



UNIVERSITE D'ORLEANS

Groupe de Formation Doctorale.

# RESSOURCES ET MATERIAUX MINERAUX

Diplôme d'Études Approfondies

Préparation au Doctorat

S.E.S.C.P.F



## D E A

Option : Géodynamique et Ressources Minérales

Rapport de Stage

**SENSIBILITE AU TASSEMENT DE SOLS  
SABLEUX DU VAL DE LOIRE**

Etude au laboratoire (test Proctor)  
et en plein champ

ANNEE 1985-1986

GRABA L.

## SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

SYMBOLES UTILISES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE

### PREMIERE PARTIE

*Etude du comportement au compactage  
de matériaux du Val de Loire.*

---

Introduction

Chapitre I.

Le compactage des matériaux : choix d'une  
technique modifiée du test Proctor à énergie réduite.

Chapitre II.

Analyse des courbes Proctor.

Conclusion

### DEUXIEME PARTIE

*Caractérisation du comportement mécanique des sols  
en plein champ : confrontation avec les données de  
laboratoire.*

Introduction

Chapitre I.

Parcelle expérimentale retenue pour l'étude.

Chapitre II.

Etude de la sensibilité au compactage

. Essais Proctor

. La sensibilité au tassement :  
comparaison entre les données du terrain et  
les résultats obtenus au laboratoire.

Conclusion

### TROISIEME PARTIE

*Influence du compactage sur l'évolution de la  
porosité et le comportement hydrique des matériaux.*

---

Chapitre I.

Conséquences du compactage sur les propriétés de  
rétention de l'eau.

Chapitre II.

Evolution de la porosité au cours du compactage.

Chapitre III.

Effets du compactage sur la circulation de l'eau  
saturante dans le sol.

Conclusion

*CONCLUSIONS GENERALES*  
*REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES*  
*TABLE DES MATIERES*  
*ANNEXES*



## AVANT - PROPOS

L'étude que je me propose de présenter, n'aurait pas pu aboutir sans le concours de tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont bien voulu me faire profiter de leur expérience de chercheur, d'enseignant, d'ingénieur. Que toutes ces personnes soient vivement remerciées.

Je pense notamment à Messieurs :

. F. LELONG, Professeur à l'Université d'Orléans, qui a dirigé ce travail et animé les discussions. Ses conseils et ses encouragements m'ont été très bénéfiques,

. M. JAMAGNE et J.C. BEGON, Directeur et Directeur-Adjoint du Service d'Etude des Sols et de la Carte Pédologique de France, de m'avoir accueilli au sein du laboratoire. La pertinence de leurs critiques et leurs remarques très constructives m'ont été d'un grand apport,

. R. DARTHOUT, Ingénieur au S.E.S.CP.F. qui a apporté son aide technique et scientifique dans l'accomplissement de l'étude,

. H. DE SOUMAGNAT, Directeur de la Chambre d'Agriculture du Loiret et B. VERBEQUE qui par leurs connaissances du milieu agricole du Val de Loire, ont permis la conduite des enquêtes sur le terrain et le choix des situations représentatives,

. E. COULON, Etudiant 3ème cycle, qui par son aide et ses remarques, a apporté beaucoup dans l'acheminement de ce travail.

Enfin, que toutes les personnes du service qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de cette étude, trouvent ici l'expression de ma gratitude, En particulier Mme J. MARTINEZ et M. L. ROUSSET qui ont assuré la mise en page.

---

## SYMBOLES UTILISES

### GRANDEURS RELATIVES A L'ENERGIE DE COMPACTAGE

$E_c$	Energie cinétique (KJ/cm <sup>3</sup> )
$m$	Masse de la dame de compactage (Kg)
$h$	Hauteur de chute (cm)
$n$	nombre de coup (54 x 2)

### TENEUR EN EAU

$W$	Teneur en eau pondérale (%) = $\frac{M_w}{M_s} \times 100$ avec $M_w$ : masse d'eau contenue dans l'échantillon (g) $M_s$ : masse à l'état sec (105°C) d'un échantillon (g)
$W^c$	Teneur en eau au seuil de sensibilité au compactage
$W^M$	Teneur en eau au maximum de compacité

### DENSITES

$\bar{\gamma}_s$	Densité de solide du matériau (sans dimension)
$\gamma_d$	Densité sèche de l'échantillon Proctor (sans dimension)
$\gamma_d^c$	Densité sèche de l'échantillon Proctor au seuil de sensibilité au compactage
$\gamma_d^M$	Densité sèche de l'échantillon Proctor au maximum de compacité
$\gamma_h$	Densité humide de l'échantillon Proctor (sans dimension)

### POROSITE

$n$	Porosité totale de l'échantillon (%) = $\frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_s} \times 100$ Compacité = 1-n
-----	---

### INDICES

$Sc$	Indice de sensibilité au compactage = $\frac{\gamma_d^M - \gamma_d^c}{M} \times 100 \pm 10^{-1}$
------	--

$H_q$  Indice d'hétérométrie (sans dimension) =  $\frac{Q_3 - Q_1}{2}$

avec  $Q_1$  = 1er quartile

$Q_3$  = 3ème quartile

$I_c$  Degré de compacité d'un sol en place (sans dimension)  
=  $\frac{\text{Densité sèche mesurée in situ}}{\gamma_d^M} \times 100$

$r$  Coefficient de corrélation



## LISTE DES TABLEAUX

		<i>Pages</i>
Tableau I	Densités sèches moyennes des fragments d'éprouvette.	12
II	Provenance et caractéristiques des matériaux étudiés.	14
III	Caractéristiques mécaniques des matériaux étudiés.	19
IV	Indice de sensibilité au compactage des matériaux.	21
V	Relation entre indice de sensibilité au compactage et les caractéristiques physiques des matériaux.	24
VI	Caractéristiques analytiques des échantillons étudiés (Parcelle de Bou).	29
VII	Caractéristiques mécaniques des échantillons compactés.	35
VIII	Calendrier des différentes opérations culturales.	41
IX	Valeurs des densités apparentes moyennes des horizons des surfaces.	42
X	Valeurs des degrés de compacité ( $I_c$ ) en fonction des énergies de compactage.	44
XI	Teneurs en eau pondérales (W%) en fonction du pF.	52
XII	Revue bibliographique sommaire des classifications de la porosité.	55
XIII	Evolution du volume des tailles de pores (%) en fonction de la densité apparente.	55
XIV	Valeurs de conductivité hydrauliques saturées ( $K_{sat. 20^\circ C}$ ) des différents échantillons.	63



## LISTE DES FIGURES

Fig. 1.	Forme générale d'une courbe de compactage complète.	6
2.	Variation de la densité d'un matériau en fonction de l'énergie de compactage.	6
3.	Influence de la texture sur la compacité.	7
4.	Appareil Proctor modifié.	13
5.	Mode de prélèvement des fragments d'éprouvette dans un échantillon Proctor.	11
6.	Eprouvette de sol après le compactage (Test Proctor modifié).	13
7.	Courbes granulométriques de fréquence.	15
8.	Désignation de la texture, diagramme de référence.	16
9.	Courbes Proctor des matériaux sableux du Val de Loire.	18

Fig. 10.	Relation entre indice de sensibilité et teneur en argile.	22
11.	Courbes granulométriques cumulées.	23
12.	Localisation de la parcelle de Bou.	30
13.	Topographie de la parcelle de Bou et localisation des sites d'observation.	31
14.	Courbes granulométriques cumulées.	32
15.	Courbes granulométriques de fréquence.	33
16.	Désignation de la texture, diagramme de fréquence.	34
17.	Courbes Proctor des matériaux de Bou.	36
18.	Relation entre l'indice de sensibilité au compactage (Sc) et la teneur en argile.	38
19.	Relation entre l'indice de sensibilité au compactage (Sc) et la teneur en éléments fins (< 20 $\mu\text{m}$ ).	39
20.	Relation entre l'indice de sensibilité au compactage (Sc) et l'indice d'hétérométrie (Hq).	40
21.	Evolution des densités apparentes (in situ).	43
22.	Appareil pour humectation sous vide.	49
23.	Schéma de l'appareil de Richards.	50
24.	Histogramme d'évolution de la micro, méso et macroporosité en fonction de la densité apparente.	56
25.	Dispositif pour mesurer la conductivité hydraulique saturée.	58
26, 27, 28.	Relation entre la conductivité hydraulique saturée à 20°C et la densité apparente ( $\gamma_d$ ).	60, 61, 62.





## **INTRODUCTION GENERALE**

Ces dernières années, les agriculteurs et les organismes professionnels du Val de Loire ont constaté des phénomènes de tassement des sols sableux, tributaires de pratiques culturales souvent intensives et de l'alourdissement des matériels utilisés.

Ces phénomènes provoquent une dégradation du transfert hydrique, se traduisant ainsi par des baisses de rendement et, sans doute, une aggravation des attaques parasitaires. Ceci a incité une équipe de recherche de l'I.N.R.A. en collaboration avec l'Université d'Orléans, à se livrer depuis quelques années à des mesures de la capacité d'infiltration effectuées en plein champ, dont les premiers résultats ont montré que les effets de tassement semblent être l'une des causes probables de cette dégradation.

Les objectifs principaux de ce travail sont les suivants :  
- apprécier, par des essais de laboratoire (test Proctor), la sensibilité au compactage de matériaux sableux représentatifs du Val de Loire, en essayant de relier ce comportement à leur distribution granulométrique et notamment à leur teneur en particules fines (argile plus limons fins) ; - tenter, parallèlement de caractériser le comportement mécanique des sols en plein champ par un suivi de l'évolution (des densités apparentes) pour un itinéraire cultural donné ; - enfin, d'étudier l'évolution de la taille des pores au cours du compactage et leurs conséquences sur le comportement hydrique.

On est ainsi conduit à réfléchir sur les limites d'une confrontation entre données de terrain et données de laboratoire et à proposer une adaptation du test Proctor aux conditions particulières du tassement par les engins agricoles.



# ***PREMIERE PARTIE***

***ETUDE DU COMPORTEMENT AU COMPACTAGE***

***DE MATERIAUX SABLEUX DU VAL DE LOIRE***

## INTRODUCTION

L'espace poral des sols agricoles évolue au cours d'un itinéraire cultural, soit naturellement sous l'action des facteurs climatiques (alternance d'humectation et de dessiccation), soit encore sous l'effet des contraintes mécaniques provoquées par les outils et engins de culture.

Les méthodes d'étude de la sensibilité au compactage des terrains agricoles sont nombreuses et variées.

• Certaines techniques sont utilisées sur le terrain dans des conditions plus ou moins contrôlées. Il en existe de plusieurs types : les unes mesurent les modules de déformation, telle la méthode d'essai de chargement à la plaque (REICHERT, 1961 ; BRULL, 1985). D'autres, estiment la résistance à l'enfoncement : la pénétrométrie (BILLOT, 1982 ; CORDIER, 1983). Mais plusieurs chercheurs utilisent des méthodes encore plus simples permettant de suivre l'évolution de la densité apparente des sols après passages d'engins (SOHNE, 1958 ; SMITH, 1985). Si toutes ces méthodes ont l'avantage d'étudier en vraie grandeur, in situ, le comportement mécanique des sols, elles se heurtent toutes à des difficultés de natures différentes : discontinuités hydriques et structurales des sols, caractère non uniforme des actions appliquées,.... qui rendent ainsi difficile le suivi de leur comportement mécanique.

• D'autres méthodes de laboratoire s'appliquent à des matériaux remaniés par des essais de compactage dynamique : l'essai Proctor (COSTET et SANGLERAT, 1975 ; DUNGLAS, 1973 ; FAURE, 1978 ; CORDIER, 1983 ...), ce test classique couramment utilisé dans le domaine du Génie Civil, a l'avantage d'être facile à mettre en oeuvre et permet de contrôler simultanément la variable caractérisant l'état de compactage d'un matériau (masse volumique) ainsi que les variables explicatives (teneur en eau, composition granulométrique, énergie utilisée).

Cependant :

. Seule la masse volumique texturale est prise en compte dans l'évaluation de la sensibilité au compactage des matériaux. L'incidence de la structure du sol est exclue en raison du haut degré de remaniement imposé à l'échantillon.

. L'énergie mise en oeuvre par ce test standard est largement supérieur et de nature différente de celle provoquée par les engins agricoles, ce qui rend difficile les études comparatives avec les tests de terrain.

. L'analyse de comportement mécanique du matériau ne peut être que grossière du fait des hétérogénéités induites par la technique de compactage standard et de l'impossibilité d'évaluer les contraintes réellement subies par le matériau.

. De plus, l'emploi du compactage dynamique ne permet pas de reproduire les variations des contraintes réellement appliquées au champ (intensité, durée) (STENGEL, 1982).

L'utilisation des essais de compactage statique par l'application d'une pression constante sur des échantillons non remaniés (essai oedométrique) permet de pallier en grande partie les difficultés relatives au test Proctor (BOX et TAYLOR, 1962 ; CORDIER, 1983).

Dans l'étude entreprise ici, nous avons retenu le procédé Proctor en raison de la simplicité de sa mise en oeuvre. Cependant, nous avons essayé de modifier le test afin de remédier en partie aux inconvénients déjà cités.

Le travail relaté dans cette première partie a pour but de comparer, en fonction de la teneur en eau, les comportements mécaniques des quatre matériaux représentatifs des sols légumiers du Val de Loire dans le secteur d'Orléans, échantillonnés sur la base d'une carte de sols au 1/10.000e (établie par le S.E.S.C.P.F.) et d'enquêtes réalisées avec la Chambre d'Agriculture du Loiret. Cette comparaison permet de proposer un indice permettant d'évaluer leur sensibilité au compactage.



## CHAPITRE I.

LE COMPACTAGE DES MATERIAUX :  
CHOIX D'UNE TECHNIQUE MODIFIEE DU TEST PROCTOR  
A ENERGIE REDUITE.

## I.1. PRINCIPE DU TEST PROCTOR

Le procédé Proctor (1933) est une méthode de compactage dynamique qui met en jeu une énergie cinétique produite par la chute d'une dame de masse  $m$ , tombant d'une hauteur constante  $h$ , un nombre choisi de fois  $n$ .

Cet essai standardisé, s'effectue dans un moule cylindrique étanche de dimensions déterminées. Un échantillon porté à une teneur en eau donnée  $y$  est placé pour être compacté en trois couches successives avec une énergie connue ( $E_C$ ) ramenée à l'unité de volume, qui peut s'écrire :

$$E_C = \frac{3 mghn}{V} \text{ (KJ/dm}^3\text{)} \quad (1)$$

En répétant l'essai à des humidités différentes, on peut tracer le diagramme Proctor (Fig. 1).

L'allure générale de cette courbe est actuellement bien connue à la suite notamment des travaux de FAURE (1978). Elle est caractérisée par deux points particuliers :

- . le point de sensibilité au compactage (S), de coordonnées  $W^C$  (teneur en eau critique) et  $\gamma_d^C$  (densité sèche critique) ;
- . le point M ("optimum" Proctor), de coordonnées  $W^M$  (teneur en eau "optimale") et  $\gamma_d^M$  (densité au maximum Proctor).

Ces deux points particuliers S et M segmentent la courbe de compactage en trois domaines :

- . pour des teneurs en eau inférieures à  $W^C$  (domaine 1), la densité sèche de matériau évolue très peu : le matériau est peu ou pas sensible au compactage ;
- . pour des teneurs en eau comprises entre  $W^C$  et  $W^M$  (domaine 2) la densité sèche augmente avec la teneur en eau : le matériau est sensible au compactage ;
- . pour des teneurs en eau élevées (domaine 3), la densité décroît lorsque la teneur en eau augmente, le matériau est incompressible et la courbe de compactage tend asymptotiquement vers l'hyperbole de saturation d'équation

$$\frac{1}{\gamma_d} = W + \frac{1}{\gamma_s} \quad (2)$$

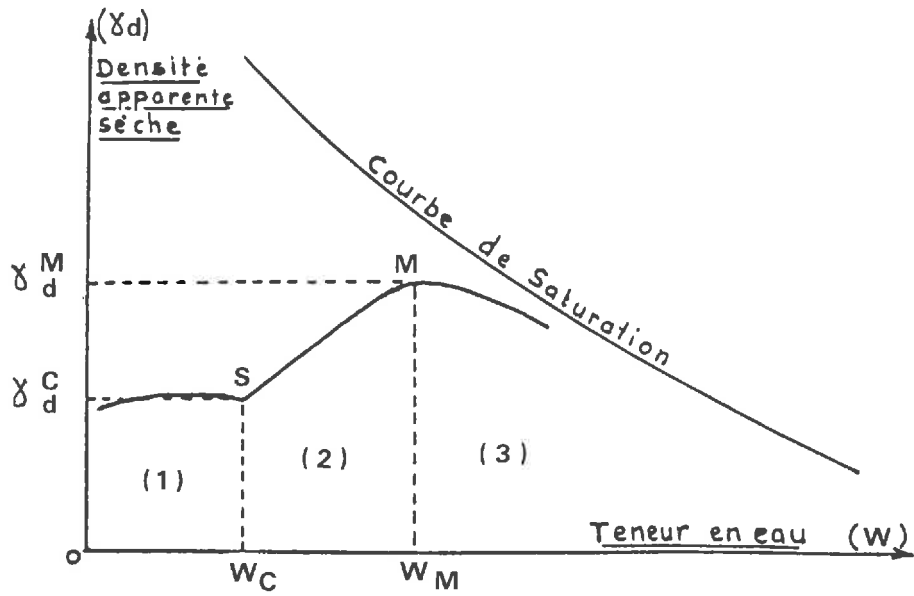


Figure .1 - Forme générale d'une courbe de compactage complète d'après DUCREUX et MANIERE ( 1984 )

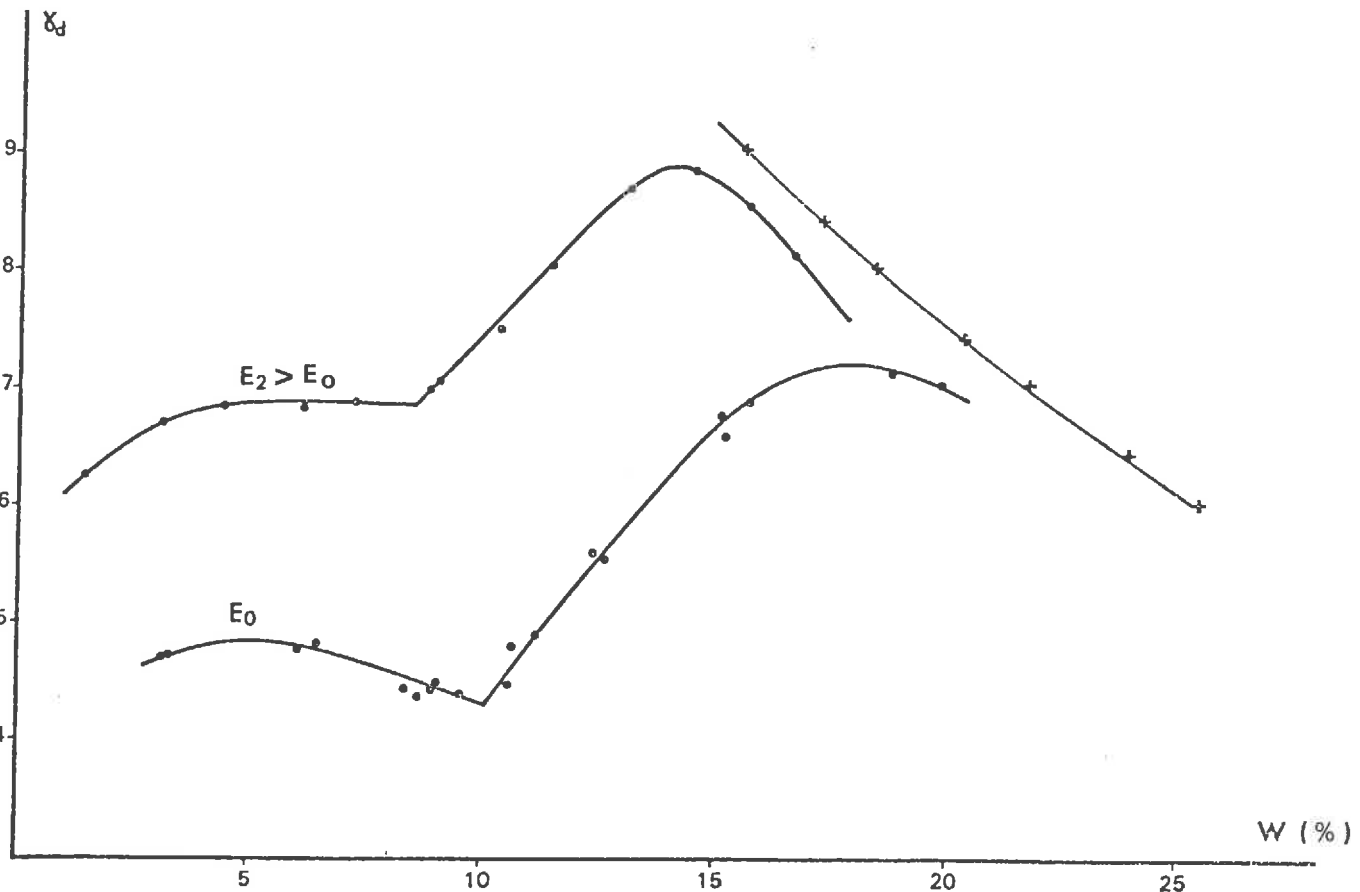


Figure .2 - Variation de la densité d'un matériau en fonction de l'énergie de compactage d'après FAURE ( 1978 )

INFLUENCE de la TEXTURE sur la  
COMPACTITE  
d'après MADDISON , cité par FAURE ( 1978 )

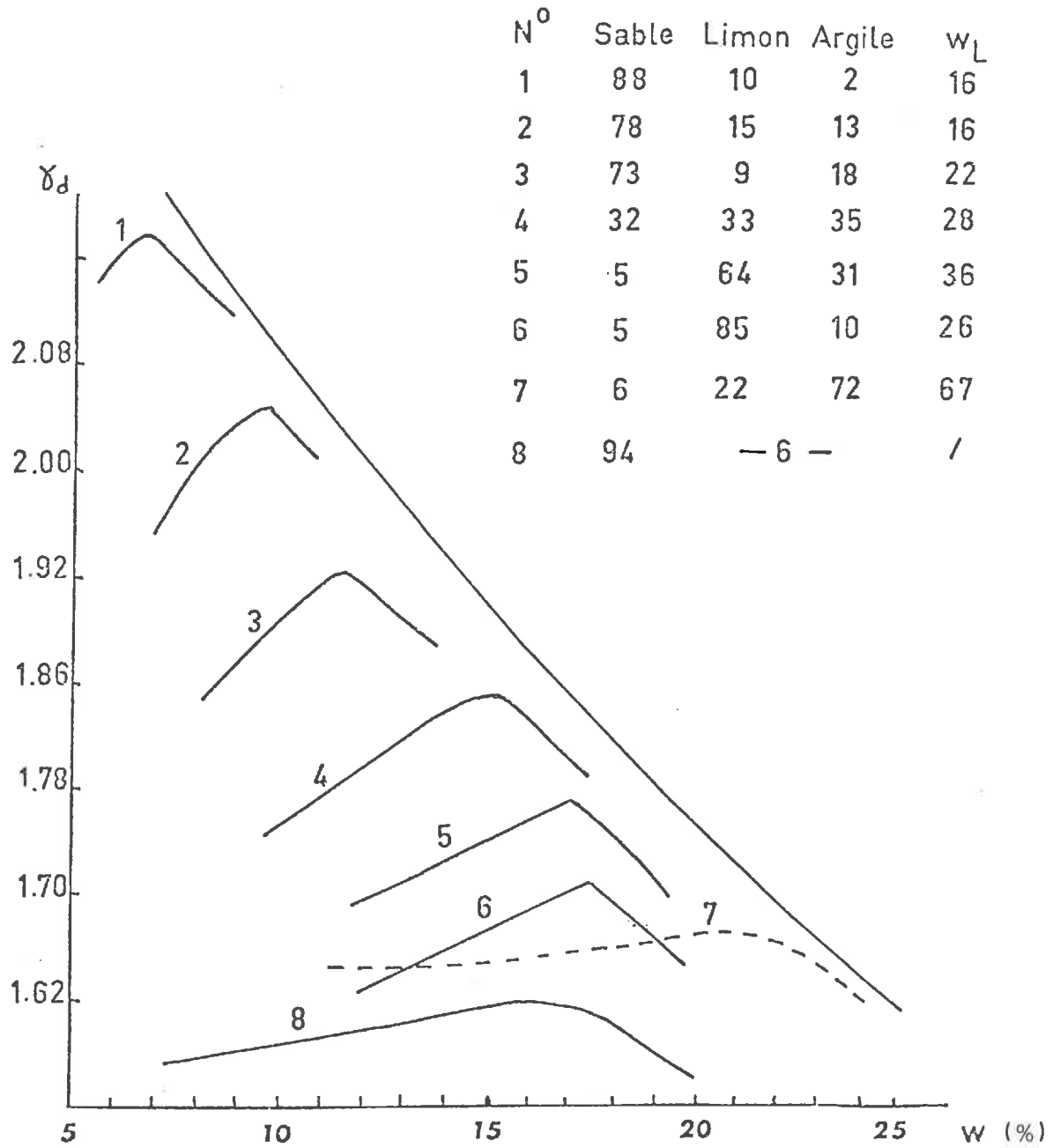


Figure .3

Les coordonnées des points S et M, pour un matériau donné, sont liées à l'énergie  $E_C$  employée (Fig. 2). Si cette énergie de compactage augmente, la densité sèche au maximum Proctor ( $\gamma_d^M$ ) s'accroît et la teneur en eau "optimale" ( $w^M$ ) diminue selon une loi logarithmique (WILSON, 1950). Au point singulier, seule la densité sèche  $\gamma_d^C$  augmente quand  $E_C$  augmente, les teneurs en eau ( $w^C$ ) restant sensiblement constantes (Fig. 2).

L'allure des courbes de compactage varie aussi avec la nature du sol. Aplaties pour une texture très sableuse ou argileuse, elles présentent un maximum très marqué pour un sable limoneux (Fig. 3) évoquant les travaux de MADISSON, 1944, cités par FAURE, 1978).

