement en saturé, avec départ d'eau) des massifs le long de la droite de saturation. Ce phénomène ne correspond qu'à un processus de dessiccation. Il semble que le point d'entrée d'air ainsi que la limite de retrait restent inchangés.

Ainsi l'analyse des systèmes de porosité, distinguant l'espace poral textural et l'espace poral structural, donne en partie les moyens d'une analyse quantitative des processus de compactage.

Si la porosité (rapport du volume des vides au volume total) est le mode d'expression le plus satisfaisant, vis à vis d'appréciations visuelles de l'espace poral, il n'en est pas de même dans l'étude du compactage. On lui préfère dans ce cas l'indice des vides (rapport du volume des vides au volume de solide) pour lequel le volume de solide qui sert de référence reste invariant lors du processus de compactage.

On distingue donc dans l'analyse de l'espace poral l'indice des vides texturaux  $e_T$  et l'indice des vides structuraux  $e_s$  pour lesquels on peut écrire, à une teneur en eau donnée :

$$e_T = e_T + e_s$$

On prendra donc comme variable quantitative exprimant un état de compacité l'indice des vides  $e_s$ .

### 3. Modalités de compactage :

Indépendamment des effets dus aux pièces travaillantes des outils de travail du sol qui induisent des tassements très localisés comme les lissages par exemple, les compactages qui concernent les volumes les plus importants dans les couches de sol sont issus principalement des roulages par les engins agricoles, processus de compactage que nous privilégierons ici.

A humidités comparables du sol, l'intensité des déformations dépend du type d'engin circulant sur la parcelle. C'est à dire de la masse de l'engin, mais surtout de la façon dont cette masse est transmise au sol par les pneumatiques ou les chenilles. Interviennent donc dans les déformations enregistrées, la charge sur chaque essieu, le nombre d'essieux, la pression de gonflage des pneumatiques, la vitesse d'avancement et le nombre de passages.

Cet ensemble de facteurs est traduit dans les essais de laboratoire en terme de pressions appliquées, de temps, et de nombre de mises en charge.

Dans la pratique, et dans les essais de plein champ, on observe évidemment que les compactages les plus sévères sont obtenus en conditions de sols humides et pour des charges élevées. Comme on l'a vu, la consistance d'un matériau et ses capacités de déformation

dépendent principalement de l'état d'hydratation du matériau et conjointement de l'intensité des sollicitations appliquées. Pour fixer les idées, pour des potentiels hydriques de -10 à -20 kPa lorsque les charges sur l'essieu dépassent 5 tonnes et que les pressions de gonflage dépassent 100 kPa la macroporosité peut devenir inférieure à 5% (v/v) (Blackwell et al, 1986).

Avec l'évolution des tracteurs notamment l'apparition des quatre roues motrices, les problèmes de trafficabilité en conditions humides ont été largement diminués, augmentant ainsi les teneurs en eau pour lesquelles il est encore possible de pénétrer dans une parcelle et, augmentant donc aussi les risques de compactages.

La gamme des pressions appliquées au sol varient de 50 à 70 kPa pour les pneumatiques basse-pression, 150 à 250 kPa pour les roues de tracteur, 400 kPa pour les remorques et tonnes pour l'épandage de lisier ou pour traitements, 500 à 600 kPa pour des engins de récolte automoteurs, jusqu'à 1 MPa pour certains matériels d'entreprises destinés au charroi des betteraves par exemple.

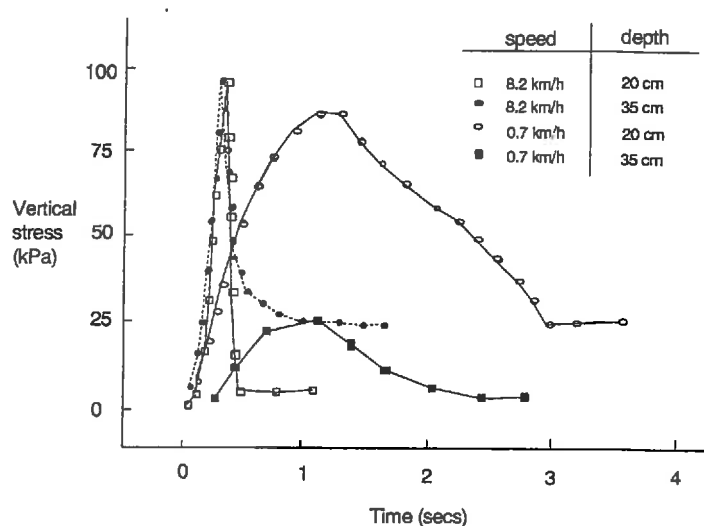


Fig.2-1. Variations de l'intensité de la contrainte verticale en fonction du temps à deux profondeurs lors du passage d'une roue,  $W = 19\%$  (Horn et Hartge, 1990).

Le temps de contact sol - pneumatique, et donc le temps de mise en charge (Fig.2-1), varie entre quelques 1/10ème de seconde et quelques secondes au maximum (Horn et Hartge, 1990).

Le nombre de passages successifs ou de recouvrements de traces de roues peut atteindre, sur 10% à 20% de la surface de la parcelle, jusqu'à 10 à 20 passages pour certains systèmes de cultures (Soane et al., 1980-1981).

Il faut dans tous les cas de figure que les variables utilisées rendent compte des déformations au cours du tassement, mais permettent aussi d'envisager une prévision ultérieure des modifications des propriétés et des comportements induites par les compactages. L'utilisation sur le terrain d'observations morphologiques d'éléments structuraux pour établir un diagnostic sur les modalités du compactage et ses effets suppose d'être à même de relier : conditions de compactage - traits morphologiques - propriétés et comportements induits.

## B. Etudes expérimentales du comportement au compactage

### 1. Caractéristiques physiques du matériau

Les tests de compactage de laboratoire (test Proctor ou mieux test uniaxial confiné drainé ou non) concernent essentiellement des matériaux remaniés qui permettent de mieux maîtriser les conditions initiales et notamment l'homogénéité de l'éprouvette. Les différents auteurs (Dexter, 1988; Koolen, 1978; Larson et Gupta, 1980; Guérif, 1982; Angers, 1987; Willat, 1987) utilisent généralement des agrégats tamisés à sec puis amenés aux humidités visées par pulvérisation ou équilibres de potentiels.

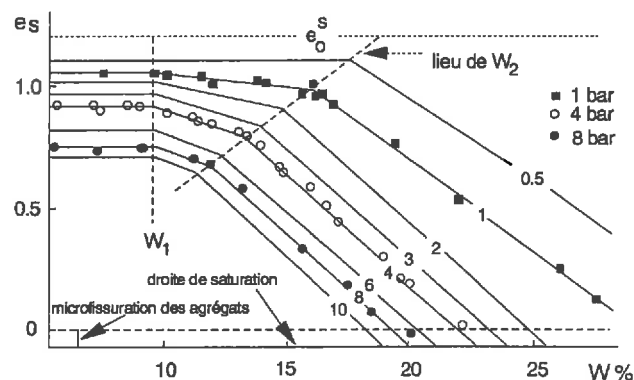


Fig. 2-2 Relation entre l'humidité au compactage et l'indice des vides structuraux résultant de compression à différentes pressions. (Guérif, 1982)

En analysant (Guérif, 1982), pour une pression de compactage donnée, les variations de l'indice des vides structuraux  $e_s$  de massifs d'agrégats compactés à différentes teneurs en eau  $W$ , on peut distinguer trois domaines hydriques de comportements mécaniques (Fig.2-2) :

-  $W < W_1$  - Le domaine solide où les agrégats se comportent comme des sables, leurs résistances mécaniques individuelles est grande vis à vis des contraintes qui se développent dans le massif, l'augmentation de compacité ne résulte que de leur réarrangement.

-  $W_1 < W < W_2$  - Le domaine fragile, où la résistance mécanique des agrégats qui diminue quand la teneur en eau s'accroît, est de l'ordre de grandeur des contraintes qui se développent dans le massif. L'augmentation de compacité résulte alors du réarrangement des agrégats après rupture, elle dépend de la teneur en eau.

-  $W > W_2$  - Le domaine visqueux, où les éléments structuraux sont ductiles. L'augmentation de compacité résulte de leur fluage et réarrangement. Cette déformation est fonction de la teneur en eau des éléments structuraux, et du temps d'application de la charge.

Pour la pression fixée, il existe une teneur en eau seuil au delà de laquelle on devrait atteindre une valeur nulle de l'indice des vides structuraux, ainsi que la saturation de l'éprouvette. En fait on connaît peu la réalité des conditions permettant d'obtenir de tels états, et quelles en sont les morphologies résultantes.

Peu d'études de laboratoire ont été menées sur l'effet de composantes de l'état structural initial sur le comportement au compactage. On trouve cependant quelques travaux sur l'effet de la distribution dimensionnelle initiale des éléments structuraux soumis au compactage.

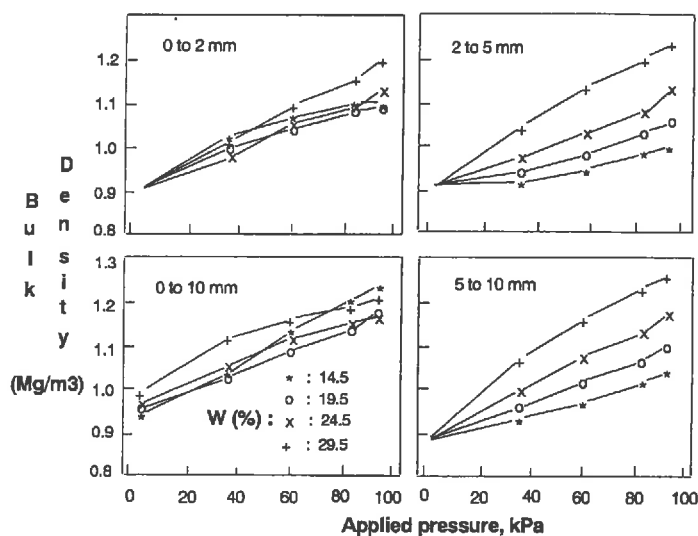


Fig. 2-3. Effet de la granulométrie des agrégats compactés sur la relation pression appliquée densité après compactage. (Willat, 1987)

Ainsi Boddaert (1976), en utilisant le test Proctor a pu montrer que la densité à l'optimum proctor n'était pas influencée par le calibre des fragments de sol et leurs distributions. Il semble que les teneurs en eau des seuils de consistance restent inchangées. C'est dans les domaines hydriques de comportements solide et fragile que les différences sont les plus marquées ; les densités des éprouvettes sont alors d'autant plus élevées que les agrégats sont petits. Willat (1987) pour sa part a montré Fig.2-3. que pour les granulométries d'agrégats les plus étalées l'accroissement de compacité dépend essentiellement de la pression appliquée, les particules les plus fines remplissant les cavités laissées par les agrégats les plus grossiers, indépendamment de la teneur en eau au compactage. Pour des granulométries



resserrées l'augmentation de compacité provient nécessairement de la fragmentation des agrégats et de leur redistribution. Cette fragmentation est fortement contingente de leur teneur en eau qui régit leur résistance mécanique (Guérif, 1982).

## 2. Conditions d'application des charges

### a) Intensité

On admet généralement que, dans des coordonnées semi-logarithmique (Fig.2-4.), l'indice des vides diminue linéairement quand la pression appliquée augmente (A → B). Lorsque la charge est supprimée on peut observer une légère augmentation de volume (B → C), ou recouvrance, qui peut être due à l'élasticité des grains, des ménisques qui établissent des liens entre constituants, ou à l'élasticité des gaz comprimés lorsqu'ils sont piégés dans l'espace poral fermé par des films liquides. Lorsque un état d'équilibre n'est pas atteint, une nouvelle augmentation de la pression provoque une reprise de l'augmentation de la compacité (C → D → E).

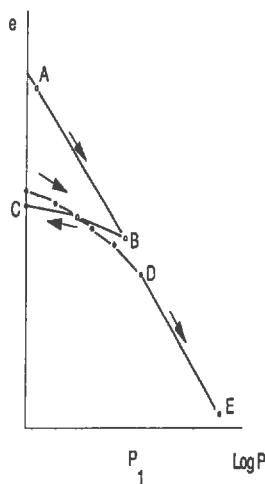


Fig.2-4 Courbe de compression.

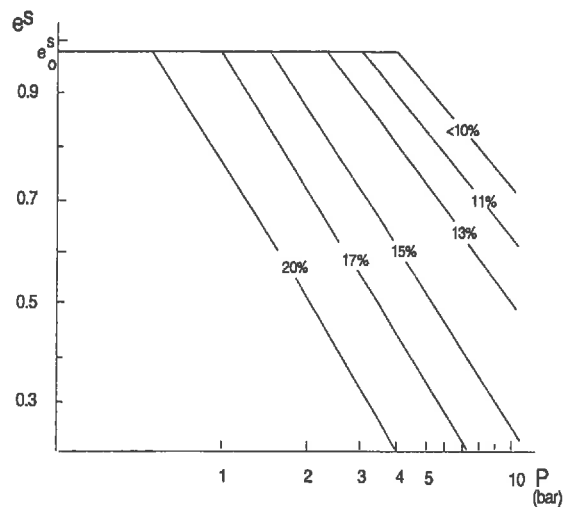


Fig.2-5. Effet de la teneur en eau sur les courbes de compression

En portant les données de la figure 2-2 dans des coordonnées semi-logarithmiques  $e_s = f(P)$  on constate (Fig.2.5) que pour chaque teneur en eau au compactage il existe une pression pour laquelle l'indice des vides structuraux tend vers zéro.

Donc un état continu doit pouvoir être obtenu par compactage pour différents couples (teneur en eau, pression appliquée) donnés. Ce sont ces couples qu'il convient de déterminer pour définir les conditions d'occurrence d'une des caractéristiques des mottes  $\Delta$ , à savoir l'aspect continu. Cependant l'analyse du système de porosité de mottes  $\Delta$  naturelles a montré (Chapitre 1) que cet aspect continu pouvait être observé pour des mottes présentant en fait une gamme d'indice des vides structuraux pouvant atteindre 0.1 voire 0.2 pour les mottes les plus poreuses.



### b) Durée de la mise en charge

Dans les domaines hydriques des comportements solide et fragile, la déformation est pratiquement instantanée. Par contre dans le domaine visqueux, comme son nom l'indique, la déformation dépend du temps (Fig.2-6), elle tend apparemment vers un état d'équilibre défini en première approximation par le couple (Pression de compactage, teneur en eau). La phase de recouvrance aussi dépend du temps

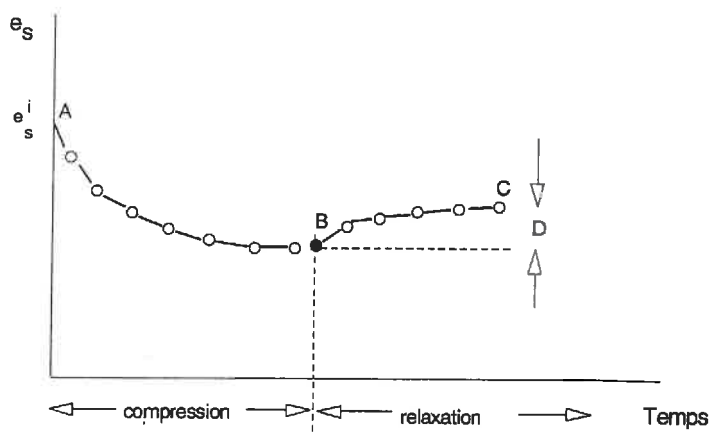


Fig 2-6. Cycle de mise en charge, variation de  $e_s$  en fonction du temps. (D = Recouvrance)

Les temps courts d'application des charges rencontrées dans les conditions habituelles de terrain laissent penser que dans le domaine visqueux les états d'équilibre sont rarement atteints.

### c) Nombre de mises en charge

Lorsque la suppression de la charge intervient, pendant une cinétique de compactage à charge constante, avant qu'un équilibre ne soit atteint, une reprise de la mise en charge s'accompagne d'une reprise de l'augmentation de compacité.

Selon les modalités de mise en charge, il n'existe pas en toute rigueur d'état d'équilibre unique. Ainsi par exemple, pour un temps cumulé équivalent de mise en charge, une succession de chargements provoquerait une déformation plus importante qu'un seul chargement.

## 3. Conditions de redistribution de l'eau dans l'espace poral, consolidation.

En pratiquant l'analyse du système de porosité, on fait implicitement l'hypothèse que l'eau est localisée dans l'espace poral textural. Cette hypothèse est valide pour de larges gammes de teneurs en eau. Cependant pour les potentiels proches de zéro des ménisques se forment dans les pores structuraux, on ne connaît alors pas réellement la teneur en eau des

agrégats et on ne peut pas estimer en toute rigueur la masse volumique texturale (et ses dérivés : porosité et indice des vides texturaux) à partir de la courbe de retrait des agrégats.

Lors d'une mise en charge, les déformations de la géométrie de l'espace poral induisent des modifications du potentiel hydrique. En saturé, l'application d'une charge mécanique augmente la pression de l'eau dans les pores jusqu'au potentiel nul. Au delà, l'eau s'écoule, il y a augmentation de la compacité, on dit qu'il y a consolidation. Les variations de la pression de l'eau dans les pores, et donc de compacité, dépendent des vitesses relatives de mise en charge et de transfert de l'eau.

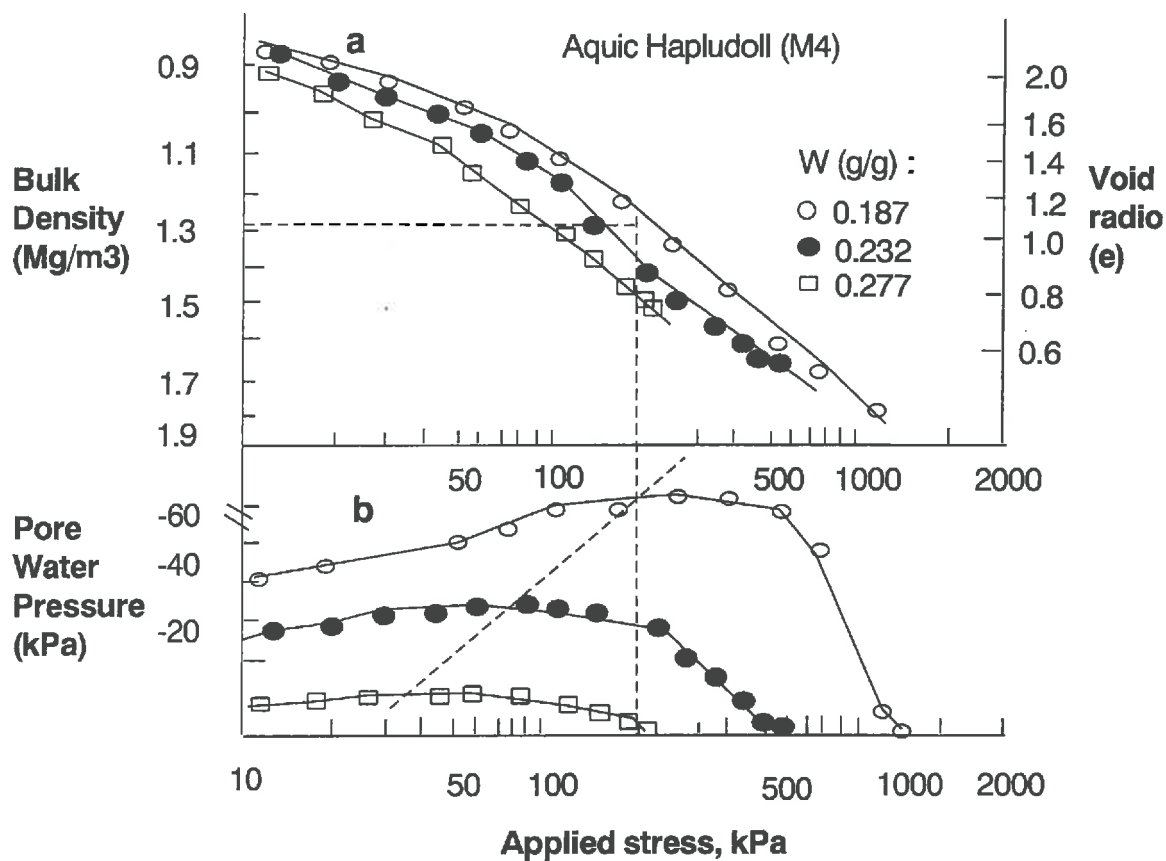


Fig. 2.7 Variations de la masse volumique et de la pression de l'eau avec la pression appliquée. (Larson et Gupta, 1980)

En non saturé, Larson et Gupta (1980) ont montré (Fig.2-7) que la mise en charge provoque :

- dans un premier temps une augmentation de la succion liée au rapprochement des grains qui, en augmentant le nombre de points de contact, favoriserait la formation de nouveaux ménisques dans les pores structuraux les plus fins, au dépend de l'eau contenue dans l'espace poral textural,

- et par la suite, lorsque la compacité augmente, une diminution de la succion induite par une augmentation des volumes saturés de l'espace poral. Au delà du potentiel nul, des phénomènes de consolidation apparaissent.

o o  
o

Ainsi donc, il ressort de la littérature que pour obtenir de mottes présentant une morphologie  $\Delta$ ,

c'est à dire :

- une valeur de  $e_s$  proche de zéro ou tout au moins comprise entre 0 et 0.2 comme le montre le Chapitre 1

- un structure continue telle que la motte ne soit constituée que d'une unité structurale,

on doit satisfaire à certaines conditions dont les plus favorables semblent les suivantes :

- c'est à l'état humide que l'état  $\Delta$  devrait pouvoir apparaître en appliquant les pressions les plus faibles;

- un compactage avec consolidation peut s'avérer nécessaire pour évacuer la fraction de l'eau contenue dans l'espace poral structural;

- des chargements successifs de courtes durées peuvent se substituer avantageusement à un seul chargement de longue durée, et se rapprocher des conditions existantes au champ.

Les différentes classes morphologiques décrivant les mottes  $\nabla$  sont en partie définies par la taille des agrégats qui les constituent. La distribution dimensionnelle des agrégats initiaux est donc une variable explicative des états morphologiques obtenus après compactage.

Il n'est pas exclu que l'occurrence de la morphologie  $\Delta$  dépende aussi de la distribution dimensionnelle des agrégats d'origine.

Certains de ces facteurs pourraient être interdépendants.

### III. MATERIELS ET METHODES

#### A. Matériau, états initiaux

On a choisi pour déterminer l'échantillon devant servir aux tests de compactage, de minimiser la variabilité des agrégats utilisés, à la fois en terme de masse volumique texturale ou de résistance mécanique texturale (voir Chapitre 3) pour simplifier les interprétations ultérieures. On a donc sélectionné le site Chantepie pour sa faible variabilité, mais on a aussi préféré, pour simplifier les observations morphologiques, extraire les unités structurales destinées au compactage par fragmentation mécanique et tamisage à sec de mottes de morphologie  $\Delta$ .

Pour pratiquer l'analyse du système de porosité au cours des essais, on utilise la courbe de retrait des agrégats de 2-3mm comme courbe de retrait textural (Fig.2-8). La teneur en eau après gonflement maximum, à un potentiel proche de zéro, avoisine 34%. Le point d'entrée d'air correspond à une teneur en eau de 21 à 22%, limite inférieure du domaine de retrait normal et de la gamme hydrique de saturation de l'espace poral textural. La limite de retrait correspond à une teneur en eau de 10%.

#### Chantepie, Allée.

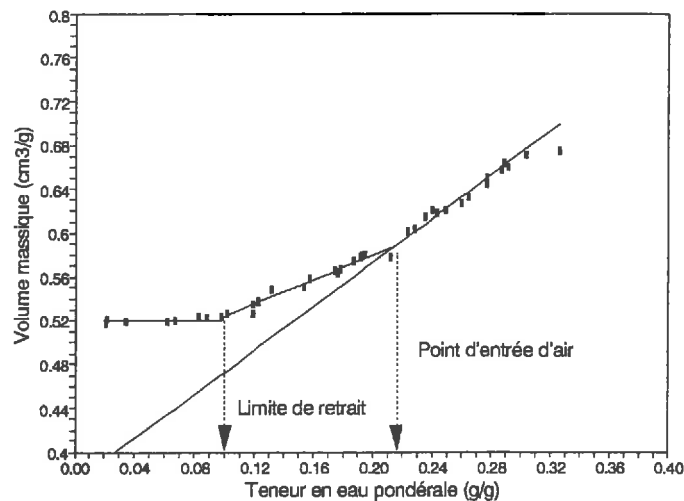


Fig. 2-8. Courbe de retrait-gonflement à l'échelle texturale.

Pour étudier l'influence de la granulométrie des éléments structuraux soumis au compactage et de son étalement, on a choisi divers calibres d'agrégats tamisés (<2mm; 1-2 mm; 2-3 mm; 5-10 mm; 60% (5-10 mm) + 40% (1-2 mm))

Le calibre <2 mm constitue la terre fine, qui présente un grand nombre de points de contact entre unités structurales, et des pores structuraux de faibles diamètres apparents avant tout processus de compactage. Le resserrement de la distribution dimensionnelle des agrégats

accompagné de calibres plus grands induit une diminution du nombre de points de contacts, au moins au début du compactage.

Au delà de 2-3mm, les effets de bords peuvent se manifester compte tenu du ratio entre diamètre d'agrégats et diamètre (70mm) ou hauteur du moule (24mm). Ces effets peuvent intervenir surtout au niveau de l'estimation de l'espace poral, mais aussi dans l'homogénéité des traits morphologiques dans les mottes artificielles. Celles-ci peuvent présenter des gradients de masse volumiques ou d'humidité selon les directions de mise en charge, qu'il conviendra de surveiller.

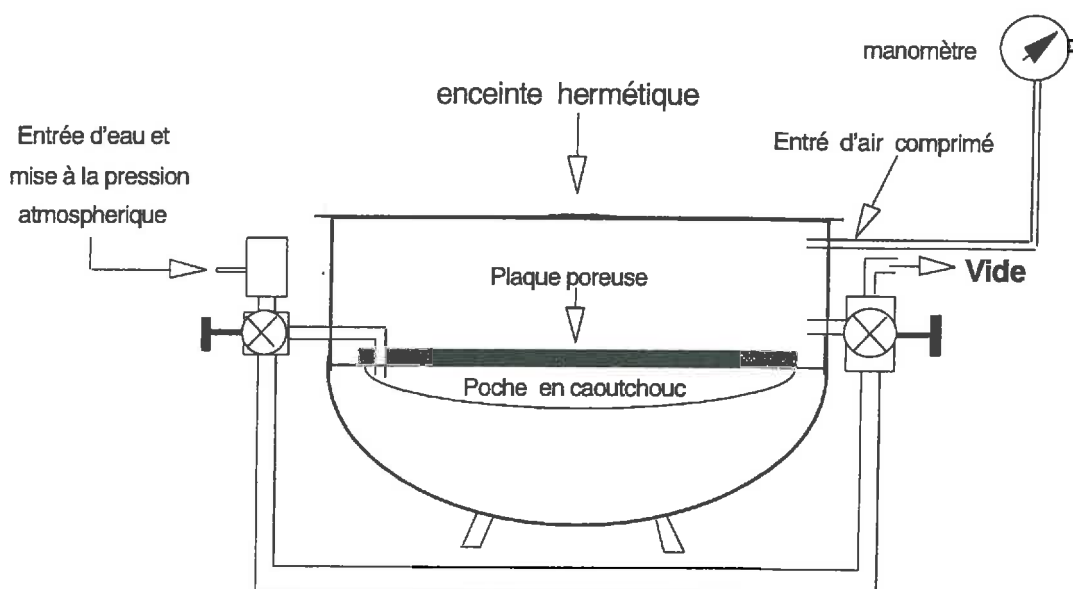
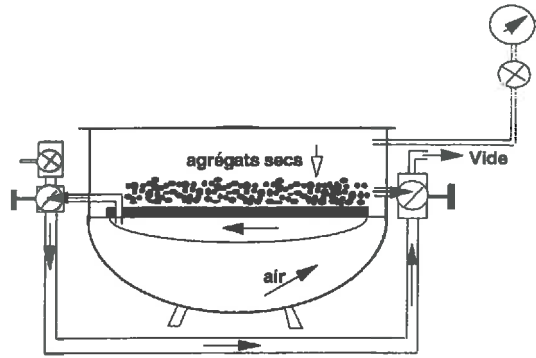
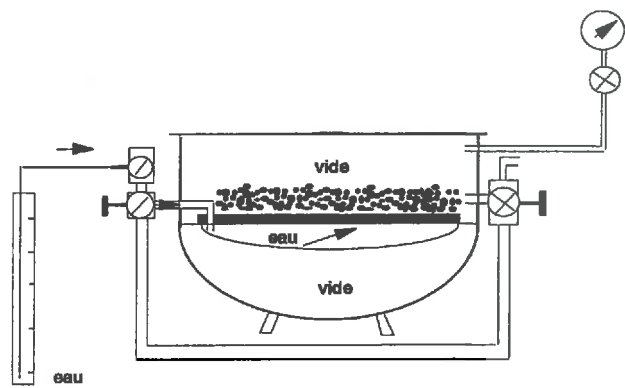


Fig. 2-9. Presse à plaque céramique de Richards modifiée.

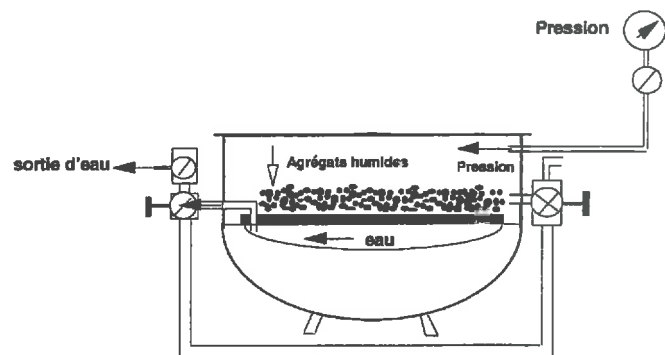
Les agrégats sont amenés aux teneurs en eau, ou mieux aux potentiels hydriques visés, en deux temps dans une presse de Richards modifiée (Fig.2-9), à plaque céramique. Les agrégats sont amenés à potentiel nul sous vide (Fig.2-10-a), l'apport d'eau (Fig.2-10-b) est effectué progressivement au travers de la plaque poreuse, sur laquelle ils sont disposés, jusqu'à saturation et obtention du potentiel nul (72 heures). Les agrégats sont ensuite soumis jusqu'à équilibre à une pression pneumatique égale au potentiel visé (Fig.2-10-c) alors que la partie inférieure de la plaque poreuse est maintenue à la pression atmosphérique. A l'ouverture de l'enceinte de mise en pression les agrégats sont en équilibre avec le potentiel hydrique visé (72 heures).



a- Mise sous vide du système.



b- Alimentation en eau sous vide de la plaque poreuse.



c- Mise en pression pneumatique des agrégats saturés.

Fig.2-10. Procédure d'humectation des agrégats et d'application de mise en équilibre de potentiel.

Cette méthode induit des relations potentiels - teneurs en eau légèrement différenciées selon la granulométrie des agrégats, sans qu'aucune explication satisfaisante autre qu'un effet incontrôlé n'existe (Fig.2-11). Pour un même potentiel les échantillons d'agrégats des différents calibres présentent des teneurs en eau qui diffèrent au maximum de 2.5 à 3 points. Seule la terre fine (<2mm), en se détachant nettement du faisceau de courbes pour un potentiel de 100 hPa présente un comportement interprétable, les pores créés par l'assemblage des agrégats et des micro-agrégats sont de dimensions telles qu'ils retiennent de l'eau aux succions les plus faibles (100 hPa).

### Chantepie, Allée.

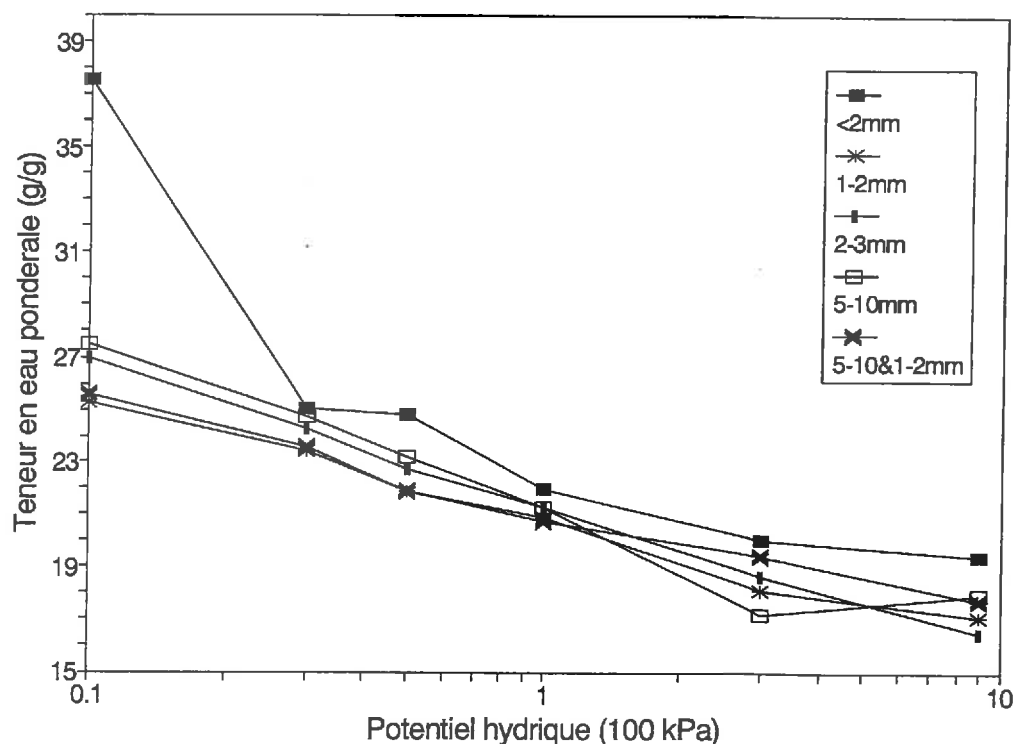


Fig. 2-11. Courbes Potentiel hydrique - Teneur en eau pour différents calibres d'agrégats

On a imposé les états structuraux après compactage, en fixant, pour les différents calibres d'agrégats, les couples (potentiel avant compactage ;  $e_s$  finaux),  $e_s$  prenant les valeurs 0, 0.1, 0.2. On mesurera donc les pressions de compactage permettant d'obtenir les niveaux de compacité visés, et on classera les morphologies induites.

Les résultats de mises en charges visant à atteindre un indice des vides structuraux nul seront principalement utilisées dans l'analyse du processus de compression. Les autres serviront à étudier les morphologies obtenues puis ultérieurement (Chapitre 3) les résistances mécaniques induites par les différents niveaux de compacité atteints.

## B. Matériels et modalités de compactage

### 1. Principes communs

Dans toutes les expérimentations on applique à l'échantillon un test de compression uniaxiale confiné. Le massif d'agrégats est soumis à l'action d'un piston coulissant verticalement dans une cellule cylindrique indéformable d'un diamètre de 70 mm ; l'éprouvette est donc freinée latéralement et ne peut pas fluer.

Deux sortes de capteurs sont utilisées :

- des capteurs de déplacement de type inductif à résolution infinie, qui permettent dans la configuration retenue d'appréhender la dizaine de  $\mu\text{m}$  sur 3 cm de course.

- un capteur de force, à jauges de contraintes disposées en pont de Wheatstone à l'intérieur d'un anneau dynamométrique, qui permet d'appréhender le  $1/10^{\text{ème}}$  de daN sur une étendue de mesure de 0 à 1000 daN, avec une tolérance de + 200 daN. Compte tenu du diamètre du piston, on peut donc mesurer des pressions appliquées sur le massif d'agrégats comprises entre 0 et  $26 \cdot 10^2 \text{ kPa}$  ( $26 \text{ kg/cm}^2$ ) avec une résolution de  $2.6 \cdot 10^{-1} \text{ kPa}$  ( $2.6 \text{ g/cm}^2$ ).

Lors des tests de compression, les capteurs sont reliés à une acquisition de données (Campbel datalogger 21X) programmée de telle sorte que chaque voie de mesure soit scrutée tous le  $1/10^{\text{ème}}$  de seconde, ce qui permet une restitution satisfaisante des cinétiques de mise en charge - déformation.