## 1.2. TECHNIQUE MODIFIEE DU TEST PROCTOR A ENERGIE REDUITE

En s'inspirant des travaux de SELVANATHAN (1976) et de DUCREUX (1984), nous avons essayé de pallier les inconvénients induits par l'emploi du test Proctor standard en modifiant la technique de compactage.

### 1.2.1. Appareillage (Fig. 4)

L'appareillage comprend :

- . le moule Proctor, constitué par un tube cylindrique métallique de 10,15 cm de diamètre intérieur et de 11,70 cm de hauteur, coupé suivant deux génératrices diamétralement opposées. Les deux coquilles sont maintenues par des boulons facilement démontables permettant ainsi un démoulage facile des échantillons compactés ;

- . la partie inférieure, métallique et amovible, qui sert de base ;

- . les deux hausses<sup>(1)</sup>, métalliques et mobiles, de même diamètre que le moule et venant s'emboîter de part et d'autre de ce dernier. L'ensemble est maintenu par un système de vis et écrous ;

- . la dame<sup>(2)</sup> : nous avons utilisé une dame à énergie réduite. Elle est constituée par un mouton cylindrique de 5,08 cm de diamètre et de 1 kg de masse, guidé par une tige métallique glissant à l'intérieur d'un fourreau. Sa hauteur de chute est de 30,5 cm.

Les accessoires :

- . une lame métallique permettant d'araser la surface du cylindre (aux cotes) après enlèvement des deux hausses ;

- . une spatule et un pulvérisateur à eau pour humecter les échantillons.

(1) Dans l'essai standard, on n'utilise qu'une seule hausse mobile (PELTIER, 1959).

(2) La dame de compactage : dans le test standard, elle est équipée d'un mouton cylindrique ayant un diamètre supérieur au rayon du moule et induisant ainsi une hétérogénéité latérale (GRIMALDI, 1977). Le mouton pèse 2,490 kg, provoquant un compactage poussé (COSTET et SANGLERAT, 1975).



### 1.2.2. Mode opératoire

La terre séchée à l'air est passée à travers un tamis à maille ronde de 2 mm.

Pour la confection d'une éprouvette de terre, il faut environ 2,5 kg de terre. Ainsi, pour un diagramme de compactage complet comportant des essais à dix teneurs en eau différentes, 25 kg de terre séchée sont donc nécessaires.

- L'échantillon de terre est étalé dans un bac, puis on y incorpore progressivement au moyen d'un pulvérisateur une quantité d'eau calculée au préalable en essayant d'obtenir un mélange homogène.

- Après addition de la quantité d'eau prévue, l'échantillon est malaxé afin d'éviter la formation d'agréats.

- On laisse alors le matériau "s'équilibrer" pendant deux jours dans un sac en plastique soigneusement fermé.

- Le compactage dans le dispositif modifié, se fait de la façon suivante :

- . l'échantillon porté à une teneur en eau donnée est versé en une seule fois dans le dispositif, puis soumis à 54 coups de dame. On arase ensuite l'éprouvette de terre après enlèvement de la première hausse.

- . L'ensemble est ensuite retourné, puis on répète la même opération à l'autre surface de l'éprouvette (54 coups de dame).

- Après compactage, le dispositif est démonté et l'éprouvette est arasée sur les deux faces externes après enlèvement des deux hausses.

- L'échantillon compacté et démoulé est immédiatement pesé. On détermine la teneur en eau pondérale du matériau après passage à l'étuve à 105°C, ce qui permet de calculer la densité sèche ( $\gamma_d$ )

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{100+W} \times 100 \quad (3)$$

avec  $\gamma_h$  = densité humide =  $\frac{\text{poids humide de l'éprouvette}}{\text{Volume}}$

W = la teneur en eau (%)

Le résultat de l'essai se traduit par un point de la courbe.

On recommence en augmentant chaque fois la teneur en eau, et l'on obtient ainsi une série de points qui dessinent le diagramme de compactage complet.

Un exemple de mesure et pesée faites au cours d'un essai figurent en annexe A-1.

### Energie de compactage

L'énergie mise en oeuvre par le procédé standard correspond à un compactage "poussé" utilisé pour les études de terrassement ( $E_C = 0,6 \text{ KJ/dm}^3$ ).

Les tassements calculés par cet essai sont supérieurs à ceux provoqués par les engins agricoles.

Afin de se rapprocher des énergies communément mises en oeuvre par les engins agricoles (VILTOX, 1985), nous avons été conduits à réduire l'énergie de compactage en choisissant une dame plus légère (le poids du mouton est de 1 kg) et tombant d'une hauteur de 30,5 cm d'où une énergie totale ( $E_c$ ) de 0,34 KJ/dm<sup>3</sup> (formule 1).

### 1.3. CONTROLE DE L'HOMOGENEITE DES EPROUVETTES CONFECTIONNEES

Compte-tenu de la modification du protocole, il apparaissait indispensable de vérifier l'homogénéité des éprouvettes de terre confectionnées par cette nouvelle méthode. Nous avons, à cet effet, procédé à la détermination de la densité sèche des fragments des éprouvettes de terre confectionnées.

Les matériaux de l'horizon (0-20 cm) du Colombier et de Bou S<sub>3</sub> (définis plus loin) ont été compactés dans ce but à plusieurs teneurs en eau.

#### 1.3.1. Mode opératoire

##### a) Prélèvement de "fragments" dans les échantillons Proctor

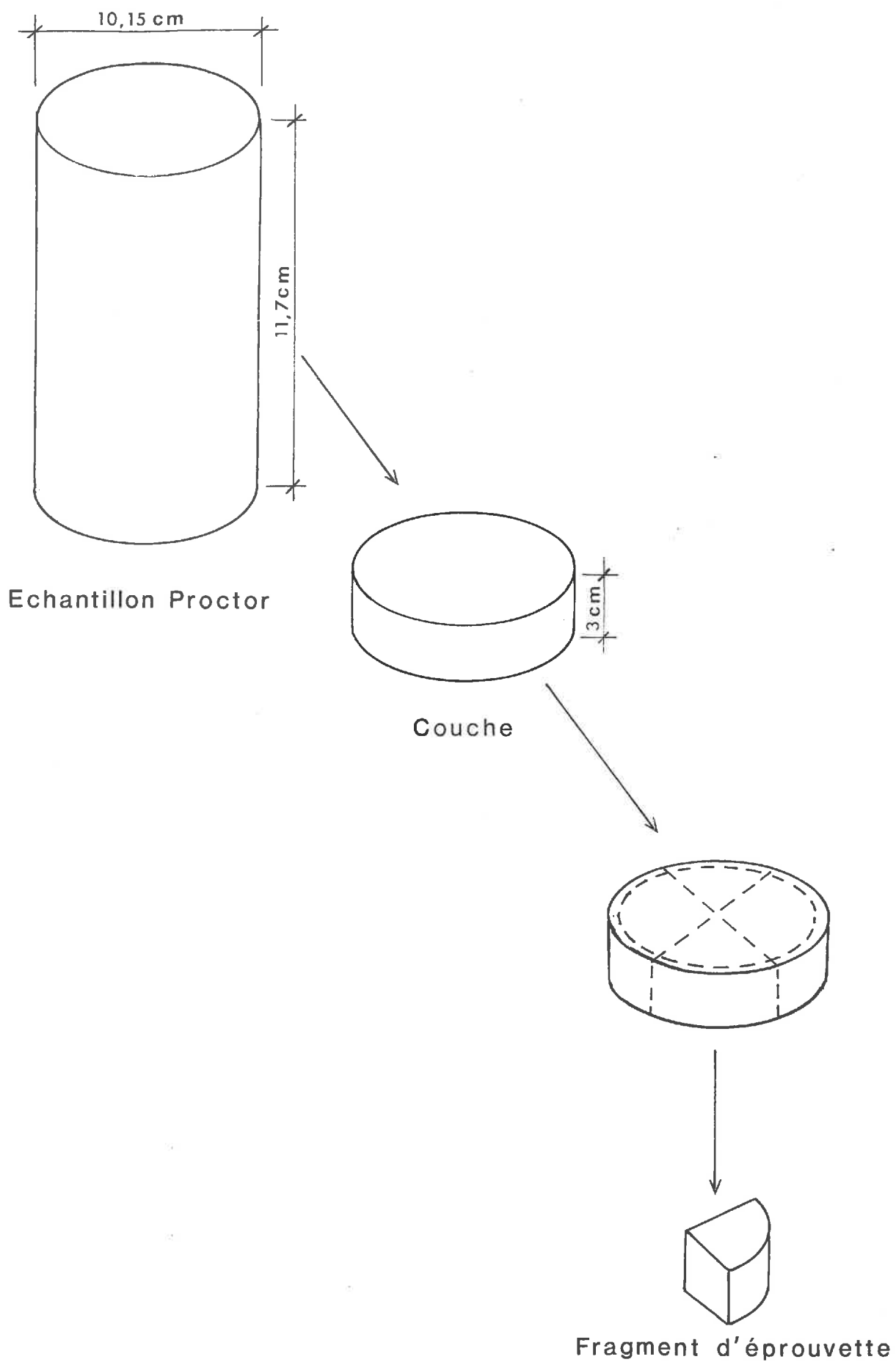
Des fragments d'éprouvettes de terre ont été prélevés selon la méthode proposée par MONNIER, STENGEL et FIES (1973) consistant en un fractionnement avec précaution des échantillons Proctor compactés.

On procède de la manière suivante (Fig. 5) : une tranche d'environ trois centimètres d'épaisseur est découpée au moyen d'un couteau fin, cette tranche est enfin divisée en quatre quarts qui correspondent aux fragments d'éprouvette de terre dont on mesure la densité sèche apparente.

##### b) Mesures de la densité sèche des fragments d'éprouvette de terre

La mesure du volume apparent des fragments d'éprouvette a été faite selon la méthode proposée par MONNIER et al. (1973), par saturation au pétrole de la porosité accessible (celle qui n'est pas occupée par la phase liquide). Une description détaillée de cette méthode figure en annexe A-2.

L'examen des valeurs de densité sèche moyenne et de l'écart type à la moyenne reportées sur le tableau I confirme la possibilité d'obtenir des échantillons homogènes quant à la densité apparente par la méthode Proctor modifiée.



**Figure -5**  
Mode de prélèvement des fragments d'éprouvette  
dans un échantillon Proctor

TABLEAU I.

Matériaux	Teneur en eau W(%)	Densité sèche Moyenne	Nombre de mottes	Ecart type à la moyenne : $\frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$
COLOMBIER 0 - 20 cm	8,9	1,53	12	0,01
	11,1	1,58	12	0,01
	13	1,65	12	0,01
	20,2	1,58	6	0,007
BOU S <sub>3</sub> 0 - 20 cm	8,5	1,65	8	0,008
	12	1,75	9	0,01

N.B. Nous n'avons pas pu réaliser cette manipulation sur toutes les "mottes" sableuses qui s'effritent trop facilement.

L'observation en lame mince montre qu'il n'apparaît pas de discontinuités dans les éprouvettes ainsi confectionnées (Fig. 6).



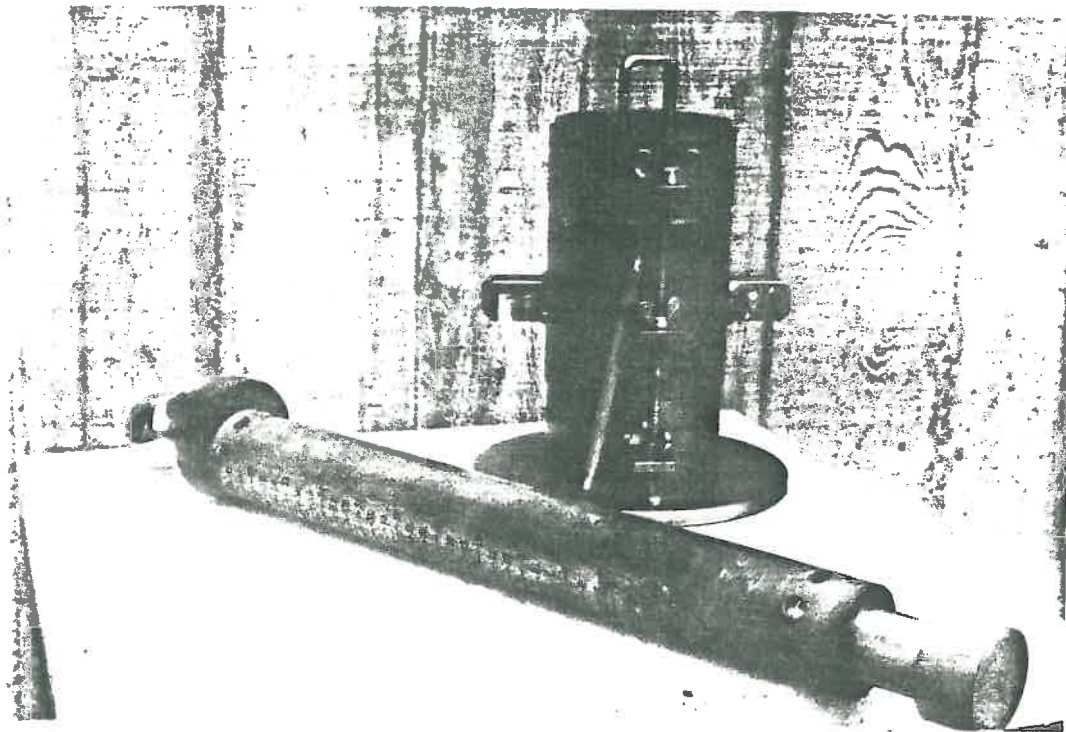
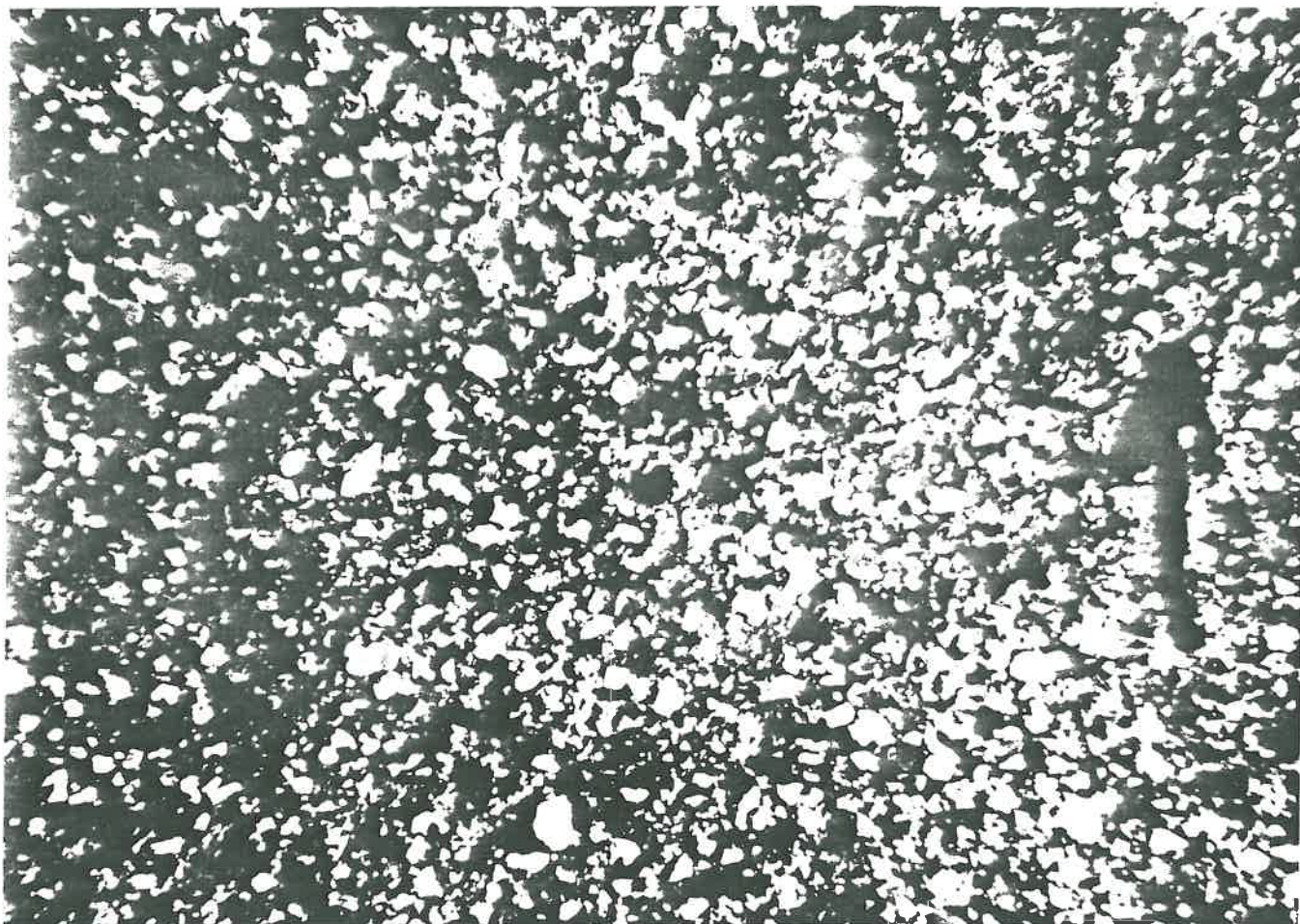


FIG.4 APPAREIL PROCTOR MODIFIE



Lum. Pol. et Anal.

0 1 2 3 4 5mm

FIG.6 Eprouvette de sol après le compactage (test proctor modifié)

*(on note l'absence de discontinuités visibles)*

CHAPITRE II.

ANALYSE DES COURBES PROCTOR

### II.1. MATERIAUX ETUDIES

Les sols du Val sont formés sur des alluvions de la Loire dont la composition granulométrique est extrêmement variée et la répartition, tant horizontale que verticale, est très complexe. On note cependant une forte dominance des sables de diverses dimensions.

Compte-tenu de ces remarques, nous avons retenu pour cette étude, quatre matériaux jugés représentatifs des horizons de surface du secteur étudié. Leur provenance et leurs caractéristiques analytiques sont indiqués dans le tableau II.

TABLEAU II.  
Provenance et caractéristiques analytiques des matériaux étudiés.

Provenance	Horizon	A. < 2 $\mu$	L.f. 2-20 $\mu$	L.g. 20-50 $\mu$	SABLES					Mo %	C %	pH eau	
					50-100 $\mu$	100-200 $\mu$	200-500 $\mu$	500-1000 $\mu$	1000-2000 $\mu$				
COLOMBIER	0-20 cm	14,9	14,3	11,1	12,2	22,0	19,2	4,4	1,9	1,72	10,0	6,5	13,3
ST BENOIT S1	0-20 cm	13	12,4	8,9	9,6	13,6	30,8	9,6	2,1	1,96	11,4	7,2	17,0
BOU S	0-20 cm	7,6	5,5	4,3	10,6	20,5	47,2	4,1	2	0,72	4,2	5,5	10,8
MALAKOF	0-20 cm	5	6,1	3,2	8,4	19,2	42,3	12,2	3,6	1,35	7,9	-	31,6

Les courbes granulométriques de fréquence sont reportées sur la figure 7.

Le diagramme de texture exposé par BETREMIEUX et al. (1962) permet une description assez significative de ces types de matériaux (Fig. 8).

### II.2. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Les résultats expérimentaux et calculés figurent en annexe A-3, les courbes correspondantes sont reportées sur la figure 9.

On sait que ces courbes en cloche passent classiquement par 2 points particuliers : un seuil de sensibilité au compactage (de coordonnées  $W_c$ ,  $\gamma_c$ ) et un maximum Proctor (de coordonnées  $W_M$ ,  $\gamma_d^M$ ). Voir les travaux de FAÛRE (1978), SELVANATHAN (1976), DEMDAMI (1982), DERDOUR (1985), GRIMALDI (1981), MANIERE (1973), DUCREUX (1984).

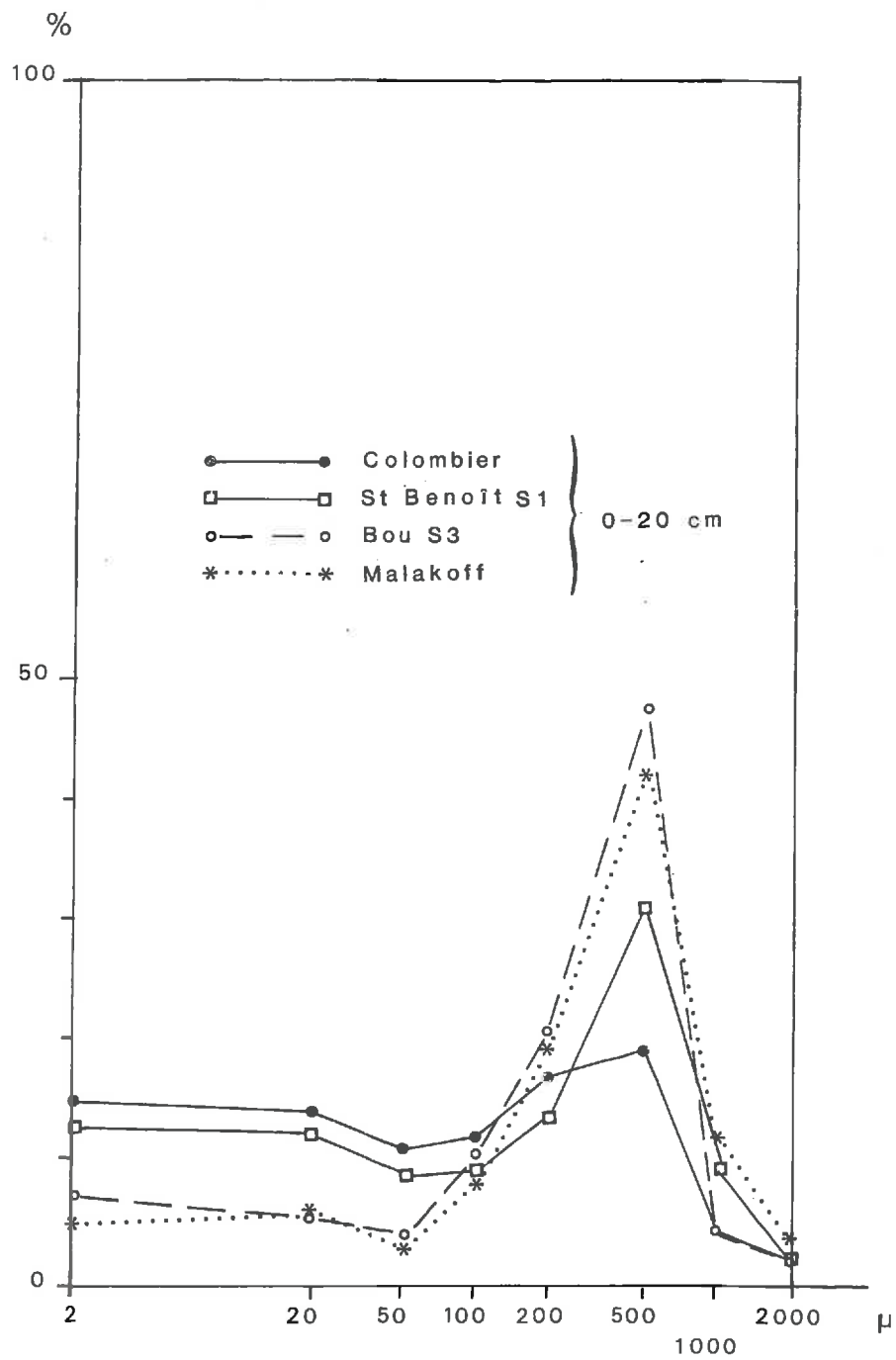


Figure: 7  
 Courbes granulométriques de fréquence

Désignation de la texture

Diagramme de référence, d'après Bétrémieux et al (1962)

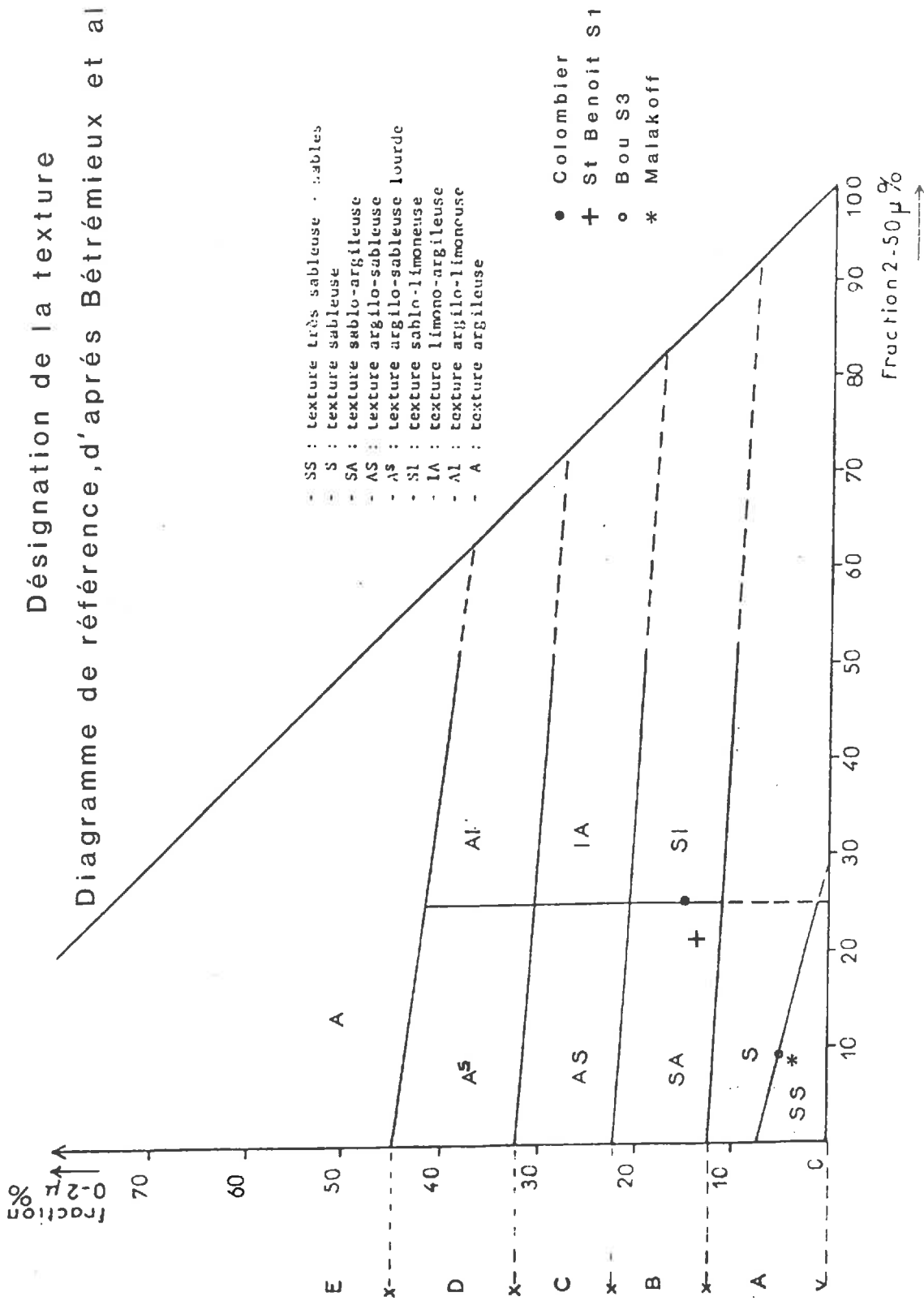


Figure: 8



### II.2.1. Le seuil de sensibilité au compactage

C'est à partir de la teneur en eau critique ( $W^c$ ) que la sensibilité au compactage de l'échantillon commence à se manifester.