### 2. Déformation imposée, effort mesuré

La Figure 2-12 donne une représentation schématique de l'appareil utilisé pour le compactage. Il est donc constitué d'un moule cylindrique et d'un piston. L'échantillon peut être placé entre deux plaques amovibles, qui peuvent être poreuses et permettre le drainage, en cas de consolidation. On peut ainsi effectuer des essais drainés ou non.

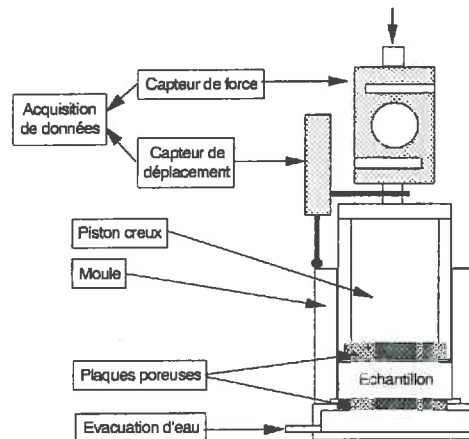


Fig. 2-12 Presse permettant un compactage uniaxial confiné, drainé ou non, (déformation imposée / effort mesuré)



Le corps du capteur de déplacement est fixé au piston, l'extrémité de la tige coulissante assurant la mesure du déplacement est placée au contact du moule. La partie supérieure du capteur de force est fixée à une poutre horizontale immobile, la partie inférieure est fixée au piston. La compression est due à l'ascension du moule, le piston restant fixe. Un vérin hydraulique assure le déplacement du moule. La vitesse de déplacement du vérin a été fixée à 10mm/min ( $1.67 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ ).

Pour imposer un indice des vides structuraux après compactage, on calcule le volume d'agrégats qu'il faut mettre dans un volume donné  $V$  de la cellule, déterminé par la position du piston dans le moule. Pour chaque teneur en eau, on estime la masse humide d'agrégats à soumettre au test, à partir du volume d'agrégats nécessaire et de leur courbe de retrait. On mesure alors la pression qu'il faut appliquer pour amener le massif d'agrégats au volume  $V$ . De manière à standardiser le protocole de mise en charge, une fois le volume  $V$  atteint, on a attendu 1 minute avant de sortir l'éprouvette de la cellule. Pendant cette minute, la compression pouvait se poursuivre ainsi qu'une éventuelle consolidation, et les diminutions de volume de l'éprouvette pouvait entraîner de fait une baisse simultanée de l'intensité de la charge. En toute rigueur donc les éprouvettes n'ont pas subi une mise en charge constante d'une minute en fin de cinétique de compression, protocole qui eut nécessité un système d'asservissement relativement lourd.

Ce volume  $V$  est choisi classiquement de manière à ce que la hauteur de l'éprouvette n'excède pas  $1/3$  du diamètre environ, l'expérience montrant qu'ainsi on minimise les effets de concentration des contraintes induisant hétérogénéités et gradients de densité dans l'éprouvette. En pratique on visera une hauteur de l'éprouvette de 24 mm pour un diamètre de 70 mm.

Pour des teneurs en eau telles qu'il n'y ait pas de consolidation, il n'y a pas d'indétermination de la teneur en eau de l'éprouvette à tout moment du test, on l'estime à 0.5 point près avant compactage sur une aliquote des agrégats utilisés pour le test, on la connaît précisément à la sortie du moule (mesure de la masse humide à la sortie du moule, mesure du poids sec après les tests de résistance mécanique du Chapitre 3).

Par contre lorsqu'il y a consolidation et drainage, on estime à 0.5 point près l'humidité sur une aliquote avant compactage, on la connaît à la sortie du moule comme ci-dessus, mais on ne connaît pas son évolution au cours du compactage. Il semble de plus qu'une partie de l'eau drainée vers les plaques poreuses regagne l'échantillon lorsque le chargement est supprimé. Il y a donc une indétermination de la teneur en eau sous charge.

### 3. Effort imposé, chargement cyclique

Pour travailler à effort imposé et chargements cycliques, on a utilisé le même type de cellule de compression que précédemment, mais avec un bâti de mise en charge à système

pneumatique (Fig.2-13). La mise en charge pneumatique permet d'une part un chargement et un déchargement quasi-instantané, et permet d'autre part de maintenir constante la pression quelle que soit la déformation de l'éprouvette. On peut donc contrôler précisément l'intensité de la pression, la durée de mise en charge même courte, et suivre la cinétique de déformation au cours du temps .

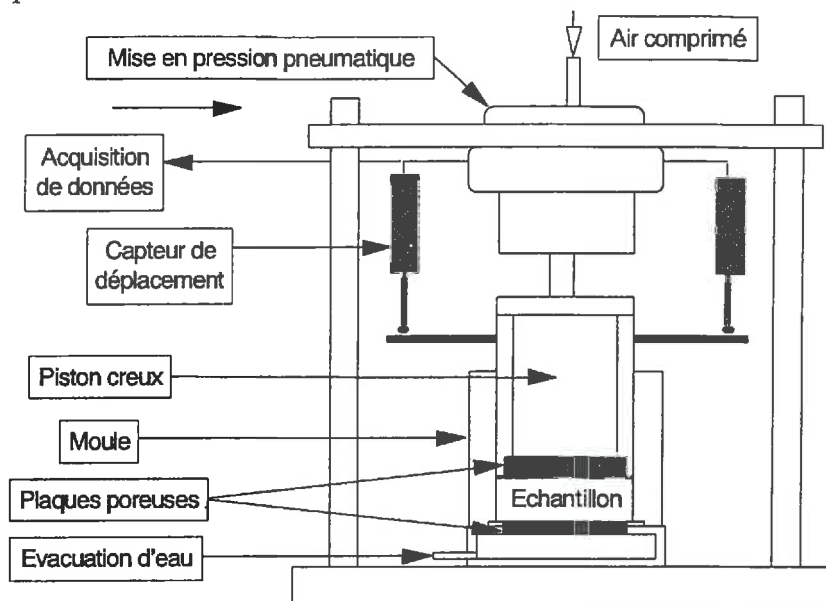


Fig. 2-13. Presse permettant un compactage uniaxial confiné drainé et cyclique (effort imposé, déformation mesurée)

Pour explorer l'effet de chargements cycliques, on s'est limité, essentiellement pour des raisons de temps de préparation des échantillons (mise à l'équilibre de potentiels), à étudier l'effet d'une pression moyenne dans la gamme des pressions rencontrées ( $4 \cdot 10^2$  kPa). Chaque cycle est constitué d'une mise en charge de 1 minute, suivie d'une période hors charge de 1 minute. Ce temps de mise en charge, bien que court est une maximisation des temps de contact rencontrés, qui permet de limiter la variabilité des résultats issue des légères fluctuations des temps de réponse à la sollicitation, mais aussi de maximiser les résultats du compactage et ses conséquences. L'effet de chargements constitués de 1, 2, 4 et 8 cycles a donc été étudié.

### C. Classement morphologique

Les morphologies des massifs compactés ont été déterminées a posteriori une fois le test de résistance mécanique effectué (Chapitre 3). Le plan de rupture a servi de plan d'observation des traits morphologiques. Les classes morphologiques définies pour les mottes naturelles ont été utilisées (Fig.2-14). Cependant les massifs, du fait de leur constitution à base d'agrégats calibrés, ne présentent jamais de morphologie de type Z. A contrario, cette

caractéristique peut leur conférer une morphologie, nommée  $Y_c$ , caractérisant un compactage serré des agrégats de 5 à 10 mm dans les massifs, alors que la morphologie  $Y$  caractérise un arrangement plus lâche.

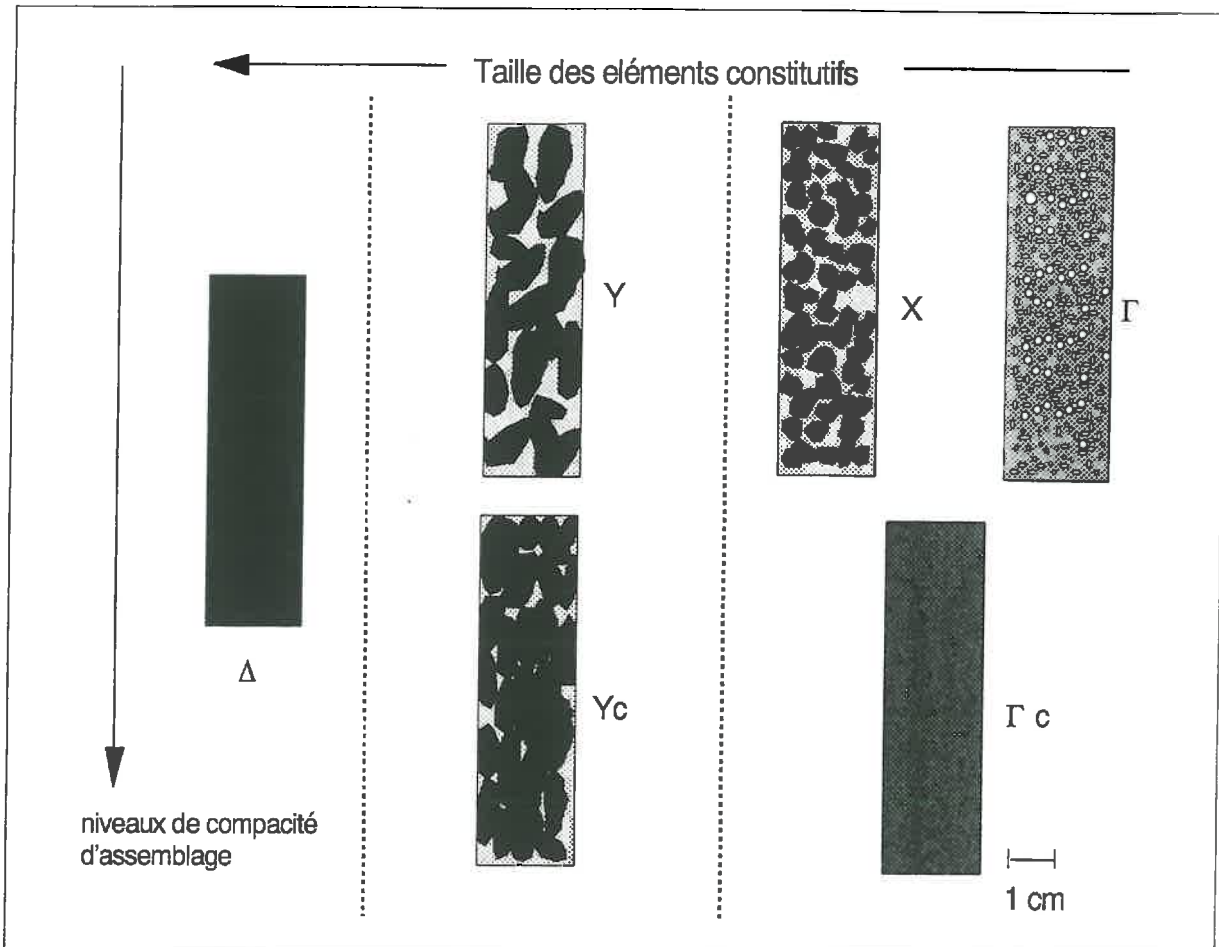
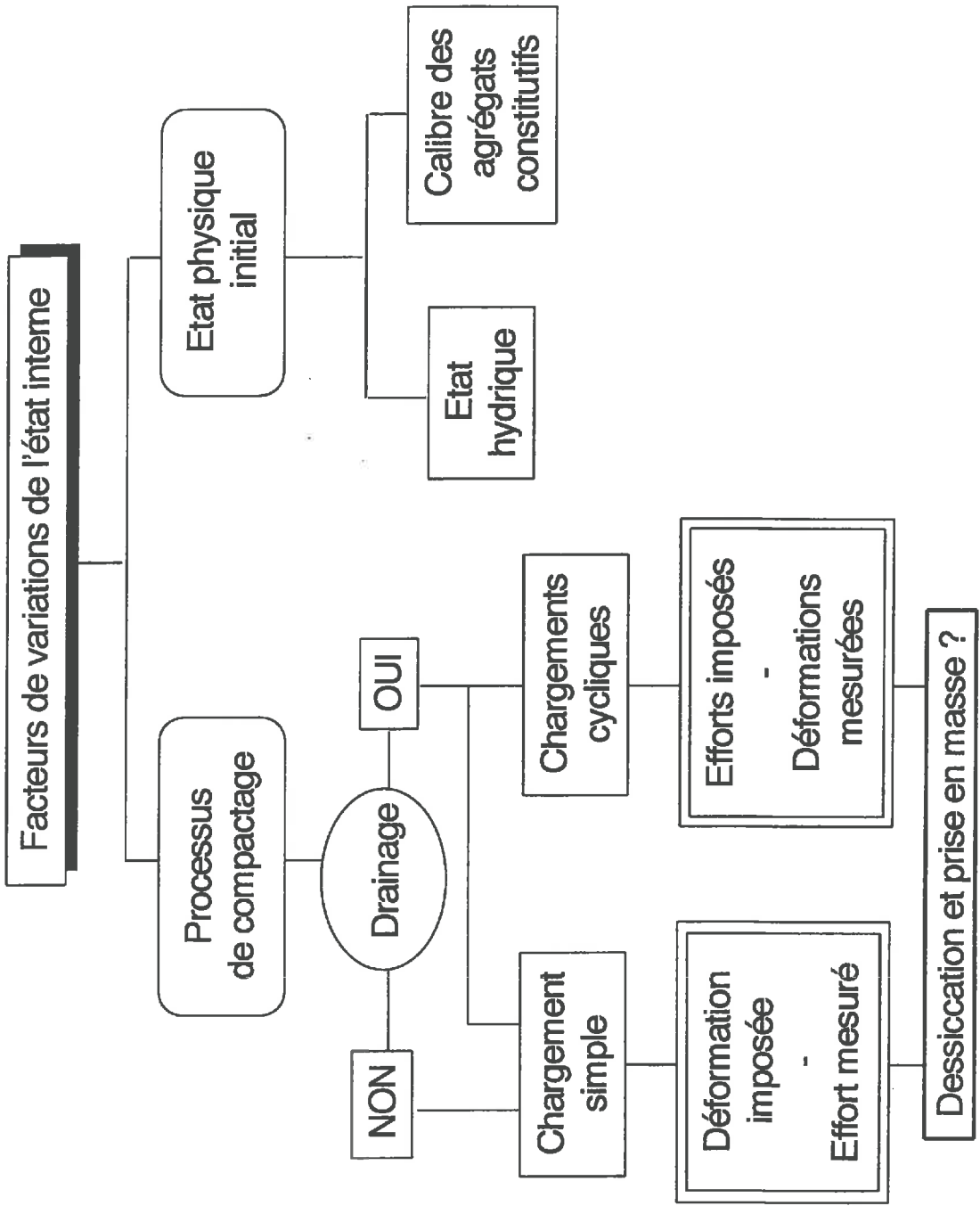


Fig. 2-14. Adaptation de la classification morphologique aux massifs compactés, observés à l'état sec.

#### IV. RESULTATS

Dans cette partie, on analysera les mécanismes de la déformation suivant le processus de compactage. Ainsi on étudiera les cinétiques de compression lors de chargements simples tout d'abord, sans possibilité de drainage, puis avec drainage. Enfin, pour une seule pression de compactage on étudiera les effets de chargements cycliques avec drainage.

Dans tous les cas de figures, on déterminera les différentes morphologies résultant des divers états physiques initiaux du matériau ainsi que des diverses modalités de compactage.



**Hypothèses**



Facteurs de formation de  $\Delta$  :

- \* tassement en conditions humides
- \* chargements successifs
- \* compactage avec consolidation
- \* calibre des éléments structuraux à l'état (i)

**Protocole expérimental :**

Dispositif	Variable imposée	Var. mesurées
Compression sans drainage	$e_s$	P et $e_s$
	0	
	0.1 0.2	
Compression avec drainage	$e_s$	P et $e_s$
	0	
	0.1 0.2	
Compression en cycles	P	$e_s$

**Variables étudiées :**

Pot. hyd.	Calibres
-10 — $\blacktriangleright$ -900 kPa	5
-10 — $\blacktriangleright$ -900 kPa	5
-10 et 30 kPa	3

## A. Chargement simple

### 1. Non drainé

Les expériences qui suivent ont été effectuées avec la presse décrite Figure 2-12. On a vérifié qu'il n'y avait eu qu'un drainage minime au cours de la compression, en comparant les humidités estimées avant le test sur aliquote et, après le test, sur le massif entier à la sortie du moule (Fig.2-15).

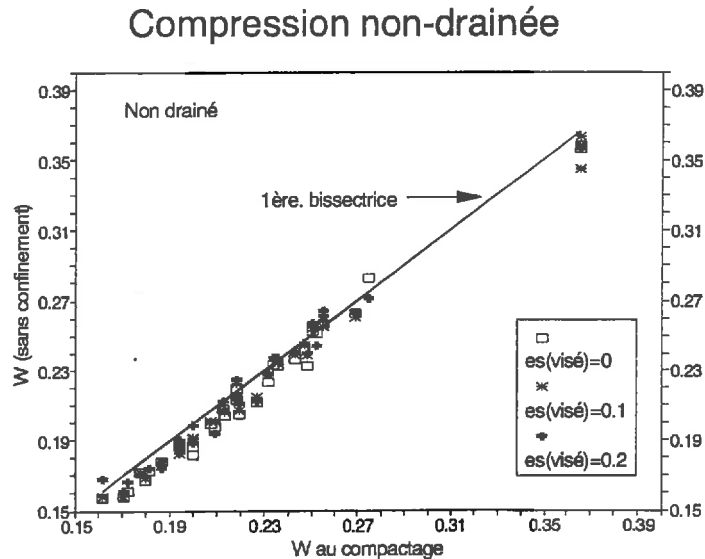


Fig. 2-15. Ecart entre teneur en eau initiale et teneur en eau à la sortie du moule (hors confinement) pour les massifs des expériences non drainées.

#### a) Cinétiques de mise en charge

Les cinétiques de mise en charge sont les relations directement obtenues à partir de l'enregistrement simultané

- des variations de volume imposées à l'éprouvette
- des variations de la pression que nécessite une telle déformation.

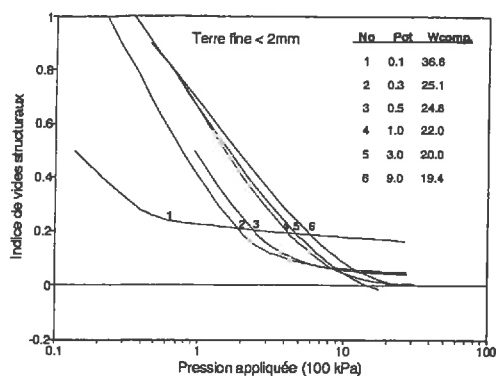
Pour étudier les variations de compacité sous charge, on exprime ces relations sous la forme  $e_s = f(P)$ . On les porte dans des coordonnées semi-logarithmiques (Fig.2-16).

Lorsqu'on se situe dans la gamme des indices des vides structuraux supérieurs à 0.2, on constate que

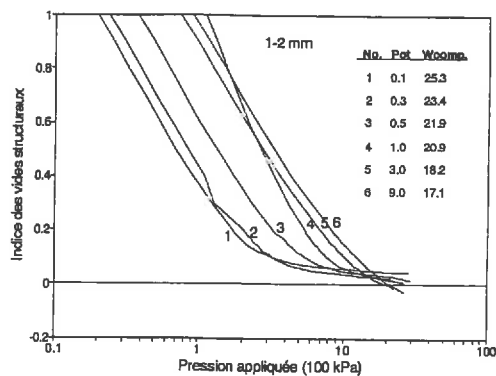
- dans ces coordonnées la relation est bien linéaire,
- la pression requise pour atteindre un  $e_s$  donné est d'autant plus élevée que la teneur en eau est faible.

Au delà par contre ce schéma disparaît, et il est d'autant plus difficile (voire impossible) d'atteindre un indice des vides structuraux nul que la teneur en eau est élevée.

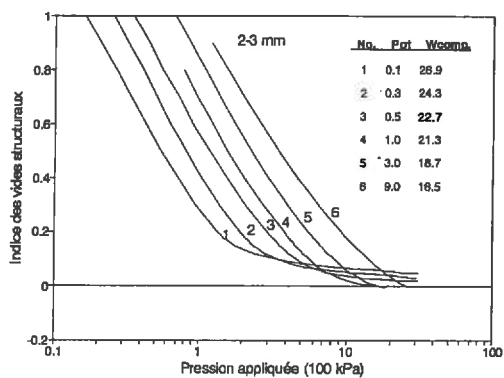
## Compression Non-Drainée



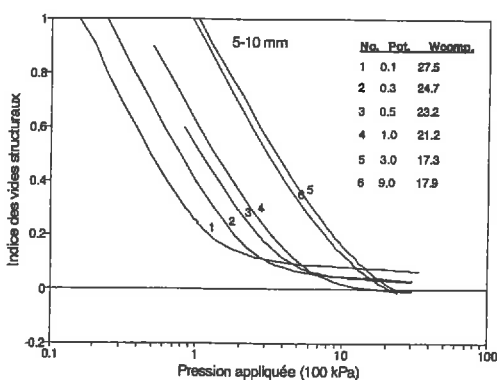
a- Terre fine &lt; 2 mm



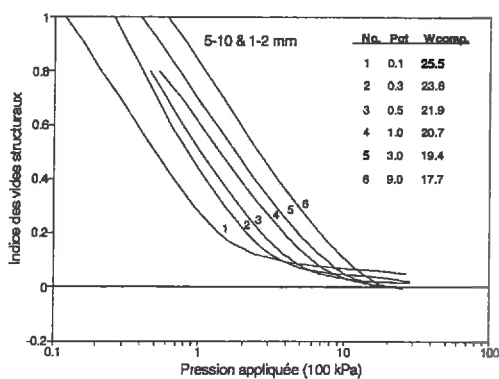
b- 1-2 mm



c- 2-3 mm



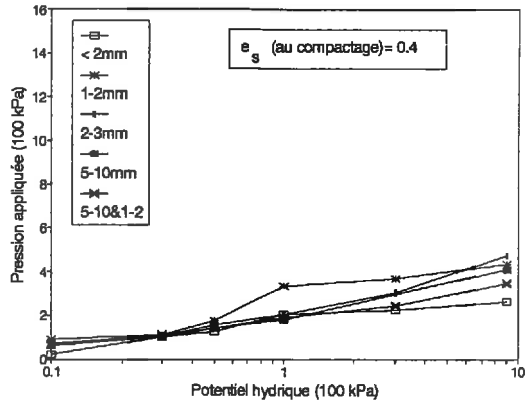
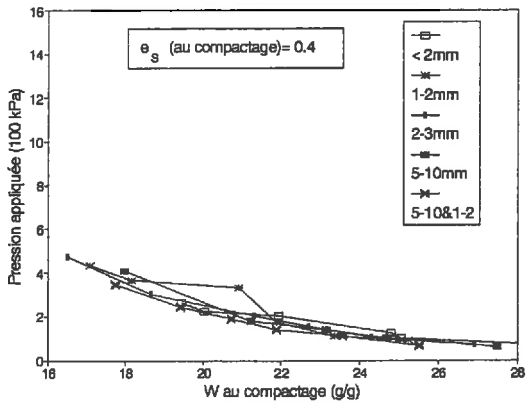
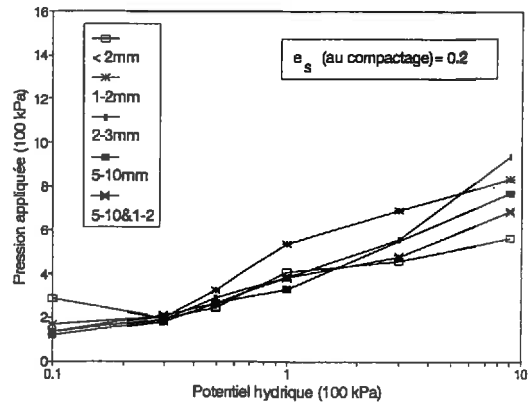
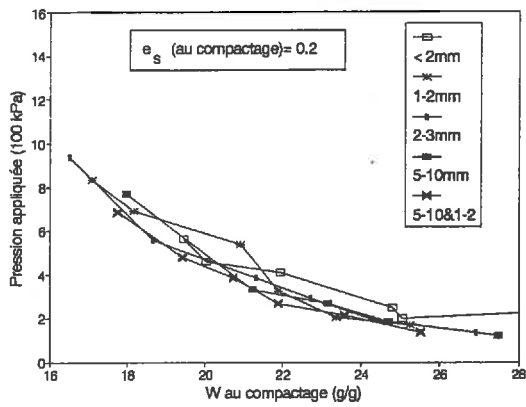
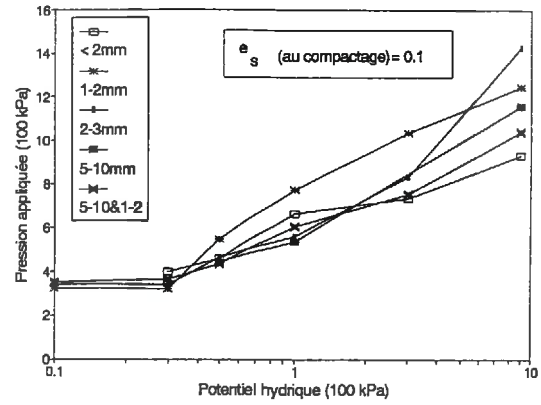
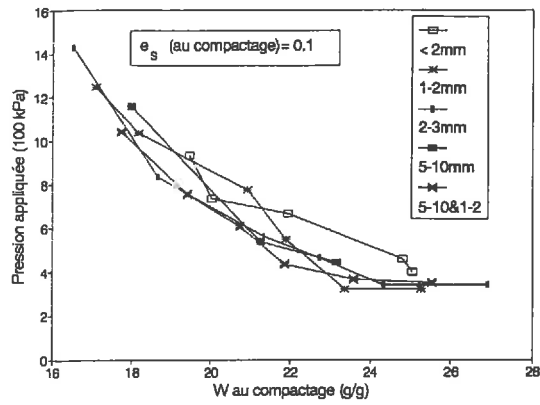
d- 5-10 mm



e- 5-10 &amp; 1-2 mm

Fig. 2-16. Relation entre pression appliquée et indice des vides structuraux lors du compactage des massifs pour différents calibres ; échelle logarithmique.

## Compression Non-Drainée



a) Teneurs eau initiales.

b) Potentiels hydriques initiaux.

Fig.2-17. Relation entre a) la teneur en eau au compactage b) le potentiel hydrique au compactage, et les pressions  $P_{0.1}$ ,  $P_{0.2}$ ,  $P_{0.3}$  nécessaires pour atteindre respectivement les valeurs de  $e_s$  de 0.1, 0.2, 0.3 .



Mise à part le cas de la terre fine, les familles de cinétiques de mise en charge correspondant aux différents calibres étudiés présentent des comportements peu différenciés.

Ainsi, en portant (Fig.2-17-a) les pressions  $P_{0,1}$ ,  $P_{0,2}$ ,  $P_{0,4}$  respectivement nécessaires pour atteindre les indices des vides structuraux  $e_s = 0.1, 0.2, 0.4$  en fonction de la teneur en eau au compactage (à partir des données de la Fig.2-16), on constate que les différents calibres ont des comportements très voisins quelle que soit la teneur en eau dans la gamme explorée. La dispersion des points autour de la tendance est d'autant plus faible que l'indice des vides structuraux visé est élevé, et que la taille des agrégats est grande.

Par contre, en portant les potentiels hydriques en abscisse on constate (Fig.2-17-b) que l'on peut analyser l'étalement des pressions  $P_{0,1}$ , pour le potentiel de 900 kPa, à la fois en terme de calibre, et de variabilité expérimentale de la relation potentiel-teneur en eau. En effet pour un potentiel de 900 kPa on peut admettre que l'eau est exclusivement contenue dans les agrégats et que les teneurs en eau devraient être identiques pour tous les calibres. En considérant les trois calibres où les teneurs en eau ( $W = 17.5\%$ ) ne sont pas significativement différentes (1-2 mm; 5-10 mm; et le mélange des deux) on peut interpréter le classement des  $P_{0,1}$  comme la manifestation d'un effet calibre. Plus l'étalement des granulométries est important plus  $P_{0,1}$  est élevé. Par ailleurs, comme le montrent les calibres (<2 mm; 2-3 mm)  $P_{0,1}$  augmente quand la teneur en eau est plus faible, et inversement. Bien que la dispersion des teneurs en eau soit semblable d'un potentiel à l'autre on constate que cet effet calibre s'atténue quand le potentiel hydrique (en valeur absolue) diminue. Ces résultats sont cohérents avec les résultats de Willat (Fig.2-3 p55).

En regroupant les cinétiques de compactage par potentiel hydrique on fait mieux apparaître (Fig.2-18) qu'il existe, dans les conditions du test, deux types de comportements en fonction du potentiel visé pour le compactage  $\psi_c$ .

- Lorsque  $|\psi_c| < 100$  kPa,  $e_s$  tend vers un état d'équilibre supérieur à zéro, dont la valeur est apparemment liée à la teneur en eau.

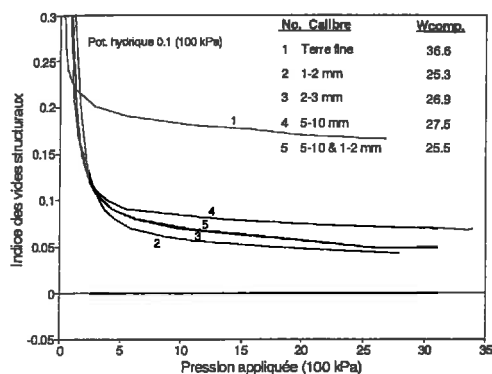
- Lorsque  $|\psi_c| \geq 100$  kPa, c'est à dire pour les succions les plus élevées, on atteint  $e_s = 0$ .

Si on analyse l'effet des fluctuations des teneurs en eau pour un même potentiel hydrique, on constate que :

- lorsque  $|\psi_c| > 100$  kPa le compactage nécessite des pressions d'autant plus fortes que le matériau est sec.

- inversement lorsque  $|\psi_c| < 100$  kPa bien que la majeure partie de la déformation ait lieu pour des pressions relativement faibles ( $P_{0,1} \leq 500$  kPa) au delà il semble que l'éprouvette devienne incompressible, en effet les pressions augmentent rapidement sans que

l'on enregistre de déformation significative. Cet effet apparaît pour des indices des vides structuraux d'autant plus grand que la teneur en eau est élevée.



a- Potentiel hydrique : 0.1 (100 kPa)

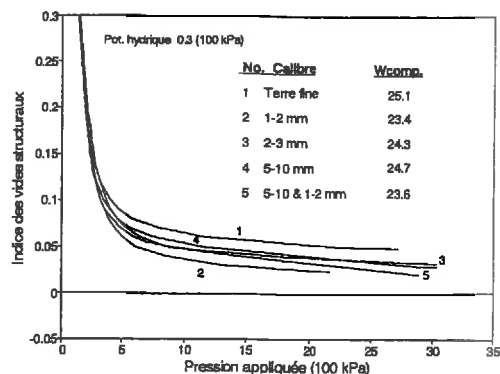
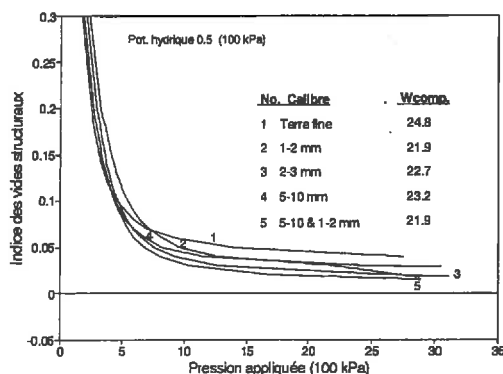
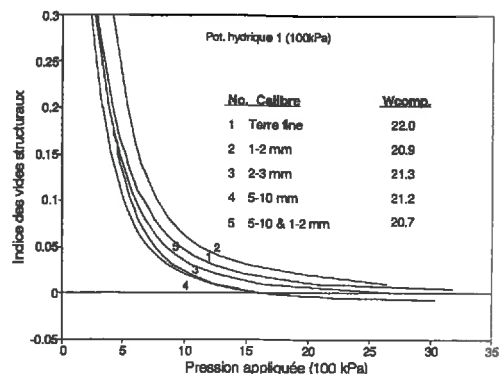
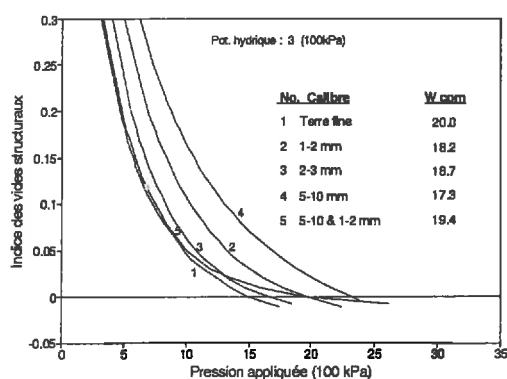
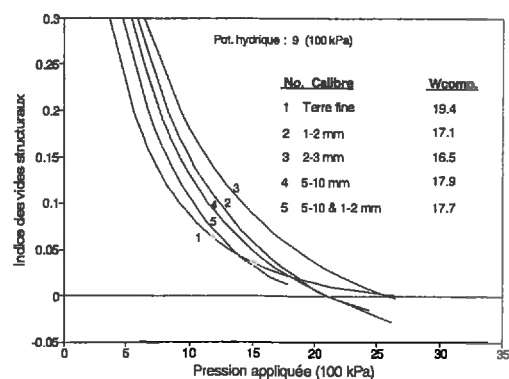
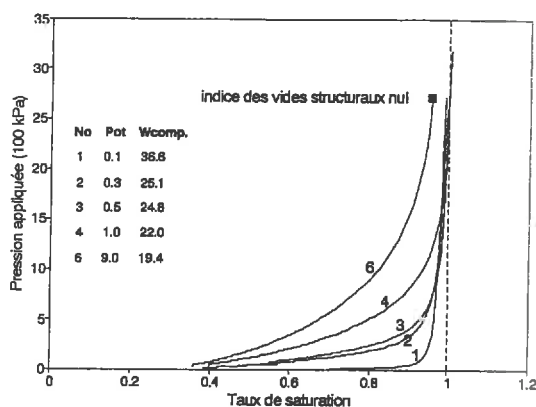
b- 0.3 (10<sup>2</sup> kPa)c- 0.5 (10<sup>2</sup> kPa)d- 1 (10<sup>2</sup> kPa)e- 3 (10<sup>2</sup> kPa)f- 9 (10<sup>2</sup> kPa)

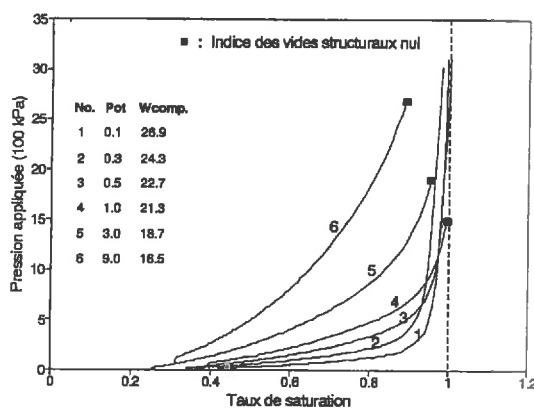
Fig. 2-18. Relation entre la pression appliquée et l'indice des vides structuraux (lors du compactage), pour chaque potentiel hydrique.

### b) Effet de l'évolution du taux de saturation

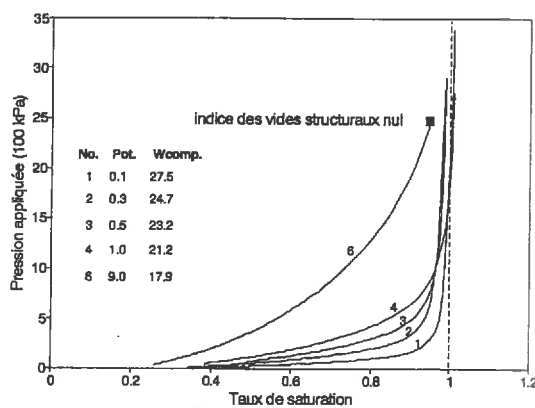
Les phénomènes décrits ci-dessus s'expliquent aisément en portant la pression en fonction de l'évolution du taux de saturation des éprouvettes (Fig.2-19)



a- Terre fine < 2 mm



b- 2-3 mm



c- 5-10 mm

Fig. 2-19. Evolution de la pression appliquée lors du compactage en fonction du taux de saturation.

Les points matérialisés par un carré plein correspondent à des éprouvettes pour lesquelles l'indice des vides structuraux a atteint la valeur nulle. Dans les autres cas la pression enregistrée atteignant la limite d'utilisation du capteur de force (i.e. une pression comprise entre 2500 et 3000 kPa), l'expérience a été arrêtée sans que l'indice des vides structuraux n'ait pu atteindre zéro.

On peut donc atteindre  $e_s = 0$  dans le cas où le taux de saturation reste inférieur à 1 tout au long de la phase de compression. Dans le cas inverse, la compression ne peut avoir lieu que par consolidation. Dans notre protocole de compactage, le drainage n'est pas possible l'éprouvette reste donc incompressible.

### c) état en fin de chargement, évolution après déconfinement et dessiccation

Le processus de compactage comporte certes une phase de compression dont on analysera l'état final induit au niveau des éprouvettes, mais aussi une phase de recouvrance après déchargement, susceptible de modifier l'état structural.

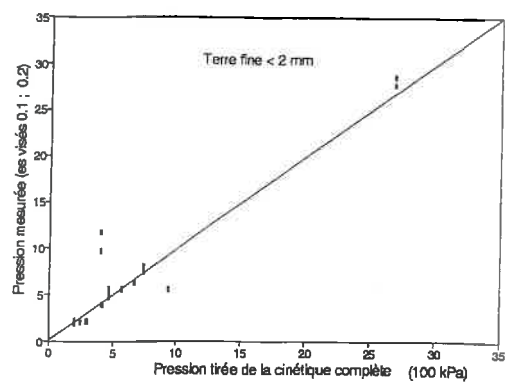
Pour étudier les comportements après déchargement une gamme suffisamment large d'états structuraux a été préparée par compactage. En plus des massifs dont les cinétiques de mise en charge visant à obtenir un indice des vides structural nul ont été présentées ci-dessus, on a préparé des massifs compactés en visant des valeurs d'indices des vides structuraux sous charge de 0.1 et 0.2, pour les 6 potentiels choisis. On peut vérifier que les différents massifs obtenus après compactage sont comparables en vérifiant que les cinétiques de mise en charge sont similaires quelques soient les indices des vides structuraux visés. Pour ce faire on peut prendre, pour cinétiques de référence à chaque teneur en eau, les cinétiques visant à obtenir un indice des vides structuraux nul et porter (Fig.2-19):

- en abscisses, les pressions  $P_{(e_s, w)}$  estimées à partir des cinétiques de référence choisies,

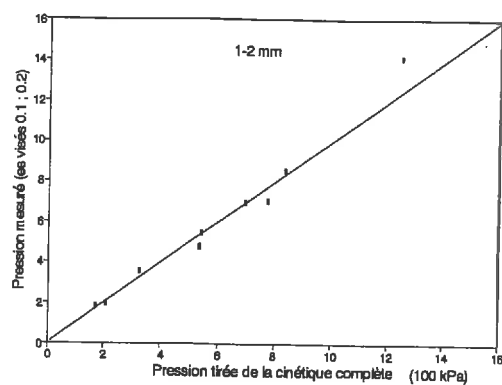
- et en ordonnées, les pressions  $P_{(0.1, w)}$  et  $P_{(0.2, w)}$  effectivement appliquées aux massifs pour que  $e_s$  atteigne les valeurs de 0.1 et 0.2, à chaque teneur en eau  $W$ , et pour chaque calibre.

Mis à part les quelques massifs qui s'écartent de la première bissectrice, on constate une bonne répétabilité du test de compactage.

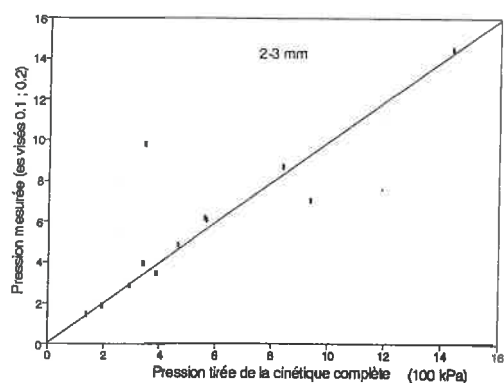
La dessiccation pouvant être un des facteurs permettant d'accéder à l'état  $\Delta$  les massifs ont été soumis à dessiccation ménagée sous silicagel pendant 1 mois. On cherchera à préciser l'effet de la dessiccation sur l'état physique après compactage.



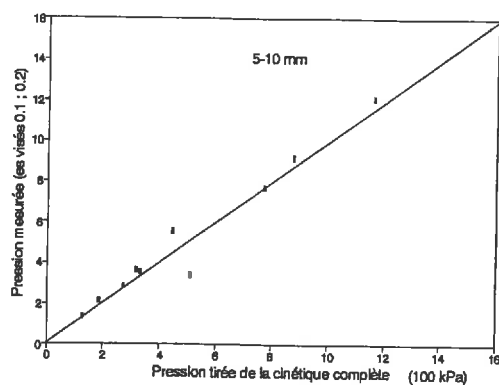
a- Terre fine &lt; 2 mm



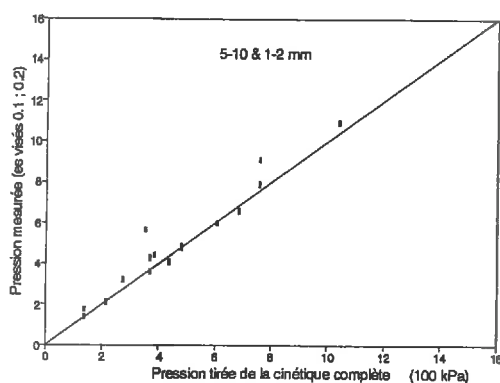
b- 1-2 mm



c- 2-3 mm

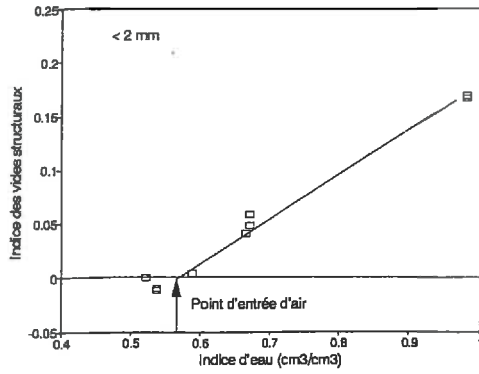


d- 5-10 mm

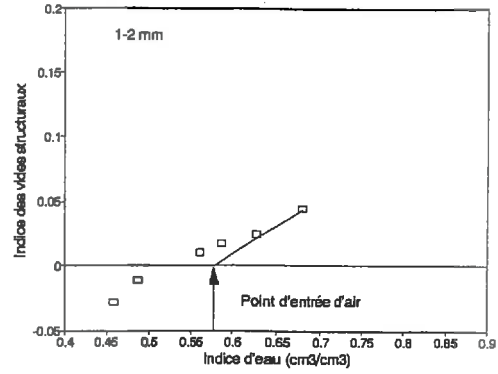


e- 5-10 &amp; 1-2 mm

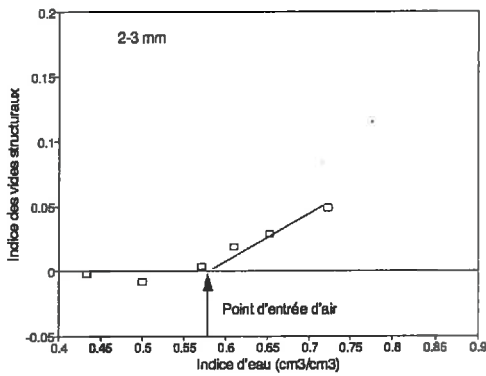
Fig.2-20. Relation entre les pressions  $P_{0.1}$ ,  $P_{0.2}$  estimées à partir de la cinétique complète de compactage et les pressions  $P_{0.1}$ ,  $P_{0.2}$ , mesurées sur des massifs pour lesquels on a visé respectivement  $e_s = 0.1$  et  $e_s = 0.2$ . Expérience Non-drainé.



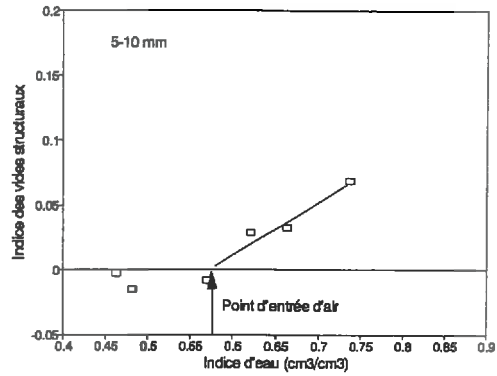
a- Terre fine &lt; 2 mm



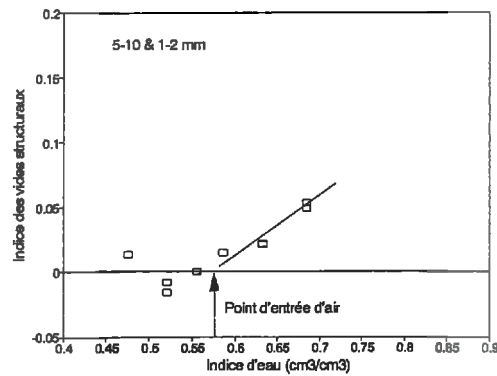
b- Calibre 1-2 mm



c- Calibre 2-3 mm



d- Calibre 5-10 mm



e- Calibre 5-10 et 1-2 mm

Fig.2-21. Relation entre l'indice d'eau et l'indice des vides structuraux des massifs pour lesquels on a visé  $e_s = 0$  à différentes teneurs en eau initiales ; expérience non-drainé.

## (1) états des massifs sous charges, limite de compressibilité

En portant les indices des vides structuraux, à la fois sous charge et en fin de cinétique de chargement, en fonction de l'indice d'eau au compactage, on constate (Fig.2-21) pour les différents calibres que :

- lorsque  $v > 0.57$  (soit  $W > 22\%$ ) on ne peut supprimer totalement le volume des pores structuraux, ce volume résiduel est directement proportionnel à l'indice d'eau,

- lorsque  $v < 0.57$  (soit  $W < 22\%$ )  $e_s$  est nul voire légèrement inférieur à zéro, en partie à cause des incertitudes de mesure et leurs répercussions dans l'analyse du système de porosité, mais aussi éventuellement à cause d'un léger drainage toujours possible par la partie inférieure du moule qui n'est pas strictement étanche.

Il semble, dans nos conditions expérimentales, que la teneur en eau seuil entre ces deux types de comportements corresponde au point d'entrée d'air de la courbe de retrait textural ( $W_{EA} \approx 21$  à  $22\%$ ), soit un potentiel de 102 kPa.

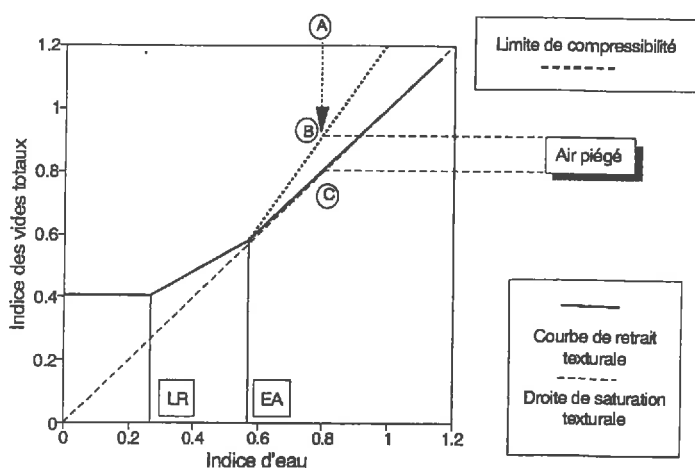
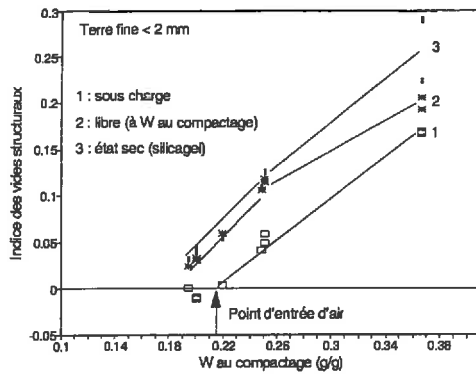


Fig. 2-22. Schéma du processus de compression relativement aux points principaux de la courbe de retrait.

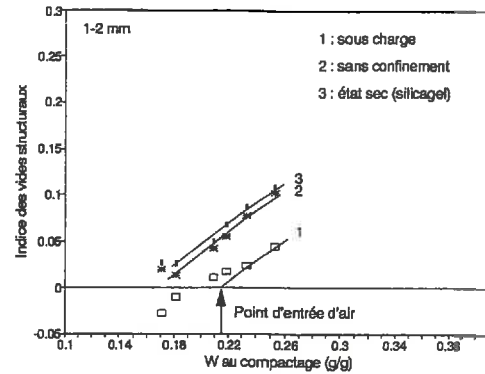
Ainsi (Fig.2-22) un massif dont l'état initial est matérialisé par le point (A) dont l'indice d'eau serait supérieur au point d'entrée d'air textural [EA] serait compressible jusqu'au point (B), et, à cause de l'air piégé, n'atteindrait pas le point (C) sur la droite de saturation texturale. Pour des indices d'eau inférieurs au point d'entrée d'air textural, les points (B) et (C) seraient confondus et la limite de compressibilité serait la courbe de retrait texturale

Pour les teneurs en eau supérieures au point d'entrée d'air on peut admettre que la probabilité que des films d'eau isolent des volumes d'air piégé augmente avec la teneur en eau. Ces volumes d'air seraient à l'origine de ce volume de vides structuraux résiduel le long de la droite de saturation texturale. Même si l'on admet que les agrégats sont soumis à une consolidation et que l'on surestime leur teneur en eau, il faudrait admettre que la répartition de l'eau entre l'espace poral textural et structural est modifiée. En l'absence de possibilité de

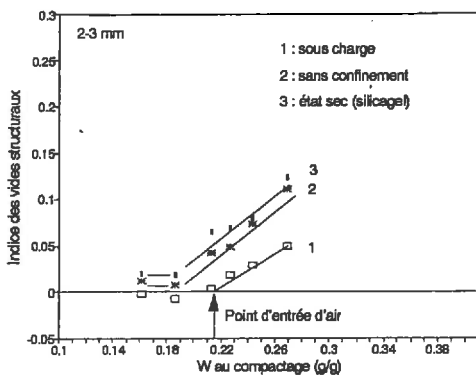
drainage du massif, le taux de saturation du massif resterait constant, et la compressibilité globale du massif serait la même.



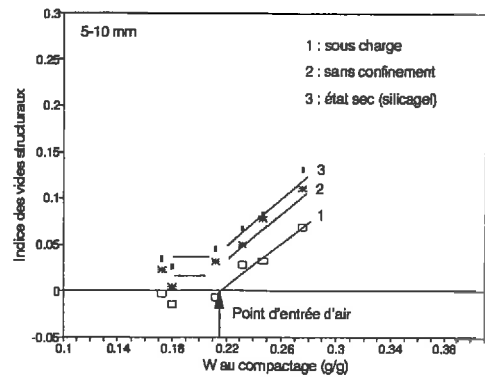
a- Terre fine &lt; 2 mm



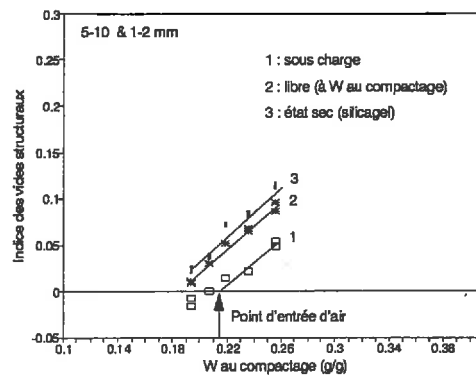
b- Calibre 1-2 mm



c- Calibre 2-3 mm



d- Calibre 5-10 mm



e- Calibre 5-10 et 1-2 mm

Fig.2-23. Evolution de l'indice des vides structuraux des massifs après déconfinement et dessiccation selon les teneurs en eau initiales, pour les massifs où on a visé  $e_s = 0$  ; expérience non-drainé.



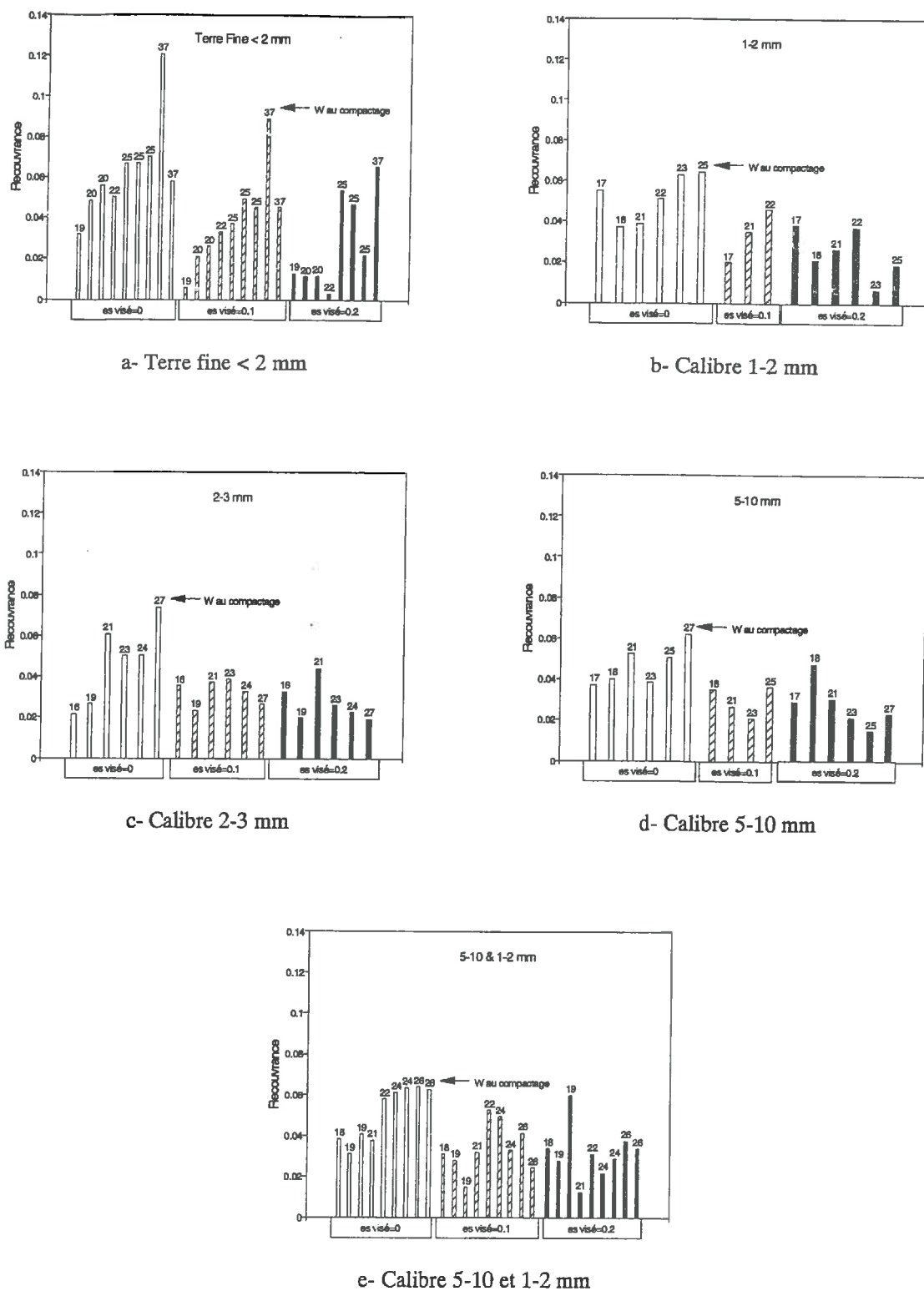


Fig. 2-24. Influence de l'indice des vides structuraux visé et de la teneur en eau pondérale au compactage sur l'amplitude de la recouvrance globale ( $e_{s(sec)} - e_{s(au\ compactage)}$ ). Expérience non-drainé.

Par contre pour les teneurs en eau inférieures au point d'entrée d'air, les agrégats n'étant plus saturés, ces films ne peuvent plus se former et l'air peut s'échapper lors de la compression. Sous charge on atteint alors un indice des vides structuraux nul.

## (2) effets du déconfinement et de la dessiccation sur l'état structural

Le déconfinement provoque, pour une teneur en eau donnée, une amplitude de recouvrance pratiquement indépendante du calibre des agrégats (Fig.2-23). Au delà du point d'entrée d'air, l'amplitude de recouvrance semble être un peu plus élevée qu'en deçà, laissant donc supposer un effet possible de l'élasticité de l'air piégé comprimé.

La dessiccation ne provoque qu'une très légère augmentation de l'indice des vides structuraux, apparemment indépendante de la teneur en eau au compactage.

En cumulant les effets du déconfinement et de la dessiccation en une recouvrance globale définie comme la différence d'indice des vides structuraux entre l'état sec et l'état sous charge ( $e_s(\text{état sec}) - e_s(\text{sous charge})$ ), on constate (Fig.2-24) que :

- pour chaque indice des vides structuraux visés, les différents calibres, mise à part la terre fine, présentent des recouvrances du même ordre de grandeur,

- pour tous les calibres, l'amplitude de recouvrance est plus élevée lorsqu'on cherche à atteindre un indice des vides structuraux nul, phénomène d'autant plus marqué que la teneur en eau est supérieure au point d'entrée d'air textural,

- pour la terre fine, la recouvrance augmente avec la teneur en eau.

La recouvrance est donc plus importante dans le domaine où l'on a pu mettre en évidence l'existence d'un volume d'air piégé résiduel incompressible sous les charges appliquées. Le déconfinement, en provoquant la détente de ce gaz, favorise la recouvrance. Ce phénomène, ainsi que dans une moindre mesure la dessiccation, contribuent à la difficulté d'obtenir par compactage non drainé un indice des vides structural nul.

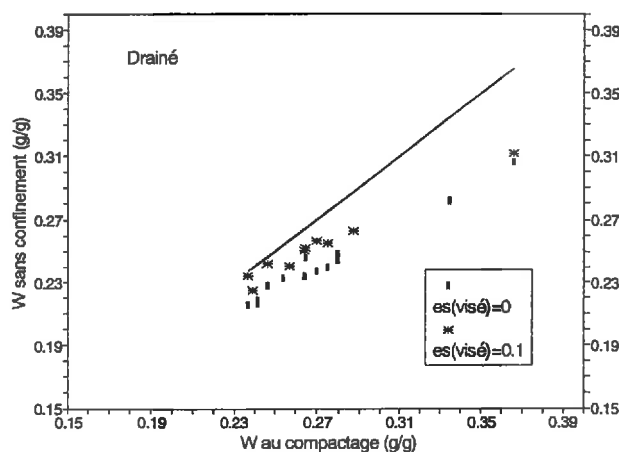
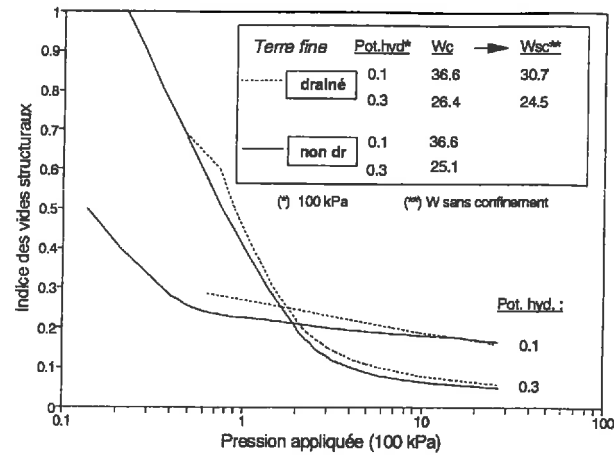
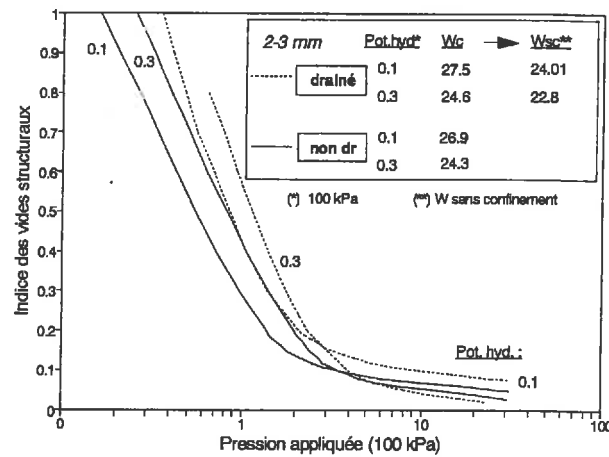


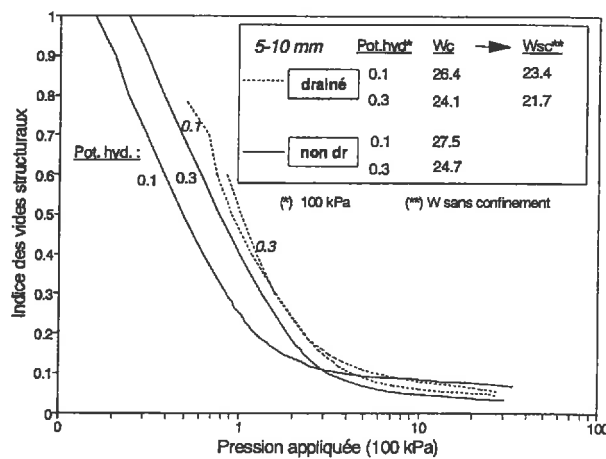
Fig. 2.25. Relation entre teneur en eau au compactage et teneur en eau à la sortie du moule (après déconfinement) pour les massifs des expériences drainées.



a- Terre fine &lt; 2 mm



b- 2-3 mm



c- 5-10 mm

Fig. 2-26. Comparaison des cinétiques de compression (drainées et non drainées) pour trois calibres d'agrégats. La compacité  $e_s$  des massifs non-drainés a été calculée à partir de la teneur en eau à la sortie du moule (après déconfinement).

## 2. Effet du drainage

Si le drainage est possible, les facteurs limitants sont alors le coefficient de transfert hydrique de l'éprouvette et la durée d'application de la charge. Dans notre protocole de compactage la consolidation reste limitée à quelques points de teneurs en eau (Fig.2-25). La faible durée d'application des charges est certainement responsable du drainage limité observé.

Quelles que soient les variations de teneurs en eau enregistrées par consolidation le compactage ne permet pas d'obtenir un  $e_s$  nul. Les indices des vides structuraux résiduels des tests drainés et non drainés restent très voisins, quels que soient les calibres étudiés (Fig.2-26).

Sauf pour la terre fine les massifs ayant subi un compactage avec ou sans drainage présentent, après déconfinement, des indices des vides structuraux résiduels similaires pour les mêmes teneurs en eau au compactage.

### B. Effets des chargements cycliques drainés

Les chargements cycliques ont été effectués avec la presse à compression uniaxiale confinée et permettant le drainage, présentée Figure 2-13. Comme pour les autres tests de compactage on a utilisé des agrégats de 2-3 mm issus de l'allée de Chantepie. On a privilégié les teneurs en eau les plus élevées (correspondant à des potentiel hydriques initiaux de 10 kPa et 30 kPa) pour lesquelles un compactage cyclique drainé est susceptible d'extérioriser au mieux l'effet d'une consolidation. La pression choisie est de 400 kPa.

On peut étudier l'effet propre de ces chargements cycliques drainés, à partir de la Fig.2-27 :

- D'une part on compare entre eux les indices des vides structuraux de massifs soumis à des cycles de mises en charge, dont le nombre varie en progression géométrique (1,2,4,8).

- D'autre part on prend comme références les cinétiques de compression sans drainage de massifs présentant des états d'hydratation initiaux les plus voisins possibles.  $W_c$  représente les teneurs en eau au compactage des massifs de cinétique de compression connue et  $W_i$  les teneurs en eau des massifs soumis aux chargements successifs.  $W_f$  représente la teneur en eau après drainage.

Les indices des vides structuraux de référence sont estimés pour une pression de 400 kPa, et représentés par les traits tiretés.

Chaque point correspondant à un nombre donné de mises en charge est renseigné par sa teneur en eau après compression et drainage ( $W_f$ ). Son indice des vides structuraux est calculé à partir de l'indice des vides textural à  $W_f$ .

## Charges cycliques, massifs drainés.

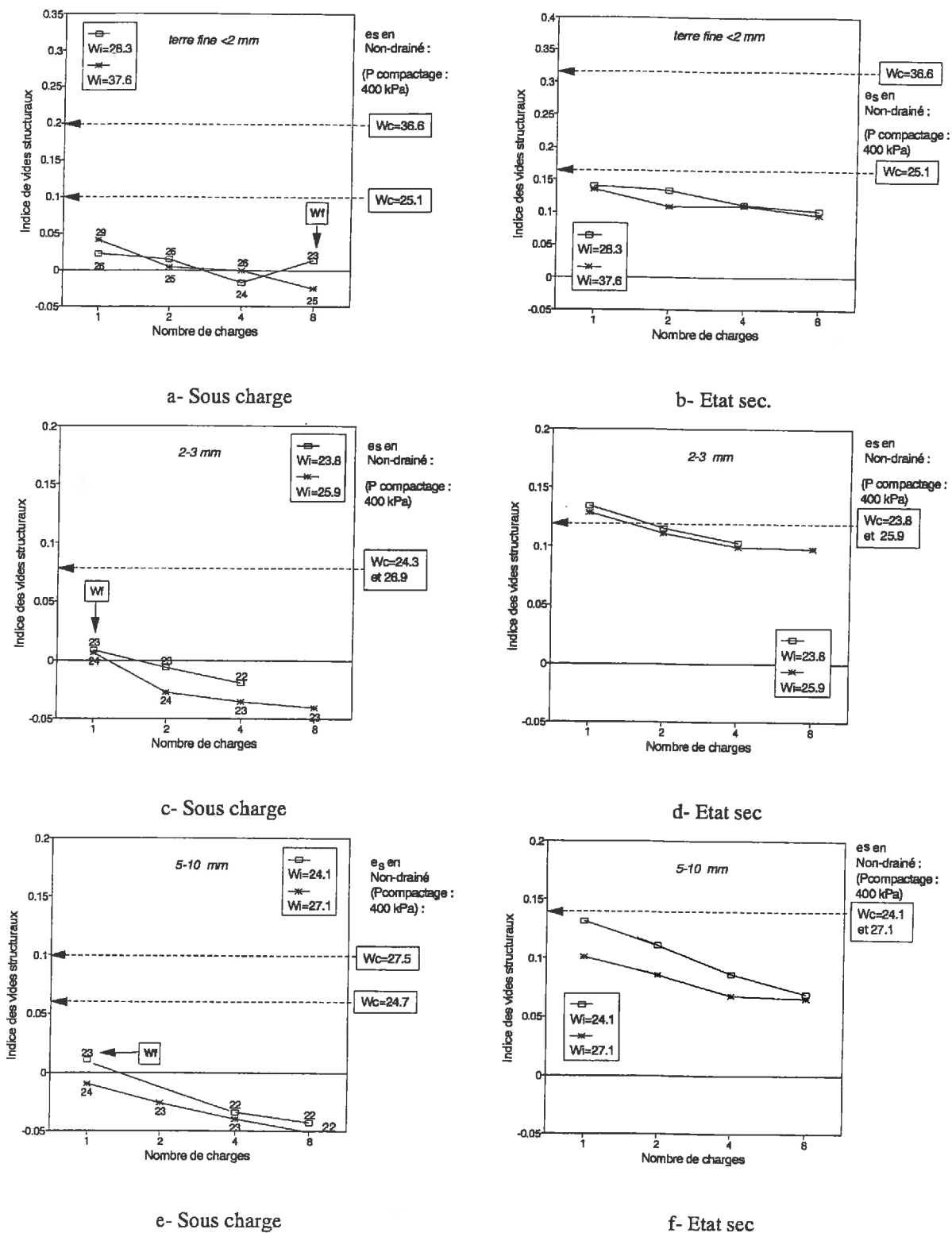


Fig. 2-27. Compacité des massifs en fonction du nombre de charges et de l'humidité au compactage initiale ( $W_i$ ). Le calcul de  $e_s$  sous charge a été effectué à partir de l'humidité final ( $W_f$ ) à la sortie du moule.

La première mise en charge de 400 kPa pendant une minute, dans un moule drainé, provoque deux phénomènes concomitants.

- Un drainage perceptible de 1 à 3 points de teneur en eau se manifeste selon les calibres, il est d'autant plus important que la teneur en eau initiale est élevée. Dans le cas de la terre fine, il atteint exceptionnellement jusqu'à 11 points de teneur en eau.

- Une diminution notable de l'indice des vides structuraux apparaît comparativement aux cas des compressions non drainées, présentées en référence. On atteint des  $e_s$  sous charge proche de zéro pour les deux potentiels étudiés.

Lorsque le nombre de mises en charge augmente, l'indice des vides structuraux sous charge peut devenir négatif, l'indice des vides texturaux étant sur-estimé. En effet, comme on ne connaît pas la teneur en eau des massifs sous charge, on utilise la teneur en eau après déconfinement ( $W_f$ ) dans l'estimation de l'indice des vides texturaux. Or l'expérience montre que le déconfinement provoque une réadsorption par le massif d'une partie de l'eau expulsée vers les plaques poreuses lors de la consolidation. Utiliser  $W_f$  conduit donc à une sur-estimation de la teneur en eau sous charge, et entraîne donc une sur-estimation de l'indice des vides texturaux sous charge.

Quels que soient les états physiques initiaux étudiés (Potentiel hydrique, et calibre des agrégats), les chargements cycliques drainés (pression de compression de 400 kPa) conduisent, sous charge, à un indice des vides structuraux nul.

Le déconfinement suivi d'une dessiccation ménagée (1 mois sous silicagel) s'accompagne d'une recouvrance globale importante. Si on admet que pour tous les nombres de chargements étudiés on a atteint sous charge un indice des vides structuraux nul, la recouvrance globale en terme d'indice des vides structuraux correspond à l'indice des vides structuraux après déconfinement. Cette recouvrance est d'autant plus faible que le nombre de chargements est grand, et que la taille des agrégats est élevée. Pour un seul chargement, mais aussi dans une moindre mesure pour des chargements répétés on retrouve les indices des vides structuraux après déconfinement et dessiccation de massifs de caractéristiques physiques initiales identiques compactés sans drainage possible. Ces indices des vides structuraux sont du même ordre de grandeur que ceux des mottes naturelles classées D dans le Chapitre 1.

### C. Morphologies résultantes

Les observations morphologiques des massifs cylindriques ont été effectuées, à l'état sec, sur des plans de rupture diamétraux.

Les tableaux 2-1 à 2-6, regroupés dans les pages suivantes, récapitulent les observations morphologiques correspondant à chacune des conditions physiques et modalités mécaniques de compactage testées.

Les indices des vides structuraux visés  $e_s = 0, 0.1, 0.2$  (sous charge) ont été obtenus pour trois classes de pressions appliquées, respectivement  $P_c > 15 \cdot 10^2$  kPa,  $P_c$  compris entre  $5 \cdot 10^2$  kPa et  $15 \cdot 10^2$  kPa, et  $P_c < 5 \cdot 10^2$  kPa.

Dans nos conditions expérimentales, après un compactage drainé ou non, l'apparition de mottes  $\Delta$  n'intervient qu'à partir de terre fine, pour des pressions en général supérieures à 500 kPa, et ce quel que soit le potentiel hydrique de l'échantillon.