Les coordonnées de ce point sont parfois difficiles à déterminer comme le montre la figure 9.

#### II.2.1.1. Etat de connaissance

Par des tests Proctor, FAURE (1971, 1976, 1978) a étudié le comportement au compactage de mélanges binaires (argiles + sables) en proportions variables pour des valeurs de teneur en eau relativement faibles. Il a ainsi proposé la notion du seuil qui serait représentative de "la limite des deux comportements fragile et plastique d'un matériau". Selon cet auteur, la teneur en eau au seuil ( $W^c$ ) est proportionnelle à la teneur en argile et dépend aussi de la nature et de la grandeur de l'énergie utilisée.

GUERIF (1976) a constaté que les coordonnées du seuil de sensibilité sont également liées à la teneur en matière organique du sol.  $W^c$  est déplacé vers les fortes teneurs en eau lorsque la teneur en matière organique d'un sol augmente. C'est un aspect du rôle protecteur des matières organiques vis-à-vis du compactage.

#### II.2.1.2. Analyse des résultats

Les coordonnées approximatives des seuils de sensibilité de chacune des courbes sont rassemblées dans le tableau suivant :

Matériaux	A (%) < 2 $\mu$	L.F. 2-20 $\mu$	Teneur en eau au seuil $W^c$ (%)	Densité sèche au seuil ( $\gamma_d$ )	Porosité totale n (%)
MALAKOF	5	6,1	3,2	1,66	37,8
BOU S <sub>3</sub>	7,6	5,5	3,4	1,52	43,1
ST BENOIT S <sub>1</sub>	13	12,4	7,4	1,57	41,2
COLOMBIER	14,9	14,3	9,4	1,53	42,7

L'examen de ces valeurs montre qu'il existe une relation étroite entre la teneur en argile (A) et/ou les limons fins (2-20 $\mu$ ) et la teneur en eau au seuil de sensibilité ( $W^c$ ).

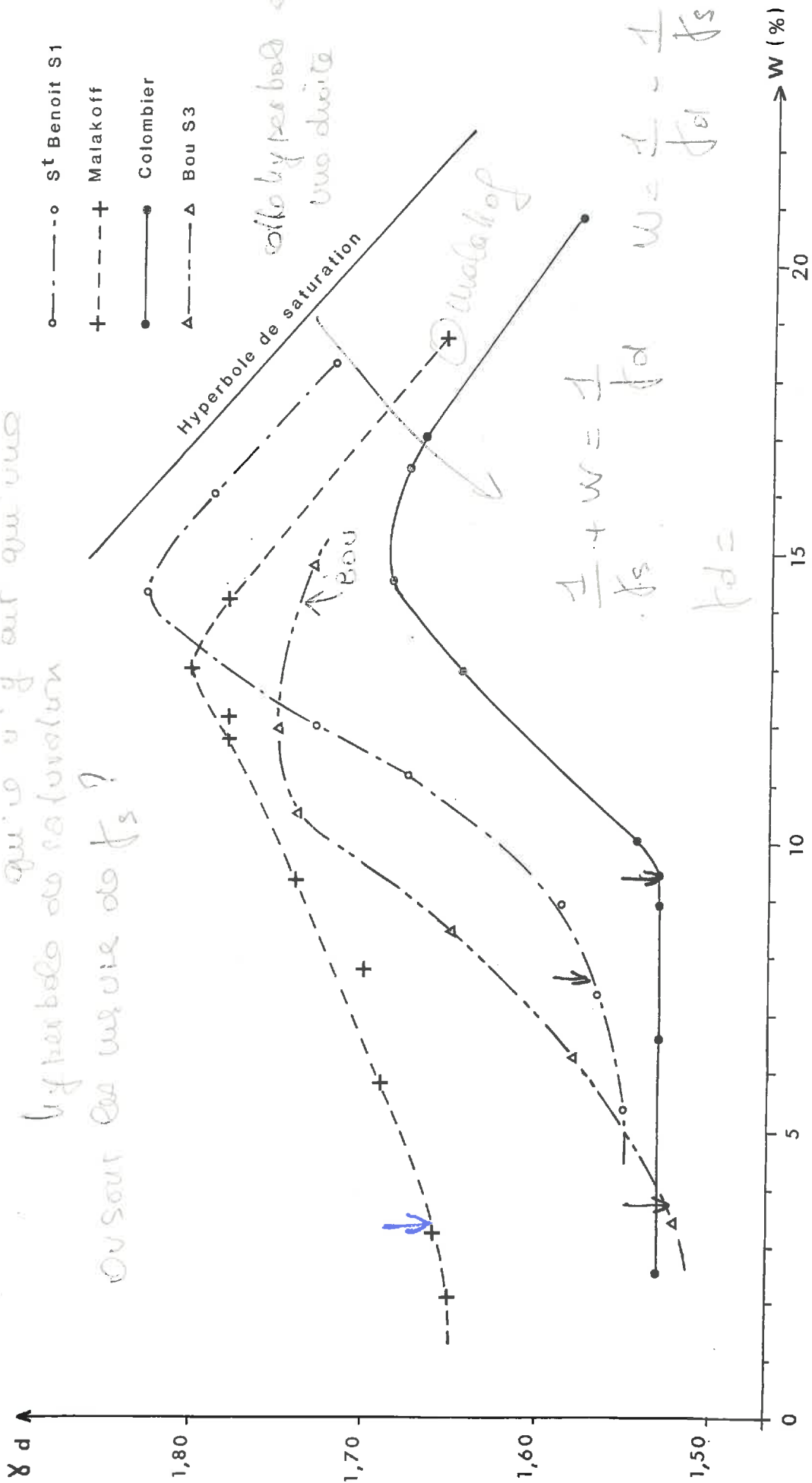


Figure 9 - Courbes Proctor des matériaux sableux du Val de Loire

## II.2.2. Comportement des matériaux au-delà du seuil de sensibilité

Au-delà du seuil hydrique ( $W^C$ ), les quatre courbes accusent une forte croissance, qui résulte du comportement plastique des matériaux d'une part, et du rôle lubrifiant de l'eau d'autre part. Les variations des densités sèches des différents matériaux correspondent à une augmentation de leur compacité. Cette compacité augmente jusqu'à un maximum (optimum Proctor).

### II.2.2.1. Le maximum de compacité : état de connaissance

Selon FAURE et FIES (1972), les coordonnées à "l'optimum" Proctor dépendent de la teneur en argile et de la taille des éléments "grossiers" constituant le squelette du matériau. Il est vraisemblable qu'elles dépendent des propriétés gonflantes de l'argile (FAURE, 1971).

MANIERE (1973) et DUCREUX (1984) ont illustré l'influence de la teneur en éléments fins sur les coordonnées à "l'optimum" Proctor. Pour ces auteurs la valeur de la densité maximale ( $\gamma_d^M$ ) est une fonction décroissante du taux d'éléments fins.

GUERIF (1979) ; GUERIF et FAURE (1979) ; MANIERE (1973) ont étudié l'influence de la teneur en matière organique sur la densité maximale ( $\gamma_d^M$ ) et la teneur en eau correspondante ( $W^M$ ). Selon ces auteurs, la matière organique a pour effet de diminuer la densité maximale et d'augmenter la teneur en eau correspondant à cette densité maximale. Les variations de coordonnées à l'optimum Proctor ne deviennent significatives que pour des teneurs en matière organique totale supérieure à 2,2 % (MANIERE, 1973).

### II.2.2.2. Analyse des résultats

Les coordonnées à "l'optimum" Proctor relatives aux quatre matériaux sont rassemblées dans le tableau III.

Matériaux	A (%) < 2 $\mu$	LF (%) 2-20 $\mu$	Eléments fins (%) A + LF	$W^M$ (%)	$\gamma_d^M$	Porosité totale (%)
MALAKOF	5	6,1	11,1	13	1,80	32,6
BOU S <sub>3</sub>	7,6	5,5	13,1	12	1,75	34,5
ST BENOIT S <sub>1</sub>	13	12,4	25,4	14,3	1,83	31,5
COLOMBIER	14,9	14,3	29,2	14,5	1,69	36,7

TABLEAU III.

Caractéristiques mécaniques des matériaux compactés.

A la lecture de ces résultats, il apparaît que :

- . la teneur en eau optimale pour le compactage augmente avec le taux d'éléments fins ; on peut, probablement, en attribuer la cause au fait que la surface spécifique du sol augmente lorsque sa texture devient de plus en plus fine ;

- . inversement, la densité sèche à "l'optimum" Proctor ( $\gamma_d^M$ ) diminue lorsque le taux d'éléments fins du matériau augmente.

Nous retiendrons, en conclusion, que les résultats obtenus dans le cadre de cette étude ne sont pas contradictoires avec ceux obtenus par les autres auteurs.

### II.3. ETUDE DE LA SENSIBILITE AU COMPACTAGE DES MATERIAUX

#### II.3.1. Etat des connaissances

Afin de mieux évaluer la susceptibilité au compactage des matériaux remaniés, certains auteurs (MATTAUER et al., cités par CORDIER, 1983) préconisent l'utilisation d'un indice  $\Delta\lambda$  qui correspond à la variation des densités sèches entre les deux points particuliers ( $\Delta\lambda = \gamma_d^M - \gamma_d^C$ )

Plus encore que la différence absolue entre les deux valeurs de densités sèches ( $\gamma_d^M$  et  $\gamma_d^C$ ), de nombreux auteurs (TERZAGHI, 1951 ; TERZAGHI et PECK, 1961 ; COSTET et SANGLERAT, 1975 ; FAURE et FIES ; DERDOUR, 1985) quantifient la sensibilité au compactage par le rapport

$$S_c = \frac{\gamma_d^M - \gamma_d^C}{\frac{W^M}{W^C}} \times 100$$

qui correspond donc à l'augmentation moyenne de densité entre le seuil de sensibilité au compactage et le maximum Proctor pour une augmentation unitaire de la teneur en eau.

DEMDAMI (1982) propose d'affecter le rapport  $S_c$  d'un coefficient correcteur  $\left(\frac{\gamma_d^M}{W^C}\right)$  traduisant la valeur de la compacité maximale et le domaine d'entrée en phase de plus grande compacité ( $W^C$ ).

Compte-tenu des difficultés quant à la détermination précise des coordonnées au seuil dans le cas des matériaux à texture très sableuse, nous avons été amenés à déterminer graphiquement une pente moyenne pour quantifier la sensibilité au compactage.

L'examen des indices de sensibilité  $S_c$  déterminés pour chaque matériau (tableau IV) fait apparaître deux classes (1) de comportement :

- . les matériaux peu sensibles au compactage pour lesquels  $S_c \leq 2,75 \%$  ;

(1) Classification adaptée par FAURE et FIES.

- . les matériaux sensibles au compactage, pour lesquels  $2,75 \% \leq S_c < 5,5 \%$ .

(l'incertitude globale est de l'ordre de  $10^{-1}$ , cf. Annexe A4)

TABLEAU IV

Indice de sensibilité au compactage des matériaux.

Matériaux	Horizons	Indice de sensibilité au compactage : $S_c$ (%)
MALAKOFF	0-20 cm	2,3
BOU S <sub>3</sub>	0-20 cm	2,6
COLOMBIER	0-20 cm	3,2
ST BENOIT S <sub>1</sub>	0-20 cm	4,7

### II.3.2. Relation entre la sensibilité au compactage des matériaux et leurs caractéristiques physiques

Les problèmes des relations entre la composition granulométrique des matériaux et leur sensibilité au compactage ont été abordés par de nombreux auteurs.

Dans le cas de mélanges binaires d'argiles et de sables, FAURE et FIES ont établi deux classes de comportement mécanique sur la seule base de la teneur en argile (Fig. 10) ; les matériaux non sensibles au compactage pour lesquels la teneur en argile est supérieure à 25 % et les matériaux sensibles au compactage pour lesquels la teneur en argile est inférieure à 25 %.

Plus encore que la teneur en argile et en éléments fins, certains auteurs (MATTAUER et al., 1978, cités par CORDIER, 1983 ; HENIN et al., 1970 ; FIES, 1971 ; STAPLE, 1975) considèrent que la forme des grains et la distribution granulométrique des matériaux rendent mieux compte des variations de leurs comportements mécaniques.

### Résultats

Afin de pouvoir mettre en évidence l'effet combiné de la fraction fine (argiles et limons fins) et de la distribution granulométrique des matériaux sur leurs comportements mécaniques, nous représenterons les courbes granulométriques cumulatives semi-logarithmiques (RIVIERE, 1977) (Fig. 11). Ce mode de représentation nous permet de calculer l'indice d'hétérométrie (Hq) défini comme étant égal à :

$$Hq = \frac{Q_3 - Q_1}{2}$$

avec  $Q_1$  = 1er quartile (abscisse correspondant à  $y = 25 \%$ )  
 $Q_3$  = 3ème quartile (abscisse correspondant à  $y = 75 \%$ )

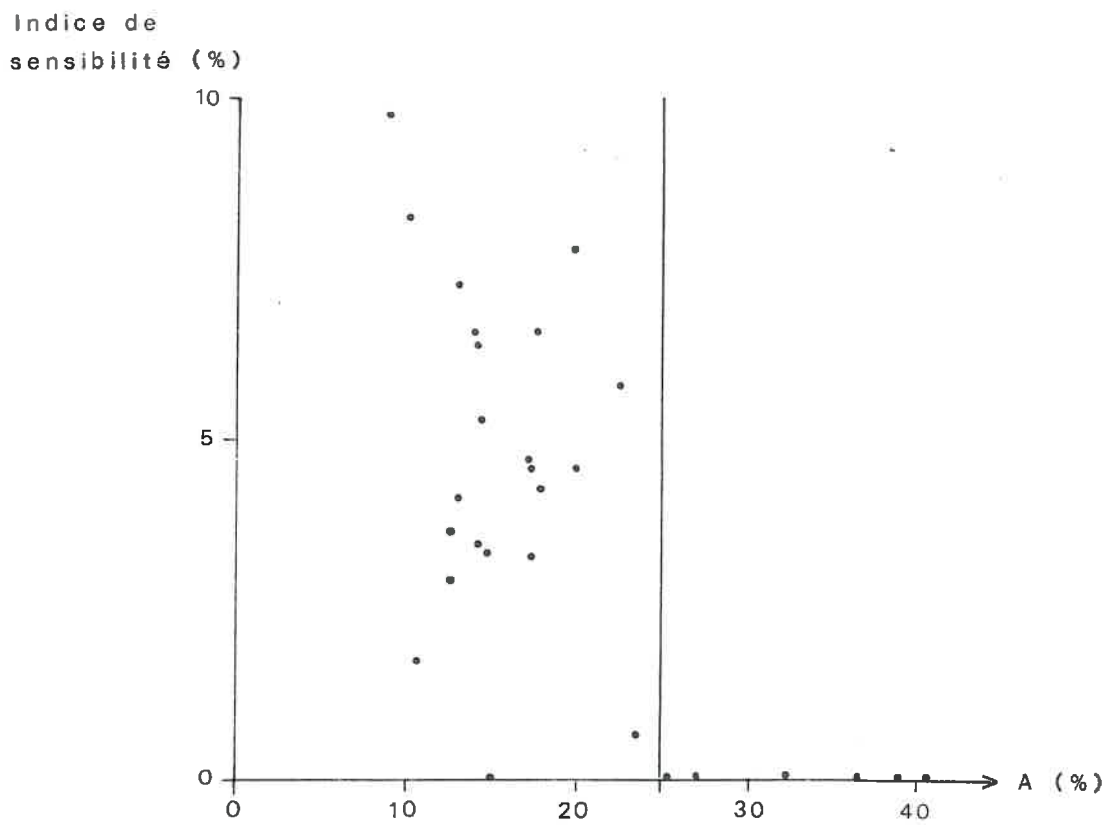


Fig:10-Relation indice de sensibilité-teneur en argile  
(d'après FAURE et FIES)

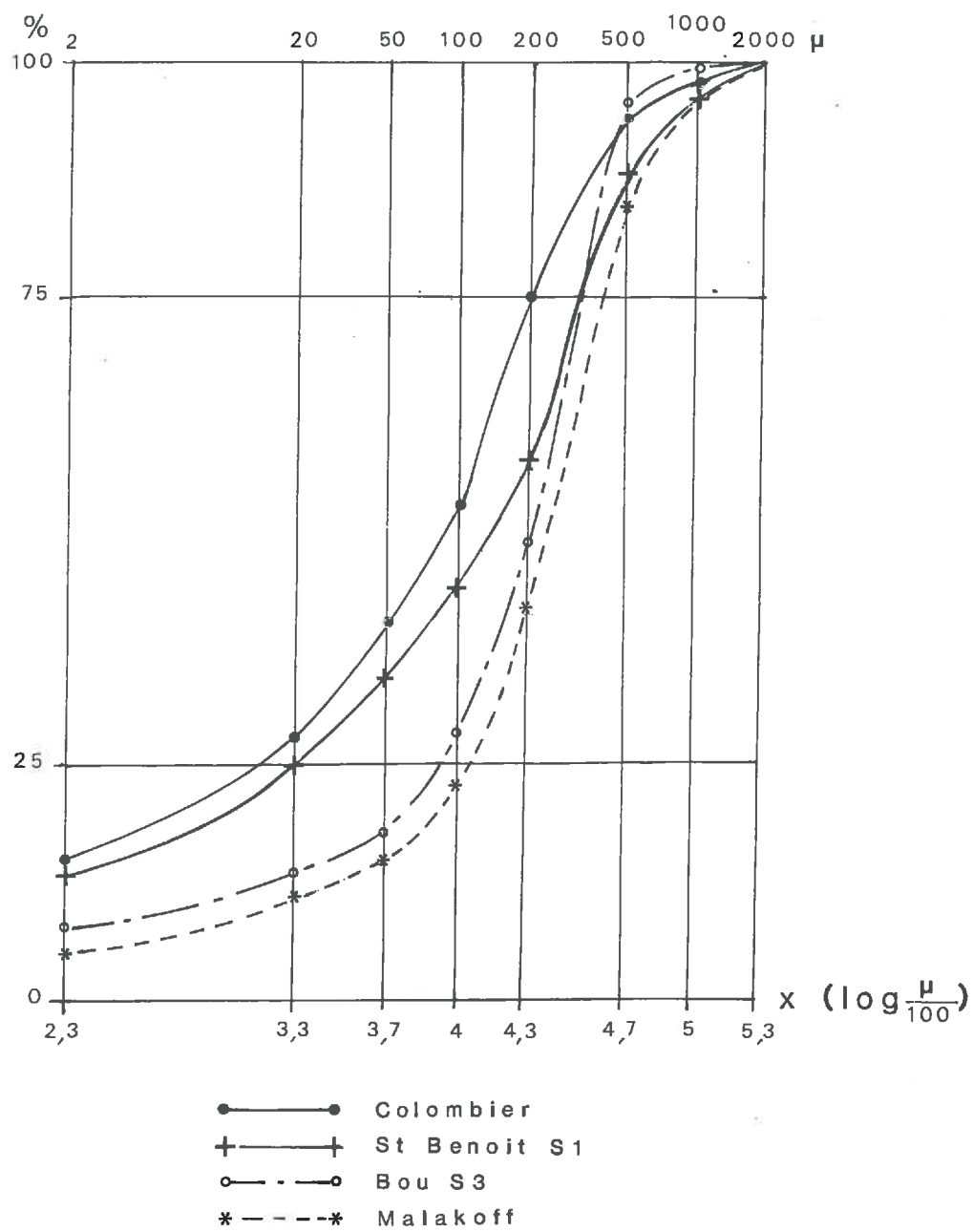


Fig:11. Courbes granulométriques cumulées

Les valeurs des quartiles sont exprimées en  $(X = \log \frac{\mu m}{100})$ .

Une valeur d'hétérométrie faible ( $Hq = 0,4$ ) indique un échantillon bien classé (SOLAU, 1980).

Le tableau V présente les valeurs des indices d'hétérométrie ( $Hq$ ), les teneurs en argile et limons fins et les indices de susceptibilité au compactage ( $Sc$ ) des quatre matériaux étudiés.

L'examen de ces valeurs développe les observation effectuées précédemment : la sensibilité au compactage est d'autant plus élevée :

- . que les teneurs en argile et en limons fins sont élevées ;
- . que l'indice d'hétérométrie ou de (mauvais) classement est élevé.

TABLEAU V.

Matériaux	Teneur en argile A (%)	Teneur en limons fins (2-20 $\mu$ ) (%)	Teneur en éléments fins A+LF (%)	Indice d'hétérométrie $Hq$	Indice de sensibilité au compactage $S_c$ (%)
MALAKOFF	5	6,1	11,1	0,27	2,3
BOU $S_3$	7,6	5,5	13,1	0,3	2,6
ST BENOIT $S_1$	13	12,4	25,4	0,58	4,7
COLOMBIER	14,9	14,3	29,2	0,6	3,2

Ces résultats ne contredisent pas les données de la littérature et notamment celles présentées dans la figure 10 évoquant les travaux de FAVRE et FIES.



## CONCLUSION

L'analyse présentée au cours de cette première partie conduit à faire ressortir les conclusions suivantes :

### 1. Choix d'une technique modifiée du test Proctor

Nous avons adapté un procédé du test Proctor modifié nous permettant d'apporter une énergie réduite comparable à celle mise en oeuvre par les engins agricoles. D'autre part, l'homogénéité des éprouvettes de sol confectionnées a été vérifiée.

### 2. Caractéristiques mécaniques des échantillons testés

L'examen des résultats obtenus à partir de quatre types de matériaux représentatifs des sols à dominance sableuse du secteur légumier du Val de Loire, (consulter le tableau récapitulatif), nous révèle que :

- le seuil hydrique de sensibilité semble dépendre de la teneur en argile et/ou en limons fins ; il est décalé vers les teneurs en eau plus élevées pour les matériaux à texture de plus en plus fine. Par contre les valeurs obtenues à "l'optimum Proctor", paraissent peu liées aux caractéristiques texturales ;

- la sensibilité au compactage, estimée au moyen d'un indice ( $S_c$ ), nous renseigne de façon globale sur le degré de sensibilité et nous permet :

- d'isoler deux grandes classes de comportement mécanique: les matériaux peu sensibles au compactage et les matériaux sensibles au compactage pour lesquels l'indice de sensibilité  $S_c$  est respectivement inférieur à 2,75 % et compris entre 2,75 % et 5,5 % ;

- de corrélérer ce comportement mécanique à certaines variables explicatives : - teneur en fractions fines (argile + limons fins), - distribution granulométrique.

Ainsi nous retiendrons que le degré de sensibilité au compactage ( $S_c$ ) est d'autant plus élevé que le matériau est plus riche en éléments fins et que sa distribution granulométrique est plus hétérométrique ( $H_q$  élevé).

Ces résultats sont par ailleurs conformes à ceux obtenus par de nombreux auteurs sur l'arrangement de populations isodimensionnelles de grains.

Cependant, compte-tenu du haut degré de remaniement imposé par le test Proctor d'une part, et de l'hétérogénéité spatiale de la granulométrie au sein d'une même unité texturale d'autre part, il convient de vérifier la "fiabilité" de tels essais de caractérisation mécanique : c'est ce que nous allons développer au cours de la deuxième partie.



MATERIAUX	Teneur en argile (%)	Teneur en limons fins (%)	Teneur en éléments fins A + Lf (%)	Valeurs au seuil		Valeurs au maximum		Indice de Sensibilité au compactage Sc (%)	Indice d'hétérométrie Hq (%)
				Teneur en eau WC (%)	Densité sèche $\gamma_c^d$	Teneur en eau $W^M$ (%)	Densité sèche $\gamma_d^M$		
Malakoff	5,0	6,1	11,1	3,2	1,66	13,0	1,80	2,3	0,27
Bou S <sub>3</sub>	7,6	5,5	13,1	3,4	1,52	12,0	1,75	2,6	0,30
St Benoit S <sub>1</sub>	13,0	12,4	25,4	7,4	1,57	14,3	1,83	4,7	0,58
Colombier	14,9	14,3	29,2	9,4	1,53	14,5	1,69	3,2	0,60

TABLEAU RECAPITULATIF.

*Pourquoi ne pas prendre en compte  
le teneur en S<sub>1</sub>?*

## ***DEUXIEME PARTIE***

***CARACTERISATION DU COMPORTEMENT MECANIQUE***

***DES SOLS EN PLEIN CHAMP : CONFRONTATION***

***AVEC LES DONNEES DE LABORATOIRE***

## INTRODUCTION

Les mesures décrites dans les chapitres précédents et déduites d'essais de laboratoire ont permis d'évaluer la sensibilité au compactage de quatre horizons superficiels des sols sableux du Val de Loire effectués sur échantillons remaniés. Par ces essais, nous avons mis en évidence l'influence de la fraction fine et de la distribution granulométrique sur cette sensibilité.

Si les essais de laboratoire constituent un élément d'information dont l'intérêt n'est nullement négligeable, ils présentent plusieurs inconvénients :

. du fait qu'il utilise de la terre remaniée, ce test ne permet pas de mettre en évidence l'effet de l'état structural sur le comportement mécanique des échantillons ;

. une longue durée d'exécution depuis le prélèvement du matériau jusqu'à l'analyse des résultats ;

. une information non continue sur le comportement mécanique du sol, en fonction de la profondeur ;

. de plus, la variabilité spatiale à l'échelle parcellaire impose l'analyse d'un nombre important de situations pour pouvoir caractériser le comportement mécanique des sols agricoles.