Les morphologies  $\Gamma, X, Y$ , et leurs dérivés indicés  $c$  dépendent directement des calibres des agrégats compactés, respectivement 1-2 mm, 2-3 mm, 5-10 mm (seuls ou en mélange).

Les morphologies  $\Gamma, X$ , et  $Y$  apparaissent pour les  $e_s$  visés de 0.2 avec des pressions comprises entre 200 kPa et 1500 kPa.

Les morphologies  $\Gamma_c$  apparaissent à partir des calibres 1-2 et 2-3 mm, et principalement pour des  $e_s$  visés de 0, et des pressions supérieures à 1500 kPa.

Les morphologies  $Y_c$  apparaissent dans les mêmes conditions mais à partir des calibres 5-10 mm et du mélange 5-10/1-2 mm.

La classe des pressions comprises entre 500 et 1500 kPa, un peu large, conduit dans quelques cas aux morphologies  $\Gamma_c$  et  $Y_c$ .

On peut donc établir une concordance entre les critères de la classification morphologique, tailles des fragments et niveaux de compacité, et l'effet conjoint des conditions physiques initiales et des intensités de compactage.

L'espace poral structural résiduel, ainsi que les phénomènes de recouvrance, mis en évidence dans les paragraphes précédents contribuent certainement, à limiter les conditions d'occurrence de la morphologie  $\Delta$ , en permettant de distinguer visuellement les contours entre agrégats. Cette distinction est d'autant plus facile que les agrégats initiaux sont gros. A contrario, dans le cas de la terre fine cet espace poral résiduel est finement divisé et peu accessible à l'observation visuelle directe, ce qui conduit à classer dans la catégorie  $\Delta$  des mottes présentant des indices des vides structuraux à l'état sec compris entre 0 et 0.20, voire 0.25.

Tableau 2-1 Chantepie (Non Drainé). Mottes artificielles, Terre Fine <2mm. Répartition des morphologies observées à sec après rupture pour les différentes situations étudiées.

es visé	Pot. Hyd. en 10 <sup>2</sup> kPa	Pression appliquée (10 <sup>2</sup> kPa)		
		0-5	5-15	>15
0	0.1 0.3 0.5 1.0 3.0 9.0			$\Delta$ (b.air) $\Delta$ $\Delta$ (fiss) $\Delta$ $\Delta$ $\Delta$
0.1	0.1 0.3 0.5 1.0 3.0 9.0		$\Delta$ $\Delta$ $\Delta$ $\Delta$	$\Delta$ (b.air)
0.2	0.1 0.3 0.5 1.0 3.0 9.0	$\Delta$ (b.air) $\Gamma_c$ $\Gamma_c$ $\Gamma_c$ $\Gamma_c$	$\Delta$	

Tableau 2-2 Chantepie (Non Drainé). Mottes artificielles, 1-2mm. Répartition des morphologies observées à sec après rupture pour les différentes situations étudiées.

es visé	Pot. Hyd. en 10 <sup>2</sup> kPa	Pression appliquée (10 <sup>2</sup> kPa)		
		0-5	5-15	>15
0	0.1 0.3 0.5 1.0 3.0 9.0			$\Gamma_c$ $\Gamma_c$ $\Gamma_c$ $\Gamma_c$ $\Gamma_c$ $\Gamma_c$
0.1	0.1 0.3 0.5 1.0 3.0 9.0		X $\Gamma_c$ $\Gamma_c$	
0.2	0.1 0.3 0.5 1.0 3.0 9.0	$\Gamma$ $\Gamma$ $\Gamma$ $\Gamma$	$\Gamma$ $\Gamma$	



Tableau 2-3 Chantepie (Non Drainé). Mottes artificielles, 2-3mm. Répartition des morphologies observées à sec après rupture pour les différentes situations étudiées.

es visé	Pot. Hyd. en 10 <sup>2</sup> kPa	Pression appliquée (10 <sup>2</sup> kPa)		
		0-5	5-15	>15
0	0.1 0.3 0.5 1.0 3.0 9.0		$\Gamma_c$	$\Gamma_c$ $\Gamma_c$ $\Gamma_c$ $\Gamma_c$
0.1	0.1 0.3 0.5 1.0 3.0 9.0	X X	$\Gamma_c$  X X X	
0.2	0.1 0.3 0.5 1.0 3.0 9.0	X X X X	    X X	

Tableau 2-4 Chantepie (Non Drainé). Mottes artificielles, 5-10mm. Répartition des morphologies observées à sec après rupture pour les différentes situations étudiées.

es visé	Pot. Hyd. en 10 <sup>2</sup> kPa	Pression appliquée (10 <sup>2</sup> kPa)		
		0-5	5-15	>15
0	0.1 0.3 0.5 1.0 3.0 9.0			$Y_c$ $Y_c$ $Y_c$ $Y_c$ $Y_c$ $Y_c$
0.1	0.1 0.3 0.5 1.0 3.0 9.0	$Y_c$	Y $Y_c$  Y	
0.2	0.1 0.3 0.5 1.0 3.0 9.0	Y Y Y Y	    Y Y	

Tableau 2-5 Chantepie (Non Drainé). Mottes artificielles, 5-10 & 1-2mm. Répartition des morphologies observées à sec après rupture pour les différentes situations étudiées.

es visé	Pot. Hyd. en $10^2$ kPa	Pression appliquée ( $10^2$ kPa)		
		0-5	5-15	>15
0	0.1 0.3 0.5 1.0 3.0 9.0			$Y_c$ $Y_c$ $Y_c$ $Y_c$ $Y_c$ $Y_c$
0.1	0.1 0.3 0.5 1.0 3.0 9.0	$Y$ $Y_c$ $Y$	$Y_c$  $Y$ $Y$ $Y$	
0.2	0.1 0.3 0.5 1.0 3.0 9.0	$Y$ $Y$ $Y$ $Y$ $Y$	    $Y$	

Tableau 2-6 Chantepie (Drainé). Mottes artificielles ; toutes granulométries (G). Répartition des morphologies observées à sec après rupture pour les différentes situations étudiées.

Calibre	es visé	P.hyd. $10^2$ kPa	Pression appliquée ( $10^2$ kPa)		
			0-5	5-15	>15
<2	0	0.1 0.3			$\Delta$ (fiss) $\Delta$ (Fiss)
	0.1	0.1 0.3	$\Gamma_c$	$\Delta$ (b.air)	
1-2	0	0.1 0.3		$\Gamma_c$	$\Gamma_c$
	0.1	0.1 0.3	$\Gamma$	$\Gamma_c$	
2-3	0	0.1 0.3			$\Gamma_c$ $\Gamma_c$
	0.1	0.1 0.3	$\Gamma_c$ $X$		
5-10	0	0.1 0.3			$Y_c$ $Y_c$
	0.1	0.1 0.3	$Y$ $Y$		
5-10 & 1-2	0	0.1 0.3			$Y_c$ $Y_c$
	0.1	0.1 0.3	$Y_c$ $Y_c$		

## V. DISCUSSION ET CONCLUSIONS PARTIELLES

Quelles que soient les conditions physiques et mécaniques, il n'a pas été possible de générer de massif présentant un  $e_s$  nul après dessiccation. En utilisant des modalités d'application des charges et de teneurs en eau du sol compatibles avec les conditions les plus probables au champ, on retrouve expérimentalement au laboratoire la gamme de variation des porosité structurales des mottes naturelles de morphologies  $\Delta$  et analysées au Chapitre 1. Ceci donne une certaine crédibilité aux modalités de compactage explorées, mais surtout permet d'expliquer l'état structural des mottes naturelles, et notamment la quasi absence de mottes présentant une organisation strictement texturale ( $e_s = 0$ ).

Dans les conditions du laboratoire, il est difficile, même **sous charge**, d'obtenir en une seule action mécanique un indice des vides structuraux nul. Les conditions les plus favorables à l'obtention d'un tel état seraient :

- un compactage drainé ou non, pour des teneurs en eau au voisinage ou en dessous du point d'entrée d'air textural, mais l'intensité de la pression requise augmente quand la teneur en eau diminue,

- un compactage par chargements cycliques en condition drainée, l'état de compacité augmentant avec le nombre de chargements.

Au delà du point d'entrée d'air textural, un espace poral structural résiduel résiste à la compression. Exprimé en terme d'indice des vides structuraux, ce volume apparemment constitué d'air piégé, est incompressible dans nos conditions expérimentales et directement proportionnel à la teneur en eau.

**Après déchargement**, les éprouvettes présentent toutes une recouvrance qui s'accompagne d'une augmentation du volume de l'espace poral structural résiduel, ou de sa réapparition dans les quelques cas où le protocole de compactage l'avait éliminé.

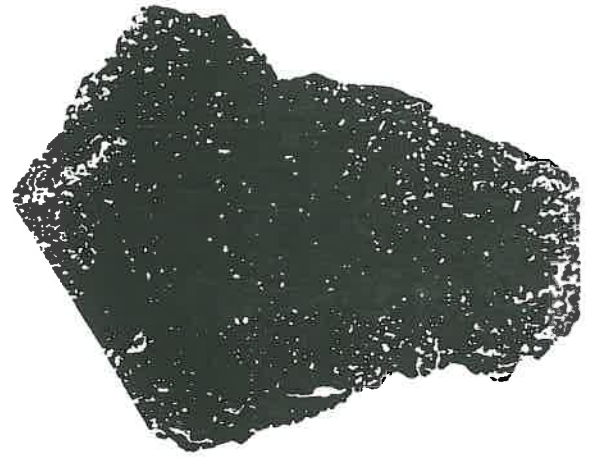
Pour la texture étudiée, on ne fait pas apparaître de prise en masse à la dessiccation après compactage, toutefois on ne peut exclure que cet effet devrait pouvoir se manifester en terre plus argileuse.

La convergence des traits morphologiques observés sur mottes naturelles et sur massifs compactés a permis d'utiliser la même classification morphologique (Fig.2-28) dans les deux cas. Les morphologies, après déconfinement et séchage, des massifs compactés sont déterminées en premier lieu par le calibre des agrégats soumis au compactage, puis modulées par l'intensité des pressions appliquées (Fig.2-29).

Ceci montre bien que la taille initiale des éléments structuraux soumis au compactage doit être, pour une grande part, déterminante dans la morphologie des mottes présentant une certaine hétérogénéité.



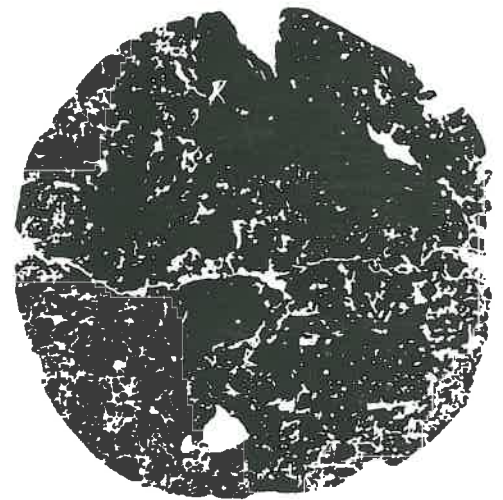
Chantepie  
 $\Delta$   $\rho=1.84$   $\eta_S=3.7$



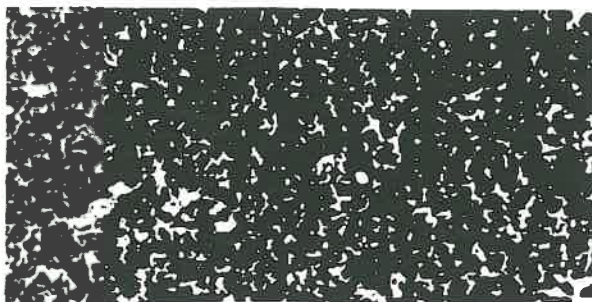
Plateau (13)  
 $\Delta$   $\rho=1.72$   $\eta_S=3.0$



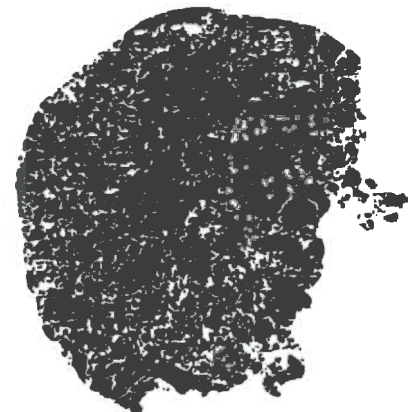
Chantepie  
 $\Upsilon$   $\rho=1.66$   $\eta_S=13.6$



Plateau (allée)  
 $\Upsilon$   $\rho=1.78$   $\eta_S=7.1$



Chantepie  
 $\Gamma$   $\rho=1.67$   $\eta_S=12.9$



Plateau (14)  
 $\Gamma$   $\rho=1.43$   $\eta_S=19.4$



1 cr

Fig.2-28. Comparaison des morphologies des mottes naturelles et des massifs compactés, observations effectuées sur des sections polies après imprégnation.



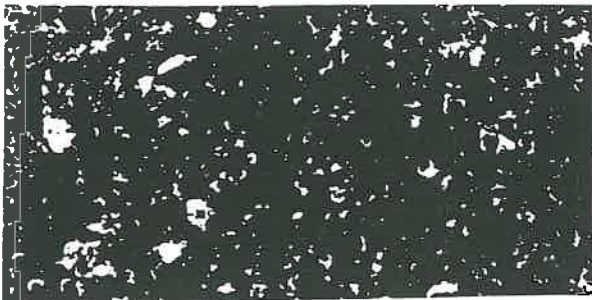
Chantepie  
 $\Delta$   $\rho=1.84$   $\eta_S=3.7$



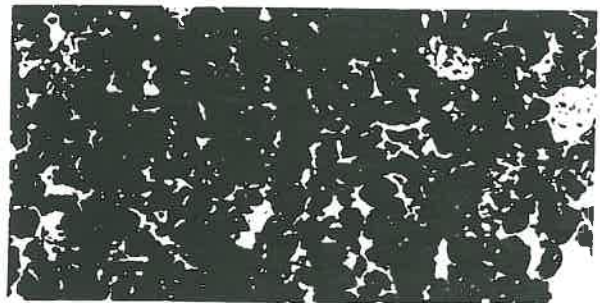
Chantepie  
Yc  $\rho=1.78$   $\eta_S=7.3$



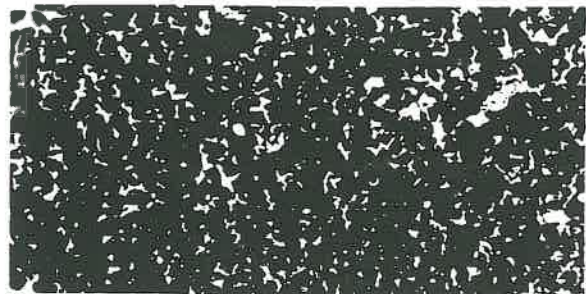
Chantepie  
Y  $\rho=1.66$   $\eta_S=13.6$



Chantepie  
 $\Gamma$ c  $\rho=1.76$   $\eta_S=8.3$



Chantepie  
X  $\rho=1.67$   $\eta_S=12.9$



Chantepie  
 $\Gamma$   $\rho=1.67$   $\eta_S=12.9$

Fig.2-29. Sections polies caractéristiques des différentes morphologies observées sur des massifs compactés.



Ainsi pour des tailles d'agrégats visibles à l'oeil, on peut distinguer les contours des fragments constitutifs du massif compacté, que souligne probablement l'espace poral résiduel.

Seule la terre fine (fragments < 2 mm) est susceptible de présenter après compactage une morphologie  $\Delta$ , car l'espace poral résiduel très divisé n'est pas perceptible visuellement. La morphologie  $\Gamma_c$  s'en distingue par une rugosité appréciable de la surface de rupture sur laquelle sont effectuées les observations, bien que les fragments constitutifs ne soient pas nettement différenciés.

En plein champ, on peut bien sûr envisager des processus de compactage conduisant à une organisation strictement texturale des mottes, telle qu'on a pu la rencontrer dans le profil Plateau 15-12 ou parmi les mottes de l'allée.

- On peut évoquer vis à vis de l'approche expérimentale, des restrictions liées au type de tests utilisés, et principalement l'aspect confiné et uniaxial de la compression. En effet, sous la roue d'un engin et selon les conditions d'états initiaux (porosités, teneurs en eau) la déformation peut présenter un fluage dont un effet possible pourrait être de permettre une évacuation de l'air et/ou de l'eau en excès.

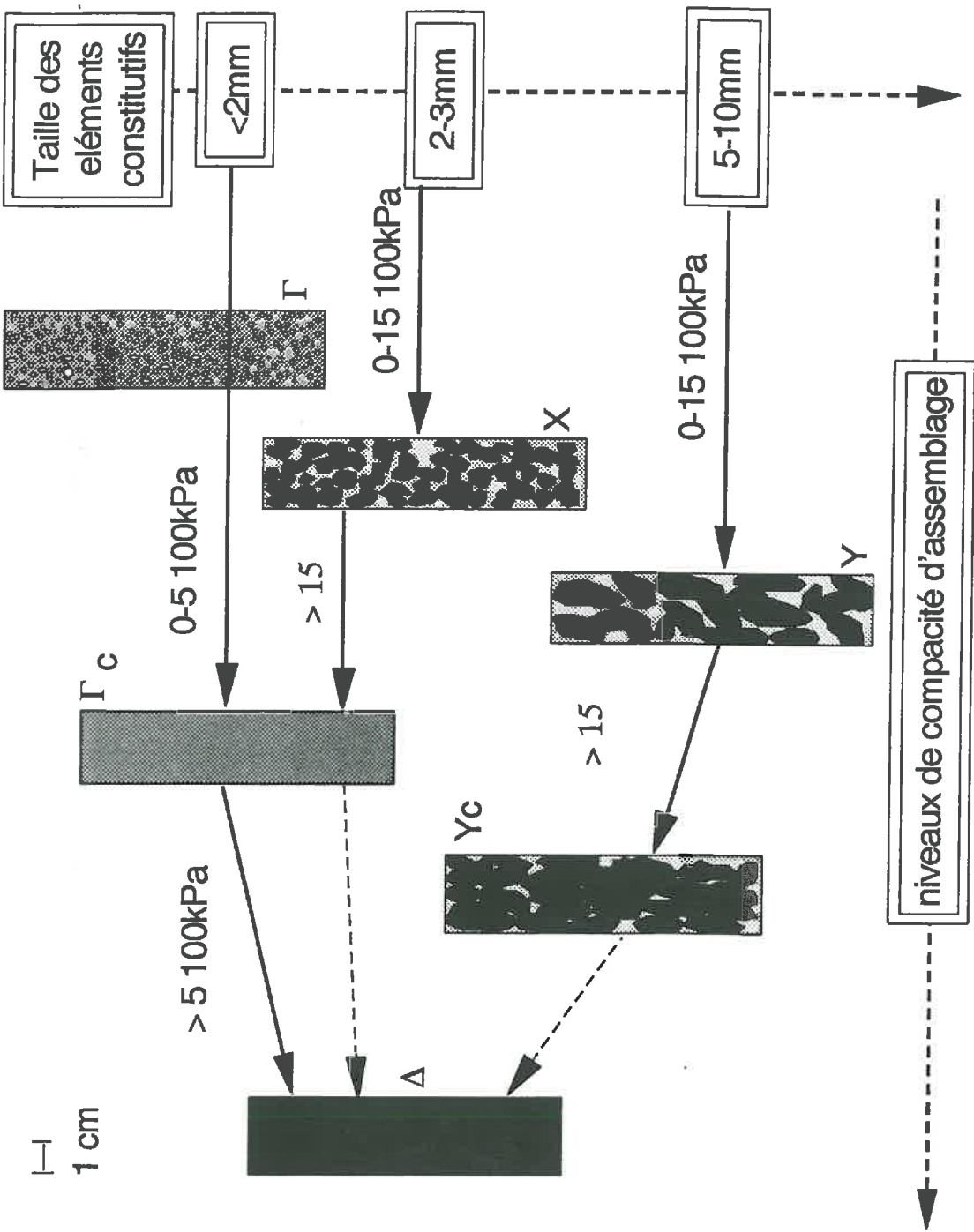
- Dans des matériaux initialement rappuyés, la recouvrance de la zone compactée peut ne pas se manifester entièrement. Une dessiccation ultérieure, en figeant pour partie l'état obtenue sous charge, pourrait alors générer un état  $\Delta$  présentant un indice des vides structuraux voisin de zéro.

- On peut envisager aussi des processus de compactage complexes, étalés dans le temps, et faisant intervenir successivement des combinaisons de phases de mises en charge, d'humectations et de dessiccations, dont l'ordre d'intervention est probablement déterminant. A cet égard les phénomènes de prise en masse, non perceptibles pour les matériaux étudiés dans ce travail, sont certainement très importants dans les matériaux plus argileux.

Dans nos conditions d'expérimentation, et pour un cycle de compactage unique, quel que soit la teneur en eau ou le potentiel envisagé (de  $0.1 \cdot 10^2$  kPa, à  $9.0 \cdot 10^2$  kPa en valeurs absolues), seules des pressions supérieures à  $15 \cdot 10^2$  kPa, généralement bien au delà des charges supportées dans les parcelles cultivées, sont susceptibles d'amener des massifs à des indices des vides structuraux, après dessiccation, inférieurs à 0.1.

Dans le cas de charges inférieures à  $5 \cdot 10^2$  kPa, plus fréquemment rencontrées, on n'obtient à l'état sec des indices des vides structuraux compris entre 0.1 et 0.25 (soit des porosités structurales comprises entre 8 et 20%) que pour des succions inférieures à 100 kPa.

Il est néanmoins probable que ce soit, à la fois pour des teneurs en eau voisines de la capacité de rétention, et pour des pressions dépassant des pressions au sol de  $5 \cdot 10^2$  kPa, que les risques de tassements sévères ne se manifestent le plus fréquemment. Ces conditions



peuvent être réunies, par exemple, lors d'épandage par tonnes de traitements ou tonnes à lisier, lors de récoltes par véhicules automoteurs, ou lors de charroi de récolte (ensilage, maïs, betterave, pommes de terre, etc.).



## CHAPITRE 3

## I. INTRODUCTION

La résistance mécanique est un critère important de la classification des mottes (Manichon, 1987), qui permet ou devrait permettre après quantification d'estimer dans un diagnostic certains aspects de leurs antécédents mécaniques (Guérif, 1990), d'appréhender certaines conséquences en termes de comportements ultérieurs (Tardieu et Manichon, 1987), et donc aussi de préconiser, vis à vis du résultat escompté du travail du sol, certaines solutions pratiques et/ou corrections dans les itinéraires techniques (Manichon, 1988; Campbel, 1976; Håkanson et al, 1985; Papy, 1984).

Un certain nombre de techniques utilisées en mécanique des sols, et plus récemment certains concepts développés en Science du Sol sur des matériaux en partie remaniés (Guérif, 1990) devraient permettre cette quantification pour des matériaux naturels mais aussi l'analyse de la résistance mécanique d'éléments structuraux naturels. Des résultats récents ont montrés en effet qu'ils permettent de porter notamment un jugement sur l'interaction compactage / résistance mécanique.

Les objectifs de ce troisième chapitre sont de :

- **Vérifier** :
  - la stabilité des outils méthodologiques permettant de juger de la résistance mécanique de mottes selon les classes morphologiques auxquelles elle appartient.
  - l'existence d'un système de référence opérationnel pour juger des conséquences mécaniques induites par le compactage.
- **Appliquer** ces outils méthodologiques à l'analyse des résistances mécaniques de mottes naturelles en les reliant aux classes morphologiques auxquelles elles appartiennent.
- **Rechercher** en analysant les propriétés mécaniques des massifs compactés, étudiés au Chapitre 2,
  - les conditions d'états initiaux du sol et les modalités de compactage susceptibles de générer les différents niveaux de résistances mécaniques,
  - les relations entre les morphologies observées selon les différentes conditions de compactage, et les résistances mécaniques induites.

## II. ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES

La "cohésion" d'un sol, au sens large, est généralement estimée comme la résistance mécanique qu'il faut vaincre pour obtenir une déformation du sol. Lorsqu'ils sont soumis à des forces d'origine externe, les sols réagissent selon des modes différents en fonction des caractéristiques du tenseur induit qui rend compte de la distribution, de l'orientation et de l'intensité des contraintes qui se développent dans le matériau. A chaque mode correspond

une relation contrainte/déformation donnée, qui peut conduire à un tassement, une rupture fragile avec dilatation, ou un écoulement plastique avec ou sans variations de volume. Les bases théoriques de tels processus dans un matériau aussi complexe que le sol (principalement hétérogène et discontinu) restent incomplètes voire inadaptées. En conséquence les agronomes et physiciens du sol ont recours à une grande variété de méthodes empiriques à semi empiriques, pour apprécier la "cohésion" du sol.

Cette résistance mécanique du sol, selon son intensité et sa distribution spatiale peut s'avérer un facteur favorable ou défavorable selon les pratiques culturales concernées, les besoins des cultures et de l'environnement.

### **A. Origines de la "cohésion" du sol :**

La déformation du sol se produit quand les particules élémentaires sont susceptibles de se détacher et de se mouvoir l'une par rapport aux autres. Ces déformations dépendent donc des liaisons et des forces de frottement entre particules.

Plus le sol est dense, plus les particules sont imbriquées, et plus les forces de frottement sont élevées. Les liaisons entre particules peuvent être de deux types :

- des forces, liées à la tension superficielle qui s'exercent au niveau des ménisques, et qui seront d'autant plus élevées que le sol sera sec,
- mais aussi des liaisons de type solide-solide (minéral-minéral, minéral-organique-minéral), dont certaines sont dues à des précipitations de silice, de  $\text{CaCO}_3$ , ou d'oxyhydroxides de Fer et d'Aluminium, aux contacts entre particules.

Ces deux types de phénomènes sont d'autant plus importants que le nombre de contacts entre particules est élevé. La fraction argileuse joue donc un rôle prépondérant comme ciment de l'assemblage des particules élémentaires du squelette (limons et sables). Certains auteurs ont mis en évidence une augmentation, à état hydrique stabilisé, de l'intensité de ces liaisons avec le temps (age-hardening, Utomo et Dexter, 1981b) phénomène expliqué soit par une réorganisation avec le temps des particules argileuses sous l'action des forces d'origine capillaire (Gill, 1959), soit par le temps nécessaire à la migration et à la précipitation des solutés (Kemper et Rosenau, 1984).

A une autre échelle, le compactage du sol en conduisant à un meilleur contact (qualité et quantité) entre agrégats et entre mottes, est responsable d'une augmentation de la résistance mécanique du sol.

### **B. Aspects théoriques concernant l'évaluation de la résistance mécanique de volumes de sols**

Les éléments de théorie utilisés en mécanique des sols sont issus de la Mécanique des milieux solides continus et homogènes. Dans les conditions rencontrées dans les couches

de sol travaillées la plupart des hypothèses généralement admises ne sont valides que dans des conditions particulières d'échelles et d'états physiques (structure, potentiel hydrique).

Lorsqu'un solide est soumis à des charges extérieures (Fig.3-1), il se crée un champ de contraintes à l'intérieur du volume concerné. Chaque cube élémentaire est soumis à un champ de contrainte que l'on peut exprimer à partir du tenseur des contraintes normales et tangentielles s'exerçant sur chacune des faces. On peut parallèlement définir l'état des déformations à partir du tenseur des déformations normales et tangentielles.

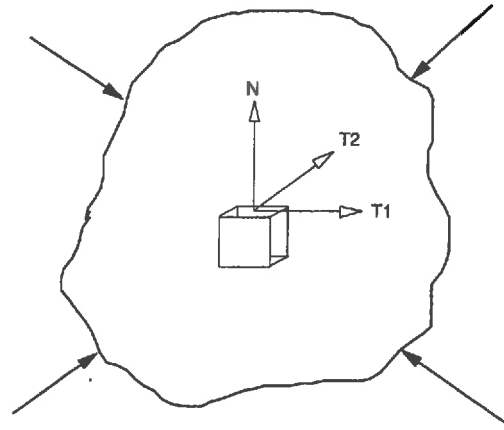


Fig.3-1. Sollicitations externes et champ de contraintes internes. (N contrainte normale à une face d'un cube élémentaire, T1 et T2 contraintes tangentielles)

Ces déformations apparaissent pour des combinaisons données des intensités et directions des composantes du tenseur des contraintes induites. Selon ces combinaisons on rencontre des ruptures de types plus ou moins bien définis, élémentaires ou complexes. Ainsi (Fig.3-2) on dit qu'il y a cisaillement lorsque la déformation est parallèle au plan de rupture, par contre, lorsque elle est normale au plan de rupture, et selon sa direction, on dit que la rupture a lieu en traction ou en compression.

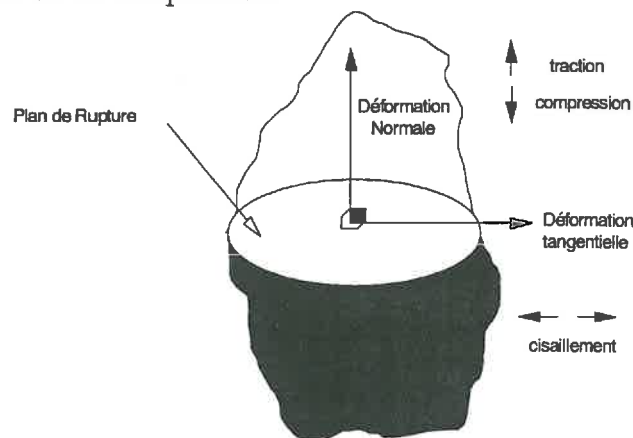


Fig.3-2 Direction des déformations par rapport au plan de rupture et nature de la rupture : compression traction cisaillement

On peut admettre généralement, qu'un massif de sol continu homogène et saturé suit les mêmes lois de comportements qu'un volume élémentaire. Par contre, si le massif est hétérogène, discontinu, et non-saturé, son comportement mécanique global peut différer de celui des éléments structuraux constitutifs (agrégats ou mottes). Il dépend alors de leurs interactions et notamment des transmissions des contraintes dans le massif.

Lors des pratiques culturales (travail du sol, roulages), ou au cours des épisodes climatiques d'humectation-dessiccation, les mottes induites par le compactage ou la prise en masse sont soumises à diverses sollicitations mécaniques susceptibles de générer les différents modes de rupture et leurs combinaisons.

Néanmoins, il nous faut choisir une grandeur mécanique relative à un mode déterminé de rupture ainsi que le test qui permet de l'estimer. Il faut d'une part que la grandeur choisie corresponde à un mode de rupture fréquemment rencontré dans les couches de sol cultivées. Il faut d'autre part que les conditions de mise en oeuvre du ou des tests permettent :

- de traiter aussi bien des éléments structuraux naturels de volumes très variés (mottes centimétriques et agrégats millimétriques prélevés au champ), que des massifs artificiels compactés au laboratoire en conditions contrôlées,
- d'effectuer un grand nombre de mesures dans des conditions acceptables, compte tenu de la grande variabilité des résultats prévisibles pour les éléments structuraux naturels.

La rupture en traction ainsi que le test dit "brésilien" (ou ses dérivés), qui permet l'estimation de la résistance en traction à partir de la mesure de la résistance en compression simple (voire Matériel et méthodes), correspondent à ce cahier des charges. Nous avons donc choisi cette grandeur ainsi que cette méthode pour la suite de notre travail.

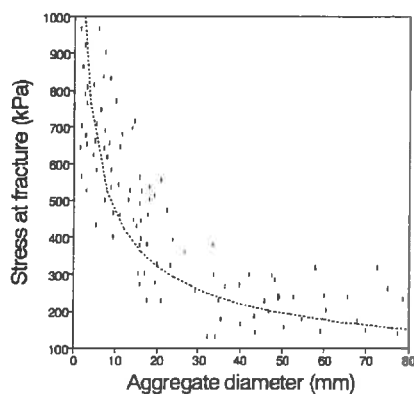


Fig.3-3 Influence du diamètre des éléments structuraux (Hadas et Wolf, 1984-a)

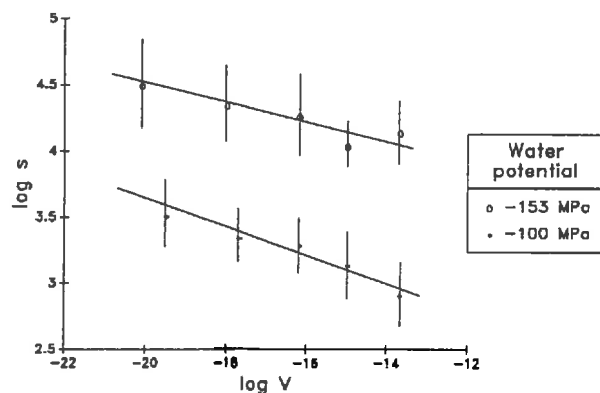


Fig.3-4 Variations de la résistance en traction avec le volume des éléments structuraux (Braunack et al, 1979)

### C. Résistance mécanique et organisation structurale, effet d'échelle

L'échantillonnage d'éléments structuraux dans des profils de sols cultivés a montré que leurs résistances mécaniques dépendent de leurs tailles (Fig.3-3) ou volumes (Fig.3-4) (Rogowski et Kirkham, 1976; Braunack et al., 1979; Hadas et Wolf, 1984a; Lipiec et Tarkiewicz, 1986; Willat, 1987; Angers et al., 1987) et de leurs états de compacité (Fig.3-5) (Lipiec et Tarkiewicz, 1986; Carter 1990). Pour ces deux relations, résistance-volume, et résistance-porosité, la tendance observée est indépendante du mode de rupture étudié. On considère généralement qu'il n'y a pas indépendance entre volume et porosité et qu'une augmentation du volume entraîne une augmentation du nombre probable de fissures ou de discontinuités mécaniques, et par conséquent diminue la résistance mécanique.

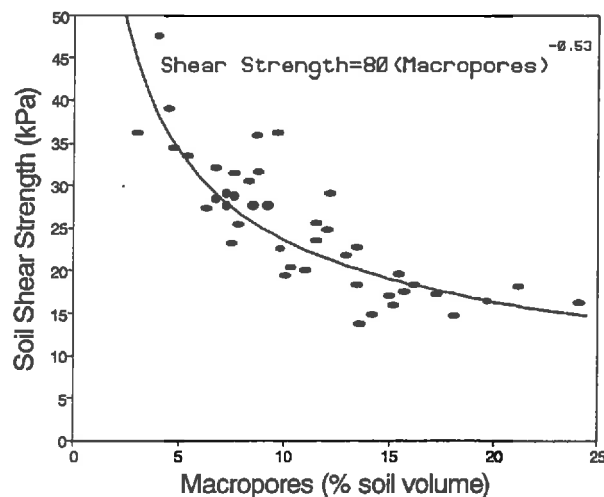


Fig. 3-5 Influence de la macroporosité sur la résistance au cisaillement.

Cependant l'étalement de la distribution des résistances mécaniques d'éléments structuraux :

- à l'intérieur d'une même classe de taille (diamètre-volume), traduit l'effet de l'étalement de la distribution des porosités.

- à l'intérieur d'une même classe de porosité, suggère un effet de la qualité des liaisons et/ou de la morphologie de l'espace poral, et donc des conditions de tassement ou de prise en masse mais aussi éventuellement d'une fissuration ultérieure.

Ces constatations impliquent dans l'analyse des résistances mécaniques des éléments structuraux la prise en compte d'un facteur d'échelle. En effet, le niveau d'organisation auquel se situe la mesure détermine sa signification. Pour juger de l'intensité de la résistance mécanique d'un élément structural relative à son état de compacité ou de fissuration, il convient de disposer d'une référence intrinsèque et définie par la seule constitution organo-minérale.

Ainsi, parallèlement à l'analyse de l'espace poral du sol, décrite par Monnier, et al. (1973) et Fiès et Stengel (1981), qui propose un modèle opérationnel d'organisation du sol, en distinguant l'arrangement textural du structural, on peut définir :

- la **résistance mécanique texturale** (Guérif, 1988b-c) que l'on mesure sur des volumes de sol suffisamment petits pour contenir le moins de pores structuraux possibles, c'est à dire en pratique des agrégats de 2-3 mm. Cette résistance mécanique texturale résulte essentiellement de l'assemblage des constituants élémentaires du matériau (Fig.3-6), c'est à dire schématiquement de l'organisation et de la cimentation, par la phase argileuse, des particules du squelette (limons et sables),

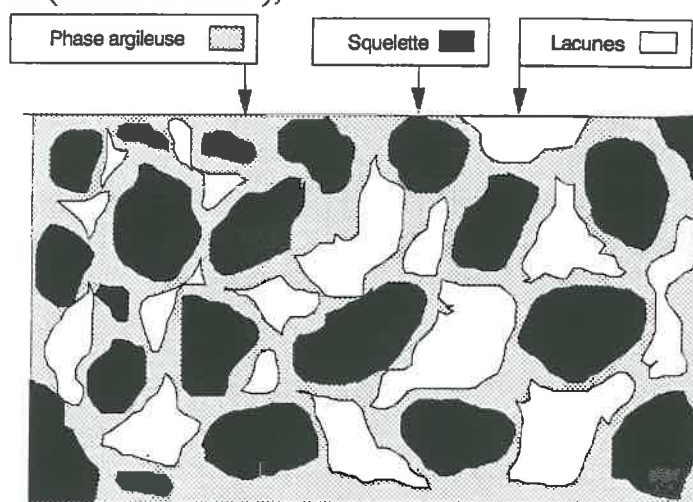


Fig. 3-6 Assemblage des constituants élémentaires, échelle texturale.

- et la **résistance mécanique globale** (Guérif, 1990) qui résulte de la résistance mécanique d'origine texturale mais aussi et surtout de la résistance mécanique structurale issue des liaisons et des frottements induits par l'arrangement des éléments structuraux (Fig.3-7). On la mesure sur des volumes de sol délimités par des pores structuraux comme les mottes, sur des cylindres de sol prélevés in situ, ou encore, à des fins analytiques sur des massifs artificiels cylindriques de matériau remanié.

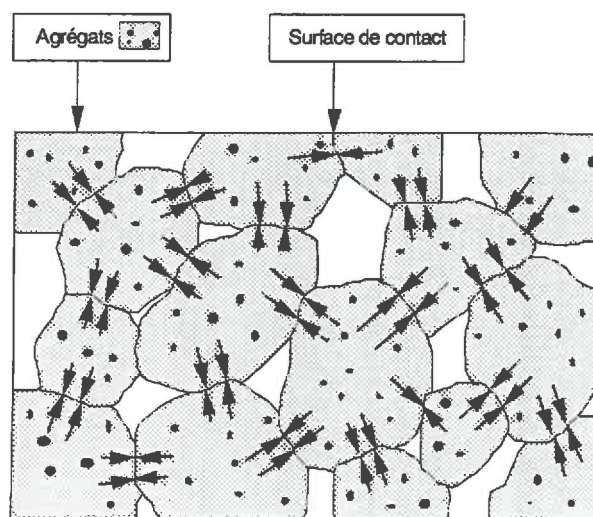


Fig. 3-7. Organisation structurale



### D. Facteurs de variations de la résistance en traction texturale.

Les facteurs de variations de la résistance mécanique texturale, et plus particulièrement de la résistance en traction texturale, sont par définition la constitution minérale et organique, mais aussi la teneur en eau. L'effet de la constitution organo-minérale (Guérif, 1988c) a été mise en évidence à l'état sec, où les gammes de variations sont maximisées, et où l'état hydrique n'interfère pas.

#### 1. Constitution

La plupart des auteurs considèrent que, parmi les paramètres de constitution, la fraction argileuse détermine tout particulièrement la résistance mécanique. Une certaine variabilité apparaît néanmoins dans des matériaux présentant des gammes étendues de teneurs en matières organiques, en sesquioxydes, ou une grande variabilité de l'E.S.P. (Middleton, 1924; Aylmore et Sills, 1978).

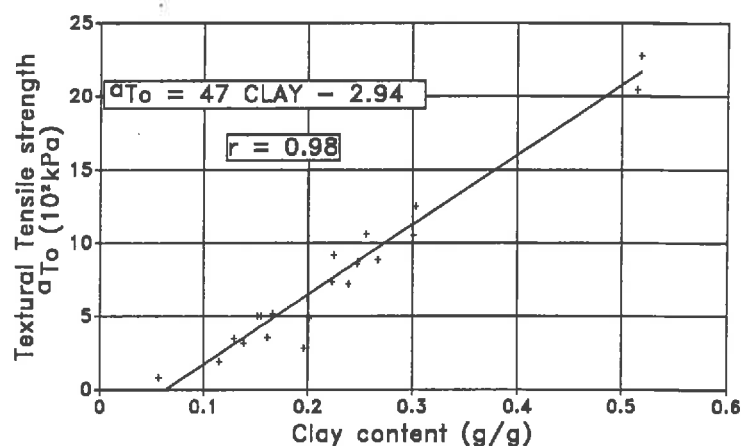


Fig.3-8 Relation entre teneur en argile et résistance en traction texturale (Guérif, 1988c)

Guérif (1988c) a pu montrer statistiquement que la résistance en traction texturale moyenne d'un matériau est pratiquement définie par le produit de la résistance en traction propre à sa phase argileuse et de sa teneur en argile (Fig.3-8).

Il vient :

$$\sigma_{T_0} = 47 A - 2.94$$

où :

$\sigma_{T_0}$  est la résistance en traction texturale à l'état sec

A est la teneur en argile en  $g \cdot g^{-1}$

Dans les sols naturels, la minéralogie de l'argile ne semble jouer un rôle sur leurs résistances en traction que pour des pôles minéralogiques extrêmes (montmorillonites pures



ou kaolinites pures, par exemple), les matières organiques adsorbées sur l'argile atténuant aussi pour partie l'importance de la minéralogie (Chenu et Guérif, 1990).

Contrairement à d'autres modes de rupture comme le cisaillement, la résistance en traction n'est pas, à proprement parlé, influencée directement par les caractéristiques du squelette. En effet celui-ci augmente essentiellement les frottements entre grains du squelette, phénomène a priori exclu dans la rupture en traction. Cependant il peut néanmoins jouer un rôle par l'étalement de sa distribution, ou par la forme de ses constituants (Pecorari et al., 1991) en modifiant le nombre et l'épaisseur des ponts d'argile assurant la cimentation entre grains.

## 2. Teneur en eau

Quel que soit le mode de rupture, et pour la grande majorité des matériaux, la résistance mécanique du sol augmente avec sa dessiccation (Farrel et al. 1967; Spoor et Godwin, 1979; Guérif, 1988c - 1990; Chan, 1989; Carter, 1990). Deux facteurs interagissent dans ce phénomène, le séchage augmente d'une part la résistance mécanique d'origine capillaire en augmentant la contrainte effective, d'autre part il augmente la compacité par retrait.

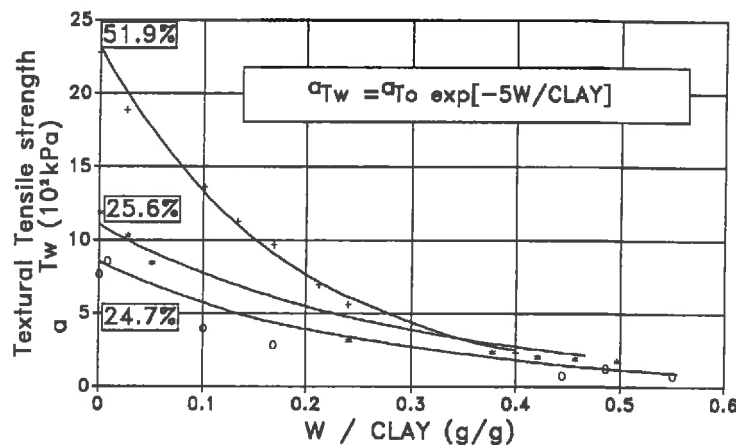


Fig. 3-9 Relation entre teneur en eau, en argile et résistance en traction

La résistance en traction texturale  ${}^aT_w$  à une teneur en eau  $W$  peut être relativement bien prédite (Fig.3-9. Guérif, 1988c - 1990) par une relation exponentielle telle que :

$${}^aT_w = {}^aT_0 \exp(-k(W) / A)$$

où :

- ${}^aT_0$  est la résistance en traction texturale à l'état sec en  $10^2$  kPa,
- $A$  est la teneur en argile ( $g \cdot g^{-1}$ ),
- et  $k$  est un paramètre d'ajustement ( $k = 5$ ).

La résistance en traction globale d'éléments structuraux hétérogènes suit le même type de relation mais, les conditions de mise en place (compactage ou prise en masse) de ces mottes détermine de façon privilégiée le comportement mécanique ultérieur.

### E. Analyse expérimentale des effets des conditions de compactage sur la résistance en traction globale

Quatre facteurs au moins contribuent à la variabilité des résistances mécaniques des éléments structuraux issus du compactage. La charge mécanique et la teneur en eau au moment du compactage, la compacité résultante, mais aussi l'humidité au moment de la rupture. En effet, le comportement mécanique d'un assemblage d'agrégats dépend certes de leur résistance mécanique texturale et donc de leur humidité mais aussi des propriétés de l'assemblage.

La Fig.3-10 illustre l'influence de la **compacité** à une humidité donnée ( $W = 18\%$ , soit un potentiel de  $-500$  kPa), la résistance en traction de massifs d'agrégats mesurée à leur humidité de compactage dépend de l'aire des surfaces de contact qui se développent entre les agrégats au cours du compactage fortement corrélée à l'indice des vides structuraux (Guérif, 1990). Dans les conditions expérimentales (sol et teneur en eau), une **dessiccation postérieure au compactage** provoque une augmentation de la résistance en traction d'un facteur de 10.

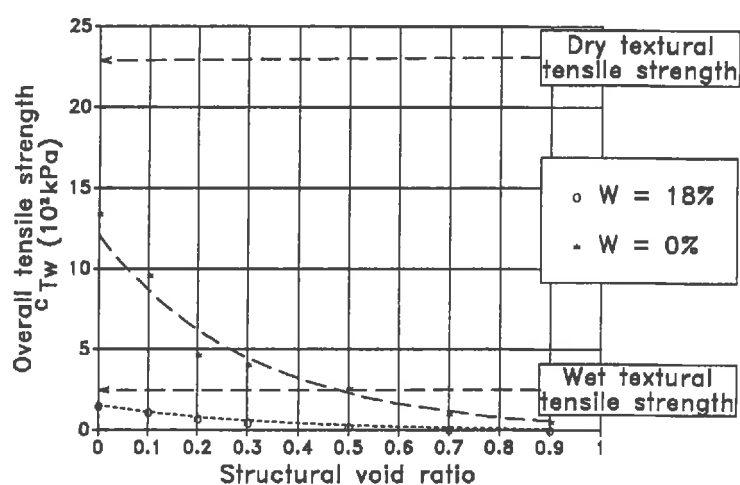


Fig. 3-10. Relation entre indice de vides structural et résistance en traction (Guérif, 1990).

On peut constater que dans les conditions d'état hydrique au compactage ( $W = 18\%$ ) présentées Fig.3-10. la résistance en traction globale ne tend pas vers la résistance en traction texturale quand l'indice des vides structuraux tend vers zéro. L'effet de la teneur en eau, lors du compactage, est mise en évidence par la Fig.3-11. Ainsi à un indice des vides structuraux donné (ici  $e_s = 0.6$ ) la résistance en traction, mesurée à l'humidité au compactage, croît dans

un premier temps quand l'humidité au compactage augmente. Le phénomène peut être interprété comme une augmentation de l'adhérence entre agrégats avec leur teneur en eau. Celui-ci, dans un deuxième temps, est limité par la décroissance simultanée de la résistance texturale quand la teneur en eau au compactage augmente.

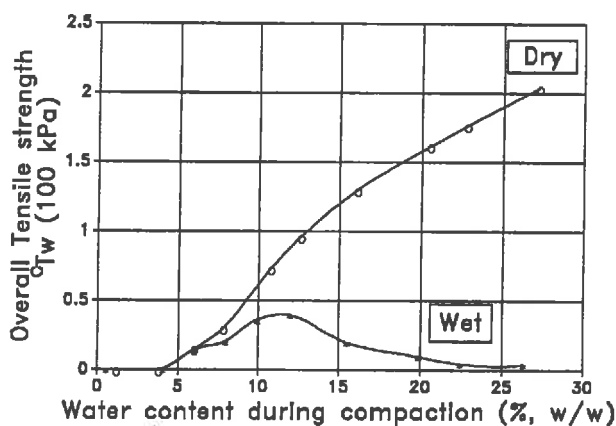


Fig. 3-11 Relation entre la teneur en eau au compactage  $W_c$  et la résistance en traction, à  $W_c$  et après dessiccation.

Lorsque la mesure est réalisée après dessiccation (Fig.3-11.) la résistance en traction texturale est très élevée et le comportement du massif dépend des forces de liaison qui se sont développées entre agrégats au cours du compactage et de la dessiccation qui a suivi. Ces liaisons sont d'autant plus intenses que le compactage a été réalisé à plus forte humidité.

o o  
o

De l'analyse bibliographique il ressort que :

- Parmi les modalités d'appréciation de la résistance mécanique, les tests d'écrasement destinés à l'estimation de la résistance en traction sont particulièrement adaptés à l'étude des propriétés mécaniques des éléments structuraux des sols cultivés, et ce à différentes échelles. On dispose déjà d'un certain nombre de concepts et de références qui permettent d'analyser les conséquences du compactage sur les propriétés mécaniques induites.

Cependant :

- On ne possède pas de données concernant la stabilité de la résistance en traction texturale en fonction de l'histoire de formation des mottes, et donc des agrégats.

- On dispose de quelques références sur l'aspect quantitatif de l'effet du volume de l'espace poral (densité, porosité, indice des vides) sur la résistance mécanique, mais par contre

on ne connaît pas l'effet de la morphologie de cet espace poral ni du type de discontinuités entre agrégats.

- Il n'existe pas, à proprement parler, de données sur les conditions hydriques et surtout mécaniques d'obtention d'éléments structuraux à résistance mécanique donnée, et en particulier, à résistance mécanique proche de la résistance mécanique texturale.

### III. MATERIELS ET METHODES

#### A. Prélèvements, profils et blocs, allées ; choix des variables analytiques :

##### 1. Mottes naturelles

Dans chaque parcelle deux types de prélèvements ont été pratiqués : d'une part dans des profils effectués dans les parcelles cultivées, d'autre part dans les allées des essais de manière à se placer dans une situation où les compactages avaient été fréquents, et effectués dans des conditions d'humidité très diverses.

Les mottes des parcelles ont été prélevées dans des profils choisis à priori, pour leurs granulométries semblables, les blocs étant déterminés à partir de la description morphologique des profils, pour leurs richesses en mottes des diverses morphologies. Ainsi les blocs Plateau (13-3) , (13-7), et (14-10) sont considérés comme des répétitions hors trace de roue, et présentent une gamme étalée de morphologies  $\nabla$ . Dans le profil (13), pour raison d'effectif par classe morphologique, le bloc (13-3) a été utilisé à la confection d'agrégats à partir de mottes de morphologies  $\Delta$  et  $\nabla$ , le bloc (13-7) a été utilisé à l'étude des mottes naturelles.

Dans le profil Plateau (15), le bloc (15-12) correspond à un profil où les traces de roues n'ont pu être repérées, mais où les mottes  $\Delta$  doivent être dominantes ; il a été utilisé pour l'étude conjointe des mottes naturelles et des agrégats.

##### 2. Mottes artificielles

Chantepie ne présente pas de problème d'interprétation d'une variabilité des densités texturales entre  $\Delta/\nabla$  et allée/non-allée. C'est un matériau qui offre donc toutes les qualités requises comme matériau modèle, et permet l'analyse des comportements mécaniques induits par le compactage.

Le comportement au compactage a été étudié dans le Chapitre 2. Les massifs obtenus ont été utilisés pour les tests de rupture. On peut rappeler que pour étudier l'influence de la taille des éléments structuraux soumis au compactage et de leur étalement, on a choisi divers

calibres d'agrégats obtenus par fragmentation mécanique à sec et tamisage (<2mm; 1-2 mm; 2-3 mm; 5-10 mm; 60% (5-10 mm) + 40% (1-2 mm))

Pour le calibre <2 mm ou terre fine, l'augmentation des diamètres induit une diminution du nombre de points de contacts entre agrégats, au moins au début du compactage, et probablement la surface de contact entre agrégats en fin de compactage.

Les agrégats sont amenés aux teneurs en eau, ou mieux aux potentiels hydriques visés avec la méthode décrite au chapitre précédent. Il convient de rappeler que cette méthode induit des relations potentiels - teneurs en eau différenciées selon la granulométrie des agrégats. Ayant imposé les potentiels, on peut avoir, surtout pour les potentiels proche de zéro, des teneurs en eau d'autant plus élevées que la taille des agrégats est faible et que leur distribution est étalée.

On a imposé les états structuraux après compactage, en fixant les couples potentiel au compactage /  $e_s$  finaux ( $e_s = 0; 0.1; 0.2$ ). Les pressions de compactage sont donc mesurées.

o o  
o

L'analyse du système de porosité a été utilisée pour hiérarchiser les états internes des mottes, en l'exprimant en terme d'indice des vides, et notamment d'indice des vides structuraux. Comme on le verra plus tard les mottes naturelles se prêtent, pour des raisons techniques, d'une manière satisfaisante à l'étude de la résistance en traction par mesure de la résistance à l'écrasement de sphère à l'état sec.

Le classement morphologique est effectué après le test mécanique, l'observation se faisant au niveau du plan de rupture, sur les faces des deux fragments.

## B. Méthodes de mesures

### 1. Principes communs

#### a) Sollicitations externes et mode de rupture résultant

Le principe du test consiste à soumettre une éprouvette à deux charges diamétralement opposées, et à mesurer la force qui conduit à la rupture. Pour pouvoir imposer le type de rupture et estimer l'intensité des contraintes internes qui en sont responsables, les éprouvettes doivent être de géométrie connue et notamment posséder une symétrie de révolution (sphère ou cylindre du test brésilien), par ailleurs, les charges doivent être appliquées en des sites choisis en fonction de la géométrie de l'éprouvette.

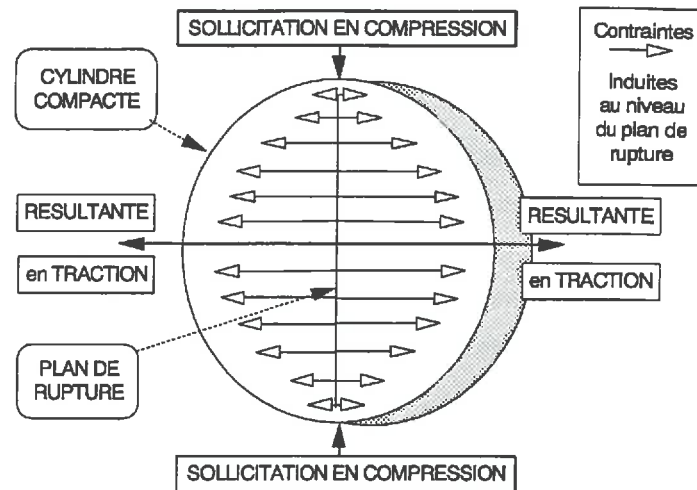


Fig. 3-12 Sollicitations externes et champ de contraintes internes induit provoquant la rupture des sphères ou des massifs cylindriques.

Les charges génèrent alors (Fig.3-12) un champ de contraintes internes à l'éprouvette dont les résultantes sont opposées, orthogonales à la direction des sollicitations externes et qui provoquent une rupture en traction en s'appliquant :

- pour la sphère sur un plan diamétral passant par les points d'application des charges externes.
- pour le cylindre sur un plan diamétral défini par les génératrices du cylindre sur lesquelles s'exercent les charges externes.

L'intensité de ces forces appliquées augmente progressivement au cours de la mise en charge, jusqu'à ce que l'intensité de la contrainte en traction atteigne celle de la résistance en traction. L'éprouvette se rompt alors selon le plan diamétral défini ci-dessus.

Pour ces deux géométries d'éprouvette, la mécanique des matériaux fournit les expressions nécessaires pour estimer la résistance en traction à partir de la force maximum à la rupture. On doit admettre alors que les éprouvettes sont continues, isotropes et homogènes, et qu'elles ont un comportement élastique jusqu'au moment de la rupture. On admet la linéarité de la relation contrainte-déformation, et sa réversibilité ainsi que l'unicité du module d'élasticité en traction et en compression. On admet de plus que la déformation est négligeable avant la rupture.

Ces hypothèses couramment admises sont certes rarement satisfaites en toute rigueur dans le cas des sols. On peut admettre cependant qu'elles sont satisfaites lorsque notamment l'humidité de l'éprouvette est telle que la déformation avant rupture reste faible. Frydman (1964), dans le cadre de l'essai brésilien a montré que le test reste valide si le rapport entre la largeur de la zone d'aplatissement aux lieux de mise en charges et la distance entre points d'appui, au moment de la rupture, demeure inférieure à 0.29. Guérif (1988) a pu montrer sur des agrégats sphériques que le test reste valide pour des potentiels inférieurs à -0.5 MPa.

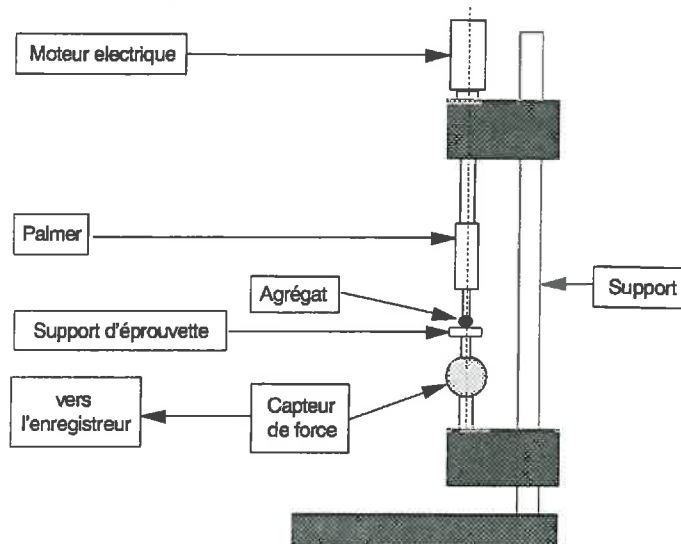


Fig. 3-13. Presse à compression simple pour agrégats millimétriques.

#### b) Appareils de mesure

##### (1) Agrégats de 2-3mm

La presse à compression simple pour échantillons millimétriques comprend (Fig.3-13) :

- un moteur électrique
- une vis micrométrique permettant, d'une part de mesurer le diamètre des agrégats, et, d'autre part, de transformer le mouvement de rotation du moteur en translation. La vitesse de déplacement du piston est de  $4.33 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ ;
- un capteur de force, à jauge extensométrique, d'une étendue de mesure de 0 à 5 daN, permettant de mesurer la force maximale à la rupture.

On suit les variations de la force, exercée sur l'agrégat, en fonction du temps grâce à un enregistreur graphique.

##### (2) Mottes sphériques centimétriques et cylindres compactés Fig.3-14.

On a utilisé un bâti de presse à compression simple (M&O) modifié. Il comprend une vis sans fin manuelle pour approche rapide, un capteur de force à jauge extensométrique, d'une étendue de mesure de 0 à 100 daN, permettant de mesurer la force maximale à la rupture.

On suit les variations de la force, exercée sur la motte où l'éprouvette, en fonction du temps grâce à un enregistreur graphique.

Le déplacement de l'échantillon et sa mise en charge sont assurés par un vérin à huile dont la vitesse de déplacement a été réglée à  $1.67 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ .

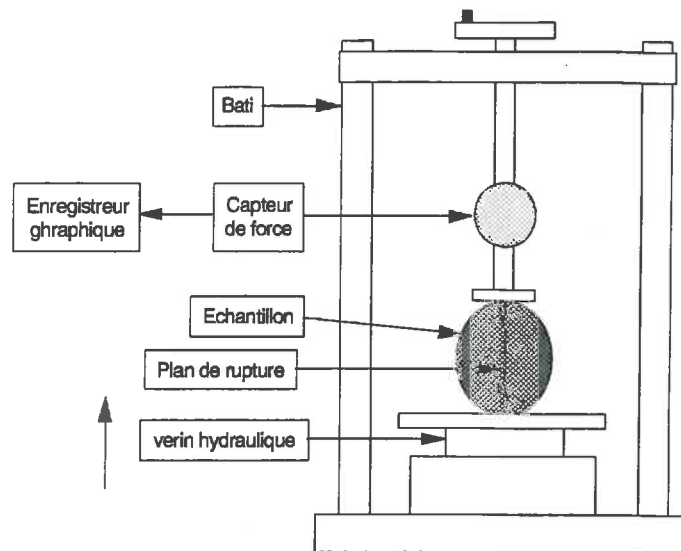


Fig. 3-14. Presse à compression simple pour mottes et massifs

## 2. Résistance en traction de sphères

### a) Préparation des agrégats de 2-3 mm

Les agrégats naturels obtenus par fragmentation ménagée et tamisage à sec présentent des géométries variées, et des arêtes anguleuses. La géométrie régulière la plus facile à leur conférer est la sphère que l'on peut obtenir en les arrondissant mécaniquement par usure et brassage sur un disque rotatif abrasif (Guérif, 1988b).

En pratique, pour obtenir des agrégats de 2-3 mm on prépare des agrégats tamisés à 3-5 mm (Guérif, 1988b). La distribution des résistances en traction peut être considérée comme normale. Ainsi, en admettant une marge d'erreur de 10% sur l'estimation de la moyenne  ${}^aT_0$ , le nombre minimum de mesures à effectuer est de 45 et de 75 pour des degrés de confiance de 95% et 99%. On pratiquera donc, par sécurité, entre 100 et 150 mesures par matériau.

La dessiccation des agrégats est obtenue sous silicagel jusqu'à l'arrêt de la perte de poids. La teneur en eau résiduelle est mesurée, après rupture, par gravimétrie après passage à l'étuve à 105°C. On caractérisera donc les matériaux par leurs résistances en traction texturale à l'état sec  ${}^aT_0$ .

### b) Préparation des mottes, observations morphologiques

Comme pour les agrégats, la sphère est la géométrie la plus facile à obtenir avec des mottes naturelles. On a pratiqué une abrasion manuelle des aspérités grossières à la râpe à bois.



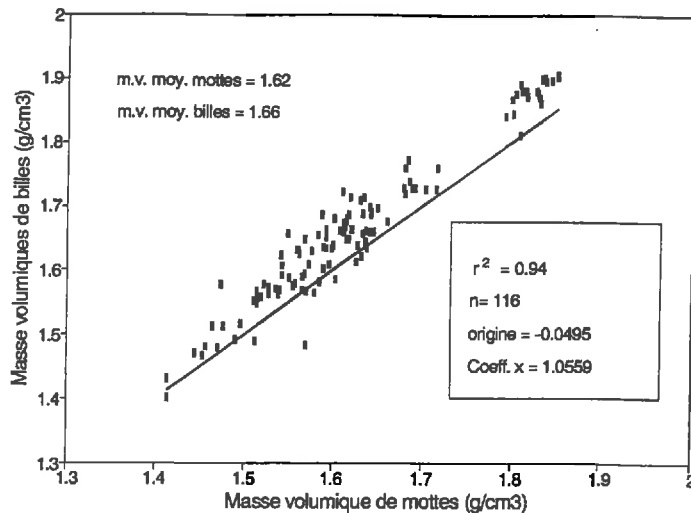


Fig. 3-15. Ecarts à la première bissectrice entre masses volumiques des mottes naturelles et arrondies. Plateau (Blocs 13-7, 14-10 et 15-12).

Une telle opération a certes modifié les mottes d'origine, on a cependant pu vérifier qu'elle ne modifiait que peu la masse volumique (Fig. 3-15). La masse volumique, de chaque motte individualisée, a été mesurée par la méthode à la paraffine avant et après l'opération. La masse volumique des mottes arrondies est légèrement accrue par l'élimination de leur périphérie qui est souvent légèrement plus poreuse.

### c) Estimation de la résistance en traction

Rogowski puis Dexter ont proposé une méthode d'estimation de la résistance en traction de petits volumes de sol à partir des résultats de tests d'écrasement d'agglomérats terreux considérés comme des sphères. Guérif (1988-b) a montré que cette méthode pouvait être améliorée en accroissant, préalablement au test, la sphéricité des agrégats. Les fondements mécaniques de la relation proposée ont été établis par Sternberg et Rosenthal (1952) et par Hiramatsu et Oka (1966) pour une sphère soumise à l'action de deux charges ponctuelles, diamétralement opposées.

La résistance en traction  $T$  (Pa) de sphères est donnée par l'équation suivante :

$$T = k (4 F / \pi d^2)$$

où  $F$  est la force maximale appliquée à la rupture (N) ;  $d$  est le diamètre de la sphère (m), et  $k$  un coefficient d'ajustement qui dépend des matériaux étudiés (sols, roches, etc...).

Dexter (1975) pour sa part réduit l'équation à :

$$T = 0.576 F / d^2$$

que nous utiliserons aussi bien pour les mottes arrondies que pour les agrégats de 2-3 mm.

### 3. Résistance en traction de cylindres (test brésilien)

#### a) Préparation des massifs

Les massifs d'agrégats compactés, destinés à l'étude expérimentale des conditions mécaniques conduisant aux différentes morphologies (Chapitre 2), ont été utilisés pour évaluer les résistances en traction induites par les différents compactage.

Rappelons que l'on a exploré :

- les conditions physiques initiales du sol, potentiel hydriques et calibre des fragments constitutifs,

- l'état final visé ( $e_s = 0 ; 0.1 ; 0.2$ ) et les conditions mécaniques nécessaires à leur obtention, en distinguant un compactage drainé ou non drainé, ainsi qu'un compactage cyclique.

Après compactage, les cylindres ont été soumis à une dessiccation ménagée sous un silicagel renouvelé régulièrement. cette dessiccation a été menée jusqu'à l'arrêt de la perte de poids, puis maintenue de façon à ce que pour tous les cylindres un temps égal se soit écoulé entre leur fabrication et le test mécanique. Cette précaution correspond au souci d'éviter un effet de "age hardening", toujours possible et susceptible d'interférer avec les effets étudiés.

#### b) Estimation de la résistance en traction

Carneiro et Barcellos, (19\*\*) ont mis au point le test dit brésilien pour étudier les bétons, Kirkham et al (1959) pour leur part l'ont appliqué aux sols. Il consiste à mesurer la force nécessaire pour provoquer la rupture en traction d'une éprouvette cylindrique soumise à une charge appliquée selon deux génératrices diamétralement opposées.

Pour notre part, le cylindre est une géométrie pour laquelle on sait fabriquer des éprouvettes de matériaux remaniés en contrôlant les conditions de compactage et/ou l'état résultant.

La résistance en traction T est donnée par l'expression :

$$T = 2 F / 4 \pi d h$$

où :

F est la force maximale à la rupture

d est le diamètre du cylindre

h est la hauteur du cylindre.

## Plateau.

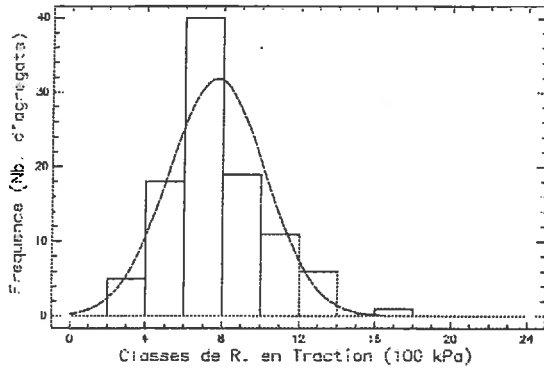
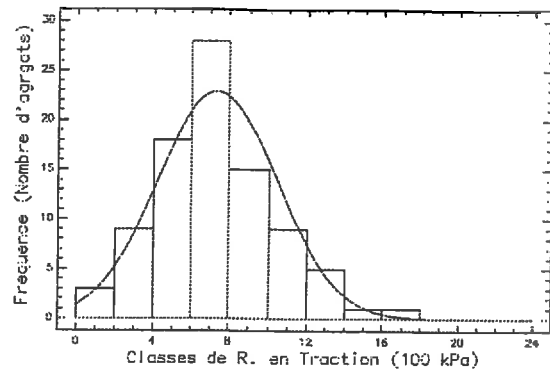
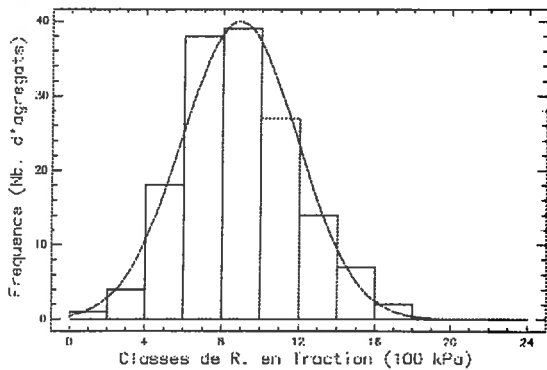
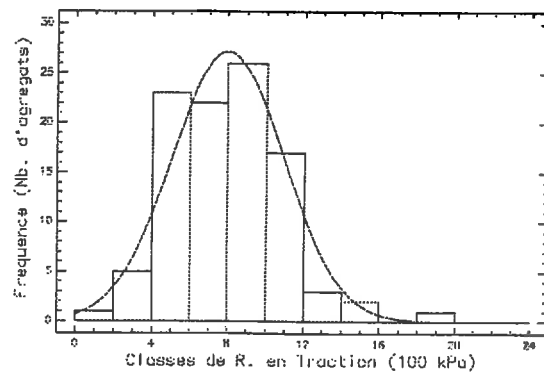
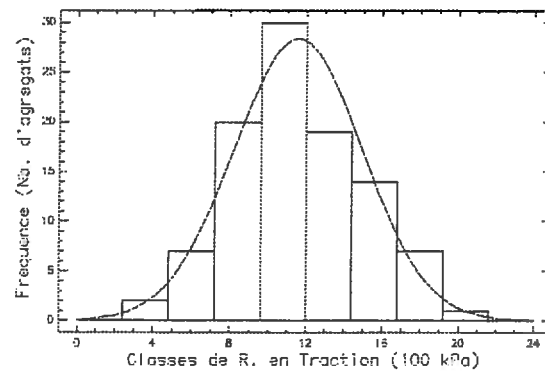
a-  $\Delta$  Profil 13 (n = 100)b-  $\nabla$  Profil 13 (n = 89)c-  $\Delta$  Allée (n = 150)d-  $\nabla$  Allée (n = 100)e-  $\Delta$  Profil 15 (n = 100)

Fig. 3-17. Histogrammes de Résistance en Traction texturale d'agrégats préparés mécaniquement; Plateau (profils et allée).

## IV. PROPRIETES MECANIQUES TEXTURALES

### A. Résultats

#### 1. Distributions

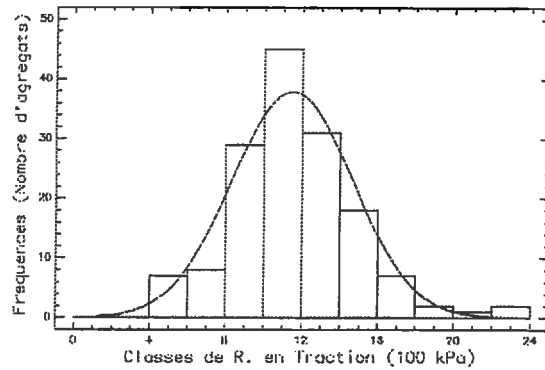
La taille de chaque échantillon a été déterminée de manière à permettre une estimation des moyennes, à 10% près avec un degré de confiance de 99%. Dans la plupart des cas cette taille a été légèrement surdimensionnée.

Quelque soit le mode de préparation des agrégats ou la morphologie des mottes d'origine, un test de  $\chi^2$  montre que chaque distribution peut être considérée comme normale (Fig.3-16 & Fig.3-17)).

Tableau 3-1 Résistances en traction texturales des différents échantillons, (sites, blocs, et mode de préparation); masse volumiques des agrégats arrondis.