Compte-tenu de ces inconvénients, il semble indispensable de choisir une méthode d'approche qui permette de vérifier "la fiabilité" de tels tests de caractérisation mécanique. Cela fera l'objet de cette deuxième partie.



## CHAPITRE I.

## PARCELLE EXPERIMENTALE RETENUE POUR L'ETUDE

## 1.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE (Fig. 12)

La parcelle retenue se situe dans un méandre de la Loire à 2 km au sud ouest de la commune de Bou, feuille à 1/25.000 de la Ferté-Saint-Aubin.

## 1.2. SITUATION DES ZONES ETUDIEES ET CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

Compte-tenu des variabilités spatiales observées, nous avons été conduits à considérer sur la parcelle choisie le "transect" qui rend le mieux compte de cette hétérogénéité. Ce transect est situé à 6 m du chemin, comme l'indique la figure 13.

Tous les prélèvements de sol, toutes les mesures in situ ont été réalisés dans les zones indiquées sur la figure 13.

Les caractéristiques analytiques des échantillons prélevés sont indiquées dans le tableau VI. Les courbes granulométriques cumulative et de fréquence, relatives aux quatre échantillons prélevés, sont reportées sur les figures 14 et 15.

Les échantillons BOU S<sub>3</sub> et BOU S<sub>5</sub> (horizons 0-20 cm) ont une texture sableuse.

Les échantillons BOU S<sub>1</sub> (horizon 0-20 cm) et BOU S<sub>3</sub> (horizon 25-40 cm) ont une texture moyenne de sable argilo-limoneux (Fig. 16).

Les taux de matière organique sont peu variables et restent inférieurs à 1 %.

TABLEAU VI

Caractéristiques analytiques des échantillons étudiés.

Zones	Horizons	Argile A (%) <2 $\mu$	Limos fins Lf (%) 2-20 $\mu$	Limos grossiers Lg (%) 20-50 $\mu$	S A B L E S					MO (%)	CO (%)	pH
					50-100 $\mu$	100-200 $\mu$	200-500 $\mu$	500-1000 $\mu$	1000-2000 $\mu$			
Bou S <sub>1</sub>	0-20cm	12,3	10,4	8,8	15,4	16,3	32,4	2,1	2,3	1,04	6,1	5
Bou S <sub>3</sub>	25-40	10,6	8,4	5,8	10,5	21,3	38,8	4,2	0,4	0,72	4,2	6
Bou S <sub>3</sub>	0-20cm	7,6	5,5	4,3	10,6	20,5	47,2	4,1	0,2	0,72	4,2	5,5
Bou S <sub>5</sub>	0-20cm	7,2	4,8	3,3	9,7	18,4	52,1	4,3	0,2	0,63	3,7	4,6

La densité moyenne des grains solides ( $\bar{\gamma}_s$ ), mesurée au pycnomètre est égale à 2,67.

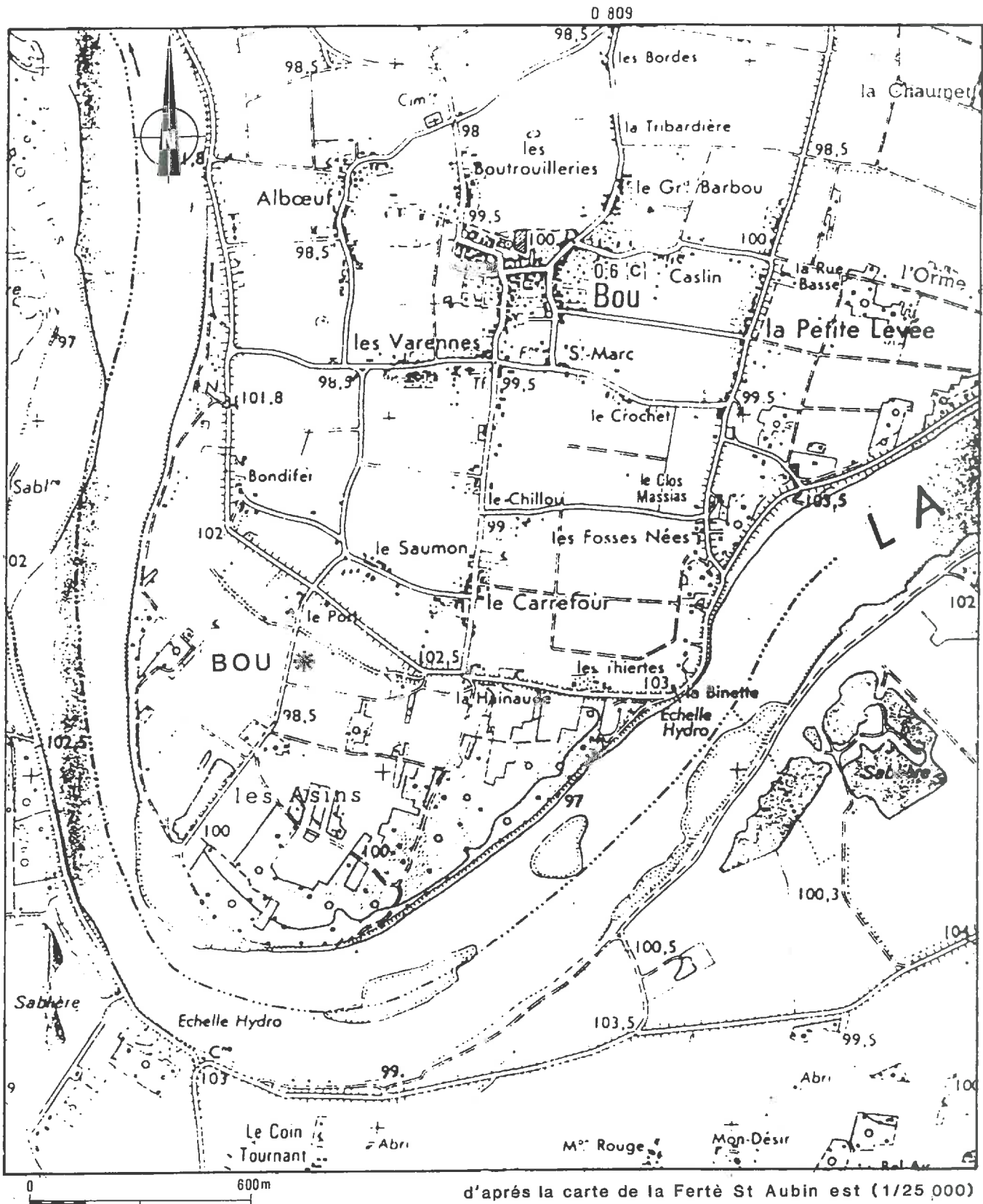
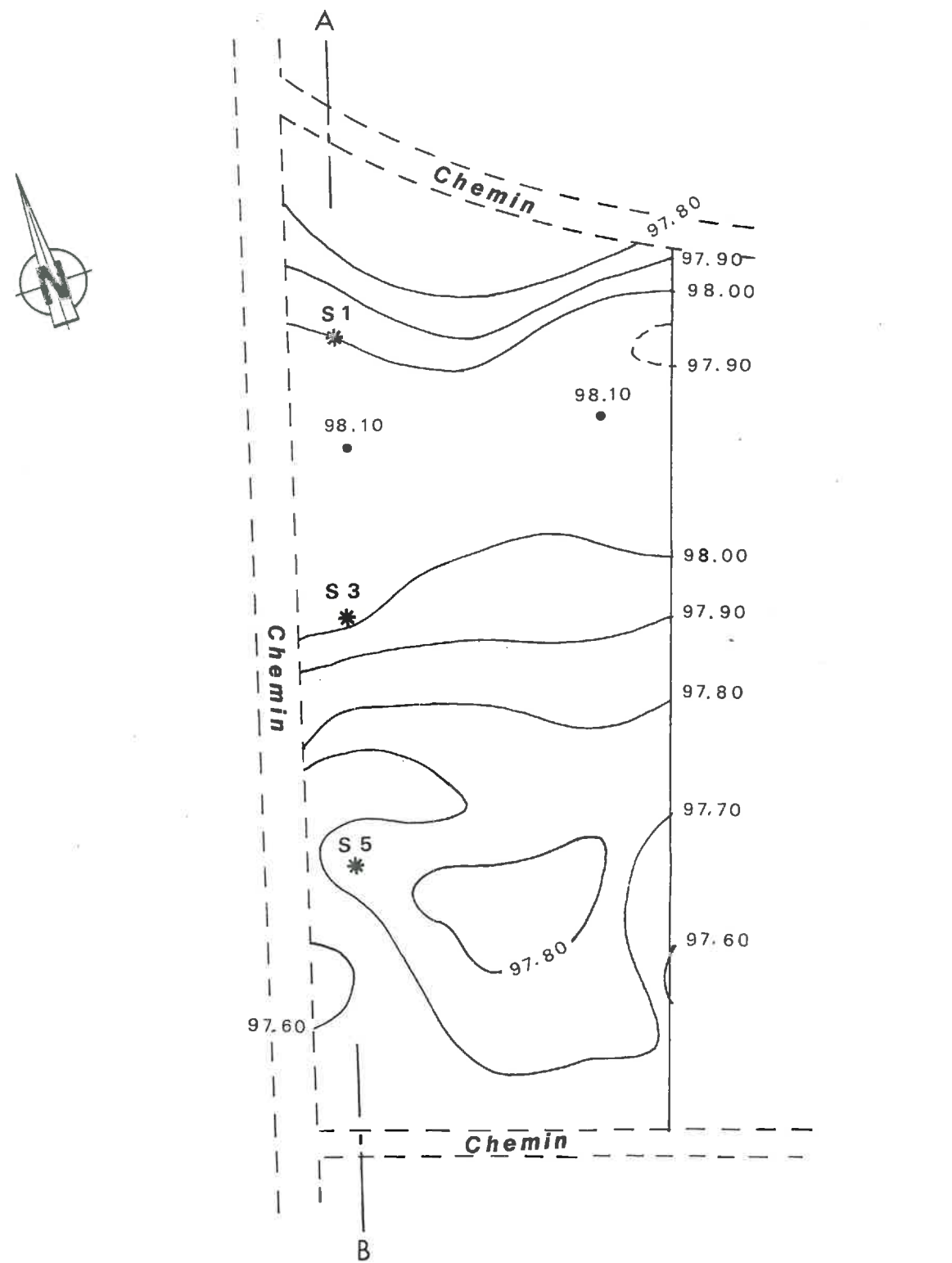


Fig:12 - Localisation de la parcelle de Bou



— 98.00 Courbe de niveau avec altitude (nivellement relatif)

\* Sites d'observation

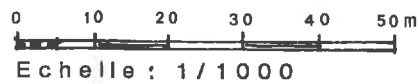


Fig:13

Topographie de la parcelle expérimentale de Bou (Val de Loire)

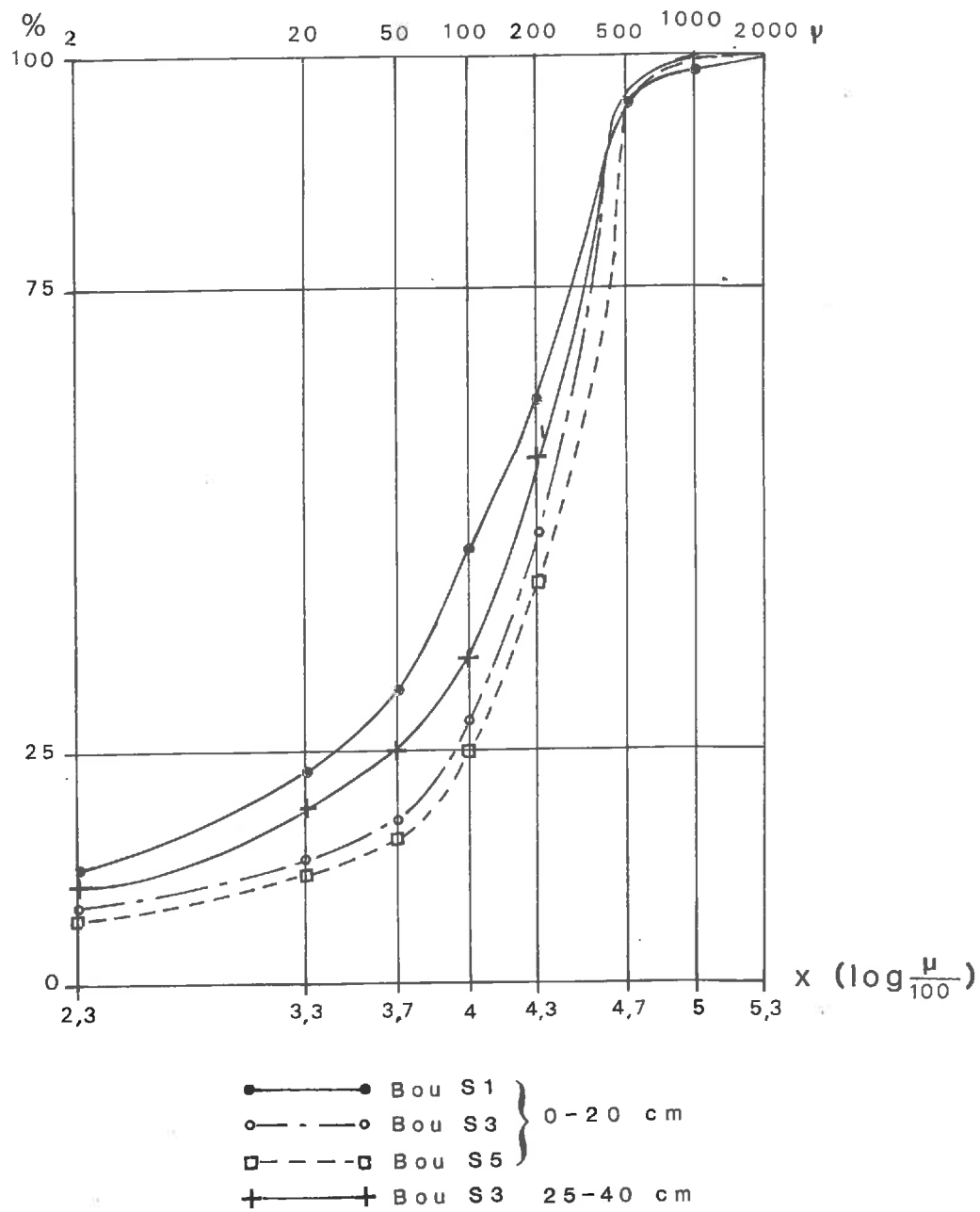


Fig:14 - Courbes granulométriques cumulées



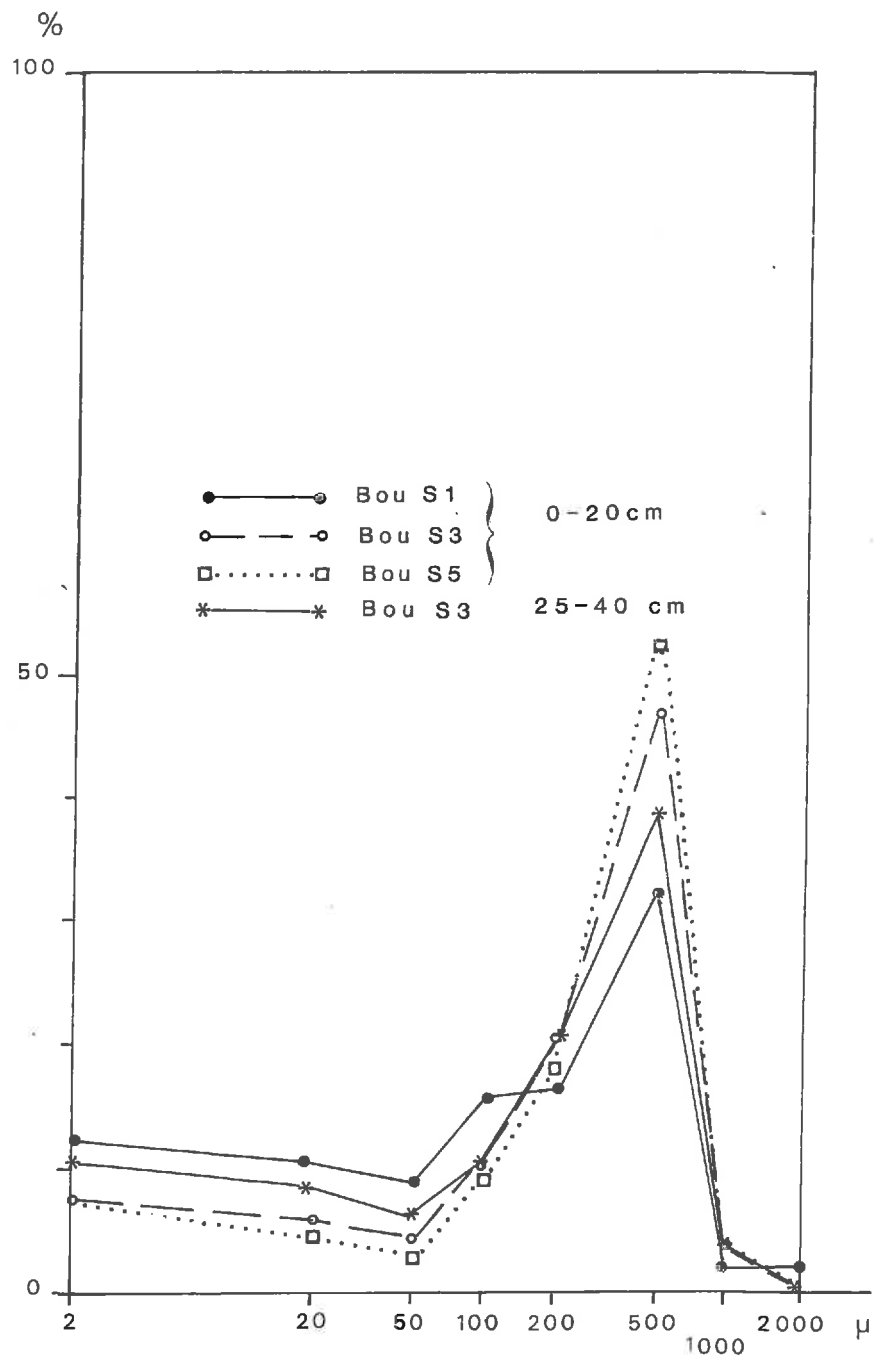


Figure:15  
 Courbes granulométriques de fréquence

# Désignation de la texture

## Diagramme de référence, d'après Bétrémieux et al (1962)

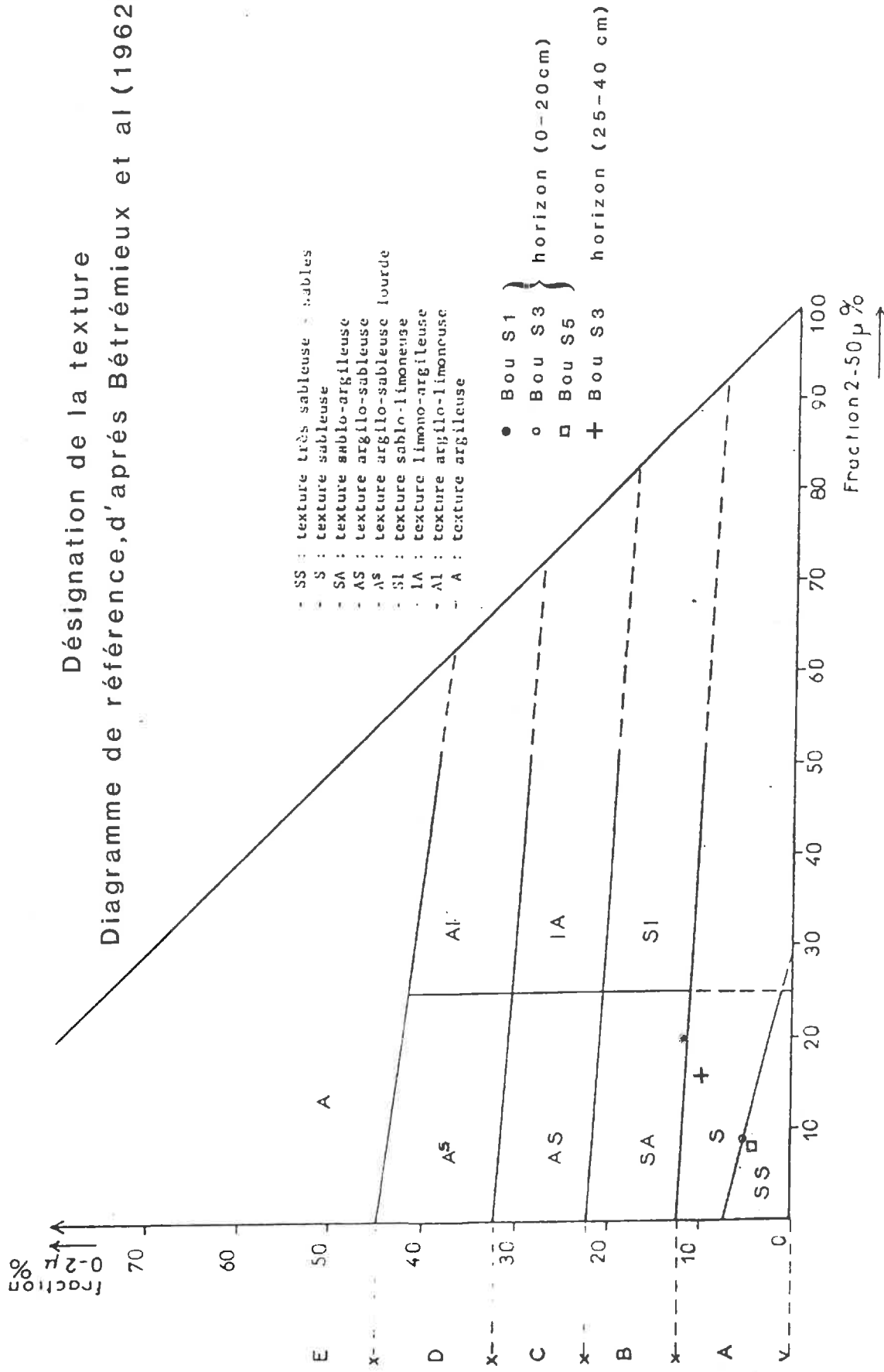


Figure:16

## CHAPITRE II.

## ETUDE DE LA SENSIBILITE AU COMPACTAGE

## II.1. ESSAIS PROCTOR

Les essais sont pratiqués selon la technique de Proctor modifiée comme déjà décrite.

II.1.1. Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux et calculés sont portés dans le tableau VII. Les courbes correspondantes sont présentées sur la figure 17.

TABLEAU VII

Caractéristiques mécaniques des échantillons compactés.

Matériaux	Teneur en argile (%)	Teneur en limons fins 2-20 $\mu$ (%)	A +Lf (%)	W <sup>C</sup> (%)	$\gamma_d^C$	W <sup>M</sup> (%)	$\gamma_d^M$
Bou S <sub>1</sub> (0-20cm)	12,3	10,4	22,7	6,4	1,56	11,7	1,78
Bou S <sub>3</sub> (25-40cm)	10,6	8,4	19	4,5	1,52	12,7	1,82
Bou S <sub>3</sub> (0-20cm)	7,6	5,5	13,1	3,4	1,52	12	1,75
Bou S <sub>5</sub> (0-20cm)	7,2	4,8	12	3,2	1,53	12,1	1,75

Nous constatons à la lecture de ces résultats que :

- . les seuils hydrique (W<sup>C</sup>) semblent être liés aux teneurs cumulées en argile et en limons fins ;
- . en ce qui concerne la teneur en eau "optimale", il ne semble pas que l'on puisse distinguer une différence significative.

Nous retiendrons, en conclusion, que les résultats obtenus sont compatibles avec ceux déjà présentés dans la première partie.

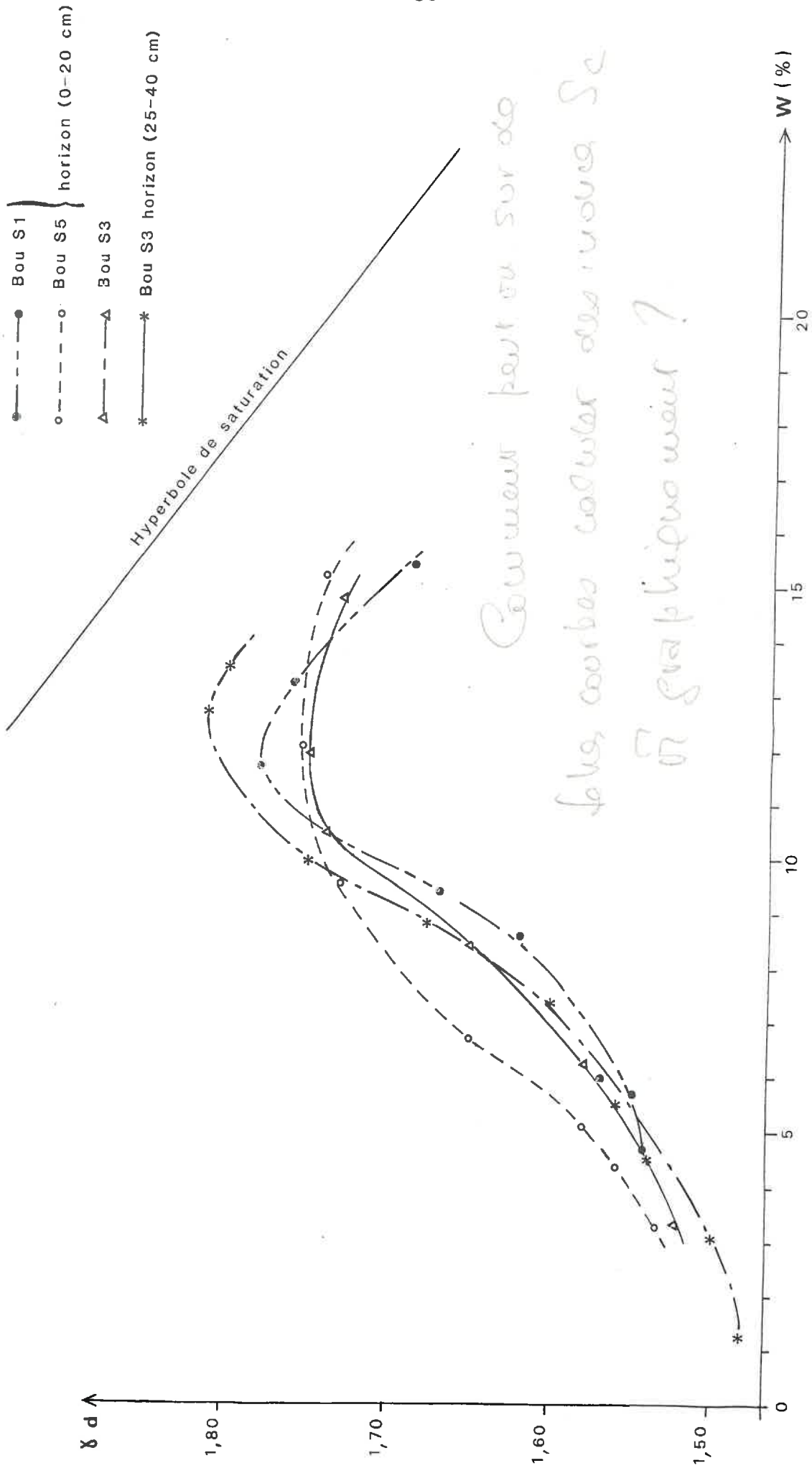


Fig :17 - Courbes Proctor des matériaux de Bou ( test modifié )

### II.1.2. Etude de la sensibilité au compactage

Les essais préalables décrits dans la première partie (CHAPITRE II) ont permis de déterminer un indice de sensibilité au compactage ( $S_c$ ) qui exprime le taux de croissance moyen de la compacité entre le seuil de sensibilité au compactage et le maximum de compacité pour une augmentation unitaire de la teneur en eau.

Les valeurs de cet indice, calculées pour chaque matériau sont regroupées dans le tableau suivant :

Zones	Horizons	Indice de sensibilité au compactage $S_c$ (%)
Bou $S_1$	0 - 20 cm	4,1
Bou $S_3$	25 - 40 cm	3,3
Bou $S_3$	0 - 20 cm	2,6
Bou $S_5$	0 - 20 cm	2,6

L'examen de ces valeurs montre la présence de deux types de matériaux du point de vue caractéristiques mécaniques :

- . les matériaux sensibles au compactage, Bou  $S_1$  (0-20 cm) et Bou  $S_3$  (25-40 cm) ;
- . les matériaux qui se distinguent par un plus faible indice de sensibilité ( $S_c$ ).

Ces résultats révèlent ainsi une variabilité spatiale de comportement mécanique au sein d'une même unité texturale.

### Relations entre la sensibilité au compactage et les variables explicatives :

Les reports en graphique des couples de valeurs (teneur en argile -  $S_c$ ), (teneur en éléments fins -  $S_c$ ) et (indice d'hétérométrie,  $S_c$ ) relatifs à tous les échantillons étudiés (Fig. 18, 19, 20) et le calcul des coefficients de corrélation linéaire permettent de mettre en évidence des relations linéaires positives entre les trois variables explicatives et la variable dépendante ( $S_c$ ).

## II.2. LA SENSIBILITE AU TASSEMENT : CONFRONTATION AVEC LES DONNEES DU TERRAIN

Pour parvenir à cet objectif, l'approche la plus simple est d'entreprendre une série de mesures déterminant l'évolution des densités apparentes du sol en place.

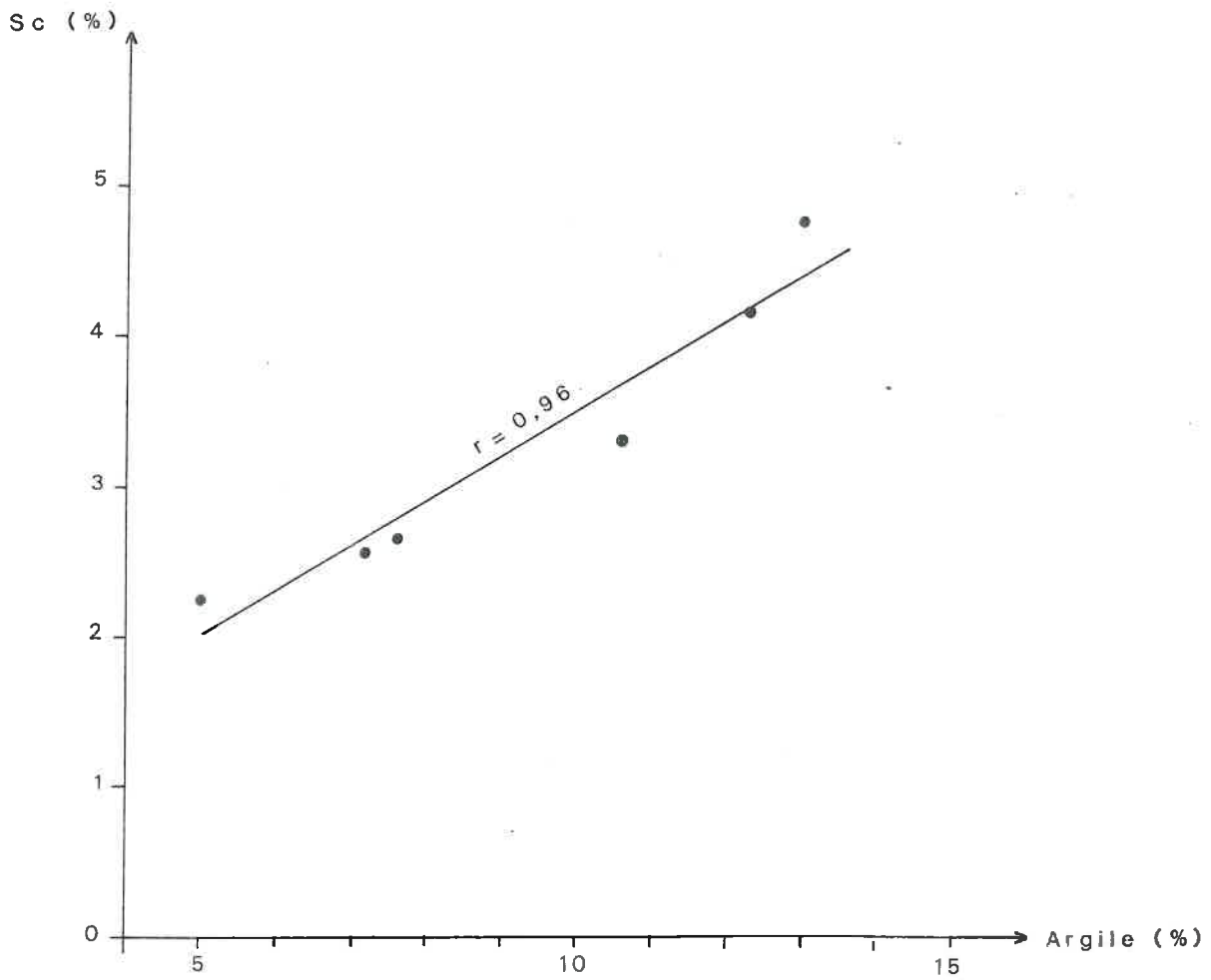


Fig:18\_ Relation entre l'indice de sensibilité au compactage (Sc) et la teneur en argile

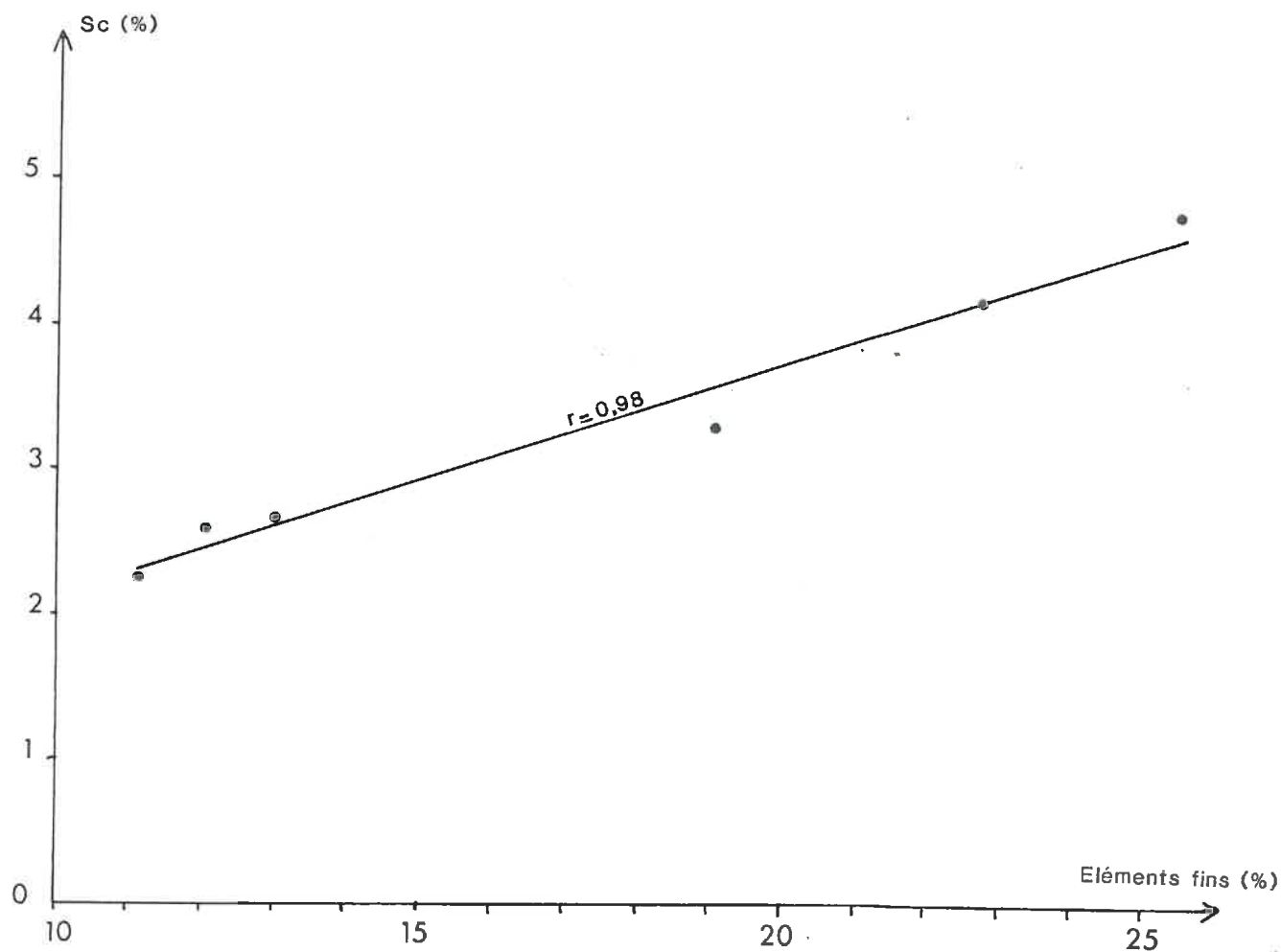


Fig: 19. Relation entre l'indice de sensibilité au compactage (Sc) et la teneur en éléments fins ( $< 20 \mu\text{m}$ )

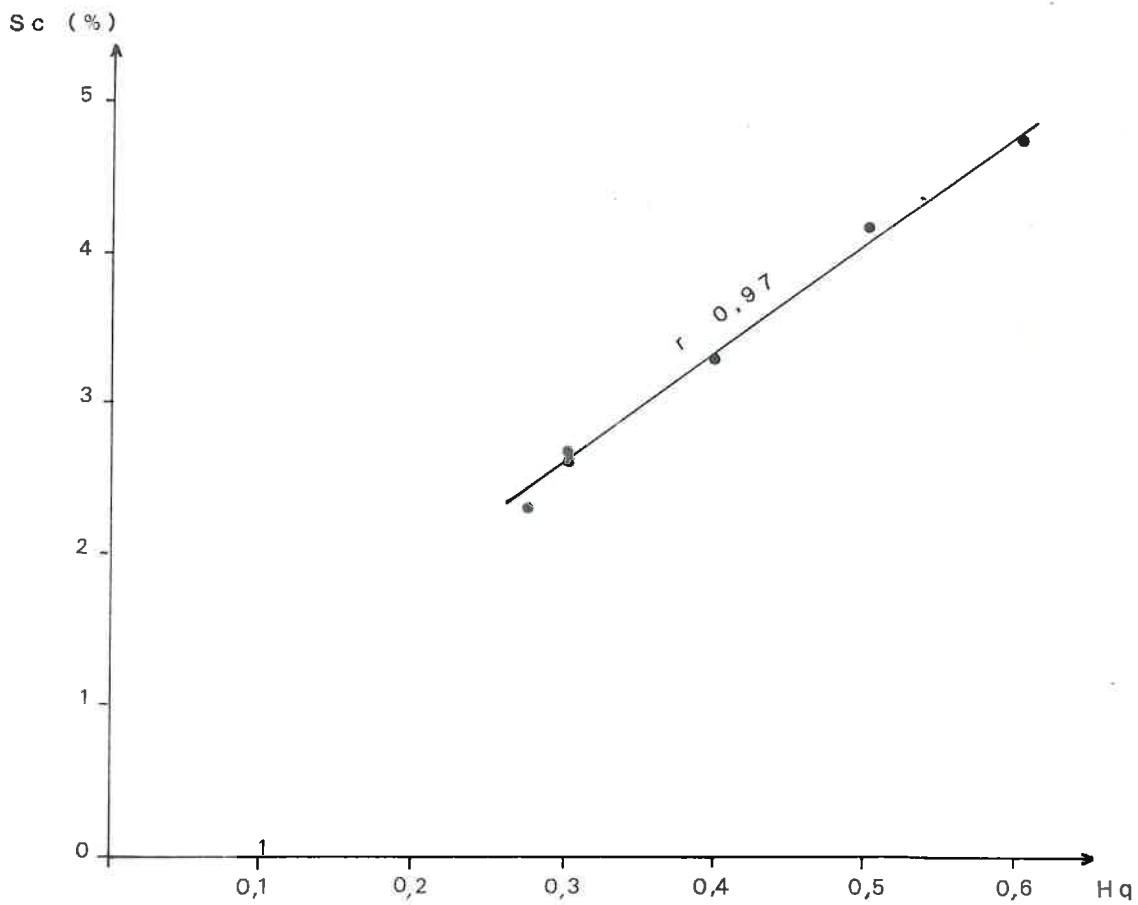


Fig:20. Relation entre l'indice de sensibilité au compactage (Sc) et l'indice d'hétérométrie (Hq)



### II.2.1. Problèmes posés par le passage au champ

Toute étude de caractérisation physique et mécanique des sols réalisée au champ se heurte à des difficultés de natures différentes :

#### . *Discontinuité structurale et hydrique du sol*

L'action des dents d'outils sur un sol constitué de deux couches de structure différente se traduit soit par une augmentation, soit par une diminution de la profondeur critique (profondeur de la semelle de labour) selon que la couche de surface est meuble ou non (GODWIN et SPOOR, 1978 cités par PAPY, 1984). GUERIF (1974) cité par PAPY (1984) met en évidence l'effet protecteur de la couche sèche de surface sur le tassement en profondeur.

#### . *Caractère non uniforme des actions mécaniques appliquées*

Hétérogénéité de la pression exercée par les pneus : Si à la surface du sol la pression exercée est souvent considérée comme voisine de la pression de gonflage, elle s'atténue avec la profondeur (VILTOX, 1985).

Dissymétrie du compactage due à la non uniformité des roues avant et arrière des tracteurs.

Face à ces difficultés, nous avons été conduits à émettre les hypothèses simplificatrices suivantes :

- . continuité structurale et hydrique à l'échelle de l'horizon de surface (0 - 20 cm) ;
- . répartition uniforme et homogène des pressions exercées par les roues des tracteurs.

### II.2.2. Mesures portant sur l'évolution des densités apparentes in situ

#### II.2.2.1. Calendrier des différentes opérations culturales

TABLEAU VIII

Nature de l'opération	Date	Teneur moyenne en eau (en surface)	Largeur de l'outil (m)	Pression (Kg/cm <sup>2</sup> )		Expression des énergies de compactage
				de gonflage	de contact*	
Labour d'hiver						$E_0$ $E_1$ $E_2$
Passage de la herse	06.05.1986		6	1,5	1,9	
Passage de vibro-culteur + épandeur d'engrais	09.05.1986	14 %	3	1,5	1,9	
Semis (tournesol)	10.05.1986	14 %				
Passage de pulvérisateur	13.05.1986	13 %	12			

\* Pression de contact (Kg/cm<sup>2</sup>) = P. de gonflage + 0,4 Kg/cm<sup>2</sup>  
D'après VILTOX, 1985).

### II.2.2.2. Résultats et interprétations

L'utilisation de la double sonde gammamétrique (1) a permis d'avoir des profils de densité apparente (Fig. 21) obtenus dans le plan vertical, initialement et à la suite, de la pression exercée par les engins agricoles au niveau des trois zones de mesure (Cf. Fig. 13).

Le tableau IX donne les densités moyennes obtenues par intégration sur l'épaisseur des horizons étudiés.

TABLEAU IX

ENERGIE DE COMPACTAGE	Bou S <sub>1</sub> (0 - 20 cm)			Bou S <sub>3</sub> (25 - 40 cm)			Bou S <sub>3</sub> (0 - 20 cm)			Bou S <sub>5</sub> (0 - 20 cm)		
	densité apparente moyenne	écart * à la moyenne	porosité totale (%)	densité apparente moyenne	écart à la moyenne	porosité totale (%)	densité apparente moyenne	écart à la moyenne	porosité totale (%)	densité apparente moyenne	écart à la moyenne	porosité totale (%)
E <sub>0</sub>	1,58	0,02	40,8	1,63	0,02	39,0	1,45	0,04	45,7	1,37	0,03	48,7
E <sub>1</sub>	1,65	0,01	38,2	1,63	0,03	39,0	1,46	0,03	45,3	1,41	0,03	47,2
E <sub>2</sub>	1,77 1,78	0,02	33,7	1,63 1,82	0,01	39,0	1,65 1,75	0,01	38,2	1,64 1,85	0,01	38,6

\* Ecart à la moyenne =  $\frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$

Nous constatons à la lecture de ces résultats, que :

. sous l'effet des contraintes engendrées par des engins agricoles, les densités apparentes mesurées in situ tendent vers des valeurs voisines de celles obtenues par le compactage en laboratoire à l'aide du test Proctor modifié ;

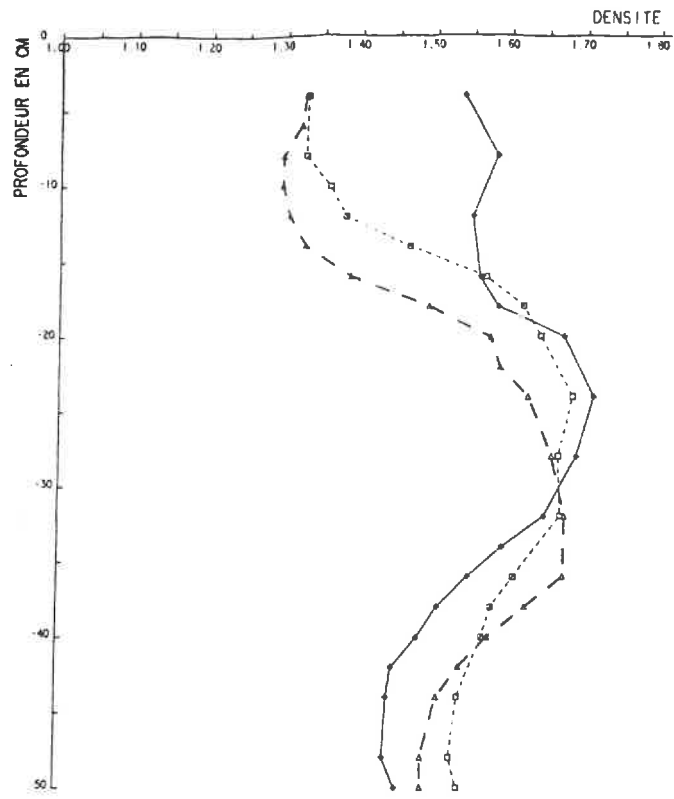
. à partir de 30 cm de profondeur, les effets de la charge sont très atténués. C'est d'ailleurs ce qui nous est confirmé par les mécaniciens des sols s'occupant de construction de remblais (SOEHNE, 1959, cité par CORDIER, 1983 ; PELTIER, 1965) ;

. pour des énergies de compactage identiques, les densités sou- mises diffèrent d'une zone à l'autre selon leur sensibilité au compactage.

### II.3. MODE D'EXPRESSION DE LA COMPACTITE D'UN SOL EN PLACE

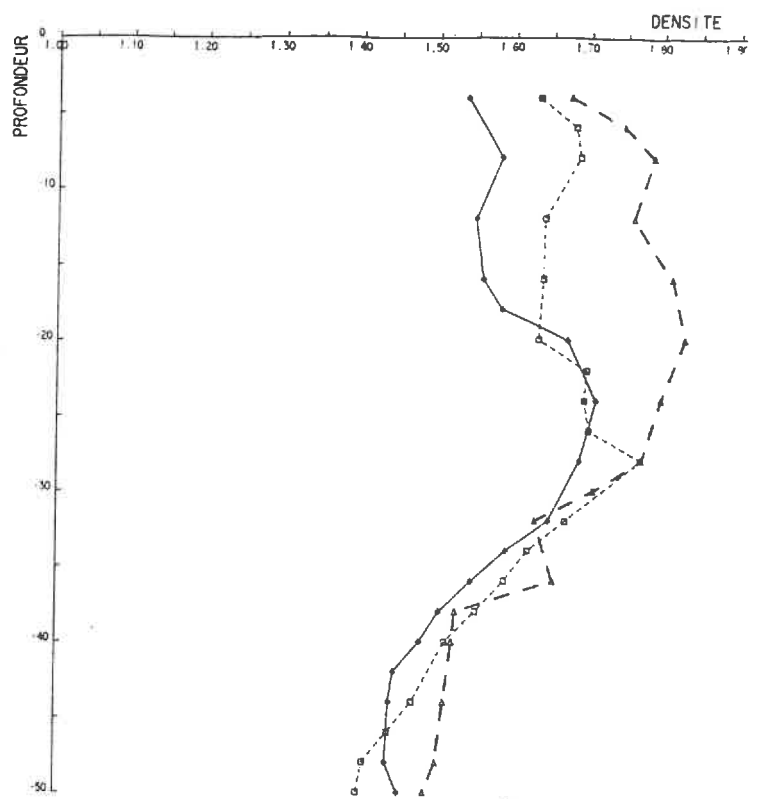
Pour chaque zone de mesure, les densités moyennes obtenues sous l'effet de différentes énergies ont été comparées à la densité au maximum Proctor ( $\gamma_d^M$ ) à l'aide d'un indice  $I_c$  traduisant le degré de compacité du sol en place (COSTET et SANGLERAT, 1975)

(1) La description, les performances de l'appareil et son mode d'emploi sont décrits en annexe A5.



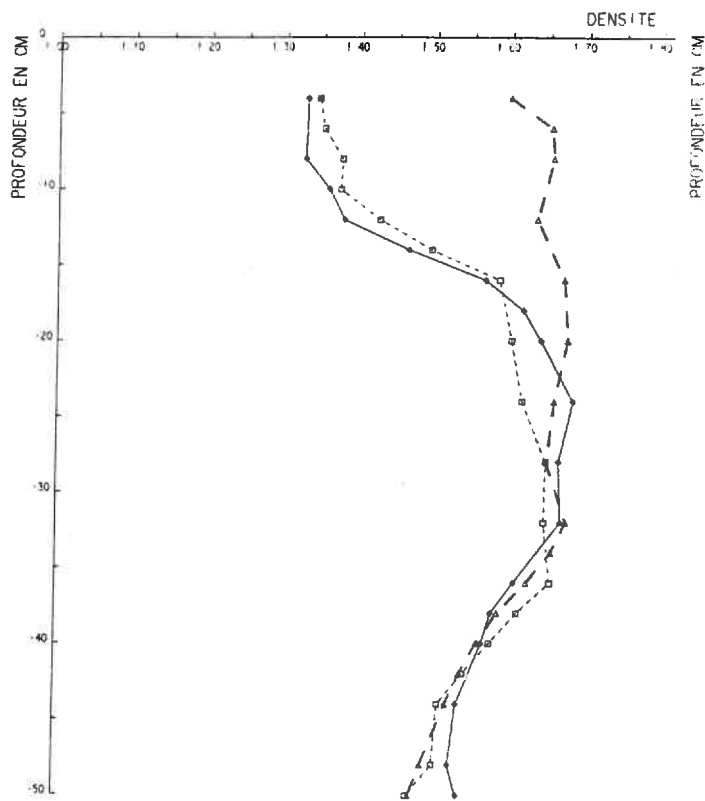
a. DENSITES BOU (ETATS INITIAUX: E0)

- BOU 1 23/04
- - -○- BOU 3 23/04
- - -△- BOU 5 25/04



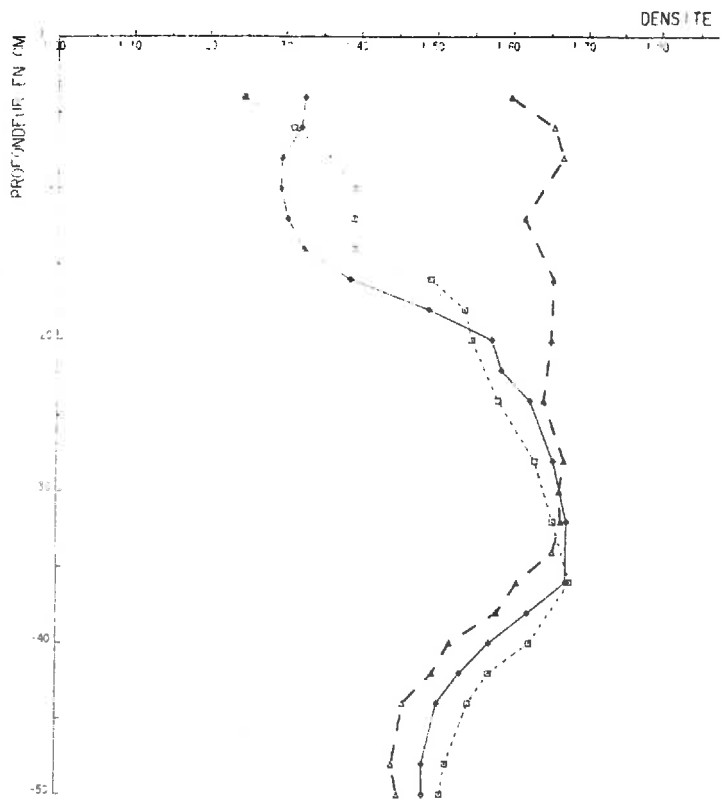
b. EVOLUTION DES DENSITES BOU1

- BOU 1 E0 23/04
- - -○- BOU 1 E1 04/06
- - -△- BOU 1 E2 07/06



c. EVOLUTION DES DENSITES BOU3

- BOU 3 E0 23/04
- - -○- BOU 3 E1 06/06
- - -△- BOU 3 E2 06/06



d. EVOLUTION DES DENSITES BOU5

- BOU 5 E0 25/04
- - -○- BOU 5 E1 10/06
- - -△- BOU 5 E2 10/06

Figure. 21

$$I_c = \frac{\text{Densité mesurée in situ}}{\text{Densité au maximum Proctor}} \times 100$$

Les valeurs de l'indice de compacité ( $I_c$ ) calculées pour les différentes situations sont présentées au tableau X.