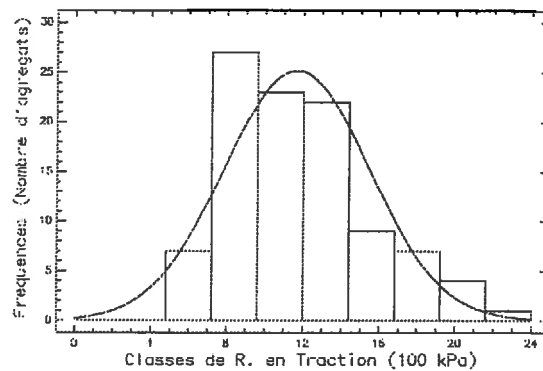
origine	type	mode	nbre	$^aT_0$ 10 <sup>2</sup> kPa	ec.typ	C.V. %	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>
<u>Plateau</u>							
Allée	Δ	mec	150	8.87	2.98	33.6	1.910
Allée	∇	mec	100	7.97	2.92	36.6	1.918
13-3	Δ	mec	100	7.71	2.50	32.4	1.803
13-3	∇	mec	89	7.33	3.08	42.0	1.768
15-12	Δ	mec	100	11.57	3.36	29.0	1.882
13-3	Δ	man	100	8.41	2.60	30.9	1.807
13-3	∇	man	100	4.51	1.86	41.2	1.786
<u>Chantepie</u>							
Allée	Δ	mec	150	11.49	3.15	27.4	1.919
Allée	∇	mec	100	11.66	3.79	32.5	1.937

## CHANTEPIE



a-  $\Delta$  Allée (préparation mécanique)

(n = 150)



b-  $\nabla$  Allée (préparation mécanique)

(n = 100)

Fig. 3-17. Histogrammes des résistances en traction texturales, parcelle Chantepie.

Le coefficient de variations est de l'ordre de 30% pour les agrégats issus de mottes  $\Delta$ , il peut atteindre environ 40% pour les  $\nabla$ . Pour chaque parcelle on note une grande stabilité des quartiles inférieur et supérieur. Seul le profil 15 de Plateau présente des caractéristiques de distribution qui se différencient des autres sans qu'aucune des caractéristiques texturales ne l'explique vraiment ; seule la teneur en calcaire total diffère (1% dans le profil 13 et dans les allées, contre 2% dans le profil 15). On note un déplacement de la distribution (profil 15) vers les valeurs plus élevées d'environ  $4 \cdot 10^2$  kPa.

## 2. Analyse des moyennes

Compte tenu de la taille des échantillons, qui permet une estimation de la moyenne à 10% près, on retrouve pour chaque parcelle (excepté pour le profil 15 de plateau) des valeurs compatibles avec la régression reliant la résistance en traction à la teneur en argile.

Tableau 3-2 Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs prédites par la régression de Guérif (1988c).

Origine	type	mode	$^aT_0$ mes.	argile	$^aT_0$ reg.
<u>Plateau</u>					
Allée	$\Delta$	meca.	8.87	24.2	8.43
13-3	$\Delta$	meca.	7.97	24.0	8.34
15-12	$\Delta$	meca.	11.57	24.0	8.34
<u>Chantepie</u>					
Allée	$\Delta$	meca.	11.49	30.3	11.30

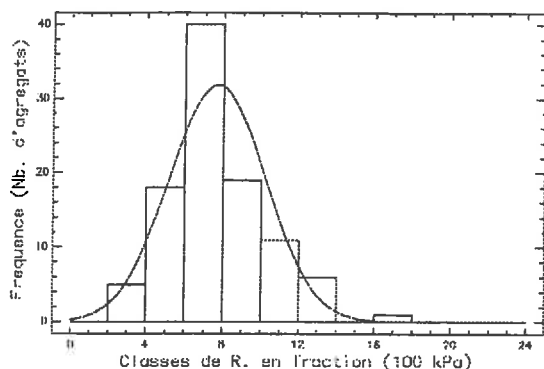
A l'intérieur d'un même profil, il n'y a pas de différence significativement supérieure à 10% entre les résistances en traction texturales en fonction des morphologies des mottes d'origines  $\Delta$  ou  $\nabla$ , ou des sites allée/profil. Seul le profil 15 de Plateau se différencie significativement des autres.

Par ailleurs on peut noter que la technique de préparation, mécanique ou manuelle, induit des différences que l'on analysera ci après.

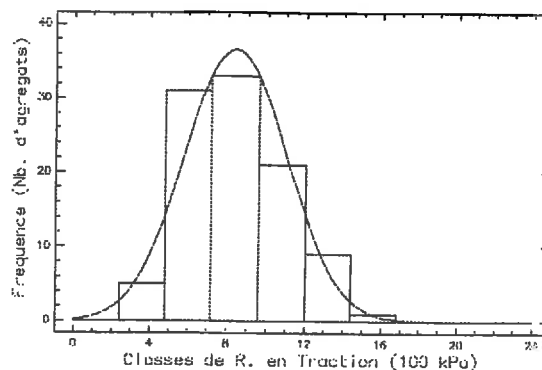
### B. Effet du mode de préparation des agrégats

La préparation à la machine, par son action mécanique engendrant chocs et abrasion, élimine les agrégats de moindre résistance mécanique.

### Profil 13 Agrégats de Mottes $\Delta$

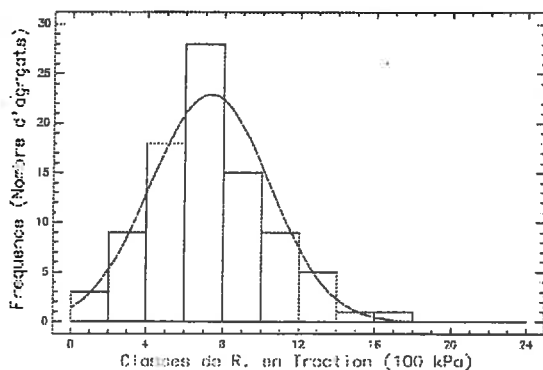


a- Préparation mécanique  
(n = 100)

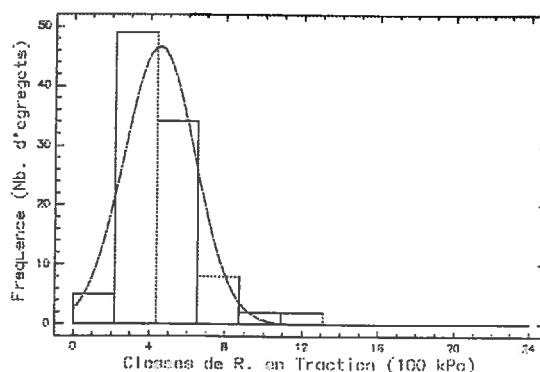


b- Préparation manuelle  
(n = 100)

### Agrégats de Mottes $\nabla$



c- Préparation mécanique  
(n = 89)



d- Préparation manuelle  
(n = 100)

Fig. 3-18. Comparaison de Résistances en Traction Texturale selon la modalité de préparation d'agrégats

Ceux-ci sont généralement constitués d'un assemblage de terre fine (constituants granulométriques élémentaires, ou micro agrégats) faiblement soudée.

Hormis pour les matériaux très pauvres en argile, ces agrégats sont issus de zones compactées à faible charge et/ou à faible humidité, ou encore microfissurés sous les actions climatiques.

Complémentairement, et quelque soit la morphologie des mottes d'origine, la préparation mécanique sélectionne donc des agrégats relativement résistants, d'apparence continue et de comportements proches d'agrégats issus de mottes présentant une morphologie  $\Delta$  (Fig.3-18).

La préparation manuelle a sélectionné des agrégats de masses volumiques peu différentes de celles mesurées sur les agrégats préparés mécaniquement. La résistance en traction des agrégats obtenus manuellement à partir de mottes  $\nabla$  est particulièrement basse

pour la masse volumique mesurée. Celle-ci, certes significativement différente d'un point de vue statistique, reste en pratique très voisine de la densité texturale estimée sur agrégats issus de mottes d'origine de morphologie  $\Delta$ .

Tableau.3-3. Incidence des modes de préparation manuel/mécanique selon les morphologies des mottes d'origine, sur les masses volumiques et les résistances en traction texturales. (Parcelle Plateau, bloc 13-3))

Mode de préparation	morphologie	sans		avec préparation	
		$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>	${}^aT_0$ 10 <sup>2</sup> kPa
Mécanique "	$\nabla$	1.758	1.768	1.768	7.32
	$\Delta$	1.774	1.803	1.803	7.71
Manuel "	$\nabla$	1.758	1.786	1.786	4.51
	$\Delta$	1.774	1.807	1.807	8.40

On peut penser dans ce cas à un compactage à forte charge en conditions sèches peu favorables à l'élaboration de liaisons entre éléments, ou à une microfissuration à l'humectation, qui provoque à cet échelle une augmentation très faible du volume de l'espace poral, en générant des microagrégats très jointifs.

La distribution des résistances en traction d'agrégats tout venant, sans préparation préalable c'est à dire sans tri mécanique, serait fortement contingente de la localisation des prélèvements ainsi que de l'état physique de la couche de sol concernée. La méthode mécanique prépare des volumes quasi-sphériques d'un diamètre compris entre 2-3 mm et sélectionne les agrégats dont la structure est continue et représentative de l'assemblage textural des constituants élémentaires. Leur résistance en traction moyenne  ${}^aT_0$  constitue la moyenne de la gamme supérieure des résistances en traction possibles, et présente l'intérêt, en étant directement corrélée à la texture du matériau, d'être généralement facilement estimée.

On admet ainsi que les agrégats de 2-3 mm qui présentent une faible résistance sont constitués d'agrégats plus petits différemment soudés. La résistance en traction de ces agrégats de 2-3 mm reflète alors cette organisation et la qualité des liaisons entre les petits agrégats et non l'assemblage textural.



### C. Influence de la Morphologie des mottes d'origine sur la résistance en traction texturale

On a limité la comparaison aux résistances en traction d'agrégats issus de mottes  $\Delta$  et  $\nabla$ . Dans les deux cas les agrégats ont été arrondis mécaniquement.

Tableau. 3-4. Relation entre la résistance en traction texturale et la porosité lacunaire selon les morphologies des mottes dans différents sites de la parcelle Plateau.

Site	morpho	${}^aT_0$ 10 <sup>2</sup> kPa	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>	$\eta_{lac}$ %
Profil 13-3	$\nabla$	7.33	1.758	23.0
"	$\Delta$	7.71	1.775	23.1
Allée	$\Delta$	8.88	1.913	21.0
Profil 15-12	$\Delta$	11.57	1.865	19.6

A l'intérieur d'un même profil Plateau(13-3), on ne note pas de différence significative entre les résistances en traction texturales des agrégats issus de mottes de morphologies  $\Delta$  ou  $\nabla$  ; résultats que corroborent les valeurs très proches de porosités lacunaires mesurées par porosimétrie à mercure effectuée sur agrégats naturels.

On constate par contre que les valeurs de  ${}^aT_0$  pour les agrégats issus de mottes  $\Delta$  diffèrent relativement faiblement mais significativement d'un site à l'autre.

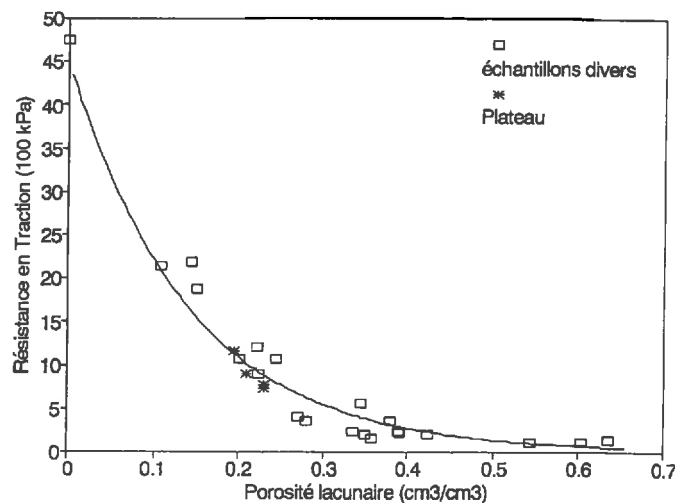


Fig. 3-19. Résistance en traction texturale en fonction de la porosité lacunaire.

Il apparaît que l'augmentation des résistances en traction d'un site à l'autre s'accompagne d'une diminution des porosités lacunaires  $\eta_{lac}$  (Fig. 3-19) tout à fait compatible avec les résultats de Guérif (1988) . La diminution des porosités lacunaires est généralement

le fait d'une augmentation de la teneur en argile (Fiès, 1984; Renault, 1989). Dans ce cas particulier, aucune variation texturale significative, notamment de la teneur en argile, n'est perceptible au vu des analyses granulométriques.

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer les différences de résistances en traction observées.

Soit elles sont à mettre sur le compte d'une variabilité de constitution locale et non appréhendée par l'échantillonnage destiné à l'analyse granulométrique et aux dosages de matières organiques et de calcaire.

Soit elles seraient dues à des variations texturales, notamment dans la fraction limons, qui bien qu'actuellement considérées comme non significatives, auraient des conséquences qui sont encore mal connues sur l'organisation des pores lacunaires (Fiès, communication personnelle), et donc sur la résistance en traction.

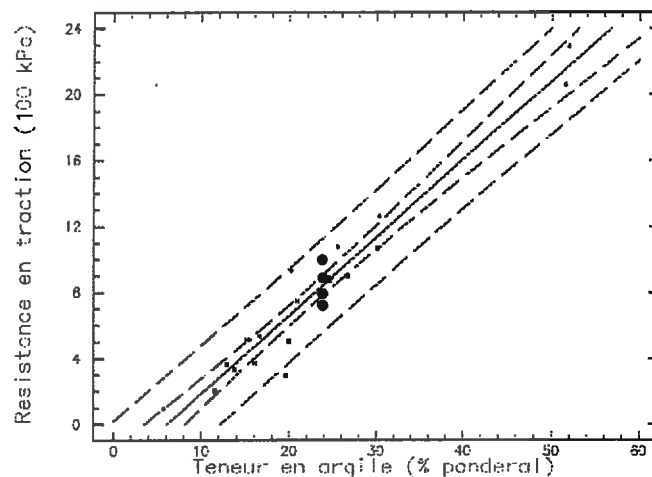


Fig. 3-20. Intervalle de confiance de la relation entre la résistance en traction texturale et la teneur en argile.

Enfin les différences enregistrées peuvent résulter d'une variation de l'assemblage textural dû à des conditions de compactage particulières, dans l'allée par exemple ou dans le profil 15-12 où les mottes  $\Delta$  sont nettement dominantes. Jusqu'à présent de telles modifications n'ont pu être obtenues expérimentalement par compactage (Fiès et Zimmer, 1982; Guérif, 198\*; Fies, 1990, communication personnelle). Par ailleurs, il convient de garder leur juste valeur à ces fluctuations en remarquant que les valeurs observées restent à l'intérieur de l'intervalle de confiance observé par Guérif (1988) autour de la régression (Fig.3-20).

o o  
o

Ainsi la résistance en traction texturale, telle qu'elle a été définie par Guérif (1988), et mesurée sur des agrégats préparés mécaniquement, constitue une référence opérationnelle

pour juger de l'effet de l'application d'une charge sur les propriétés mécaniques des volumes de sol soumis au compactage.

## V. PROPRIETES MECANQUES DE MOTTES NATURELLES $G_{T_0}$

### A. Résultats

Le mode d'échantillonnage, par bloc dans les profils, induit nécessairement des distributions des résistances en traction issues de l'histoire de compactage de ces blocs. Par ailleurs les mottes n'ont pas été échantillonnées au hasard, mais au contraire en sélectionnant à priori des blocs permettant d'obtenir des effectifs satisfaisant par classe de morphologie. Cet objectif n'a pas été toujours atteint dans les sous classes des mottes  $\nabla$ .

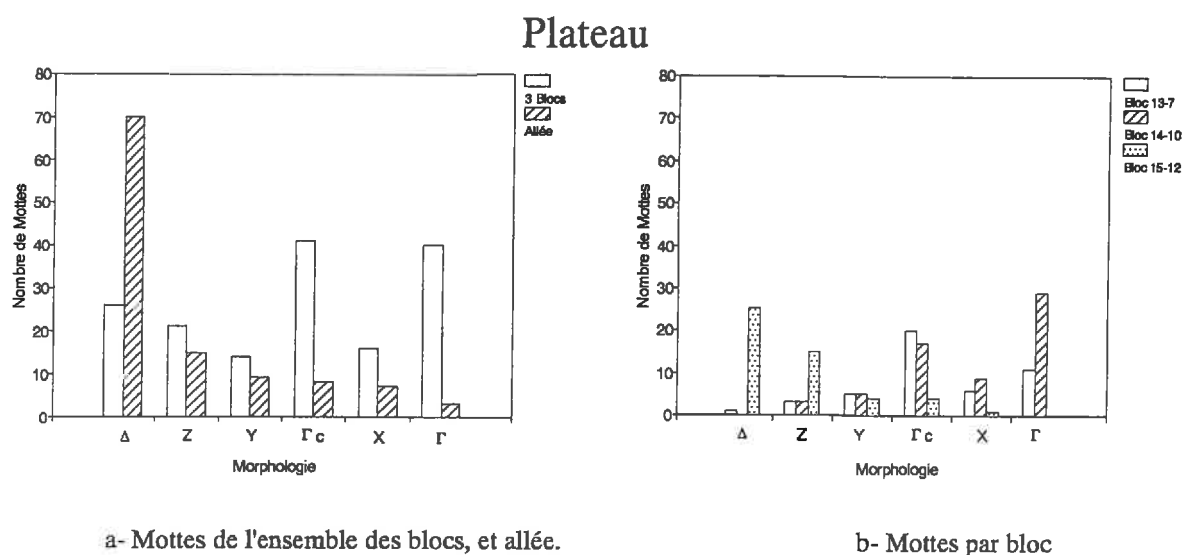
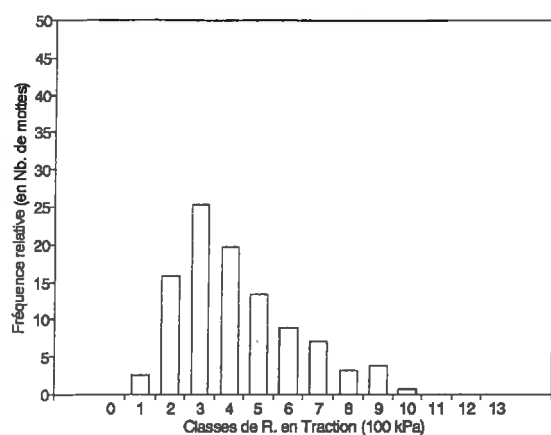


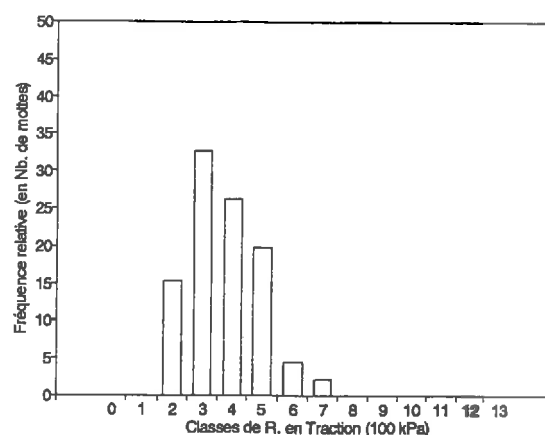
Fig. 3-21. Nombre de mottes arrondies par classe morphologique et par bloc

Les distributions des nombres de mottes par classe morphologique sont présentés Fig.3-21. Dans les classes Y et X les effectifs sont relativement faibles (Fig.3-21-a), dans l'allée les mottes  $\Delta$  sont principalement représentées, chaque sous classe des mottes  $\nabla$  étant sous représentée. Le bloc 15-12 (Fig.3-21-b) contient principalement des mottes  $\Delta$  et Z, les blocs 13-7 et 14-10 fournissant pour l'essentiel des mottes  $\nabla$ . Cette spécificité des blocs et des allées au niveau des morphologies se retrouve au niveau des distributions des résistances en traction globales  $G_{T_0}$  de chaque échantillon (Fig.3-22).

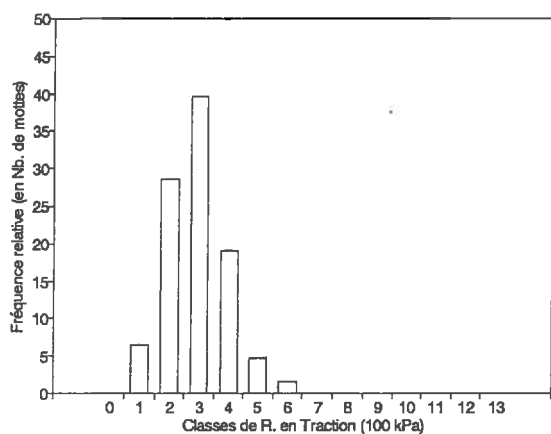
## Plateau (Profils et Allée). Mottes Arrondies



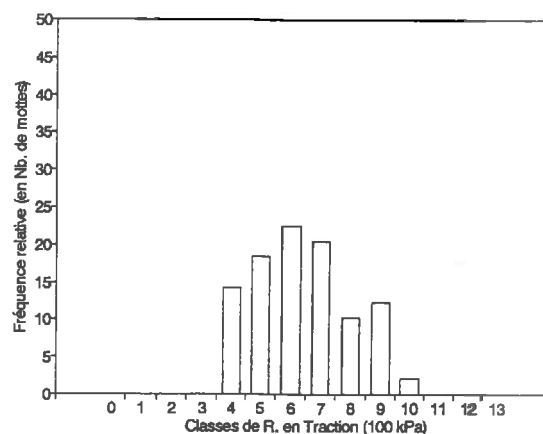
a- Echantillon global (n = 158)



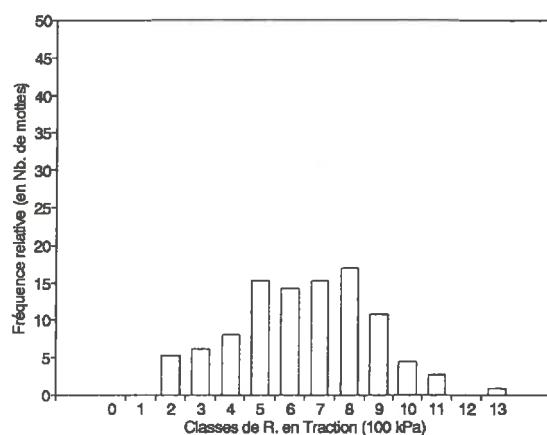
b- Bloc 13-7 (n = 46)



c- Bloc 14-10 (n = 63)



d- Bloc 15-12 (n = 49)



e- Allée. n = (112)

Fig. 3-22. Histogrammes de Résistances en Traction des mottes arrondies. Blocs et Allée, Plateau.

## B. Effet de l'état de compacité

En faisant a priori l'hypothèse que la résistance en traction texturale mesurée pour le bloc (15-12), bien que supérieure à celle des autres blocs, ne jouera qu'un rôle mineur sur la résistance en traction globale des mottes de (15-12), on peut regrouper l'ensemble des résultats pour étudier l'effet de l'état de compacité (exprimé en terme d'indice des vides structuraux) sur la résistance en traction globale  $\sigma_{T0}$  des mottes naturelles (Fig.3-23-a).

### Plateau. Mottes des Profils 13, 14 et 15

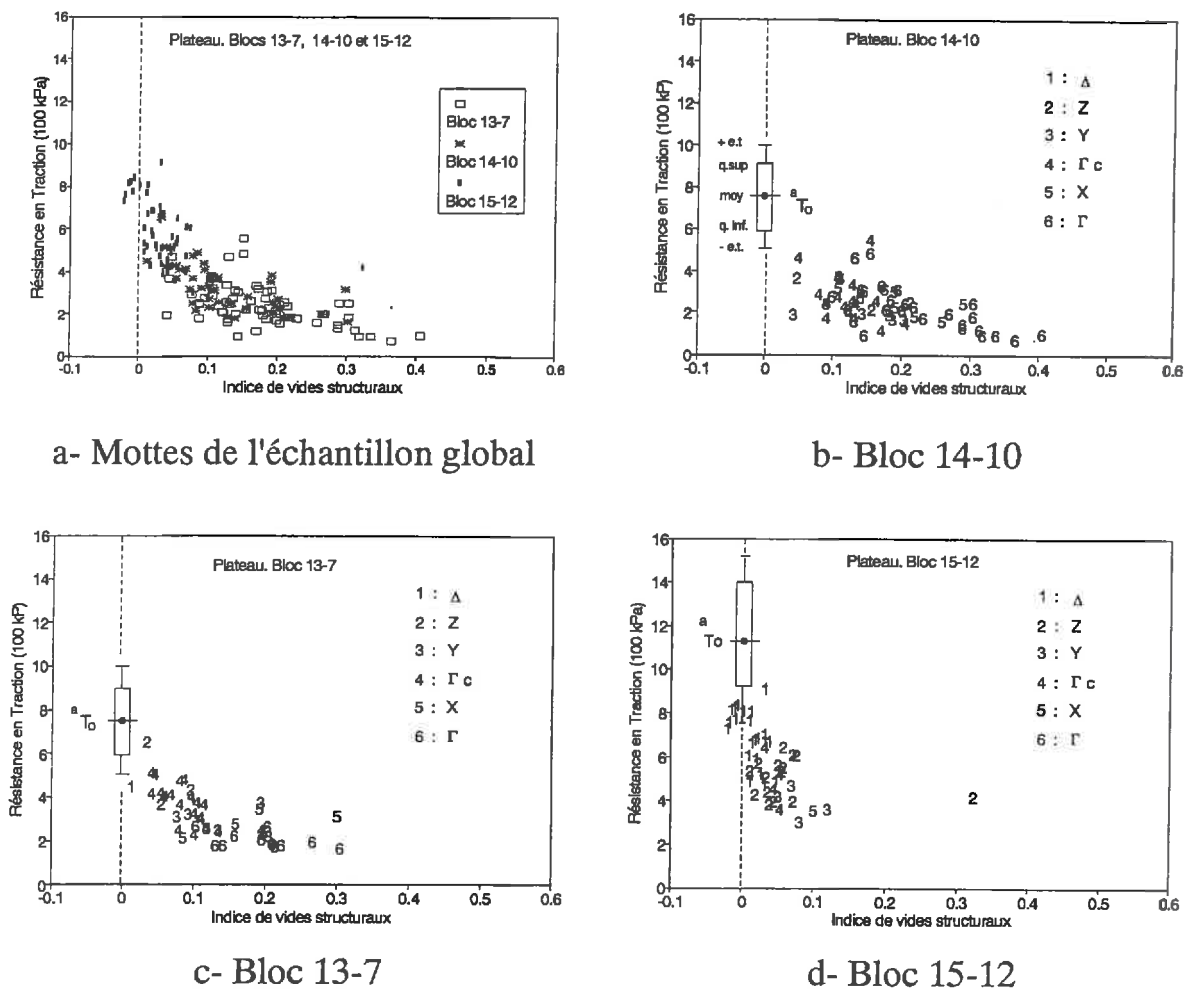


Fig. 3-23 Relation entre la Résistance en Traction globale et la Compacité en distinguant les différents blocs, et les morphologies des mottes.

Pour une valeur donnée de l'indice des vides structuraux la variabilité peut être due :

- aux conditions de compactage (Guérif, 1990), données qui sont inconnues dans le dispositif dont sont issus les échantillons, et notamment à la teneur en eau lors du compactage qui conditionne la qualité des liaisons entre éléments structuraux constitutifs de la motte,

Si de plus, on considère que les mottes sont soumises à des alternances d'humectation - dessiccation, les phénomènes de fissuration viennent encore diminuer la résistance en traction acquise lors du compactage.

Pour les mottes de l'allée de Plateau (Fig.3-24-b) on retrouve le même type de comportement. On n'a pas dans cet échantillon de mottes d'indice des vides structuraux supérieur à 0.25. Il existe un nombre important de mottes à indice des vides structuraux nul ou voisin de zéro dont les valeurs de résistance en traction globale sont incluses dans la gamme des résistances en traction des agrégats. Ces mottes doivent avoir été compactées, pour un couple (teneur en eau au compactage, pression appliquée), mais aussi des conditions d'applications des charges que nous n'avons pas pu mettre en évidence expérimentalement, qui permette à la fois l'obtention d'un indice des vides structuraux voisin de zéro, ainsi qu'une intensité maximale des liaisons entre agrégats.

### C. Relation avec la morphologie

On constate (Tableau 3-5) que les moyennes des résistances en traction de chaque classe morphologique s'ordonnent en fonction de la typologie des mottes et décroissent des mottes  $\Delta$  vers les mottes  $\Gamma$ .

Tableau 3-5 Résistance en Traction Globale des mottes arrondies des profils de la parcelle Plateau.

Morphologie	Nb	Moyenne	Ecart type	C.V.
$\Delta$	26	6.79	1.37	20.2
Z	21	4.72	1.21	25.6
$\Gamma_c$	41	3.45	1.20	34.8
Y	14	2.87	0.97	33.8
X	16	2.69	0.66	24.5
$\Gamma$	40	2.19	0.90	41

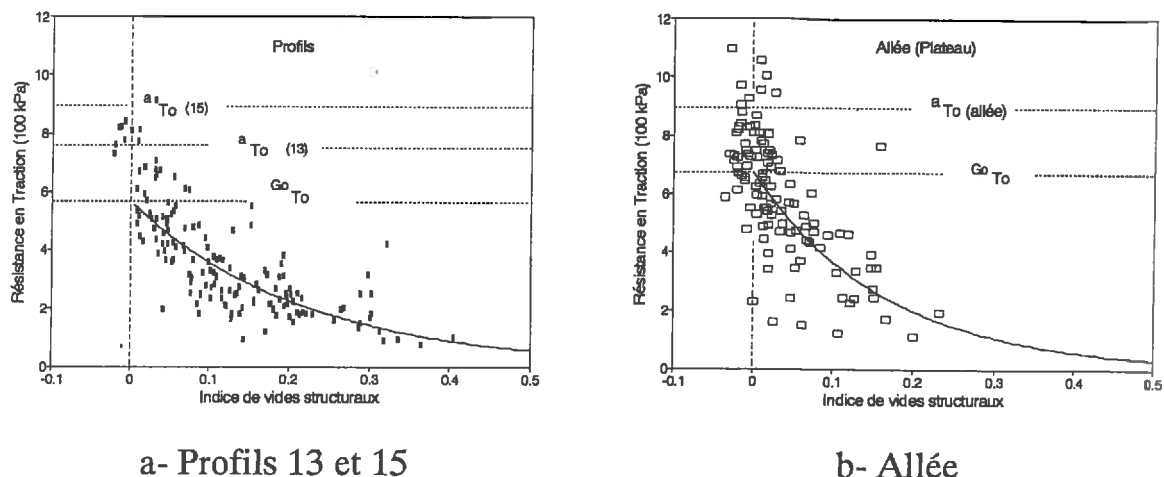
En portant d'une manière synthétique (Fig.3-25) les moyennes des résistances en traction globales en fonction des moyennes d'indices des vides structuraux par classe morphologique, ainsi que les ajustements exponentiels de  $\sigma_{T_0}$  en fonction de  $e_s$  pour les populations des mottes des parcelles et des mottes de l'allée du site Plateau, on constate que malgré les différences d'entretien du sol il y a peu de différences entre les deux situations. La faiblesse de l'effectif de la classe  $\Gamma$  des mottes de l'allée ne permet pas de trancher vis à vis de leur comportement qui serait sans doute moins différencié de celui des mottes des profils avec un échantillonnage satisfaisant.

- mais aussi à une fissuration postérieure au compactage lors d'alternances d'humectations-dessiccations (Utomo et Dexter, 1981a; Stengel, 1988), qui induit des zones de faiblesses mécaniques.

Ces différences d'histoires mécaniques et/ou hydriques sont à l'origine de morphologies différentes ; ainsi pour une même valeur d'indice des vides structuraux on peut observer (Fig.3-23-b/c/d) différentes morphologies qui peuvent correspondre à différentes valeurs de résistances mécaniques globales.

Si on localise (Fig.3-23-b/c/d) une représentation schématique (Box and Whisker plot) de l'histogramme des résistances en traction des agrégats sur l'axe des ordonnées, on constate que la résistance en traction des mottes après compactage est bornée supérieurement par la gamme des résistances en traction texturales.

### Plateau. Mottes arrondies



a- Profils 13 et 15

b- Allée

Fig. 3-24. Résistance en traction en fonction de l'indice de vides structuraux.

En regroupant les différents échantillons des profils du site Plateau (Fig.3-24-a) un ajustement exponentiel sur l'ensemble de la population donne une ordonnée à l'origine  $G\sigma T_0$  (soit la résistance en traction globale pour un indice des vides structuraux nul) de  $5.57 \cdot 10^2$  kPa qui reste inférieure aux résistances en traction texturales  ${}^aT_0$  estimées pour les blocs (13-7) et (15-12).

On peut concevoir une teneur en eau au compactage seuil pour laquelle la relation résistance en traction globale ( $G\sigma T_0$ ) - indice des vides structuraux ( $e_s$ ) corresponde à l'enveloppe supérieure des couples ( $e_s, G\sigma T_0$ ). L'ordonnée à l'origine en serait alors la résistance en traction texturale ( ${}^aT_0$ ). Plus la teneur en eau lors du compactage serait inférieure à cette teneur seuil, plus la résistance en traction serait faible.

## Plateau. Parcelles et allée

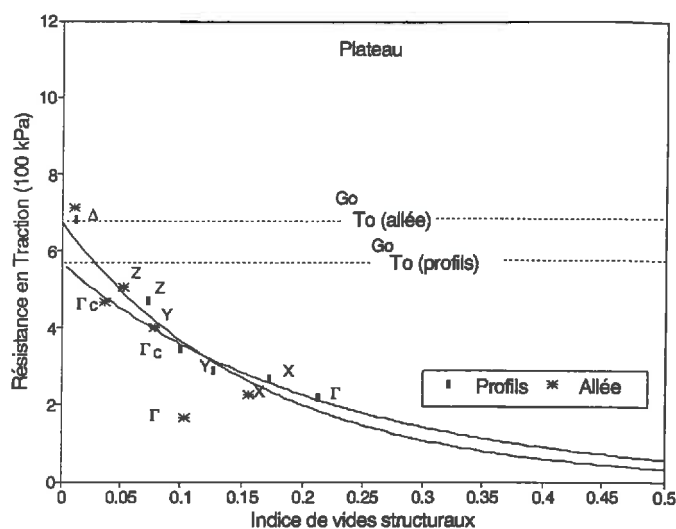


Fig. 3-25. Résistance en traction en fonction de l'indice de vides structuraux. Moyennes par classe morphologique.

Apparemment la correspondance entre classe morphologique et gamme d'indice des vides structuraux mise en évidence au Chapitre 1 domine dans la relation résistance en traction indice des vides structuraux. Les classes morphologiques, telles qu'elles ont été définies, ne permettent pas de discriminer, à l'intérieur des classes d'indice des vides structuraux, de stratification indépendante des résistances en traction.

o o  
o

L'étude des résistances en traction globale des mottes naturelles sont compatibles avec les résultats expérimentaux de Guérif (1990) obtenus sur matériaux remaniés qui établissent la relation entre  $G_{T_0}$  et  $e_{sp}$ , et montrent l'importance des conditions hydriques de compactage.

Le bon accord obtenu entre les classes morphologiques et les classes d'indice des vides structuraux (Chapitre 1) se retrouve entre les classes morphologiques et les résistances en traction. Cette relation reste néanmoins contingente de la texture du matériaux et des conditions de compactage qui induisent les distributions des résistances en traction pour une classe d'indice des vides structuraux donnée, mais aussi des conditions climatiques postérieures au compactage.