TABLEAU X.

Valeurs des degrés de compacité en fonction des énergies de compactage.

Zones de mesures	$E_0$	$E_1$	$E_2$	Sc (%)
Bou $S_1$ (0 - 20 cm)	89	93	99	4,1
Bou $S_3$ (25 - 40 cm)	90	90	90	3,3
Bou $S_3$ (0 - 20 cm)	83	84	94	2,6
Bou $S_5$ (0 - 20 cm)	78	81	93	2,6

L'examen de ces valeurs montre :

- une compacité à caractère "irréversible" de la semelle de labour (horizon 25 - 40 cm) sous l'effet de l'itinéraire cultural (Cf. II.2.1.) ;
- que le labour d'hiver avait comme conséquence : la remise "à zéro" du passé cultural des horizons superficiels (0 - 20 cm) ;
- que le degré de compacité reste relativement faible au niveau de la zone  $S_5$  jugée peu sensible au compactage par le test du laboratoire.

Ainsi, l'essai Proctor modifié semble donc être un test prédictif "assez fiable" du comportement réel du sol sous l'influence du tassement provoqué par le passage des engins.

Comment peut-on  
faire cette interprétation sans  
eu eau au moment du  
Cronologie terrain ?  
(Tableau VIII)

## CONCLUSION

Nous avons jusqu'ici étudié le comportement mécanique des sols agricoles, nous avons tenté de faire ressortir l'action de la fraction fine et de la distribution granulométrique sur la sensibilité au compactage.

La démarche présentée dans cette dernière partie nous a conduit à comparer "l'état de tassement" du sol traduit par son degré de compacité ( $I_c$ ) à la sensibilité au compactage évaluée par l'indice ( $S_c$ ). Il serait hasardeux d'en conclure que les deux types d'approches pourtant très différentes, conduisent dans tous les cas à des résultats voisins, mais il est intéressant de signaler tout au moins qu'ils ne sont pas contradictoires.

Il faut maintenant passer à la dernière étape de l'étude et chercher à analyser les conséquences du compactage sur l'évolution de la porosité et sur le comportement hydrique d'un matériau : c'est ce que nous allons développer au cours de la troisième partie.



# **TROISIEME PARTIE**

**INFLUENCE DU COMPACTAGE**

**SUR L'EVOLUTION DE LA POROSITE ET LE**

**COMPORTEMENT HYDRIQUE DES MATERIAUX**

## CHAPITRE I.

CONSEQUENCES DU COMPACTAGE  
 SUR LES PROPRIETES DE RETENTION DE L'EAU

Avant d'aborder cette étude, nous verrons brièvement quelques aspects concernant l'état énergétique de l'eau dans le sol et le dispositif expérimental utilisé dans cette étude.

### 1.1. CARACTERISATION DE L'ETAT ENERGETIQUE DE L'EAU DANS UN ECHANTILLON

Les mouvements de l'eau dans le sol sont conditionnés par un ensemble de forces qui déterminent en un point donné, l'état énergétique de l'eau, appelé "potentiel capillaire" par BUCKINGHAM en 1907 : action de gravité, attraction moléculaire du fluide par la matrice solide (forces de capillarité et d'adsorption), présence de soluté (pression osmotique)...

On peut ainsi écrire :

$$\psi_t = \psi_g + \psi_o + \psi_p$$

dans lequel :

$\psi_t$  est le potentiel total<sup>(1)</sup> de l'eau, relatif à un état énergétique  $S_o$  (I.S.S.S., 1976) et exprimé en unité d'énergie par unité de de masse d'eau.

$\psi_g$  est le potentiel gravitaire

$\psi_o$  est le potentiel osmotique

$\psi_p$  est le potentiel de pression qui peut être positif (potentiel de submersion), nul (surface d'une nappe libre) ou négatif (potentiel matriciel).

#### Expression du potentiel de l'eau : notion de pF

Selon SCHOFIELD (1935), l'énergie nécessaire à l'extraction de l'eau retenue dans une certaine gamme de pores, est équivalente à une colonne d'eau de hauteur (h) en cm, exprimée par son logarithme décimal noté pF (pF = log h) qui correspond à une différence d'énergie libre de l'eau.

N.B. Dans le cadre de ce travail, le potentiel de l'eau est déterminé par la valeur du potentiel de pression  $\psi_p$  ( $\psi_g$  et  $\psi_o$  sont négligeables par rapport à  $\psi_p$  du fait de la taille des échantillons (5 cm) et de l'utilisation d'eau déminéralisée et dégazée).

(1) L'énergie cinétique est négligée compte-tenu des vitesses lentes de transfert de l'eau dans le sol.

## 1.2. METHODES DE MESURE

### 1.2.1. Préparation des échantillons

La longue durée qu'exige ce genre de manipulation et les nombreux problèmes rencontrés, nous ont obligé à limiter notre étude à un seul type de matériau (Bou S<sub>3</sub> - 0-20 cm).

Sur la base de la courbe Proctor relative à ce matériau (Fig. 17), nous avons retenu trois niveaux de densité apparente compris entre le seuil de sensibilité et la densité à "l'optimum" Proctor ( $\gamma_d^C, \gamma_d, \gamma_d^M$ ).

Après chaque compactage, l'éprouvette de sol confectionnée est "taillée" à 5 cm de hauteur et placée dans un cylindre en P.V.C. de diamètre intérieur de 9,6 cm recouvert à sa base d'une toile à maille fine. Les échantillons ont été saturés sous vide pendant quelques jours selon la méthode décrite par GRAS (1972) (Fig. 22).

### 1.2.2. Dispositif expérimental

Cette méthode est basée sur le principe suivant :

l'eau, retenue dans un pore cylindrique par une force  $F = 2\pi r \eta \cos \theta$ , n'est chassée que si la pression pneumatique  $P \pi r^2$  lui est supérieure :

$$P \pi r^2 \geq 2 \pi r \eta \cos \theta, \\ \text{soit } P \geq \frac{2\eta \cos \theta}{r} \quad \text{où } P \geq \psi_p \text{ (cf. I.1.)}$$

$\eta$  étant la tension superficielle de l'eau,  $\theta$  est l'angle de contact entre la phase solide et la phase liquide,  $r$  est le rayon équivalent du capillaire.

Par conséquent, à une pression donnée, tous les pores de taille supérieure ou équivalente à cette pression seront vidés.

L'appareil de RICHARDS (1941) ou presse à membrane, fonctionne selon ce principe (Fig. 23). Les membranes utilisées dans le cadre de ce travail n'autorisent que l'étude de la rétention en eau à des pressions ne dépassant pas 0,32 bars ( $p_F = 2,5$ ). De plus, l'accumulation de bulles d'air au-dessous de la plaque poreuse nous a toujours posé de nombreux problèmes.

## 1.3. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Les teneurs en eau pondérales mesurées à différents  $p_F$  et aux différents états de compacité, sont reportées dans le tableau XI.



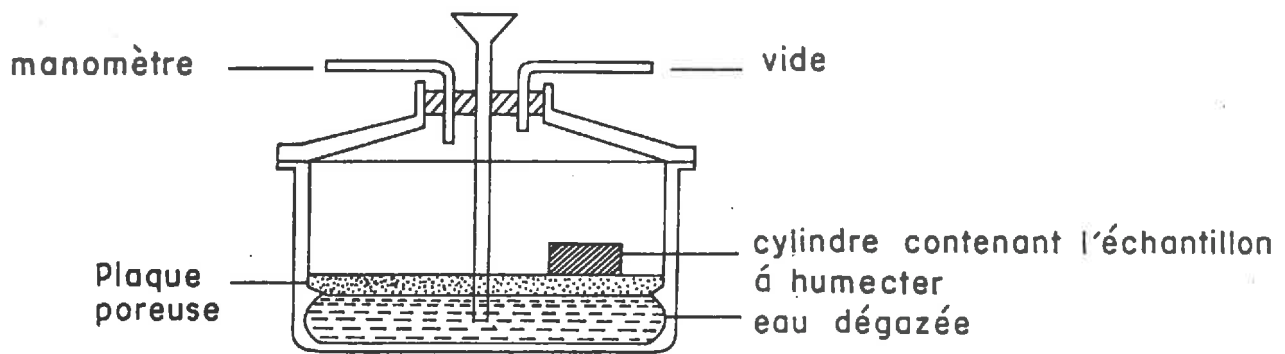


Fig:22 \_Appareil pour humectation sous vide

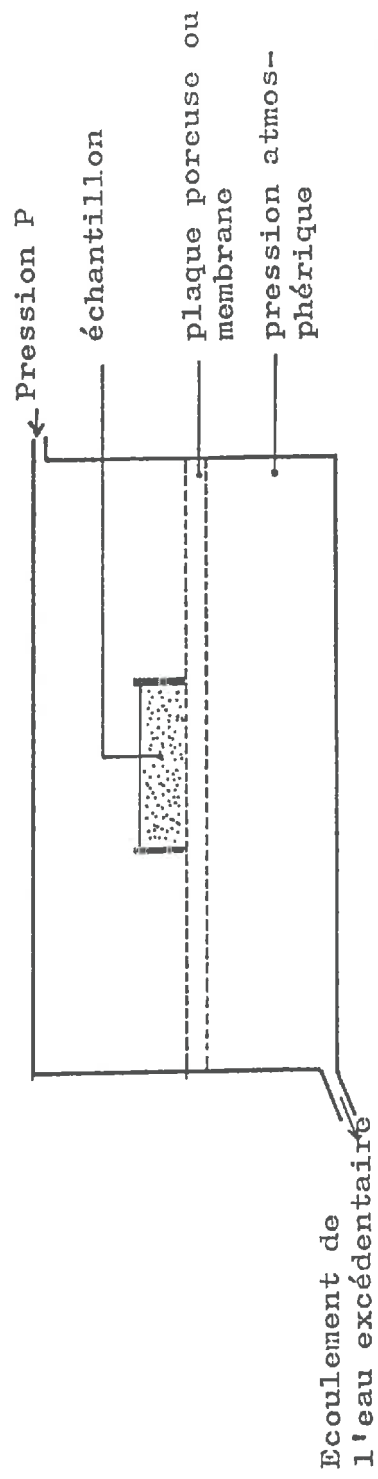


Fig : 23 - Schéma de l'appareil de RICHARDS

L I T T E R A T U R E

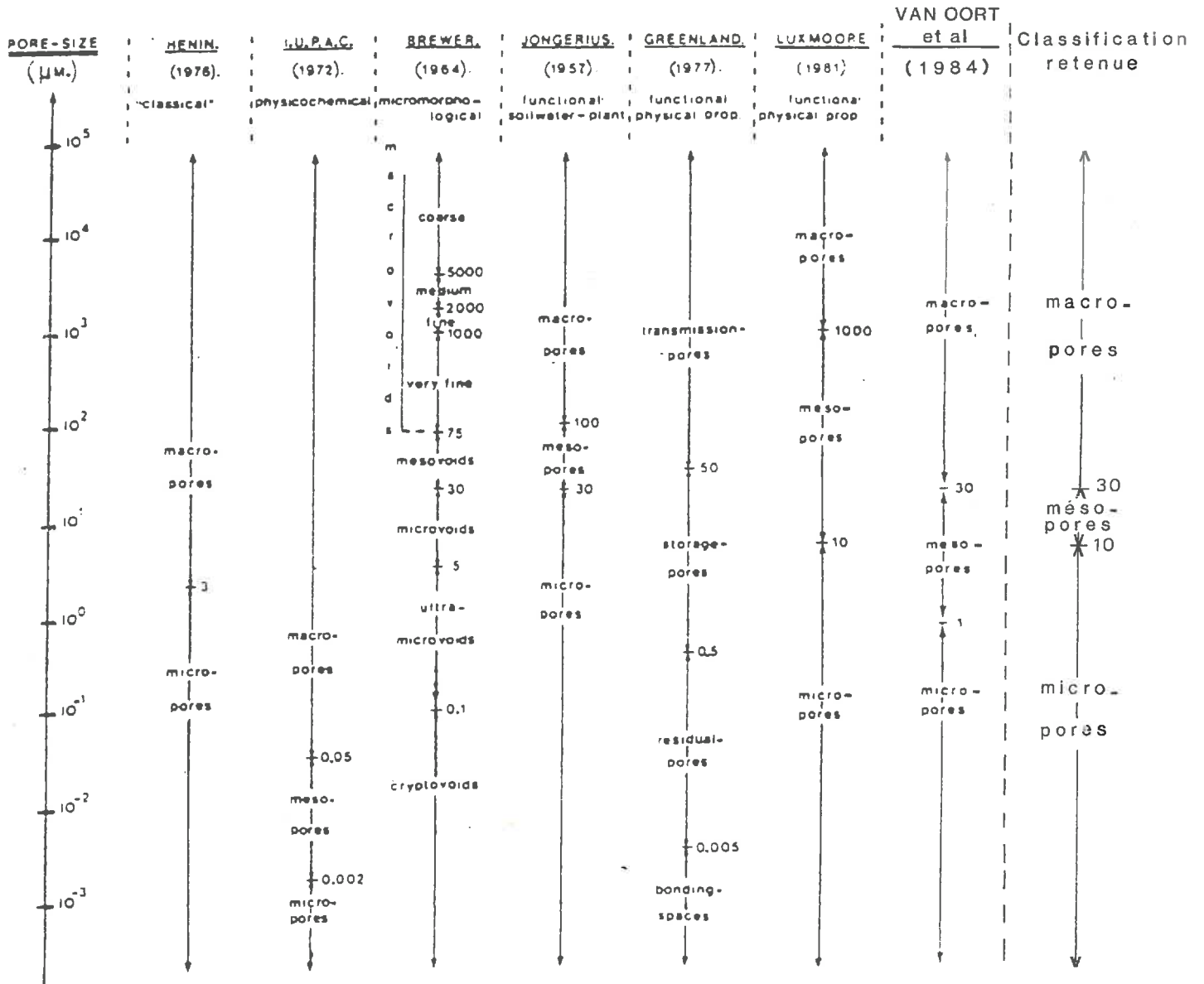


TABLEAU XII Revue bibliographique sommaire des classifications de la porosité (d'après VAN OORT, 1984)

TABLEAU XI

Teneurs en eau pondérales (%) en fonction du pF.  
Matériau : Bou S<sub>3</sub> - Horizon (0 - 20 cm).

Echantillons	Densité apparente $\gamma_d$	Taux de saturation initial (%)	à saturation initiale	pF 1,5	pF 2	pF 2,5
1	1,52	93	26	21	14	10
2	1,67	94	21	18	11	9
3	1,75	94	18	16	11	10

Nous constatons à la lecture de ces résultats que :

- les teneurs en eau sont d'autant plus élevées que les échantillons sont moins denses et les valeurs de succion plus faibles ;
- la porosité totale de l'échantillon est réduite par l'effet du compactage et la répartition des diamètres de pores modifiée, principalement les plus grands ; en effet, au-delà de pF 2, on ne voit pas grande différence dans la rétention de l'eau par les différents échantillons.

→ valeurs de  $f_s$  pour approcher le taux  
de saturation initial réel

— CHAPITRE II. —

EVOLUTION DE LA POROSITE  
AU COURS DU COMPACTAGE

Le sol est un système poreux, complexe qui est constitué de pores aux tailles variées. Une différence dans la répartition et les formes des pores peut rendre deux échantillons du même sol différents en ce qui concerne la relation sol-eau (NIELSEN et BAVER, 1940 cités par SELVANATHAN, 1976).

RUSSEL et RICHARDS, 1938 ont suggéré que la distribution de la taille des pores doit être liée directement à la structure et à la texture ainsi qu'à certaines propriétés physiques du sol.

L'étude de l'évolution de la porosité d'un sol permet de renseigner sur la circulation de l'eau, sa disponibilité pour les plantes, la capacité de son stockage et les conditions d'aération.

Dans ce chapitre, nous allons étudier l'évolution du volume poral des échantillons soumis au compactage à partir de la relation pF teneur en eau. Mais, avant d'aborder cette étude, nous rappellerons brièvement quelques aspects concernant le concept de rayon équivalent des pores.

### II.1. LE CONCEPT DE RAYON EQUIVALENT : APPLICATION DE LA LOI DE JURIN

Rappel théorique (CHILDS, 1940 ; HENIN, 1977 ; SELVANATHAN, 1976 ; VAN OORT, 1984 ; HILLEL, 1974).

Si on assimile l'espace poral du sol à un ensemble rigide et de forme cylindrique, selon la loi de JURIN (considérant les seules forces de capillarité), la hauteur d'eau h dans un tube capillaire est inversement proportionnelle à son rayon r.

$$h = \frac{2 \eta \cos \theta}{r \rho_{\text{eau}} g}$$

$\eta$  étant la tension superficielle de l'eau ayant la densité  $\rho$  ;  
 $\theta$  étant l'angle de contact et g, la force gravitaire.

Cette équation liant le rayon du pore et la tension capillaire h a été utilisée pour la première fois par CHILDS (1940), elle permet d'obtenir un schéma général de la répartition des pores en fonction de leur diamètre dans un milieu poreux rigide.

Si

$$\begin{aligned} \cos \theta &= 1 \text{ (eau mouillant parfaitement le matériau poreux)} \\ \eta &= 75 \text{ dyres cm}^{-1} = 75 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^{-1} \\ \rho_{\text{eau}} &= 1 \text{ g cm}^{-3} = 10^3 \text{ kgm}^{-3} \\ g &= 981 \text{ cm s}^{-2} = 9,81 \text{ m s}^{-2} \end{aligned}$$

On a alors

$$h(\text{m}) = \frac{15,3}{r} 10^{-6}$$

$$\text{comme } pF = \log h, \text{ avec } h \text{ en cm, } r = \frac{15,3}{10^{pF-2}} \text{ avec } r \text{ en } \mu\text{m}$$

Le tableau suivant donne quelques valeurs de diamètre équivalents  $d$  correspondant aux  $pF$

$pF$	Rayon équivalent des pores ( $\mu\text{m}$ )	Diamètre équivalent des pores ( $\mu\text{m}$ )
1	153	306
1,5	48	96
2	15,3	30,6
2,5	4,8	9,6

Connaissant le volume total, la densité apparente et la teneur en eau d'un échantillon à un  $pF$  donné, on peut en déduire la part de son volume poral occupée par l'eau. De plus, l'utilisation de la loi de JURIN permet de calculer, pour cette valeur de  $pF$ , la taille maximale des pores occupés par l'eau. C'est ainsi qu'un schéma général de la répartition équivalente de la porosité en fonction de la taille des pores peut être déterminé à partir de l'étude de la variation de la teneur en eau de l'échantillon en fonction du  $pF$ .

Il convient cependant de rappeler que l'utilisation de cette méthode pour étudier la répartition de la porosité ne peut s'appliquer que dans le cas où l'élimination d'eau à l'intérieur d'un système poreux par l'intermédiaire d'une succion ou une pression pneumatique, n'entraîne aucune évolution du volume des pores (cas des matériaux poreux se comportant comme une matrice dimensionnellement stable : GRAS, 1971).

## II.2. CARACTERISATION DU VOLUME PORAL D'UN ECHANTILLON

Le volume poral d'un échantillon de sol peut être caractérisé en termes de porosité totale et distribution de la taille des pores.

De nombreux auteurs ont cherché à répartir cette porosité en trois classes :

- . la microporosité,
- . la mésoporosité,
- . la macroporosité.

Cette classification s'avère être un sujet très discuté.

(Tableau XII, d'après VAN OORT et al., 1983 cité par VAN OORT, 1984).

### II.3. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Dans le tableau XIII est reporté l'ensemble des résultats obtenus. Les fractions de porosité correspondant aux différentes classes de dimensions de pores sont exprimées en pour cent de la porosité totale de chaque échantillon ramenée à 100 %.

Nous avons pris comme valeurs de microporosités et mésoporosités celles correspondant respectivement au pF 2,5 et pF 2 et avons mentionné dans le tableau XIII les trois classes de la porosité (microporosité, mésoporosité et macroporosité).

La lecture de ces résultats et l'examen des histogrammes d'évolution (Fig. 24) des trois classes de porosité font apparaître que le compactage provoque une réduction de la macroporosité et de la mésoporosité, et une augmentation de la microporosité. Cette observation est en parfaite accord avec les travaux de BAVER (1964) et SELVANATHAN (1976).

TABLEAU XIII

Evolution du volume des tailles de pores (%) en fonction de la densité apparente.

Diamètres équivalents des pores ( $\mu\text{m}$ )	Porosité totale (%)	Porosité (%)			
		Micro- porosité 9,6	Méso- porosité 30,6	Macroporosité 96	
1,52	43	37	16	27	20
1,67	37	44	10	30	16
1,75	34	54	6	25	15

Il en résulte une modification de la dynamique de l'eau : le compartiment macroporal étant le principal siège des mouvements gravitaires et le compartiment mésoporal le siège du stockage d'une fraction de l'eau exploitable par les plantes (R.U.).

L'étude du rôle des macropores dans le transfert hydrique doit donc être envisagée par l'intermédiaire de mesures de la conductivité hydraulique.

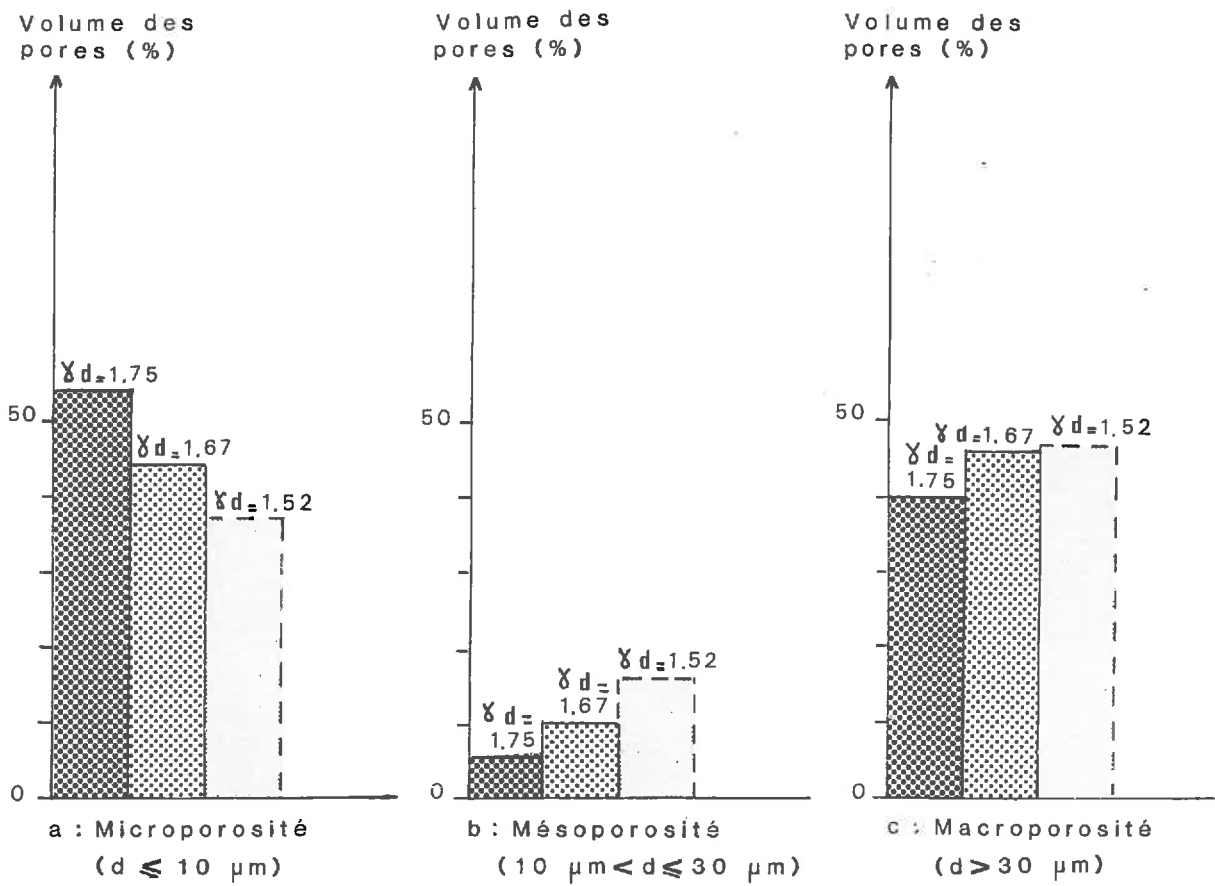


Fig: 24 - Histogrammes d'évolution de la microporosité, la mésoporosité et la macroporosité en fonction de la densité apparente ( $\gamma_d$ )



CHAPITRE III.

EFFETS DU COMPACTAGE SUR LA CIRCULATION  
DE L'EAU SATURANTE DANS LE SOL

Après une brève description du dispositif expérimental utilisé et un rappel des lois de la circulation de l'eau dans les milieux poreux saturés (la filtration), nous examinerons l'influence du compactage des sols étudiés sur la conductivité hydraulique.

III.1. DISPOSITIF EXPERIMENTAL  
APPLICATION DE LA LOI DE DARCY

Le schéma 25 représente le dispositif expérimental pour mesurer la conductivité hydraulique en condition de saturation.

La méthode consiste à maintenir une charge constante (a) d'eau préalablement dégazée sur un système constitué par un matériaux poreux de section S et de longueur l que nous appellerons filtre. On mesure le volume V d'eau écoulé dans un temps t à travers ce filtre.

$$\text{On a ainsi : } Q = \frac{V}{t} = K \cdot \frac{S(a + 1)}{l} \quad (\text{DARCY, 1856})$$

K étant la "conductivité hydraulique" encore appelée "vitesse de filtration par unité de pente".

Les valeurs K de DARCY sont définies pour une température de 20°C et tout résultat de mesure pratiquée à une autre température doit subir une correction faisant intervenir le rapport des viscosités de l'eau à la température de l'expérience et à 20°C suivant la formule :

$$K_{20} = K_t \times \frac{\mu_t}{\mu_{20}}$$

où

$K_{20}$  et  $K_t$  : perméabilités à 20°C et à t°C (mesurée)

$\mu_{20}$  et  $\mu_t$  : viscosités de l'eau à 20°C et à t°C (expérience)

On prendra pour valeur de t la température de l'eau dans le cylindre de mesure.

Les facteurs de correction  $\mu_t/\mu_{20}$  sont donnés dans le tableau suivant (d'après AUDRY et al., 1973) :

T°C	$\mu_t / \mu_{20}$
21	0,976
22	0,953
23	0,931
24	0,910
25	0,889
26	0,869
27	0,850

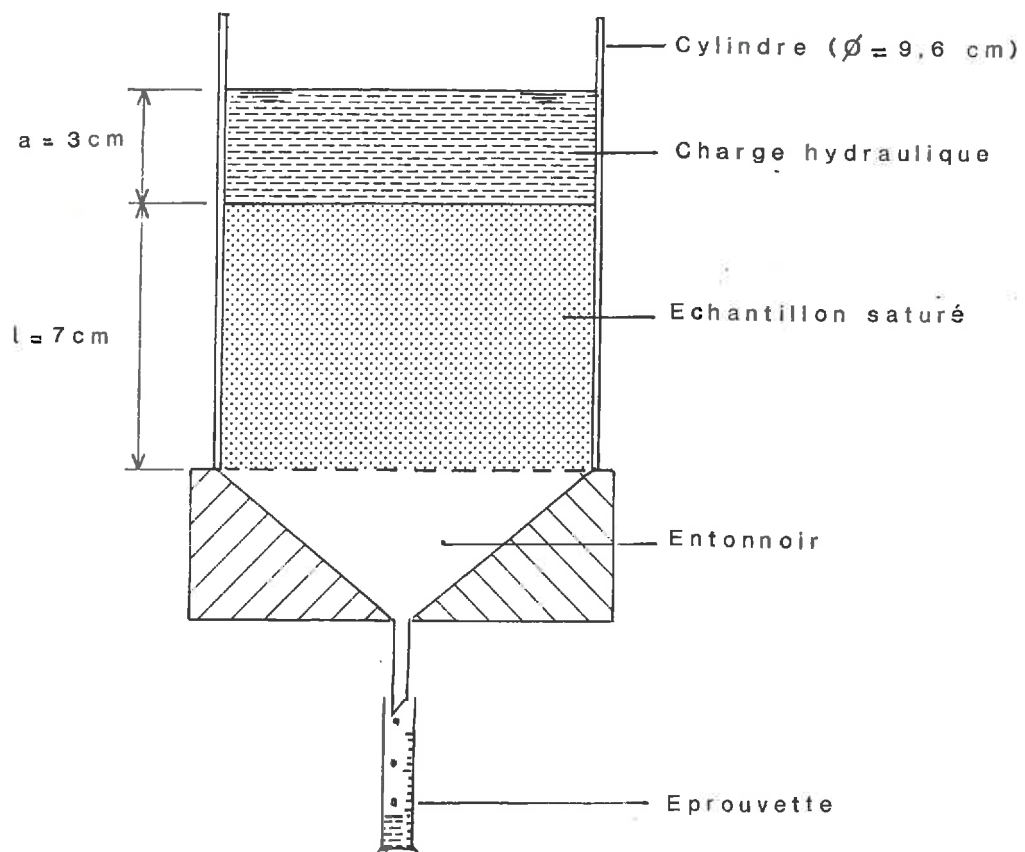


Fig:25.-Dispositif pour mesurer la conductivité hydraulique saturée

### III.2. METHODE D'ETUDE

#### Préparation des échantillons

Les éprouvettes de sol ont été confectionnées selon le protocole décrit dans la première partie (Chap. I.2.). Deux échantillons ont été préparés pour chaque niveau de densité apparente. Chaque échantillon a été taillé à 7 cm de longueur et placé soigneusement dans un cylindre en PVC de diamètre intérieur de 9,60 cm, recouvert à sa base d'une toile à maille fine. Les échantillons ont été saturés sous vide de la façon précédemment décrite (cf. Chap. I).

### III.3. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Les résultats complets sont donnés sur le tableau XIV . L'examen de ces valeurs montre qu'au cours de la filtration, la conductivité hydraulique a tendance à décroître avec le temps. Cette variation observée par certains auteurs a été attribuée à la migration des particules fines dans la direction de l'écoulement (MITCHEL et YOUNGER, 1966 ; SELVANATHAN, 1976).

L'étude des courbes de variation de la conductivité hydraulique à 20°C en fonction de la densité apparente (Fig. 26, 27 et 28) fait apparaître que :

- . la variation de la conductivité ( $K_{sat}$ ) en fonction de la densité apparente ( $\gamma_d$ ) suit une loi exponentielle décroissante. Cette relation a été déjà observée par POST et LONDE (1953) et MANIERE (1973). Les variations de la conductivité hydraulique sont d'autant plus grandes que la densité apparente est plus faible. Au contraire, pour les fortes densités, toute augmentation de cette variable entraîne une faible variation de la conductivité ( $K_{sat}$ ) ;

- . la chute brusque de valeur de conductivité peut être attribuée à la réduction des pores conduisant l'eau. Cependant, il est intéressant d'observer que la décroissance de valeur de K est moins brusque dans le cas des matériaux à tendance sableuse (Bou S<sub>3</sub>) que dans le cas du matériau à texture sablo-argileuse (Bou S<sub>1</sub>).



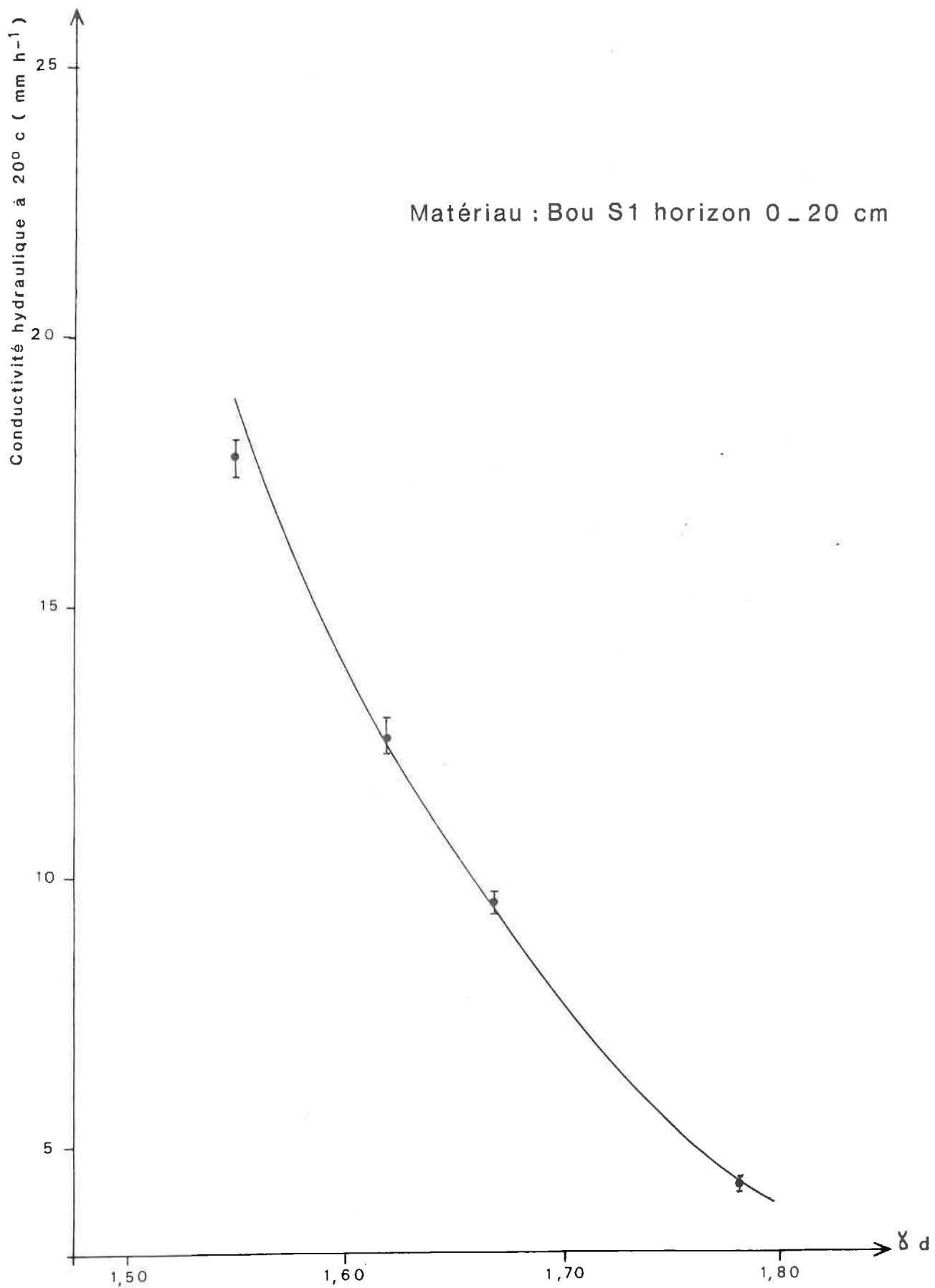


Fig: 26 - Relation entre la conductivité hydraulique à 20° c et la densité apparente ( $\gamma_d$ )

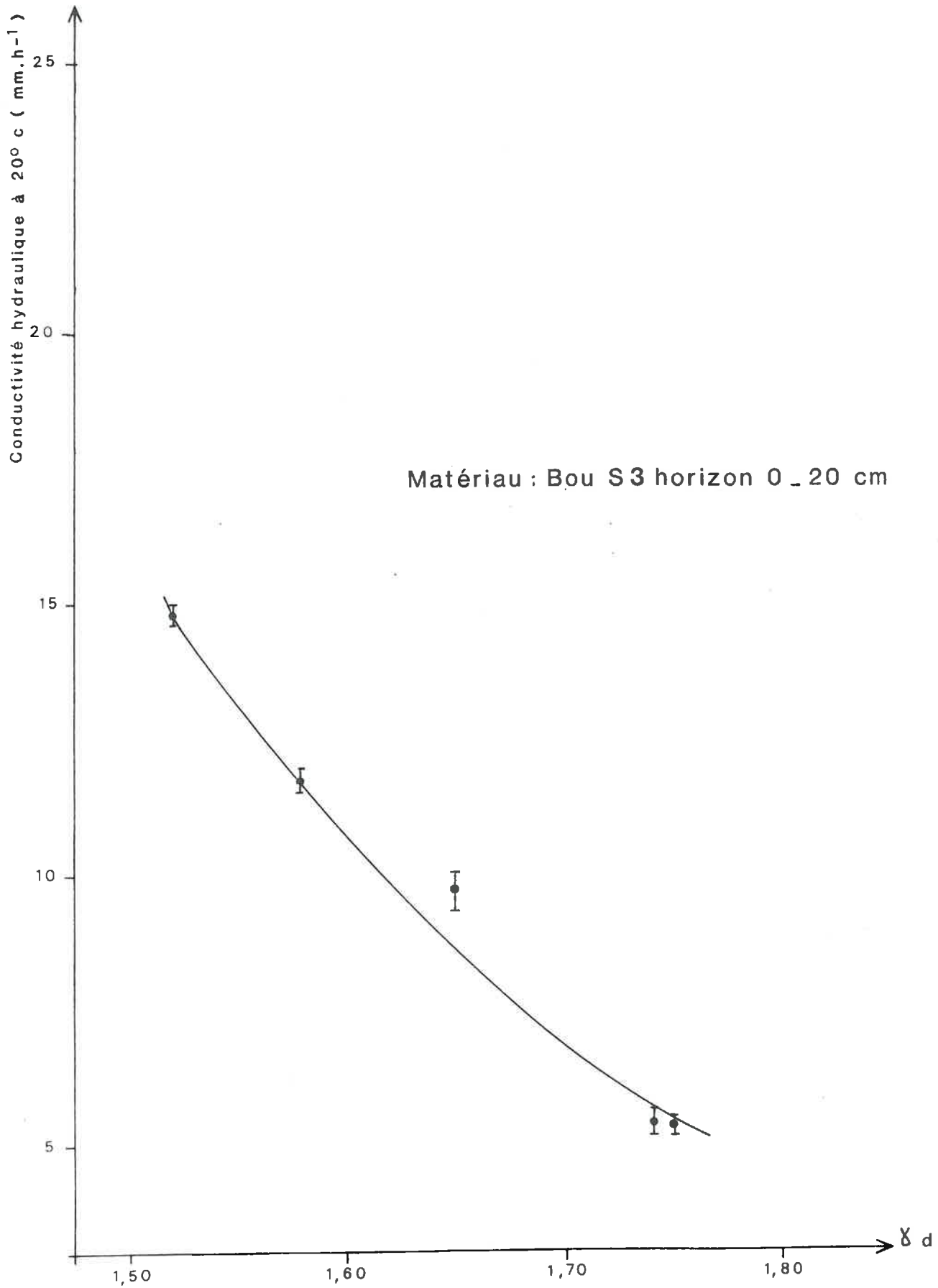


Fig: 27 \_ Relation entre la conductivité hydraulique à 20° c et la densité apparente ( $\gamma_d$ )

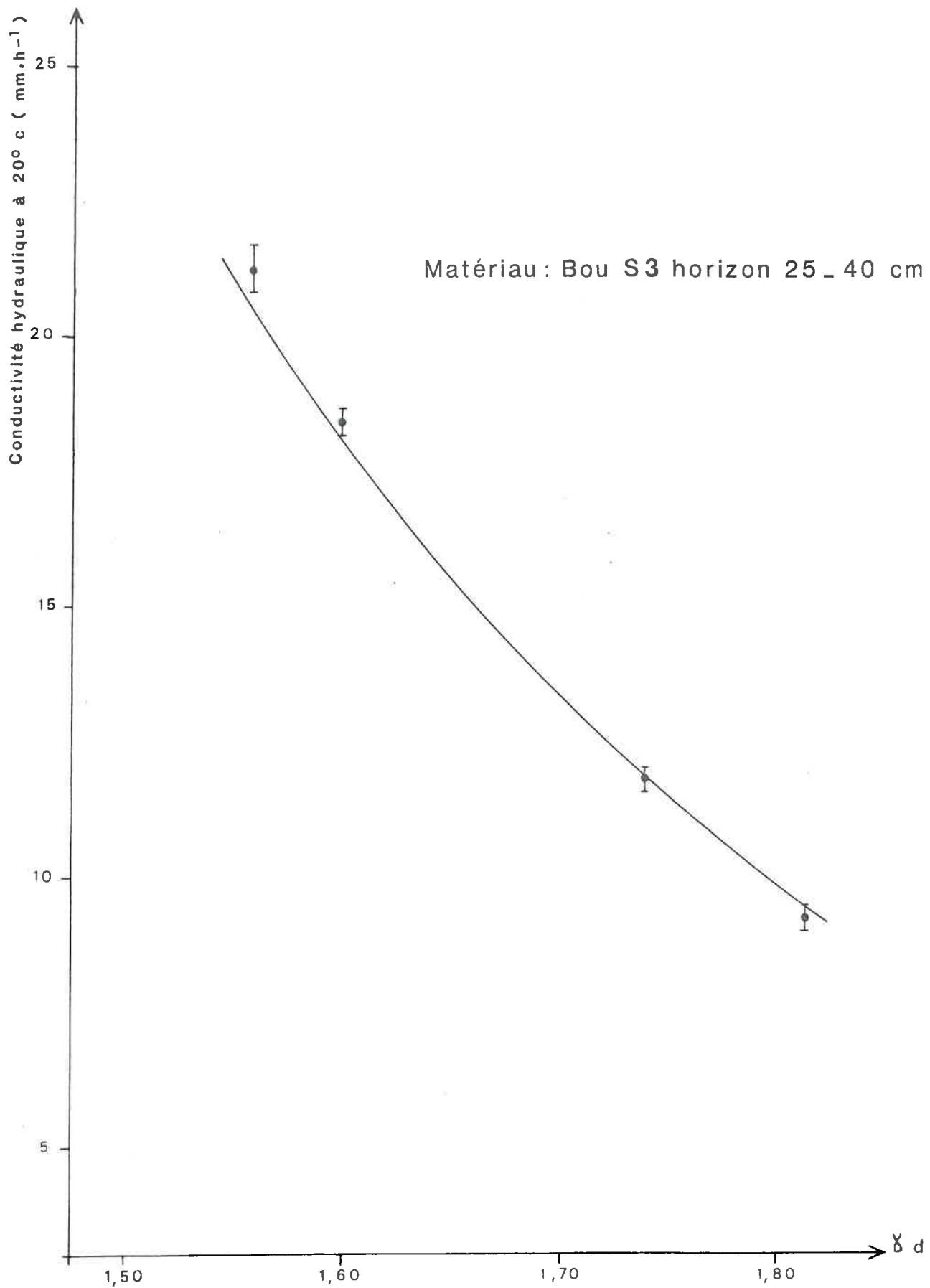


Fig: 28 - Relation entre la conductivité hydraulique à 20° c et la densité apparente ( $\gamma_d$ )

MATERIAU	DENSITE APPARENTE $\gamma_d$	CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE SATUREE à 20°C (mm/h)										CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE MOYENNE à 20°C (mm/h)		
		1 h.		2 h.		3 h.		1 h.		2 h.			3 h.	
		Répétitions		Répétitions		Répétitions		Répétitions		Répétitions			Répétitions	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2		1	2
BOU S <sub>1</sub> 0 - 20 cm	1,55	17,5	19,5	16,7	18,2	16,5	18,2	16,5	18,2	16,5	18,2	17,6		
	1,62	11,6	11,8	11,3	11,6	11,3	11,4	11,3	11,4	11,3	11,4	11,5		
	1,67	9,8	10,1	9,6	9,8	8,7	9,4	8,7	9,4	8,7	9,4	9,5		
	1,78	4,6	5,3	3,9	4,1	3,9	4,1	3,9	4,1	3,9	4,1	4,3		
BOU S <sub>3</sub> 0 - 20 cm	1,52	14,6	15,9	14,2	14,6	14,4	14,6	14,4	14,6	14,4	14,6	14,7		
	1,58	11,3	12,9	11,1	11,8	10,9	12,3	10,9	12,3	10,9	12,3	11,7		
	1,65	9,7	10,0	9,1	9,8	9,3	10,0	9,3	10,0	9,3	10,0	9,6		
	1,74	5,4	5,5	5,4	5,4	5,5	5,5	5,4	5,5	5,5	5,5	5,5		
BOU S <sub>3</sub> 25 - 40 cm	1,75	5,4	5,5	5,4	5,4	5,4	5,5	5,4	5,4	5,5	5,5	5,5		
	1,56	23,0	21,4	22,8	20,4	22,2	20,4	22,2	20,4	22,2	20,4	21,1		
	1,60	17,0	16,5	16,3	15,6	16,2	15,2	16,2	15,2	16,2	15,2	16,1		
	1,74	13,0	12,0	11,9	10,8	11,4	11,0	10,8	11,4	11,4	11,0	11,7		
	1,81	9,7	9,0	9,0	9,0	9,5	8,6	9,0	9,0	9,5	8,6	9,1		

TABLEAU XIV

Valeurs de conductivité hydraulique saturée à 20°C des différents échantillons en fonction du temps de mesure.

## CONCLUSION

Au cours de ce travail, nous avons cherché à analyser les conséquences de compactages réalisés dans des conditions bien définies, sur l'évolution de la porosité et sur le comportement hydrique des matériaux. Dans notre étude nous avons considéré uniquement l'aspect de la rétention et de la filtration de l'eau dans le sol.

L'ensemble des résultats de la teneur en eau et de la porosité en fonction du  $pF$ , obtenus sur le matériau de Bou S<sub>3</sub> (horizon : 0-20 cm) traduit l'effet du compactage : ainsi, l'augmentation de la densité apparente des matériaux entraîne simultanément une diminution de la porosité totale, de la macroporosité et de la mésoporosité, mais par contre, une légère augmentation de la microporosité.

L'analyse des courbes de conductivité saturée obtenues sur les différents matériaux, montre une baisse rapide de  $K_{(sat)}$  quand la densité apparente augmente. Les variations de la conductivité hydraulique saturée sont d'autant plus grandes que la densité apparente est plus faible. Au contraire, pour les fortes densités, toute augmentation de cette variable entraîne une faible variation de la conductivité ( $K_{sat}$ ).

\*  
\* \*

Le compactage réduit ainsi, comme on pouvait s'y attendre, la macroporosité, la mésoporosité et la conductivité hydraulique à saturation.

o  
o o  
o



## CONCLUSIONS GENERALES

### Rappel des problèmes posés

Ce travail s'est inscrit dans le cadre d'un programme plus général de caractérisation physique et hydrique des sols sableux du Val de Loire (1).

Son intérêt est d'évaluer la sensibilité au tassement mécanique de sols sableux et d'en analyser les conséquences sur l'évolution de leur porosité et comportement hydrique.

### 1. Conclusions sur le plan méthodologique

L'ensemble des méthodes d'étude proposées dans ce travail nous ont permis :

- . d'apprécier le degré de sensibilité au compactage des échantillons de sols sableux à l'aide du test Proctor adapté aux conditions particulières du tassement par les engins agricoles. Cependant, cette approche de caractérisation mécanique nécessite de prendre certaines précautions du fait du remaniement imposé aux échantillons ;

- . d'analyser le comportement mécanique du sol en plein champ. La confrontation de ces deux approches au moyen des deux indices synthétiques ( $I_c$  et  $S_c$ ) s'avère nécessaire à la compréhension du comportement mécanique du sol en place et à l'évaluation de son "état de tassement". Ces deux indices montrent une convergence des caractéristiques mécaniques des sols étudiés. Ainsi, l'essai Proctor modifié semble être un test prédictif "assez fiable" du comportement réel du sol sous l'influence du tassement provoqué par le passage des engins agricoles.

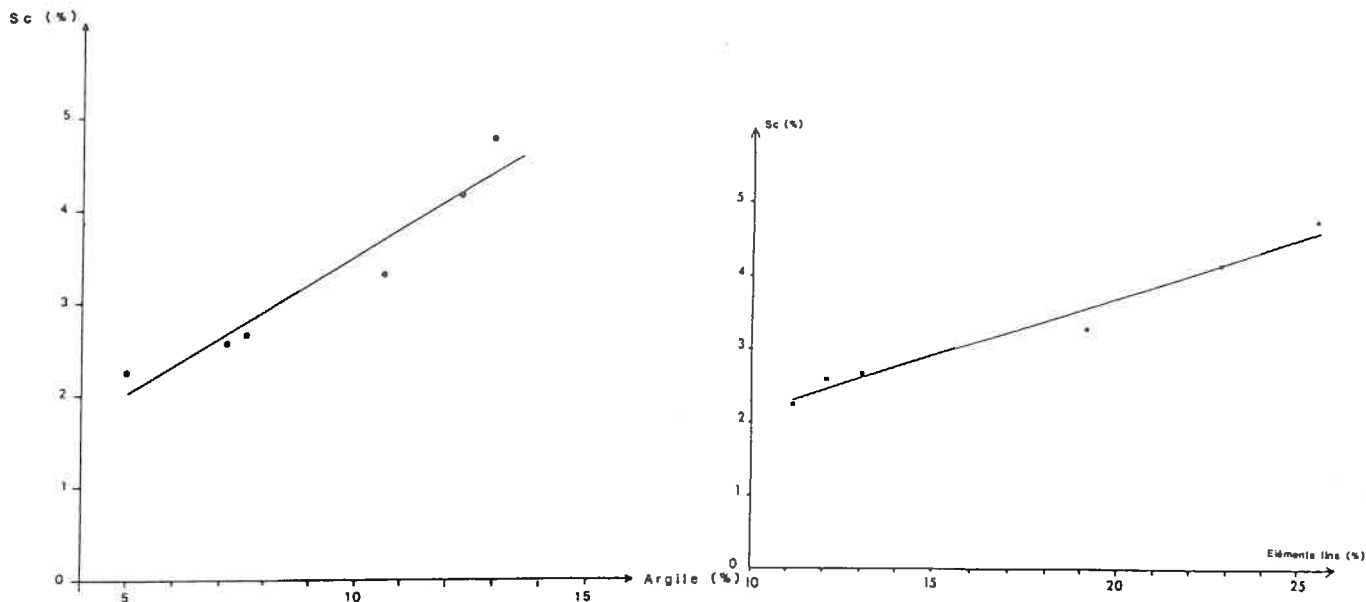
### 2. Les principaux résultats

Les matériaux sableux testés en laboratoire montrent une sensibilité au compactage (évaluée par l'indice  $S_c$  avec erreur relative de l'ordre de  $10^{-1}$ ) qui augmente avec la teneur en argile et/ou en limons fins et avec le degré d'hétérométrie.

- voir figures page suivante -

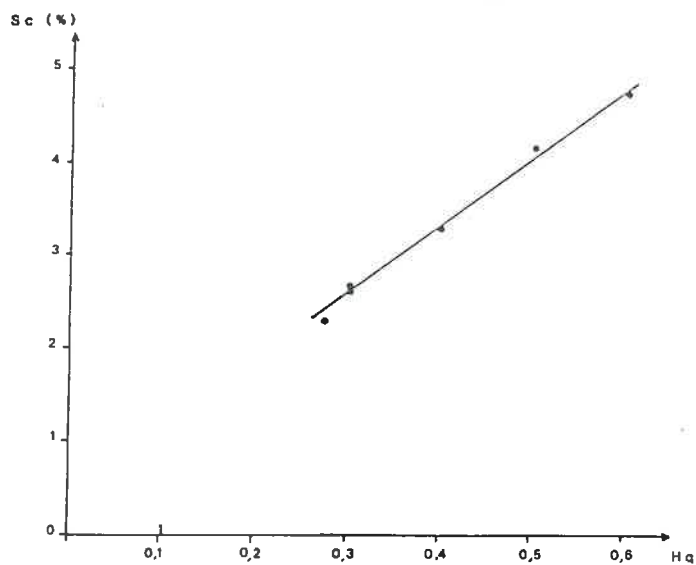
---

(1) S.E.S.C.P.F. en collaboration avec l'Université d'Orléans travaux en cours.