## VI. ETATS PHYSIQUES INITIAUX ET MODALITES DE COMPACTAGE ; APPROCHE EXPERIMENTALE :

La difficulté d'accéder à la connaissance des différents états physiques initiaux et des modalités précises des compactages successifs au cours de la saison culturale en conditions normales de terrain, impose de recourir à une démarche expérimentale. Celle-ci devrait permettre d'analyser quelques uns des facteurs de variation de la résistance en traction globale, pression, teneur en eau au compactage, et, calibre des éléments structuraux constitutifs des mottes. On se limitera par la suite à l'étude des conditions hydriques et mécaniques d'obtention de mottes  $\Delta$ , en éliminant d'office l'effet des alternances humectation - dessiccation

### A. Effet de la compacité induite

En regroupant l'ensemble des massifs ayant subi une compression uniaxiale confinée simple, et en portant comme précédemment pour les mottes naturelles la résistance en traction en fonction de l'indice des vides structuraux, on retrouve (Fig.3-26-a) l'allure des résultats rencontrés sur les mottes naturelles des parcelles Plateau. L'ajustement exponentiel, déjà pratiqué sur les mottes naturelles, présente une valeur de l'ordonnée à l'origine  ${}^G T_0$  inférieure à la résistance en traction texturale  ${}^a T_0$ . Quelle que soit la combinaison des états physiques initiaux, et les modalités de compactage, il n'a pas été possible de créer des massifs compactés dont la résistance en traction atteigne la résistance en traction texturale.

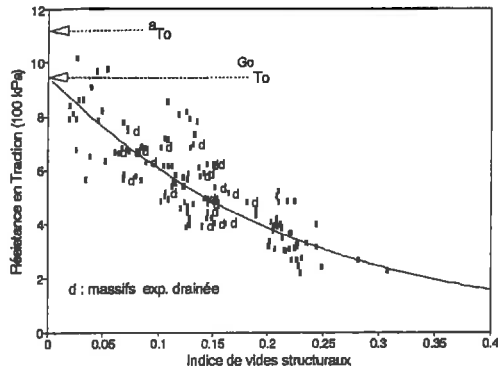
En situant les données de chaque calibre par rapport à l'ajustement, on constate (Fig.3-26-b,c,d,e,f) qu'il existe une stratification des résistances en traction globales induite par les tailles des agrégats et leurs étalements. La résistance en traction est d'autant plus élevée que la taille des agrégats est réduite. La faible taille des agrégats et leur étalement favorisent un grand nombre de points, ou de surface, de contacts qui peut expliquer cette augmentation de la résistance en traction.

### B. Effet de la teneur en eau

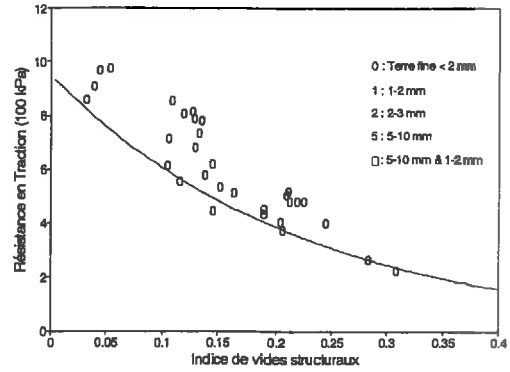
En effectuant pour chaque calibre une stratification par classe d'indices des vides structuraux ( $e_s \notin [0, 0.1]$  ;  $[0.1, 0.2]$  ;  $e_s > 0.2$ ), on constate (Fig.3-27) que, à l'intérieur de chaque classe de  $e_s$ , la variabilité de la résistance en traction globale est en partie définie par la teneur en eau au compactage.

La première classe, où  $e_s \notin [0, 0.1]$ , correspond aux massifs pour lesquels on cherchait à obtenir des indices des vides structuraux nuls. On a vu (Chapitre 2) que le comportement au compactage dans de telles conditions conduisait à l'apparition d'un espace poral structural résiduel dont le volume est proportionnel au volume d'eau au compactage.

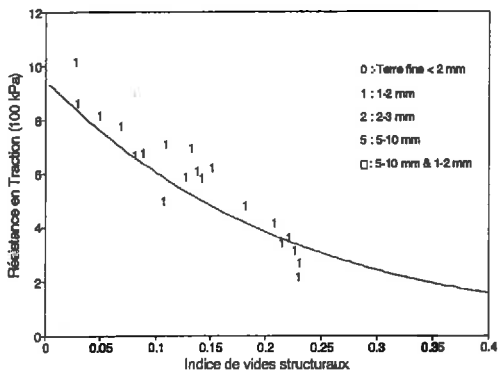
### Chantepie, massifs compactés.



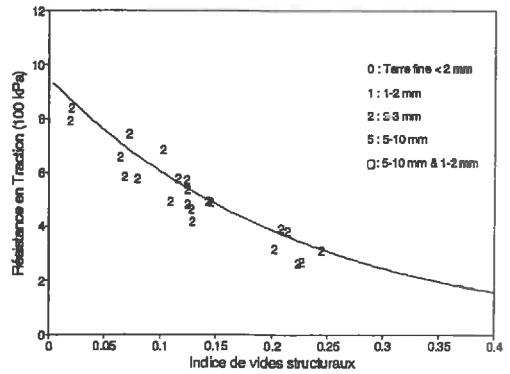
a- Echantillon global



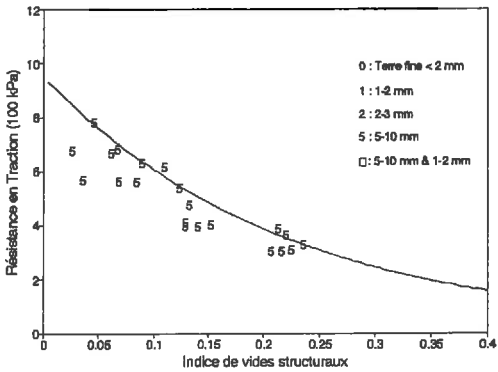
b- Terre fine < 2 mm



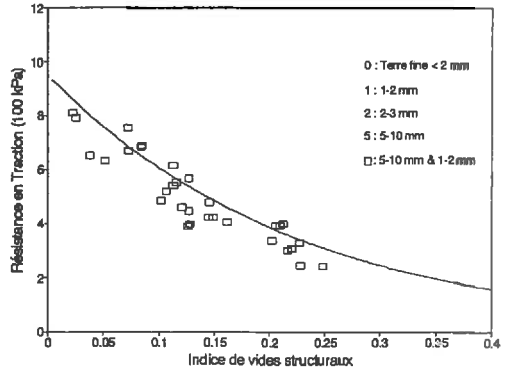
c- 1-2 mm



d- 2-3 mm



e- 5-10 mm



f- 5-10 mm (60%) et 1-2 mm (40%)

Fig. 3-26. Résistance en Traction des massifs en fonction de leur compacité à l'état sec, selon les calibres d'agrégats. Chantepie, massifs drainés et non drainés.

## Chantepie. Massifs compactés

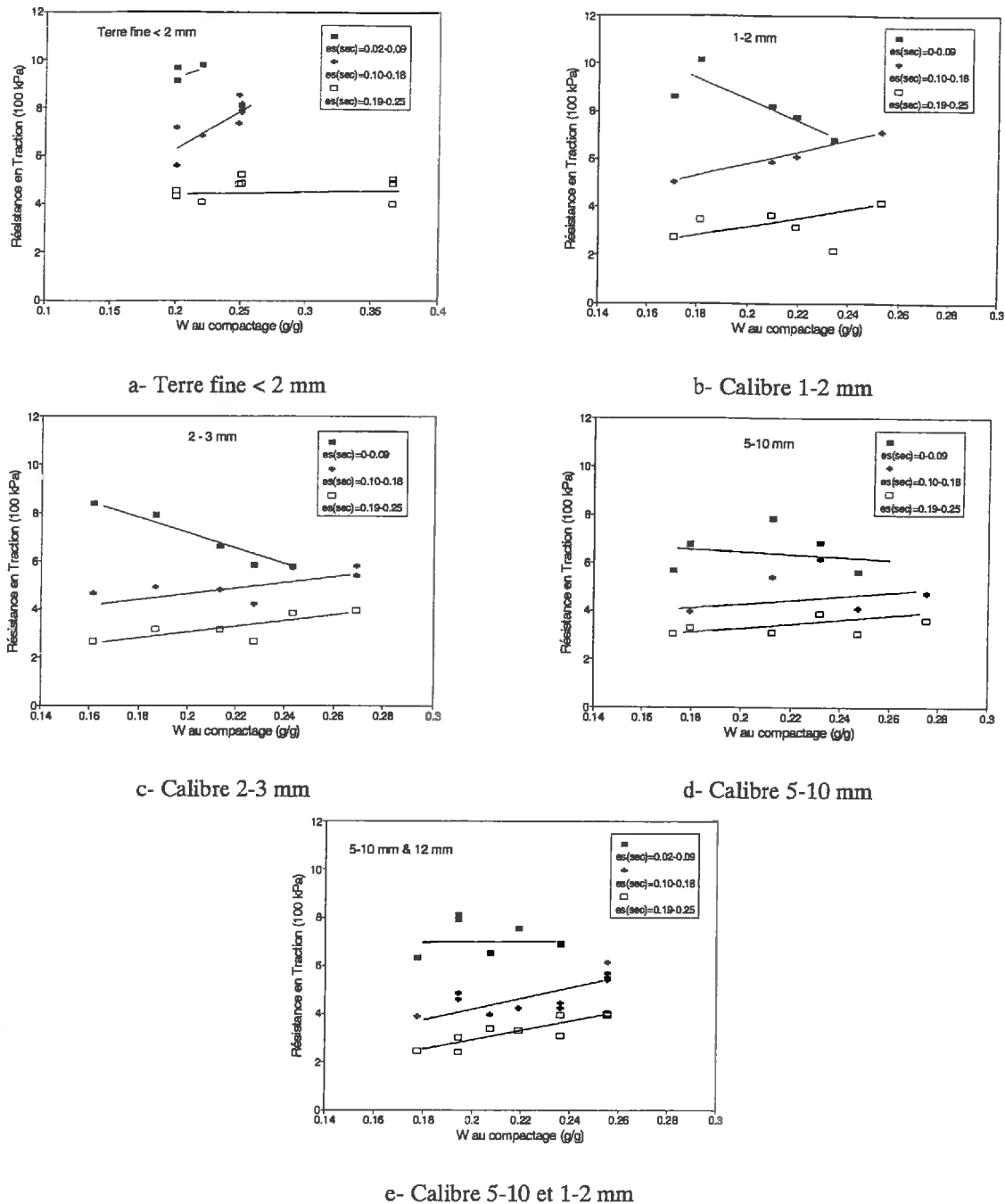


Fig. 3-26 Relation entre l'humidité au compactage et la résistance en traction des massifs classés par leur compacité à l'état sec. Expérience non-drainé.

Ce phénomène explique que, pour la classe où l'indice des vides structural  $\leq [0,0.1]$ , la résistance en traction diminue quand la teneur en eau augmente.

A contrario, dans les deux autres classes où ce phénomène n'existe pas, la résistance en traction augmente avec la teneur en eau au compactage comme on le trouve dans la littérature. La qualité des liaisons entre agrégats induites par le compactage serait d'autant meilleure que la teneur en eau serait plus élevée, au moins dans la gamme des potentiels et des indices des vides structuraux étudiés.

### C. Effet des modalités d'application des charges

Comme on l'a vu, la résistance en traction globale induite par compactage est en grande partie déterminée par l'état physique du massif résultant du compactage. L'effet de la pression appliquée dans la majorité des cas ne peut être interprété qu'au travers de l'analyse de cet état physique acquis, imposé par le couple (pression, teneur en eau), mais peut être aussi, dans une moindre mesure, modulé par la granulométrie des agrégats initiaux.

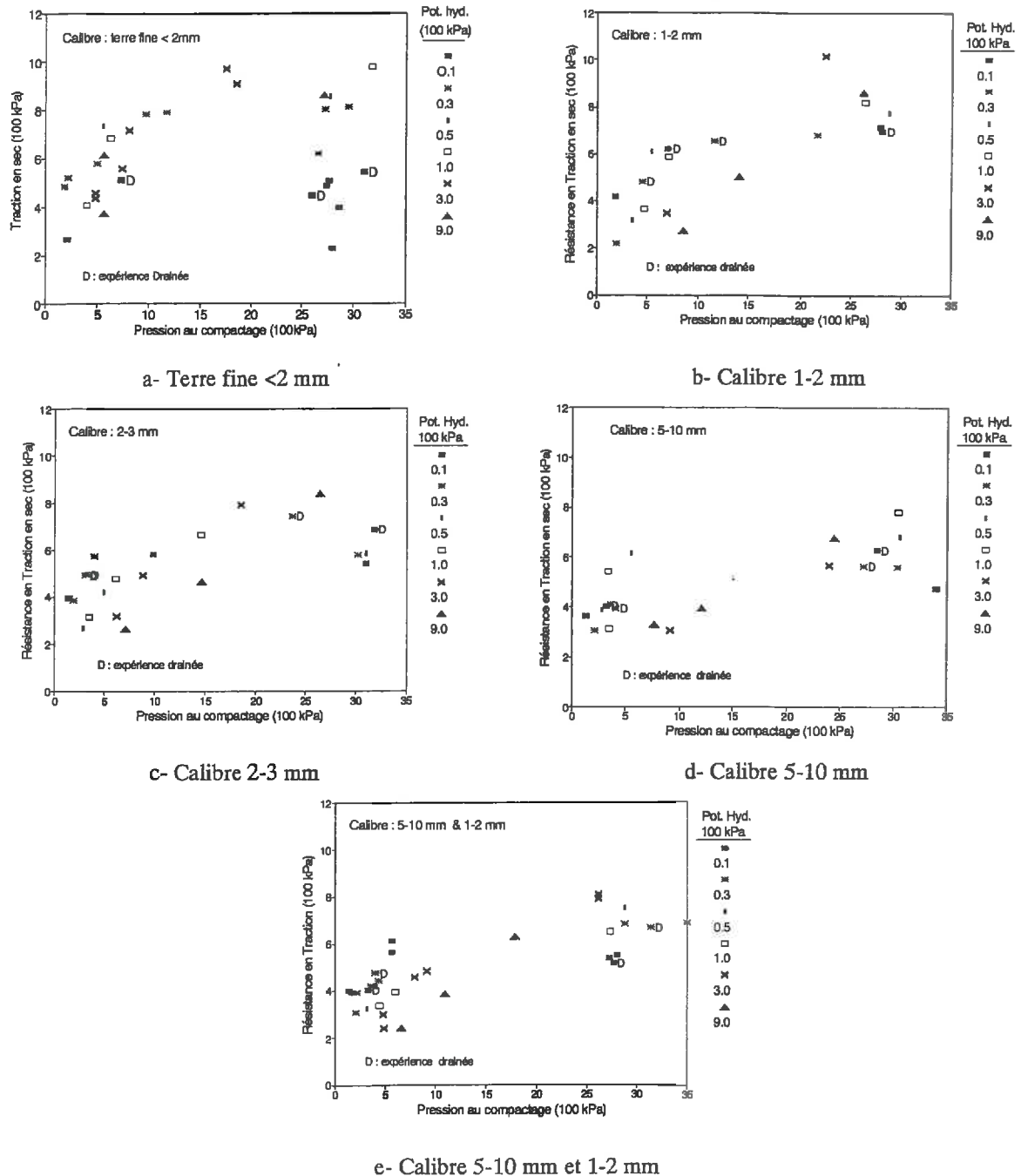


Fig. 3-27 Effet de la Pression appliquée au compactage sur la résistance en traction des massifs secs (D indique un essai en conditions drainées)

## 1. Intensité des pressions appliquées

Les résistances en traction globales induites par le processus de compactage sont en règle générale d'autant plus élevées que l'intensité des charges appliquées est élevée (Fig.3-27).

Cet accroissement de résistance en traction avec l'augmentation de la charge est dû généralement à l'augmentation de la compacité. Cependant lorsque les agrégats sont saturés et singulièrement dans le cas de la terre fine, les résistances en traction présentent, pour des charges élevées, une variabilité importante et des valeurs relativement faibles. Dans ces conditions, comme on l'a vu précédemment, il n'est pas possible malgré des pressions élevées de supprimer totalement l'espace poral structural (Chapitre 2). Cet espace poral structural résiduel est proportionnel à la teneur en eau, et plus le potentiel hydrique tend vers zéro plus cet espace poral résiduel augmente, limitant en conséquence les résistances en traction globales induites. Dans le cas où les pressions dépassent  $25 \cdot 10^2$  kPa, ce phénomène est particulièrement marqué pour la terre fine.

### Chantepie. Cycles de compactage

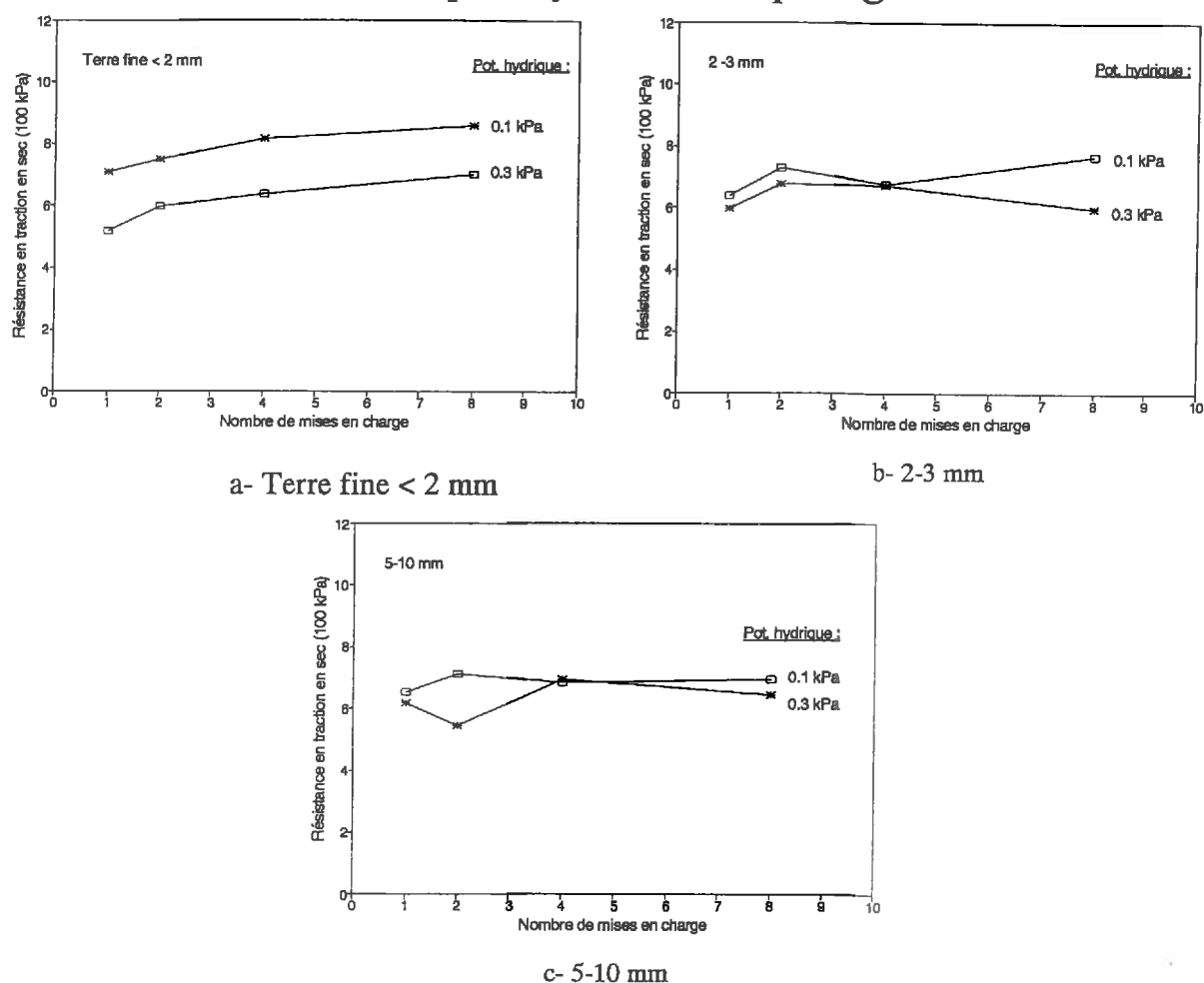


Fig. 3-28 Effet du nombre de mises en charge sur la résistance en traction de massifs à l'état sec de 3 calibres d'agrégats.

## 2. Nombre de mises en charge

L'étude des charges cycliques a été effectuée pour une pression de  $4 \cdot 10^2$  kPa appliquée pendant une minute, la mise en charge étant répétée après une minute de déchargement 2, 4 et 8 fois. On a vu au Chapitre 2 que l'indice des vides structuraux après recouvrance et dessiccation n'est que faiblement diminué par l'augmentation du nombre de mises en charge. En conséquence, on constate (Fig.3-28) qu'une augmentation du nombre de mises en charge de 1 à 8 ne provoque généralement pas d'augmentation perceptible de la résistance en traction globale. Seule la terre fine présente une légère augmentation de la résistance en traction avec l'augmentation du nombre de mises en charge, que l'on peut expliquer par l'amplitude des variations de l'indice des vides structuraux. On peut évoquer parallèlement l'effet d'une amélioration à chaque cycle de la qualité des liaisons qui doivent s'établir entre des agrégats et des microagrégats initialement très divisés du fait de leur faible taille.

## D. Comparaison avec les mottes naturelles ; Relation avec la morphologie

### 1. Comparaison entre massifs compactés et mottes naturelles

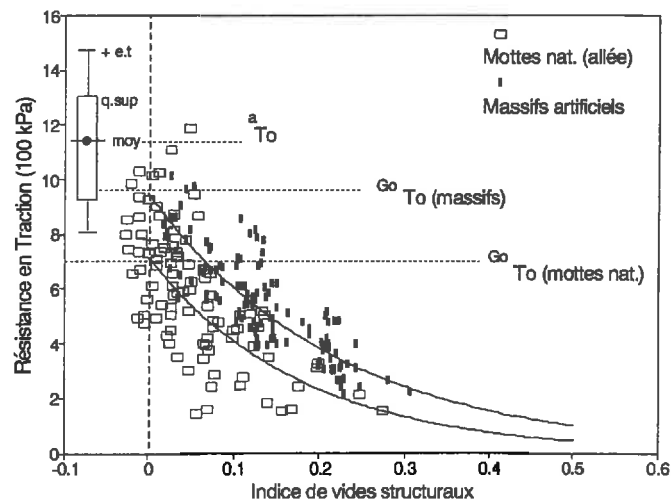


Fig.3-29. Relation entre la résistance en traction globale et l'indice des vides structuraux des mottes naturelles de l'allée et des massifs compactés

En portant (Fig.3-29) les résistances en traction globales des massifs et des mottes naturelles provenant de l'allée en fonction de leurs indices des vides structuraux, on constate que :

- Les résistances en traction des massifs compactés sont, à indice des vides structuraux équivalents, en général supérieures à celles des mottes de l'allée dont on ne

connaît ni les conditions de compactage ni l'histoire hydrique ultérieure (une fissuration des mottes de l'allée lors d'alternances d'humectation/dessiccation pourrait entre autres expliquer cette moindre résistance),

- Lorsque les indices des vides structuraux sont proches de zéro, certaines mottes de l'allée présentent des résistances en traction proches de la résistance en traction texturale.

## 2. Morphologies et résistance en traction

La correspondance entre les classes morphologiques et les indices des vides structuraux moyens par classe, mise en évidence et analysée au Chapitre 1, induit une relation entre classes morphologiques et niveaux de résistances en traction (Fig.3-30).

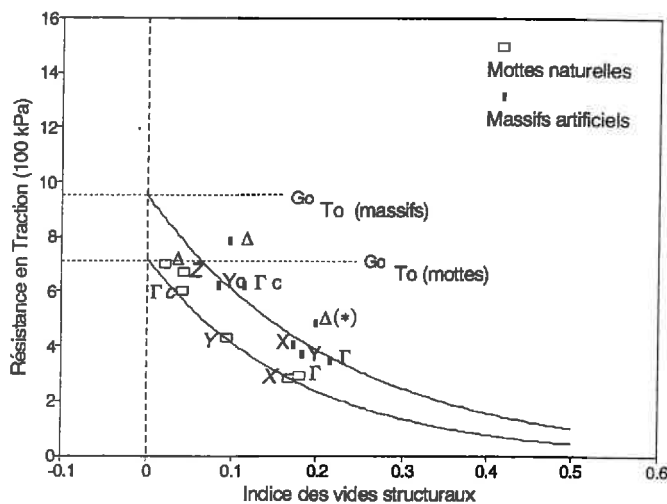


Fig. 3-30. Relations entre l'indice des vides structuraux et la résistance en traction des mottes naturelles de l'allée et des massifs artificiels (drainés et non drainés).  $\Delta^*$  : massifs d'apparence continue, issus du compactage de la terre fine en conditions très humides et présentant des fissures et/ou des bulles d'air.

Si les individus de deux sous-populations de mottes, présentant les mêmes caractéristiques morphologiques et des valeurs de  $e_s$  semblables, ont des niveaux moyens de résistance en traction différents, on peut en déduire que des différences de qualité et/ou de répartition spatiale des liaisons peuvent seules expliquer ces différences de niveaux de résistance (X)

Par contre, si deux populations de mottes, présentant les mêmes caractéristiques morphologiques et des niveaux de résistance en traction  $^G T_0$  semblables, mais ayant des  $e_s$  différents, on peut en déduire que le volume de l'espace poral structural n'est plus une variable explicative satisfaisante de la résistance en traction, car elle dépend de la population concernée. La quantité, la distribution spatiale, et la qualité des liaisons sont, au moins en

partie, indépendantes du volume de l'espace poral structural, et dominant face aux variations de  $e_s$  pour régir la résistance en traction. ( $\Delta$ ,  $Y$  et  $\Gamma_c$ )

## VII. DISCUSSION ET CONCLUSIONS PARTIELLES

La résistance en traction texturale s'avère un système de référence satisfaisant pour juger de la résistance mécanique induite par les différents processus de compactage pour différents états physiques initiaux. Il convient cependant que le mode de préparation des agrégats arrondis utilisés pour les mesures :

- sélectionne des volumes de sol où l'intensité des liaisons entre constituants est principalement déterminée par la résistance mécanique propre à la phase argileuse qui assure leur cimentation,

- ou encore qu'il élimine les agrégats microfissurés ou issus d'une agglomération de terre fine induite par un compactage soit de faible intensité soit en condition sèche.

On retrouve sur les mottes naturelles les phénomènes mis en évidence expérimentalement par Guérif (1990) :

- l'allure de la relation entre résistance en traction globale et indice des vides structuraux

- l'influence de la teneur en eau au compactage sur la qualité des liaisons entre agrégats compactés pour des massifs ayant le même indice des vides structuraux, qui se traduit par une dispersion des résultats autour de la tendance.

L'augmentation de la charge, en interaction avec l'augmentation de la teneur en eau, augmente la résistance mécanique en augmentant la compacité.

Cependant les compactages mêmes intensifs (charges élevées, compression avec possibilité de drainage, chargements successifs) d'agrégats saturés ne conduisent pas dans nos conditions expérimentales à un indice des vides structuraux nul et par voie de conséquences ne conduisent pas à une résistance en traction globale égale à la résistance en traction texturale.

Que ce soit à partir de mottes naturelles ou de massifs compactés il existe une relation entre classes morphologiques et niveaux moyens de résistance en traction globale par classes. Cette relation reflète principalement la correspondance établie entre classe morphologique/indice des vides structuraux.

Dans le cas où les morphologies des mottes sont imposées par la combinaison de l'état initial des fragments constitutifs du volume compacté et de l'intensité de la mise en charge, les traits morphologiques de la classification expriment implicitement l'effet de la surface de contact et donc de la liaison entre éléments structuraux constitutifs. Etant



étroitement corréllés au volume de l'espace poral structural, ils n'apportent pas d'information spécifique concernant les résistances mécaniques globales.

Par contre, dans le cas de fissuration partielle des mottes sous l'action d'outils ou d'alternances d'humectation / dessiccation, l'indice des vides ne devrait alors pas être une variable explicative adéquate de la résistance mécanique. En effet la fissuration peut n'entraîner que de faibles variation de l'espace poral tout en diminuant considérablement la résistance mécanique globale. L'expérimentation entreprise dans ce travail n'a pas du tout abordé cet aspect de la morphologie, issu notamment de l'activité structurale du matériau sous les agents climatiques, qui devrait être beaucoup moins corréllé à une expression du volume de l'espace poral structural.

## CONCLUSION GENERALE

Nous avons dans ce travail proposé une classification des états internes des mottes qui complète et systématise la typologie de Manichon. Fondée uniquement sur la distinction de deux types de morphologie de base,  $\Delta$  et  $\nabla$ , elle assimile les mottes à des assemblages des volumes appartenant à chacun des deux types. En estimant la proportion volumique de ces deux types et la compacité de l'assemblage, elle différencie des classes de mottes suivant des critères qui sont dans leur nature quantitatifs, même s'ils sont évalués de façon très approximative par observation visuelle directe.

La comparaison avec l'analyse des systèmes de porosité a bien confirmé ce caractère quasi quantitatif de la classification. Le tri morphologique des mottes selon leur état interne sépare des classes de porosité structurale, suivant un ordre conforme aux hypothèses qui ont présidé à l'élaboration de la classification. Ces classes de porosité structurale sont, en valeur moyenne, régulièrement espacées. Elles présentent toutefois une forte dispersion. On peut la réduire en les subdivisant en sous classes, par appréciation de la porosité visible, comme le montre l'exemple de la classe d'état  $\Gamma$ , qui pour les mottes artificielles, a du être étendu à d'autres classes morphologiques.

De ce point de vue, la classification morphologique apparaît comme un moyen permettant d'estimer sur le terrain la porosité structurale des mottes et sa dispersion.

Toutefois, nous avons vu que la valeur moyenne des porosités structurales correspondant à chaque état interne, et sa dispersion, étaient variables suivant l'histoire mécanique du profil étudié. Bien que les échantillons mettant en évidence cet effet de l'histoire représentent un cas extrême, puisqu'ils sont extraits des zones roulées d'allée, ils suggèrent qu'un type morphologique ne soit pas nécessairement associé à un niveau moyen de porosité structurale, indépendamment du système de culture. On peut ainsi supposer que des parcelles conduites en semis direct permanent présenteraient des états internes plus proches de ceux des allées que de ceux des parcelles.

Outre l'homogénéité de l'état interne des mottes et la présence éventuelle d'une porosité structurale visible insuffisamment prise en compte dans les critères de classification (porosité de forme arrondie), cette variation des porosités structurales correspondant aux classes morphologiques dépendrait de la variabilité de l'état  $\Delta$ . Nous reviendrons plus loin sur ce point.

En considérant d'abord l'existence de la relation classement morphologique-valeur de porosité structurale, on doit s'interroger sur l'intérêt respectif de ces deux moyens de caractérisation d'état interne de mottes, en terme de prévision de leurs propriétés physiques. A cet égard, on peut d'abord constater que le classement morphologique est un estimateur rapide

mais néanmoins imprécis de la porosité structurale. A un état interne donné correspond une gamme étendue de porosité structurale. Compte tenu de la sensibilité de la plupart des propriétés physiques à ce paramètre, on peut en conclure qu'à une classe morphologique correspondent des propriétés physiques très variables. Ceci serait évidemment vérifié pour les coefficients de transferts de masse, coefficient de diffusion pour les gaz ou conductivité hydraulique. Par rapport à ces paramètres, la recherche d'estimateurs inciterait à subdiviser les classes morphologiques, et tout particulièrement les classes correspondant aux états les plus compacts, dans la mesure où l'on sait qu'un très petit volume de pores structuraux est susceptible d'accroître considérablement les propriétés de conduction.

Mais on peut également évaluer, à partir des données sur la résistance mécanique, quelle amélioration de la connaissance des propriétés physiques apporte la classification morphologique par rapport à l'analyse de la porosité utilisée seule.

Nos résultats montrent, à cet égard, que la porosité structurale est la meilleure variable explicative de la résistance mécanique après compactage et dessiccation, la relation résistance-porosité structurale étant cependant dépendante de la morphologie structurale. Du fait de l'intervention d'autres facteurs dans le déterminisme de la résistance mécanique, il est impossible d'en proposer un modèle d'estimation à partir des deux variables, porosité structurale et classe d'état interne. Ces facteurs, humidité lors du compactage, pression appliquée, peuvent être corrélés à l'état interne, ce qui complique l'analyse.

Finalement, en termes généraux, cette tentative montre la faisabilité d'un tri des états internes corrélables à des classes ou des niveaux moyens de propriétés physiques. Elle peut permettre des estimations grossières de ces propriétés dont l'utilité peut être de prendre en compte la variabilité spatiale et temporelle grâce à la rapidité et à l'économie des moyens de mesure. Cependant, l'adaptation à l'estimation de différentes variables imposerait certainement l'élaboration de nouveaux critères morphologiques, pour être discriminant dans les domaines où les variables sont les plus sensibles aux modifications de la structure. Dans la majorité des cas ceci conduirait à affiner la classification des états les plus compacts pour lesquels la variation des paramètres de transferts ont les conséquences les plus importantes sur les flux.

Le deuxième aspect de l'interprétation de notre méthode, et le plus décisif par rapport à l'objectif général de la démarche était la connaissance des conditions de formation des différents types d'état interne. Si l'on considère l'ensemble des résultats de l'étude expérimentale deux points essentiels nous paraissent ressortir :

- L'influence très importante de l'état structural avant compactage sur l'état interne des mottes formées : pour des teneurs en eau et des pressions appliquées, même élevées, la limite des éléments structuraux qui sont assemblés par le compactage et constituent la motte restent discernables, si ces éléments étaient suffisamment grossiers.

- La possibilité de reproduire, à partir d'états initiaux variés, et par le protocole de compactage élémentaire que nous avons utilisé, des états internes très voisins de ceux des mottes naturelles.

Ces deux faits mettent en évidence l'intérêt d'une approche du compactage tenant compte de l'organisation structurale pour pouvoir comprendre son rôle dans l'évolution structurale des couches travaillées et ses conséquences.

A partir de ces principaux éléments, nous pouvons aborder de façon plus approfondie le cas particulier de l'état  $\Delta$ . Celui-ci a été privilégié dans les travaux antérieurs en tant qu'indicateur de l'effet cumulatif des systèmes de cultures, en se fondant sur un ensemble d'hypothèses (Manichon et Roger-Estrade, 1990) concernant :

1- Son homogénéité supposée, conséquence de la définition plus étroite de ses critères morphologiques distinctifs par rapport aux autres états types.

2- Les propriétés physiques caractéristiques liées à cette morphologie : par exemple un niveau de résistance mécanique suffisamment supérieur à celui des autres états pour qu'on puisse assimiler état  $\Delta$  et obstacle à l'enracinement.

3- Des conditions de formation suffisamment restrictive pour qu'on puisse lui attribuer une origine exclusivement anthropique et l'associer aux applications de contrainte les plus élevées en conditions humides.

4- Sa stabilité temporelle dans l'horizon  $H_5$ , c'est-à-dire l'influence négligeable des mécanismes naturels d'évolution structurale dans la partie profonde de l'horizon labouré. Nos résultats permettent seulement de discuter les trois premières de ces hypothèses. Ils montrent à la fois la grande variabilité de l'état  $\Delta$  dans l'horizon  $H_5$  d'une parcelle soumise à un système de culture donnée, et la possibilité de différenciation entre des états  $\Delta$  pour des systèmes de culture différents.

Dès lors, on ne peut comparer des systèmes de culture en se fondant sur la teneur en mottes  $\Delta$  qu'après s'être assuré de l'identité statistique des états internes de ces mottes. A cette condition, la comparaison peut acquérir le sens qui lui est attribué par Manichon. Elle révélerait l'influence du système de culture sur le bilan entre la fraction volumique de l'horizon travaillée qui est affectée par des tassements anthropiques d'une intensité donnée d'une part, la fraction volumique de ce même horizon qui est finement divisé par les façons superficielles et les actions climatiques d'autre part.

En revanche, avec les critères actuels de leur identification, on ne peut pas en général attribuer aux mottes  $\Delta$  des propriétés physiques suffisamment homogènes et différentes de celles des autres populations pour fonder la disjonction entre volume  $\Delta$  et  $\nabla$  dans le profil. Si nos résultats ont bien établi l'existence de relations entre morphologie des différents états internes et propriétés physiques, ils montrent également que la définition des seuils de ces propriétés spécifiques de l'état  $\Delta$  est arbitraire dans les cas que nous avons étudié. Cela

signifie qu'on ne peut établir l'influence spécifique de l'abondance des volumes  $\Delta$  sans avoir préalablement montré, par la mesure des propriétés physiques pertinentes, qu'on peut leur attribuer un comportement ou des fonctions particulières.

Quant aux hypothèses sur le déterminisme d'apparition de l'état  $\Delta$ , qui fonde la relation entre sa fréquence et les systèmes de culture, nous n'avons pu préciser les limites de ces conditions de formation par rapport aux différentes variables étudiées : pression appliquée, teneur et potentiel de l'eau, état structural initial. Nous ne sommes parvenus à générer une morphologie de type  $\Delta$  qu'en compactant de la terre fine.

Dans nos conditions expérimentales, l'état  $\Delta$  ne pouvait pas être généré par un processus simple d'application de pression suivi de séchage lorsque la structure initiale comportait des agrégats grossiers. L'extension de ce résultat au terrain requiert une certaine prudence. Les conditions de compactage réalisées sous les roues sont évidemment différentes de celles qui prévalent dans la presse et nous y avons insisté. Néanmoins, il est vraisemblable que la genèse de l'état  $\Delta$  n'est pas exclusivement le résultat d'un processus élémentaire de tassement. Elle peut inclure une combinatoire plus ou moins complexe d'applications de pression et de variations de teneur en eau. Cela sous entendrait qu'elle comporte probablement un aspect cumulatif et ferait apparaître les caractéristiques de l'état  $\Delta$  comme un autre indicateur possible de l'effet "système de culture".

Bien que cette influence déterminante de l'état structural initial sur l'état interne des mottes ne remette pas en cause l'hypothèse générale qui relie les états internes les plus compacts aux épisodes d'application des charges les plus élevées en conditions humides, l'identification des composantes des itinéraires techniques responsables de la formation de l'état  $\Delta$  reste après notre travail très imprécise. L'amélioration des connaissances sur ce point devra intégrer l'état structural au moment des roulages dans les variables explicatives de la formation de mottes  $\Delta$ , et plus particulièrement la teneur en terre fine. La relation système de culture-fréquence des mottes  $\Delta$ , pouvait ainsi apparaître plus complexe, car faisant intervenir conjointement les actions de compactage propres à un système et le degré d'affinement réalisé par le travail du sol.

Plus fondamentalement, le rôle particulier de la terre fine met en évidence les problèmes qui limitent la portée de la caractérisation de l'état structural par une approche morphologique à une échelle unique. La morphologie résultant du compactage de terre fine est classée  $\Delta$  parce que les limites entre éléments constitutifs de la motte où les pores qui persistent entre eux sont indiscernables à l'oeil.

La face de rupture apparaît de ce fait continue. Mais l'état  $\Delta$  ainsi obtenu présente une porosité structurale en moyenne élevée ( $e_s \approx 0.1$ ) et fortement variable. A l'échelle microscopique, l'organisation pour un même état interne est donc diversifiée, ce qui implique la nécessité de restrictions dans l'emploi du concept.



Nous avons souligné l'importance de cette variabilité de l'état  $\Delta$  vis-à-vis de la validité de notre proposition de classification des états internes, fondée principalement sur l'estimation de l'abondance de cet état dans les mottes, qu'elle limite fortement. Ceci s'ajoute aux arguments précédents pour justifier une tentative d'amélioration des critères d'identification de cet état. Notre expérience suggère qu'on pourrait introduire des critères de rugosité plus précis, permettant de discerner objectivement plusieurs sous classes dans la morphologie  $\Delta$ . On s'approcherait ainsi de l'analyse quantitative de la rugosité des surfaces de rupture, introduite par Dexter (1990) comme moyen de caractérisation de la structure. On doit cependant se demander si l'amélioration qu'on peut ainsi espérer dans l'interprétation de la classification morphologique apporterait un progrès significatif par rapport à l'utilisation conjointe de la classification que nous avons proposée et de l'analyse des systèmes de porosité. Celle-ci permet également de différencier des mottes appartenant à une même classe morphologique en sous populations plus homogènes. Elle présente l'avantage d'être reliée par un ensemble de relations déjà établies avec différentes propriétés physiques, coefficient de transfert ou résistance mécanique. Hors des recherches à long terme sur les méthodes, il paraît plus opportun vis-à-vis de l'application aux systèmes de culture de se fonder sur la combinaison de ces deux méthodes déjà éprouvées.

Quant à l'application de la classification morphologique aux parcelles qui ont été le support de notre étude, nous avons vérifié que dans les deux emplacements l'état  $\Delta$  correspondait à une distribution unique des porosités structurales indépendamment des différences de texture et de systèmes de culture. Nous sommes fondés dans ce cas à revenir sur l'effet système de culture, de façon à poser le problème général d'échantillonnage que soulève, en tout état de cause, l'évaluation des teneurs en mottes des différents états internes.

Rappelons que nous avons choisi nos parcelles d'étude dans une gamme de situations que nous supposons pouvoir être différenciées par l'importance des volumes compactés, en relation avec la présence ou non de maïs dans la succession. Nous avons prélevé sur la face de chaque profil, 5 blocs contingüs, constituant ensemble la totalité du compartiment  $H_5-L_3$ . Après séchage de la terre et tamisage, nous avons isolé la fraction "mottes" et procédé à l'enrobage de celles-ci pour les mesures de masse volumique. La masse volumique moyenne des mottes de chaque bloc a été calculée à partir du volume total de la fraction et de sa masse. Pour un sous-échantillon de 18 blocs choisis dans 4 profils (comprenant les 9 blocs que nous avons étudiés plus complètement), nous avons effectué motte à motte une notation morphologique.

Cet échantillon visait à nous permettre d'explorer complètement la gamme de variation des morphologies de mottes existant dans les milieux étudiés ; il ne nous donne évidemment pas la possibilité de calculer pour chaque profil concerné les valeurs de l'indicateur "teneur en mottes  $\Delta$  du compartiment  $H_5-L_3$ " proposé par Manichon et Roger-Estrade (1990). En effet, l'importante variabilité spatiale de l'état structural,

perpendiculairement à la direction des travaux culturaux interdit de considérer cet échantillon comme suffisamment représentatif pour chaque profil.

\*Tableau\* Masses volumiques des mottes par profil

Profil	Nb. récoltes Maïs	Masses volumiques des mottes		
		Moyenne H5-L3	mini.	maxi.
<b>Chantepie</b>				
6	3	1.74	1.64	1.77
10	2	1.68	1.61	1.77
9	1	1.63	1.59	1.67
11	1	1.71	1.67	1.77
8	0	1.62	1.50	1.71
<b>Plateau</b>				
12	10	1.64	1.59	1.70
15	10	1.66	1.60	1.72
13	0	1.56	1.53	1.61
14	0	1.57	1.53	1.62

La seule donnée que nous pouvons utiliser pour toutes les situations est la masse volumique moyenne des mottes par bloc. La moyenne de ces données pour le compartiment H<sub>5</sub>-L<sub>3</sub> de chaque profil est présentée au tableau ci dessus. On constate, à Chantepie comme au Plateau, que les parcelles ayant subi une ou plusieurs récoltes de maïs avant les prélèvements correspondent à des valeurs moyennes plus élevées que les parcelles en monoculture de blé d'hiver. Dans chaque profil, il existe une assez grande variabilité entre blocs, ce qui montre l'importance de la qualité de l'échantillonnage pour aboutir à des valeurs représentatives du compartiment. On retrouve aussi un décalage entre les deux sites, lié à la différence de constitution de la terre qui existe entre eux.

Ces résultats vont dans le sens attendu. On pourrait dès lors considérer que la densité moyenne des mottes fournit un indice synthétique des effets des systèmes de culture sur l'état du profil cultural. Les procédures utilisées sont assez faciles à mettre en oeuvre mais devraient être perfectionnées (en particulier la technique d'imperméabilisation des mottes). Il resterait à mettre au point les modalités d'échantillonnage au champ pour disposer d'une méthode permettant de caractériser l'effet des systèmes de culture, ou tout au moins de classer ceux-ci.

Mais l'interprétation des variations des masses volumiques moyennes des mottes en termes de variation de la teneur massique en mottes  $\Delta$  impliquerait pour tous les blocs :

- l'identité, pour chaque type morphologique, de la valeur moyenne et de la distribution des masses volumiques,
- une composition identique selon les types morphologiques autres que  $\Delta$ .

Ces conditions sont vraisemblablement très fortes et, bien que nous ayons pu calculer des corrélations élevées entre masse volumique du bloc et teneur massique en mottes  $\Delta$ , sur les 18 blocs où avaient été faits les tris morphologiques ( $r = 0.89$ ,  $n = 9$ , pour chaque site), nous ne pouvons nous risquer à une telle extrapolation.

La variabilité des masses volumiques au sein de chaque type morphologique, ainsi que le recouvrement partiel des gammes de variation entre types, rendent impossible un tri sur les densités mottières. Par ailleurs, le tri morphologique direct ne peut être envisagé sur de grandes quantités de mottes. Il est donc nécessaire, pour évaluer la teneur en mottes  $\Delta$ , d'avoir recours à d'autres moyens. Une approche directe au champ, utilisant des moyens photographiques et l'analyse d'image, est en cours de mise au point à Grignon, et semble prometteur.



## Références Bibliographiques

- Angers, D.A., Kay, B.D., Groenevelt, P.H., 1987. Compaction characteristics of a soil cropped to corn and broomgrass. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 779-783.
- Aylmore, L.A.G., Sills, I.D., 1978. Pore structure and mechanical strength of soils in relation to their constitution. In: Emerson, W.W., Bond, R.D., Dexter, A.R., (Editors), *Modification of Soil Structure* John Wiley & sons. Chichester UK., 69-77.
- Blackwell, P.S., Graham, J.P., Armstong, J.V., Ward, M.A., Howse, K.R., Dawson, C.J., Butler, A.R., 1986. Compaction of a silt loam soil by agricultural vehicles. I Effects upon soil conditions. *Soil Tillage Res.*, 7: 97-116.
- Boddaert, D., 197. Etude du comportement mécanique d'un sol travaillé soumis au roulage. Mémoire de fin d'étude ENITA Dijon 30p. Document interne INRA Station de Science du sol Avignon.
- Bourlet, M., Fiès, J.C., 1981. Technique d'échange de l'eau de gros échantillons de sol par l'acétone en phase vapeur. *Bull. A.F.E.S. Science du sol. (France)* 4: 293-304.
- Braunack, M.V., Hewitt, J.S., Dexter, A.R., 1979. Brittle fracture of soil aggregates and the compaction of aggregate beds., *J. Soil Sci.*, 653-667.
- Campbel, D.J., 1976. The occurrence and prediction of clods in potato ridges in relation to soil physical properties. *J. Soil Sci.*, 27: 1-9.
- Carneiro, F., Barcellos, A., 1953. C-oncrete tensile strength. *Bull. R.I.E.M., Paris.* 13.
- Carter, M.R., 1990. Relationship of strength properties to bulk density and macro porosity in cultivated loamy sand to loam soils. *Soil Tillage Res.*, 15: 257-268.
- Chan, K.Y., 1989. Friability of a hardsetting soil under different tillage and land use practices. *Soil Tillage Res.*, 13: 287-298.
- Chenu, C., Guérif, J., 1991. Effects of an adsorbed polysaccharide on the mechanical strength of clay minerals. *SSSAJ (à paraître)*
- Childs, E.C., 1969. An introduction to the physical basis of soil water phenomena. Willey, New York 493p.
- Coulomb, I., Manichon, H., Roger Estrade, J., 1990. Evolution de l'état structural sous l'action des systèmes de culture. In: Boiffin, J., and Marin la Flèche, A., (Editors), *La structure du sol et son évolution: conséquences agronomiques et maîtrise par l'agriculteur.* (Soil structure and its evolution: agricultural consequences and management, in French) *Colloques de l'INRA.* pp 15-36.
- Demolon, A., 1952. *Principes d'agronomie. Dynamique du sol.*, Dunod, Paris. 1er volume, 520p.
- Dexter, A.R., 1975. Uniaxial compression of ideal brittle tilths. *J. Terramech.* 12: 3-14.
- Dexter, A.R., 1988. Strength of soil aggregates and aggregate beds. In: Drescher, J., Horn, R., de Boodt, M., (Editors), *Impact of water and external forces on soil structure.* *Catena Supplement*, 11:35-52.
- Dexter, A.R., 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil Tillage Res.*, 11:199-238.
- Farrel, D.A., Greacen, E.L., Larson, W.E., 1967. The effect of water content on axial strain in a loam soil under tension and compression. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 31: 445-450.
- Fiès, J.C., 1978. Porosité du sol étude de son origine texturale. Thèse d'Etat, Univ. Strasbourg I. 150p.
- Fiès, J.C., Stengel, P., 1981. Densité texturale des sols naturels. I. Méthode de mesure. (Textural bulk density of natural soils. I. Measurement method. in French.). *Agronomie*, 1: 651-658.
- Fiès, J.C., Zimmer, D., 1982. Etude expérimentale de modifications de l'assemblage textural d'un matériau sablo-argileux sous l'effet de pressions. *Bull. G.F.H.N.*, 12:39-55.
- Fiès, J.C., 1984. Analyse de la répartition du volume des pores dans les assemblages argile-squelette : comparaison entre un modèle d'espace poral textural et les données fournies par la porosimétrie au mercure. *Agronomie*, 4:(9)891-899.
- Fiès, J.C., 1990. Analyse de la porosité de mottes Delta et Gamma au porosimètre à mercure. Rapport interne de la Station de Science du Sol, INRA Avignon. 20p.
- Frydman, S., 1964. The applicability of the brazilian (indirect tension) test to soils. *Aust. J. Appl. Sci.*, 15: 335-343.

- Gill, W.R., 1959, The effect of drying on the mechanical strength of Loyd clay. *Soil Sci. Soc. Proc.*, 23: (4) 255-257.
- Guérif, J., 1982. Compactage d'un massif d'agrégats: effet de la teneur en eau et de la pression appliquée. (Compaction of aggregate beds: effect of water content and applied load. in French). *Agronomie* 2: 287-294.
- Guérif, J., 1984, The influence of water-content gradient and structure anisotropy on soil compressibility. *J. agric. eng. res.* 29: 367-374.
- Guérif, J., 1987. L'analyse de la porosité : application à l'étude du compactage des sols. In: Monnier, G., and Goss, M.J., (Editors), *Soil compaction and regeneration. Proceedings of the Workshop on soil compaction, Avignon 17-18 Sept. 1985.* Balkema, Rotterdam/Brookfield, pp 1-14.
- Guérif, J., 1988a. Détermination de la résistance en traction des agrégats terreux : revue bibliographique et mise au point technique. (Assesment of soil aggregate tensile strength: review and technical set up, in French) *Agronomie* 8: 281-288.
- Guérif, J., 1988b. Résistance en traction des agrégats terreux : Influence de la texture, de la matière organique et de la teneur en eau. (Soil aggregate tensile strength: Effect of texture, organic content and water content, in French) *Agronomie* 8: 379-386.
- Guérif, J., 1990. Factors influencing compaction-induced increases in soil strength. *Soil Tillage Res.*, 16: 167-178.
- Guérif, J., 1991. Changes in strength properties. In : Soane, B.D., van Ouwrekerk, C., (Editors) *Soil compaction in crop production.* Elsevier, Amsterdam. (à paraître)
- Gupta, S.C., Hadas, A., Schaffer, R.L., 1989. Modelling soil mechanical behaviour during compaction. In: Larson, W.E., Blake, G.R., Allmaras, R.R., Voorhees, W.B., Gupta, S.C. *Mechanics and Related Processes in Structured Agricultural Soils.* NATO ASI Series, E172, Kluwer, Dordrecht/Boston/London. pp. 137-152.
- Hadas, A., Wolf, D., 1984. Soil aggregates and clod strength dependence on clod size, cultivation, and stress load rates. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48: 1157-1165.
- Haines, W.B., 1923. The volumes changes associated with variations of water content in soils. *J.Agr.Sci.*,13: 296.
- Håkanson, I., Henriksson, L., Gustafsson, L., 1985. Experiments on reduced compaction of heavy clay soils and sandy soils in Sweden. *Proceedings of the Int. Conf. on Soil Dynamics*, at Auburn, Alabama, pp. 995-1009.
- Hénin, S., Gras, R., Monnier, G., 1969. *Le profil cultural* (2ème édition) Masson, Paris.
- Hiramatsu, Y., Oka, Y., 1966. Determination of the tensile strength of rock by a compression test of an irregular test piece. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 3: 89-99.
- Hodgson, 1974. *Soil survey field Hand-book.* Tech. Mono. n°5. Soil Survey G.B.
- Horn, R., 1989. Strength of structured soils due to loading. In: Larson, W.E., Blake, G.R., Allmaras, R.R., Voorhees, W.B., Gupta, S.C. *Mechanics and Related Processes in Structured Agricultural Soils.* NATO ASI Series, E 172, Kluwer, Dordrecht/Boston/London. pp. 9-22.
- Horn, R., Hartge, K.H., 1990. Effects of short-time loading on soil deformation and strength of an ameliorated Typic Paleustalf. *Soil Tillage Res.* 15: 247-256.
- Kemper, W.D, Rosenau, R.C., 1984. Soil cohesion as affected by time and water content; *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48:1001-1006.
- Kirkham, D., de Boodt, M.F., de Leenher, L., 1959. Modulus of rupture determination on undisturbed core samples. *Soil Sci.*, 87: 141-144.
- Koolen, A.J., 1976. Mechanical properties of precompacted soil as affected by the moisture content at precompaction. *Proc of the 7th Int. Conf. of ISTRO.* Upsala, Sweden. No 65. 6p.
- Koolen, A.J., 1978. The influence of a soil compaction process on subsequent soil tillage processes. A new research method. *Neth. J. agric. Sci.* 26: 191-199.
- Larson, W.E., Gupta, S.C., 1980. Estimating critical stress in unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. *Soil Sci. Am. J.*, 41, 1127-1132.
- Lipiec, J., Tarkiewicz, S., 1986. The effect of moisture on the crushing strength of aggregates of loamy soil of various density levels. *Polish J. Soil Sci.* 19: 27-31.
- Lyles, L., Woodruff, N.P., 1961, Surface soil cloddiness in relation to soil density at time of tillage. *Soil Sci.*, 1961, 23:178-182
- Manichon, H., Sebillotte, M., 1973, *La monoculture du maïs INA* (Paris)
- Manichon, H., Sebillotte, M., 1975. Analyse et prévision des conséquences des passages successifs d'outils sur le profil cultural. *Bull. Tech. Inform.* 302-303.
- Manichon, H., 1982. Influence des systèmes de cultures sur le profil cultural : élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse de Doct. Ing. INA-PG, 311 p.

- Manichon, H., 1987. Observation morphologique de l'état structural et mise en évidence d'effets de compactage des horizons travaillés. (Morphological observation of structural state and enhancement of compaction effects in tilled layers in French) In: Monnier, G., and Goss, M.J., (Editors), Soil compaction and regeneration. Proceedings of the Workshop on soil compaction. Avignon 17-18 Sept. 1985. Balkema, Rotterdam/Brookfield, pp 39-52
- Manichon, H., 1988. Compactage, décompactage du sol et système de culture. (Compaction, decompaction and crop system. in French) C.R. Acad. agric. France, 74: 43-54.
- Manichon, H., Roger Estrade, J., 1990. Caractérisation de l'état structural et étude de son évolution à court et moyen terme sous l'action des systèmes de culture. In : Combe, L., Picard, D., (Editeurs) Les systèmes de culture. Un point sur... INRA (Paris).
- McKenzie, B.M., Dexter, A.R., 1985. Mellowing and anisotropy induced by wetting of molded soil samples. Australian J. Soil Res., 23: 37-47.
- Monnier, G., Fiès, J.C., Stengel, P., 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux, application à l'analyse de porosité du sol. (A method to measure the bulk density of small aggregates of soil, application to soil porosity analysis, in French). Annales Agronomiques, 24: 533-545.
- Monnier, G., Stengel, P., 1982. Structure et état physique du sol. Techniques Agricoles. 67p.
- Papy, F., 1984. Comportements du sol sous l'action des façons de reprise d'un labour au printemps. (Effets des conditions climatiques et de l'état structural). Thèse de Doct. Ing. INA-PG, Paris.
- Papy, F., 1987. Comportement d'une couche labourée sous l'action de compactage en fonction de son état hydrique et structural. Agronomie 7:(2) 111-121.
- Pecorari, C., Guérif, J., Stengel, P., 1991. Fitolitos en suelos pampeanos : influencia sobre las propiedades físicas determinantes de los mecanismos elementales de la evolución de la estructura. XIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 8-12/04/91.
- Renault, P., 1988. Etude et modélisation du coefficient de diffusion en phase gazeuse en fonction de la morphologie de l'espace poral textural des sols cultivés. Thèse INP, Toulouse.
- Richard, G., Guérif, J., 1988. Modélisation des transferts gazeux dans les lits de semence : application au diagnostic des conditions d'hypoxie des betteraves sucrières (*Beta vulgaris* L.) pendant la germination. I Présentation du modèle. Agronomie. 8:(7) 539-547, II Résultats des simulation. Agronomie 8:(7) 639-646.
- Rogowski, A.S., Kirkham, D., 1976. Strength of soil aggregates : Influence of size, density and clay and organic matter content. Med. Fac. Landbouww. Rijksuniv. Gent, 41: 85-100.
- Rogowski, A.S., Moldenhauer, W.C., Kirkham, D., 1968. Rupture parameters of soil aggregates. Soil Sci Soc. Am. Proc., 32: 720-724.
- Sebillote M., 1978. Itinéraire technique et évolution de la pensée agronomique. C.R. Acad. Agric. Fr. 74:(1)43-54.
- Soane, B.D., Blackwell, P.S., Dickson, J.W., Painter, D.J., 1981. Compaction by agricultural vehicles: a review. I. Soil and Wheel characteristics. Soil Tillage Res., 1:207-237.
- Spoor, G., Godwin, R.J., 1979. Soil deformation and shear strength characteristics of some clay at different moisture content. J. Soil Sci., 30: 483-498.
- Stengel, P., 1979. Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. Annales Agronomiques, 30: (1),27-49.
- Stengel, P., 1984. Analyse de la porosité. Séminaire CEE-AGRIMED, Avignon (FRA), 1983/03/14-18. INRA Station de Science du Sol, Montfavet, Document Interne (FRA), 54p.
- Stengel, P., Douglas, J.T., Guérif, J., Goss, M.J., Monnier, G., Cannel, R.Q., 1984. Factors influencing the variation of some properties of soils in relation to their suitability for direct drilling. Soil Tillage Res., 4: 35-53.
- Stengel, P., Bourlet, M., 1987. Fissuration d'un sol argileux gonflant après compactage: Effet de l'humectation. (Cracking of a swelling clay soil after compaction: effect of wetting, in French) In: Monnier, G., and Goss, M.J., (Editors), Soil compaction and regeneration. Proceedings of the Workshop on soil compaction, Avignon 17-18 Sept. 1985. Balkema, Rotterdam/Brookfield, pp 39-52.
- Stengel, P., 1988. Cracks formation during swelling : Effects on soil structure regeneration after compaction. In : Proc. 11<sup>th</sup> Int. Conf. ISTRO., Edinburgh, Scotland, 11-15 July 1988. 1: 147-152.
- Stengel, P., 1990. Caractérisation de l'état structural, objectifs et méthodes. (Characterization of soil structure: aims and methods.) In: Boiffin, J., and Marin la Flèche, A., (Editors), La structure du sol et son évolution: conséquences agronomiques et maîtrise par l'agriculteur. (Soil structure and its evolution: agricultural consequences and management, in French) Colloques de l'INRA. pp 15-36.

- Tardieu, F., 1984. Etude au champ de l'enracinement du maïs. Influence de l'état structural sur la répartition des racines, conséquences sur l'alimentation hydrique. Thèse de Doct. Ing. INA-PG. 232p.
- Tardieu, F., Manichon, H., 1987. Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs : Modélisation d'états structuraux types de la couche labourée. (Soil structure, maize rooting and water supply: modelling different standards of the structural state of the tilled layer. in French). *Agronomie*, 7: 123-131.
- Utomo, W.H., Dexter, A.R., 1981a. Soil friability. *J. Soil Sci.*, 32: 203-213.
- Utomo, W. H., Dexter, A. R., 1981b. Age hardening of agricultural top soils. *J. Soil Sci.*, 32: 335-350.
- Willat, S.T., 1987. Influence of aggregate size and water content on compactibility of soil using short-time static loads. *J. Agric. Eng. Res.*, 37: 107-115.

## ANNEXE 1

### Simplification de la mesure de masse volumique par enrobage à la paraffine.

#### 1. Principe :

Rappelons que l'application rigoureuse de la technique consiste à déterminer sur chaque motte :

- |  |          |
|--|----------|
| - sa masse humide avant paraffinage                                | $m_w$    |
| - sa masse après paraffinage                                       | $m_p$    |
| - son volume avec l'enrobage de paraffine                          | $V_{mp}$ |
| - sa masse sèche à 105°C, l'enrobage de paraffine ayant été enlevé | $m_d$    |

Le volume de l'enrobage est alors calculé à partir d'une estimation expérimentale de la masse volumique de l'enrobage  $\rho_p$

La masse volumique sèche de la motte s'exprime de la façon suivante :

$$\rho_d = m_d / V_p - (m_p - m_w / \rho_p)$$

La simplification de la méthode a consisté à :

- estimer la teneur en eau moyenne des mottes de chaque bloc en déterminant séparément celle d'une sous population de mottes du bloc. Cette teneur en eau a été utilisée pour calculer la masse sèche de chacune des mottes à partir de  $m_w$ . L'état humide de ces mottes correspond à l'équilibre avec l'atmosphère du laboratoire, l'erreur ainsi générée est nécessairement faible.

- calculer le volume de paraffine enrobant chacune des mottes en admettant que la couche d'enrobage avait pour l'ensemble des mottes d'un bloc une épaisseur moyenne identique.

A partir de ces hypothèses, il était possible de limiter les mesures à la pesée de chaque motte paraffinée et à celle de la poussée hydrostatique. Le calcul utilisé pour estimer le volume de paraffine d'enrobage est le suivant. Les mottes paraffinées sont assimilées à des sphères de rayon équivalent  $R_i$ . Pour chaque motte :

$$V_{mpi} = 4/3 \Pi R_i^3 \quad (1)$$

Le volume d'enrobage  $v_{pi}$  est alors :

$$v_{pi} = 4 \Pi (R_i - e_p/2)^2 (2)$$

où  $e_p$  est l'épaisseur de la couche de paraffine.

Pour l'ensemble des mottes d'un bloc :

$$e_p \sum_i 4 \Pi (R_i - e_p/2)^2 = V_p \quad (3)$$

où  $V_p$  est le volume total de paraffine enrobant les mottes d'un bloc.

En développant (3), on obtient :

$$n/4 e_p^3 - e_p^2 \sum R_i + e_p \sum R_i^2 - V_p/4\Pi = 0 \quad (4)$$

où  $n$  est le nombre de mottes du bloc.

$V_p$  est estimé en mesurant la variation de poids du bac de paraffine dû à l'enrobage des mottes, connaissant la masse volumique de la paraffine.

Les différentes valeurs de  $R_i$  sont calculées par l'équation 1. On estime alors l'épaisseur moyenne  $e_p$  par (4).

Connaissant  $e_p$  on peut estimer le volume de chaque enrobage (équation 2) et sa masse puis en déduire le volume et la masse de la motte avant paraffinage.

## 2. Résultats

Cette méthode d'estimation permet d'accroître notablement la rapidité de la détermination de masse volumique. Avec un dispositif de trempage dans la paraffine de séries de 50 mottes (Fig.1), nous avons pu atteindre le rythme de 800 mesures/jour pour deux personnes.

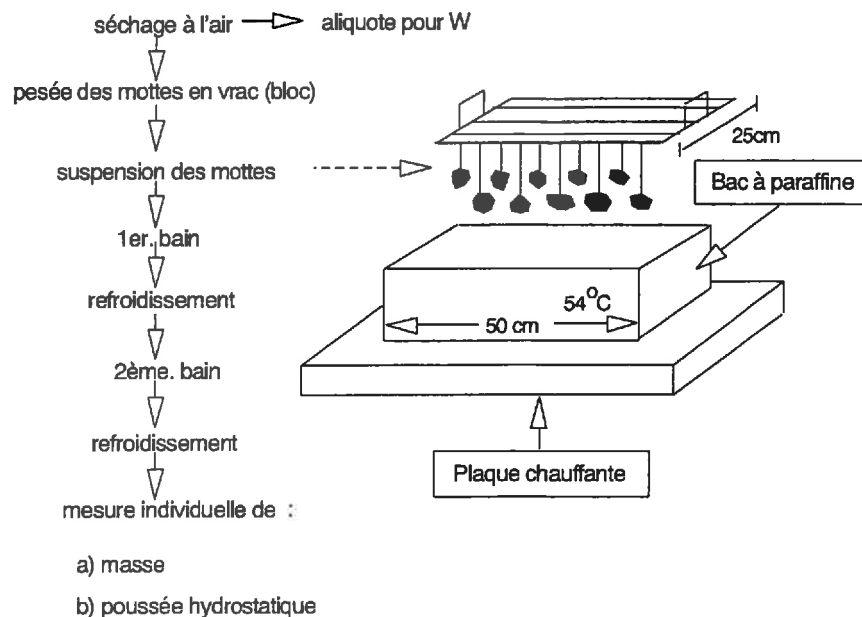


Fig. 1-2. Procédure de paraffinage des mottes

La validité a été testée sur une population de mottes des profils de Plateau, pour lesquelles la mesure a été réalisée suivant le protocole classique (Fig.2). L'estimation apparaît non biaisée et l'erreur d'estimation est faible, très voisine de l'incertitude sur la mesure dans sa version la plus complète.

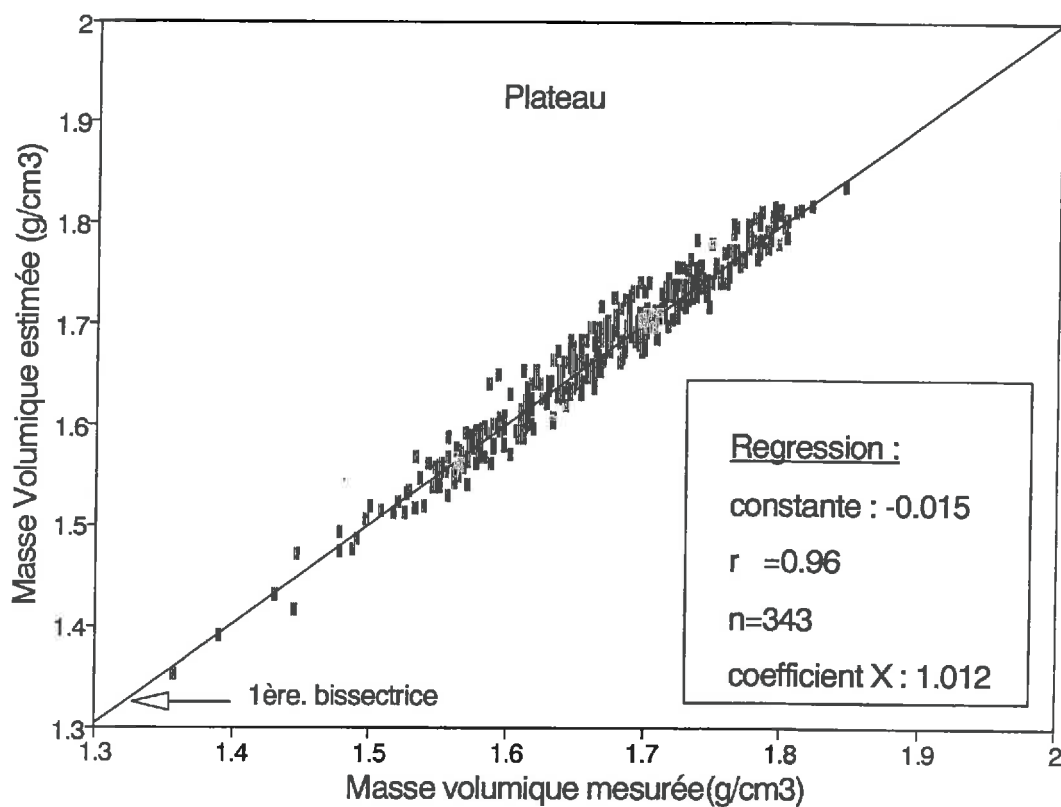
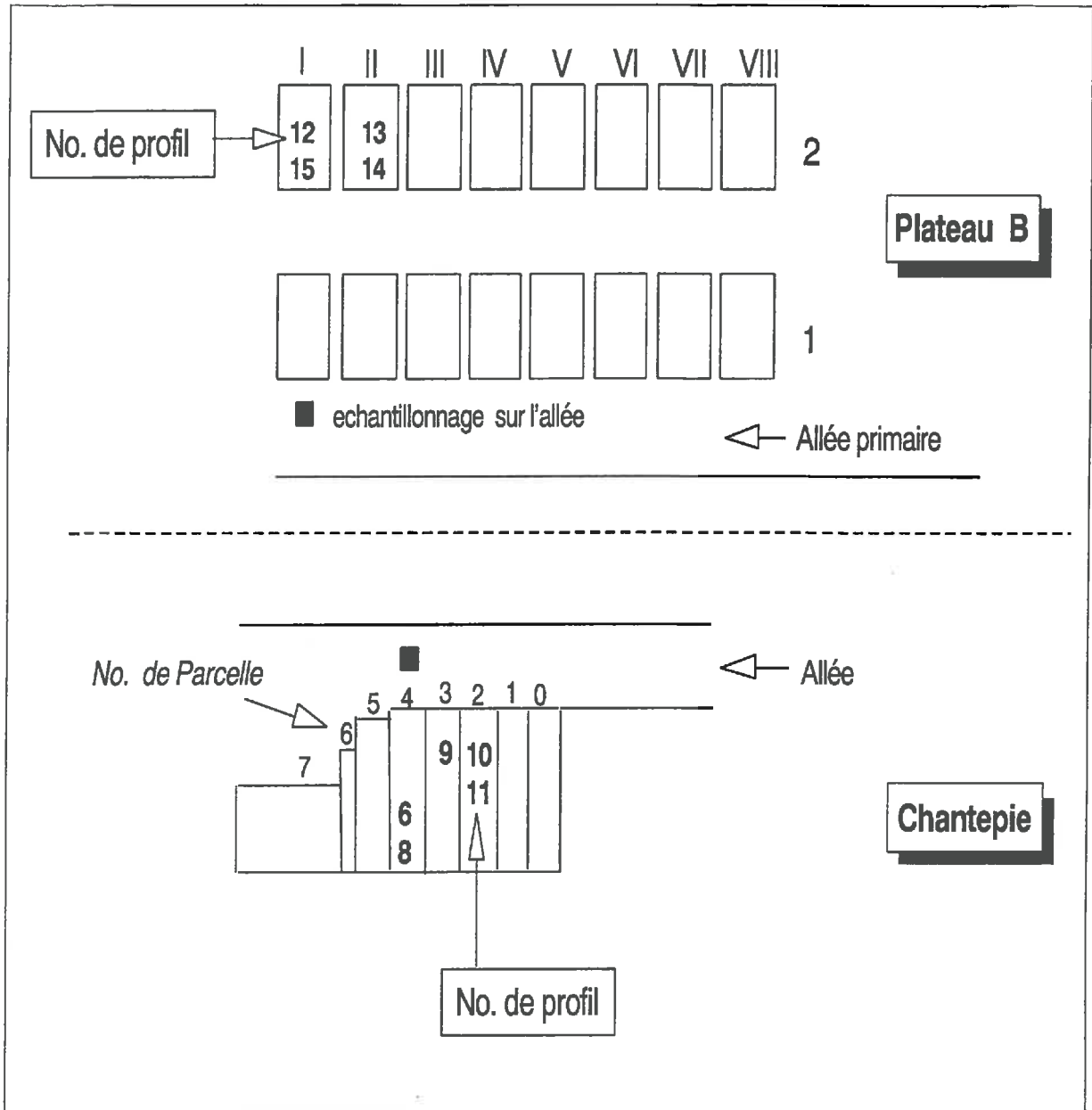


Fig. 2 Relation entre la masse volumique estimée par la méthode du volume équivalent de la motte et la masse volumique mesurée. Mottes de Plateau.

ANNEXE 2



Localisation des profils dans les dispositifs du centre expérimental de Grignon



**Impression réalisée au Service de Reprographie du Centre de Recherches d'Avignon.**