La sensibilité au compactage d'un échantillon de sol augmente avec sa teneur en argile et/ou en limons fins

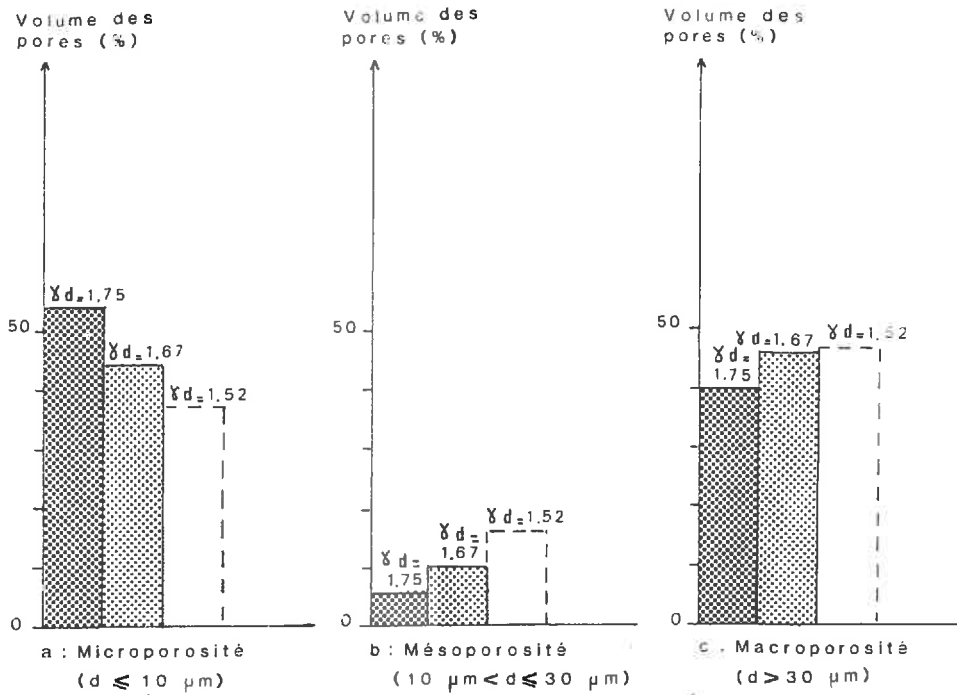
(Agents de lubrification)



et aussi avec son indice d'hétérométrie

(Facteur géométrique)

On vérifie bien, par ailleurs, que ce tassement agit défavorablement par modification de la porosité du sol. En fonction des différents niveaux de compacité, on constate une réduction de la méso et de la macroporosité au profit de la microporosité, d'où une diminution de la capacité de stockage de l'eau exploitable par les plantes (R.U.) et une baisse de la conductivité hydraulique saturée.



Le compactage se traduit essentiellement par une réduction de la méso et de la macroporosité induisant

- . une diminution de la R.U.,
- . une baisse de la conductivité hydraulique saturée.

L'ensemble des résultats présentés dans ce mémoire ne prétendent pas caractériser parfaitement le comportement mécanique et hydrique des principaux types de sols du Val de Loire. Cela supposerait de conduire les recherches sur une gamme d'échantillons plus large et d'utiliser des techniques d'investigation plus fines (spectre granulométrique plus détaillé, observations microscopiques, variation de la grandeur et de la nature d'énergie de compactage, relation entre la porométrie et le comportement hydrique,...).

Cependant, la démarche adoptée dans ce travail peut être une base permettant d'établir une typologie de comportement au tassement des sols sableux, applicable aux classements texturaux utilisés dans les cartes de sols.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AUDRY P. et al., 1973 - Essai sur les études de dynamique des sols. *Bulletin du groupe de travail sur la dynamique actuelle des sols. Numéro 2. ORSTOM - Juillet 1973.*
- BAVER L.D., 1964 - Soil physics. *Jhon Willey et Sons, New-York. Chapman et Hall, Ltd, London.*
- BETREMIEUX et al., 1962 - Etude pédologique préalable à l'irrigation en Val de Loire. (Communes de Jargeau, Darvoy, Ferolles et Sandillon).
- BILLOT J.F., 1982 - Les applications agronomiques de la pénétrométrie à l'étude de la structure des sols travaillés. *Bull. Science du sol, n° 3.*
- BOX J.E. et TAYLOR S.A., 1962 - Influence of soil bulk density on metric potentiel. *Soil Sci. Soc. Amer. (26), pp. 119-122.*
- BRULL A., 1985 - Modules de déformation et répétition des charges. *Colloque International sur le travail du sol. 29 Nov. 1985, Faculté des Sci. Agr. de l'Etat. Belgique.*
- CORDIER Y., 1983 - Etude de l'influence des travaux culturaux sur les propriétés mécaniques et physiques d'un sol limoneux. *Thèse Doct. en Sci. Agr. Gembloux.*
- COSTET J. et SANGLERAT G., 1975 - Cours pratique de mécanique des sols. *Tome I. Dunod, Paris. 263 p.*
- DEMDAMI L., 1982 - Essai de caractérisation géotechnique des formations superficielles et des sols du Sundgau, Application aux problèmes de l'aménagement régional. *Thèse de 3ème cycle, Paris VI.*
- DERDOUR H., 1985 - Influence du taux de sodium échangeable sur le comportement au compactage d'un mélange de sable et de bentonite. *Bull. Science du Sol, n° 3, pp. 107-114.*
- DORIGNY A., 1985 - Etude et mise en oeuvre d'un observatoire agroclimatique automatisé. *Diplôme Ing. C.N.A.M.*
- DUCREUX A., 1984 - Caractérisation mécanique des sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche de l'Afrique de l'Ouest. *Thèse de Doct. Ingénieur. Univ. des Sci. et Techniques du Languedoc.*
- DUCREUX A. et MANIERE G., 1984 - Variation de la densité des sols. Diagramme représentatif. *Bull. G.F.H.N., n° 16 (Nov. 1984), pp. 97-108.*
- DUNGLAS J., 1973 - Aspects mécaniques de l'interaction sol-machine. *Bull. Techn. d'Information, 278 p.*
- FAURE A., 1971 - Contribution à l'étude du mécanisme du compactage des sols. Notion de potentiel de lubrification. *Ann. Agr., 22 (5), pp. 487-513.*
- FAURE A., 1976 - Influence de la phase argileuse sur la susceptibilité au tassement des sols. *Bull. Science du Sol, n° 2, pp. 121-130.*

- FAURE A., 1978 - Comportement des sols au compactage : rôle de l'argile et conséquences sur l'arrangement des grains. *Thèse Doct. es Sciences - Univ. Sci. et Médicale de Grenoble.*
- FAURE A. et FIES J.C., 1972 - Etude expérimentale de la sensibilité au compactage des matériaux meubles en fonction de leur composition granulométrique. *Ann. Agr., 23(3), pp. 317-332.*
- FAURE A. et FIES J.C., - Portance et sensibilité au tassement des terrains agricoles. *C.R. I.N.R.A. d'Avignon.*
- FIES J.C., 1971 - Recherche d'une interprétation texturale de la porosité des sols. *Ann. Agr., 22(6), pp. 655-685.*
- GRAS R., 1972 - Effets des éléments grossiers sur la dynamique de l'eau dans un sol sableux. *Ann. Agr., 23(3), pp. 247-316.*
- GRIMALDI M., 1977 - Etudes en laboratoire du comportement au tassement du sol limoneux de Rheu (Ille et Vilaine). Observations micromorphologiques. *Mémoire de D.E.A., Univ. de Rennes.*
- GRIMALDI M., 1981 - Contribution à l'étude du tassement des sols : évolution de la structure d'un matériaux limoneux soumis à des contraintes mécaniques et hydriques. *Thèse Doct. Ingénieur en Sci. Agro., ENSA, Rennes.*
- GUERIF J., 1979 - Rôle de la matière organique sur le comportement d'un sol au compactage. Matières organiques libres et liées. *Ann. Agro., (6).*
- GUERIF J. et FAURE A., 1979 - Rôle de la matière organique sur le comportement des sols au compactage. *Ann. Agro., (5).*
- HENIN S., 1977 - Cours de physique du sol. Vol. I et II. *ORSTOM, Editest, Paris.*
- HENIN S., FIES J.C. et MONNIER G., 1970 - Etude théorique de la porosité des matériaux meubles en fonction de leur composition granulométrique. *C.R. Acad. Sci., 271, pp. 1960-1963.*
- HILLEL D., 1974 - L'eau et le sol. Principes et processus physiques. *Vander, Paris, 288 p.*
- I.S.S.S., 1976 - Soil physics terminology. *Bull. I.S.S.S., n° 48, pp. 16-22.*
- MANIERE G., 1973 - Contribution à l'étude des zones compactées des horizons superficiels d'un sol complanté de vignes et désherbé chimiquement, utilisation de la méthode Proctor. *Thèse spécialité en Agro., mention Pédologie. Univ. des Sci. et Techniques du Languedoc.*
- MITCHEL J.K. et YOUNGER J.S., 1966 - Abnormalities in hydraulic flow in "Permeability and Cappilarity of soils". *Trans. Farady soc., 57, pp. 1200-1207.*
- MONNIER G., STENGEL P. et FIES J.C., 1973 - Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Ann. Agro., 24(5), pp.533-545.*
- MULLER J.W., 1980 - Les incertitudes de mesures. *Encyclopédie scientifique de l'univers. Vol.4 - Bureau des longitudes - Gauthier-Villars, Paris.*

- PAPY F., 1984 - Comportement du sol sous l'action des façon de reprise d'un labour au printemps. Effets des conditions climatiques et de l'état structural. *Thèse Doct. Ingénieur en Sci. Agro., I.N.A. Paris-Grignon.*
- PELTIER R., 1959 - Manuel du laboratoire routier. *Dunod, Paris.*
- PELTIER R., 1965 - Manuel du laboratoire routier. *Dunod, Paris.*
- POST et LOND, 1953 - Les barrages en terre compactée. *Gauthier-Villars, Paris.*
- REICHERT, 1961 - Influence de la répétition des charges sur la déformabilité des couches de chaussées. *5ème Conférence Internationale de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondation. pp. 293-301, vol. II, Paris.*
- RIVIERE A., 1977 - Méthodes granulométriques. Techniques et Interprétations. *Masson, Paris, 170 p.*
- RUSSEL A.B. et RICHARDS L.A., 1938 - The determination of soil moisture energy relations by centrifugations. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 3, pp. 65-69;*
- SELVANATHAN G., 1976 - Contribution à l'étude expérimentale des relations entre les caractéristiques hydriques et la porométrie du sol. *Thèse Doct. Ingénieur, Paris-sud.*
- S.E.S.C.P.F., 1982 - Carte départementale des terres agricoles au 1/50.000, Feuille de la Ferté-Saint-Aubin.
- SHONE W., 1958 - Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. *Agricultural Engineering, (39), pp. 276-281.*
- SMITH D.L.O., 1985 - Compaction by wheels : a numerical model for agricultural soils. *Soil Sci. (36), pp. 621-632.*
- SOLAU J.L., 1980 - Etude sédimentologique et pédologique des sables de Sissonne (Aisne). *Mémoire de diplôme Ing. C.N.A.M., Paris.*
- STAPLE W.J., 1975 - The influence of size distribution on the bulk density of uniformly packed glass particle. *Soil Sci. Soc. Amer. 39(3), pp. 404-408.*
- STENGEL P., 1982 - Influence des contraintes hydriques et mécaniques sur l'espace poral. *Séminaire sur le comportement physique et mécanique des sols, pp. 25-42, I.N.R.A., Pech-Rouge, oct. 1982.*
- TERZAGHI K., 1951 - Mécanique théorique des sols. *Dunod, Paris.*
- TERZAGHI K. et PECK R.D., 1961 - Mécanique des sols appliquée aux travaux publics et aux bâtiments. *Dunod, Paris.*
- VAN OORT F., 1984 - Géométrie de l'espace poral, comportement hydrique et pédogénèse. *Thèse Doct. Ingénieur "Géologie appliquée". I.N.A. Paris-Grignon.*

VILTOX O., 1985 - Compaction des sols. *Colloque International sur le travail du sol. 29 Nov. 1985, Faculté des Sci. Agro. de l'Etat. Belgique.*

WILSSON S.D., 1950 - Small soil compaction apparatus duplicates field results closely. *Engeneering News Record, 145, n° 18, Nov. 2, pp. 34-36.*

# TABLE DES MATIERES

Pages

SOMMAIRE	
AVANT-PROPOS	
SYMBOLES UTILISES	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
INTRODUCTION GENERALE	1
PREMIERE PARTIE	
<i>Etude du comportement au compactage de matériaux sableux du Val de Loire.</i>	3
Introduction	3
Chapitre I.	
Le compactage des matériaux : choix d'une technique modifiée du test Proctor à énergie réduite.	5
1.1. Principe du test Proctor	5
1.2. Technique modifiée du test Proctor à énergie réduite	8
1.2.1. Appareillage	8
1.2.2. Mode opératoire	9
1.3. Contrôle de l'homogénéité des éprouvettes confectionnées.	10
1.3.1. Mode opératoire	10
a) Prélèvement de "fragments" dans les échantillons Proctor.	10
b) Mesures de la densité sèche des fragments d'éprouvette de terre.	10
Chapitre II.	
Analyse des courbes Proctor	14
II.1. Matériaux étudiés	14
II.2. Résultats et interprétations	14
II.2.1. Le seuil de la sensibilité au compactage	17
II.2.1.1. Etat de connaissance	17
II.2.1.2. Analyse des résultats	17
II.2.2. Comportement des matériaux au- delà du seuil de sensibilité	19
II.2.2.1. Le maximum de compacité état de connaissance	19
II.2.2.2. Analyse des résultats	19
II.3. Etude de la sensibilité au compactage des matériaux	20
II.3.1. Etat des connaissances	20
II.3.2. Relation entre la sensibilité au compactage des matériaux et leurs caractéristiques physiques	21
Conclusion.	25



## DEUXIEME PARTIE

<i>Caractérisation du comportement mécanique des sols en plein champ : confrontation avec les données de laboratoire</i>	28
<hr/>	
Introduction	28
Chapitre I.	
Parcelle expérimentale retenue pour l'étude.	29
1.1. Situation géographique	29
1.2. Situation des zones étudiées et caractéristiques physiques	29
Chapitre II.	
Etude de la sensibilité au compactage.	35
II.1. Essais Proctor	35
II.1.1. Résultats expérimentaux	35
II.1.2. Etude de la sensibilité au compactage	37
II.2. La sensibilité au tassement : confrontation avec les données du terrain	37
II.2.1. Problèmes posés par le passage au champ	41
II.2.2. Mesures portant sur l'évolution des densités apparentes	41
II.2.2.1. Calendrier des différentes opérations culturales	41
II.2.2.2. Résultats et interprétations	42
II.3. Mode d'expression de la compacité d'un sol en place	42
Conclusion	45

## TROISIEME PARTIE

<i>Influence du compactage sur l'évolution de la porosité et le comportement hydrique des matériaux</i>	47
<hr/>	
Chapitre I.	
Conséquences du compactage sur les propriétés de rétention de l'eau	47
1.1. Caractérisation de l'état énergétique de l'eau dans un échantillon	47
1.2. Méthodes de mesure	48
1.2.1. Préparation des échantillons	48
1.2.2. Dispositif expérimental	48
1.3. Résultats et interprétations	48
Chapitre II.	
Evolution de la porosité au cours du compactage	53
II.1. Le concept de rayon équivalent : application de la loi de Jurin	53

II.2. Caractérisation du volume poral d'un échantillon	54
II.3. Résultats et interprétations	55
Chapitre III. Effets du compactage sur la circulation de l'eau satu- rante dans le sol	57
III.1. Dispositif expérimental. Application de la loi de Darcy	57
III.2. Méthode d'étude. Préparation des échantillons	59
III.3. Résultats et interprétations	59
Conclusion	54
<i>CONCLUSIONS GENERALES</i>	65
<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i>	68



**A N N E X E S**

ANNEXE A1

FEUILLE D'ESSAI

Exemple de mesures et pesées faites au cours d'un essai de compactage (test Proctor modifié).

. Matériau : ST BENOIT S<sub>1</sub> (horizon à - 20 cm)

. Volume du moule Proctor : 946,70 cm<sup>3</sup>

N° d'échant.	Eau ajoutée(g)	Aliquote			Eprouvette confectionnée		
		Poids humide (g)	Poids sec * (g)	Teneur en eau W (%)	Poids total humide (g)	Poids sec (g)	Densité sèche (γ <sub>d</sub> )
1	70	120,06	114,04	5,28	1551,69	1473,87	1,56
2	120	108,95	101,50	7,34	1612,94	1482,46	1,56
3	170	117,62	108,02	8,89	1591,31	1503,05	1,59
4	220	98,58	88,74	11,09	1762,60	1586,64	1,68
5	240	119,68	107,39	12,00	1839,11	1642,12	1,73
6	290	111,47	97,27	14,28	1977,91	1730,70	1,83
7	340	97,38	81,80	16,00	1960,24	1689,86	1,79
8	400	88,31	74,64	18,30	1927,69	1629,50	1,72

\* Après passage à l'étuve (105°C).

## ANNEXE A 2

### MESURE DE LA DENSITE APPARENTE Méthode au pétrole

---

La méthode de mesure du volume apparent au pétrole, décrite par MONNIER et al., (1973) est effectuée sur des échantillons centimétriques ou millimétriques, à une humidité déterminée. Elle est basée sur le principe de la poussée d'Archimède. Le choix du pétrole comme liquide d'immersion s'explique à la fois par son caractère peu volatil et par sa faible interaction physico-chimique avec la phase minérale du sol. Un schéma des détails des manipulations de la méthode est présenté dans la figure I. Ainsi, sur un même échantillon il est possible d'apprécier son volume apparent et son poids sec.

$$\begin{aligned} \text{Densité apparente} &= \frac{\text{Poids sec de l'échantillon} \times \text{densité du pétrole}}{\text{poussée hydrostatique}} \\ &= \frac{(T_1 - T_0) \times d}{P_1 - P_0} \end{aligned}$$



1. Imbibition dans le pétrole (saturation de la porosité)



2. Essuyage de l'échantillon sur un mouchoir en papier



3. Pesée du récipient contenant le pétrole ( $P_0$ )



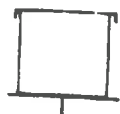
4. Mesure de la poussée hydrostatique ( $P_1$ )



5. Essuyage de l'échantillon sur un mouchoir en papier



6. Pesée de la boîte vide ( $T_0$ )



7. Pesée de la boîte + l'échantillon après passage à l'étuve ( $T_1$ )



FIG 1. MESURE DU VOLUME APPARENT  
PAR LA METHODE AU PETROLE  
(détails des manipulations)

ANNEXE A3

COURBES PROCTOR DES ECHANTILLONS ETUDIES

Densités sèches ( $\gamma_d$ ) mesurées après compactage Proctor, en fonction de la teneur en eau (W), (protocole modifié).

Densité de solide  $\bar{\gamma}_s = 2,67$

MATERIAU	Teneur en eau (W) %	Densité sèche $\gamma_d$	Porosité totale %
COLOMBIER  (horizon 0 - 20 cm)	2,46	1,53	42,70
	6,60	1,53	42,70
	8,90	1,53	42,70
	9,40	1,53	42,70
	10,00	1,55	41,95
	13,00	1,65	38,20
	14,50	1,69	36,70
	16,50	1,67	37,45
	17,00	1,66	37,83
20,8	1,57	41,20	
ST BENOIT S <sub>1</sub>  (horizon 0 - 20 cm)	5,28	1,56	41,57
	7,34	1,56	41,57
	8,89	1,59	40,45
	11,09	1,68	37,10
	12,00	1,73	35,21
	14,28	1,83	31,46
	16,00	1,79	32,96
18,30	1,72	35,58	
BOU S <sub>3</sub>  (horizon 0 - 20 cm)	3,40	1,52	43,07
	6,33	1,58	40,82
	8,44	1,65	38,20
	10,50	1,74	34,83
	12,00	1,75	34,45
14,80	1,73	35,21	

.../...

... /

	2,10	1,65	38,20
MALAKOFF	3,20	1,66	37,83
	5,80	1,69	36,70
(horizon 0 - 20 cm)	7,80	1,70	36,33
	9,40	1,74	34,83
	11,80	1,78	33,33
	12,15	1,78	33,33
	13,17	1,78	33,33
	14,26	1,77	33,71
	18,70	1,64	38,57
	5,70	1,55	41,95
BOU S <sub>1</sub>	6,00	1,57	41,20
	7,60	1,62	39,32
(horizon 0 - 20 cm)	9,40	1,67	37,45
	11,70	1,78	33,33
	13,20	1,76	34,10
	15,40	1,69	36,70
	1,26	1,49	44,19
BOU S <sub>3</sub>	3,10	1,50	43,82
	4,40	1,54	42,32
	5,50	1,56	41,57
(horizon 25 - 40 cm)	7,40	1,60	40,07
	9,27	1,67	37,45
	10,90	1,74	34,83
	12,73	1,81	32,21
	13,50	1,80	32,58
	15,10	1,76	34,08
	4,20	1,56	41,57
BOU S <sub>5</sub>	5,10	1,58	40,82
	6,70	1,65	38,20
	9,50	1,73	35,20
(horizon 0 - 20 cm)	12,10	1,76	34,08
	15,20	1,74	34,83



ANNEXE A4

ESTIMATION DES INCERTITUDES GLOBALES  
SUR L'INDICE DE SENSIBILITE AU COMPACTAGE ( $S_c$ )

---

Application de la loi de composition des  
variances (cf. DORIGNY A., 1985 ; MULLER, 1980)

$$S_c = \frac{\gamma_d^M - \gamma_d^c}{M - c} \times 100$$

$$Y = f(x_1, \dots, x_k) \text{ avec } k = 4$$

Y = grandeur propagée

$X_i$  = grandeur mesurée

Hypothèses de calcul :

Incertitude globale

$$\Delta(x) = 3 \sigma \text{ (MULLER, 1980)}$$

$$\text{avec } \sigma^2 = V(x)$$

il vient :

$$V(y) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \frac{(\partial y)}{\partial x_i} \frac{(\partial y)}{\partial x_j} \text{cov}(x_i, x_j)$$

Si les covariances sont nulles :

les variables statistiquement indépendantes deux à deux  
(hypothèse vraisemblable, mais que nous n'avons pas pu  
matériellement vérifier).

Il devient alors :

$$V(y) = \sum_{i=1}^k \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 S_i^2$$

$$\text{avec } S_i = \frac{\Delta(x_i)}{3}$$

Résultats :

- . Incertitude globale sur la détermination des valeurs de densité  
aux deux points particuliers  $\Delta(\gamma_d) = 0,02$
- . Incertitude globale sur la détermination des teneurs en eau aux  
deux points particuliers  $W = 1,5 \%$ .

Matériaux	$W^C$ (%)	$W^M$ (%)	$\gamma_d^C$	$\gamma_d^M$	Sc (%)	$\Delta(Sc)$ (%)
Malakoff (0 - 20 cm)	3,2	13,0	1,66	1,80	2,3	0,1
Bou S <sub>3</sub> (0 - 20 cm)	3,4	12,0	1,52	1,75	2,6	0,1
St Benoît (0 - 20 cm)	7,4	14,3	1,57	1,83	4,7	0,2
Colombier (0 - 20 cm)	9,4	14,5	1,53	1,69	3,2	0,1
Bou S <sub>5</sub> (0 - 20 cm)	3,2	12,1	1,53	1,75	2,6	0,2
Bou S <sub>3</sub> (25 - 40 cm)	3,4	12,0	1,52	1,75	2,6	0,3
Bou S <sub>1</sub> (0 - 20 cm)	6,4	11,7	1,56	1,78	4,1	0,5

## ANNEXE A 5

### LA DOUBLE SONDE GAMMAMETRIQUE

(Description, performances et mode d'emploi - Fig. II)

La double sonde gammamétrique est destinée à mesurer la masse volumique humide en place de matériaux divers entre la surface et 50 cm de profondeur.

Au préalable, deux trous parallèles d'un diamètre donné sont forés dans le sol à une distance déterminée. Les échantillons de sol sont prélevés afin de déterminer la teneur en eau, couche par couche de 10 cm d'épaisseur jusqu'à 50 cm de profondeur. Deux tubes de guidage en aluminium sont ensuite introduits dans les trous, puis la mise en oeuvre de la mesure consiste à descendre les tiges de la double sonde qui portent à leur extrémité la source et le détecteur positionnés face à face.

La distance source-détecteur limite la zone de mesure. Elle est fixée pour nos mesures à 30 cm.

Les photons diffusés dans le matériau sont en partie éliminés par l'utilisation de filtres mécaniques placés au niveau du détecteur. Ce principe permet de rendre indépendante de la nature du matériau, la mesure de la masse volumique qui est fonction du flux détecté.

#### DESCRIPTION DE L'APPAREIL

##### **La double sonde proprement dite :**

système de deux tubes rigides ( $\varnothing = 30$  mm) entretoisés à leur partie supérieure et distants de 300 mm.

Le premier tube est raccordé au conteneur de la source radioactive ( $^{137}\text{Cs}$ ). Le deuxième tube contient le détecteur (sonde à scintillations ( $\varnothing = 12$  mm) + circuits électroniques). Les tubes sont gradués tous les 2 cm.

##### **La plaque support**

plaque déposée sur le sol permettant le guidage des tiges.

##### **Echelle de comptage**

ensemble électronique portatif servant à l'alimentation des circuits et l'exploitation de la mesure.

Le temps de mesure, de l'ordre de 20 à 30 secondes, est pratiquement négligeable par rapport au temps nécessaire à la réalisation des avant-trous.

En outre, une comparaison des humidités pondérales obtenues avec la tarière et la sonde à neutrons nous permet d'observer un écart minimum entre deux mesures de 0,1 % et maximum de 5 %. Le maximum apparaît surtout pour de forte humidité obtenue après les pluies. Cette différence est logique dans la mesure où les prélèvements d'échantillons à la tarière dans de telles conditions ne sont pas rigoureux.

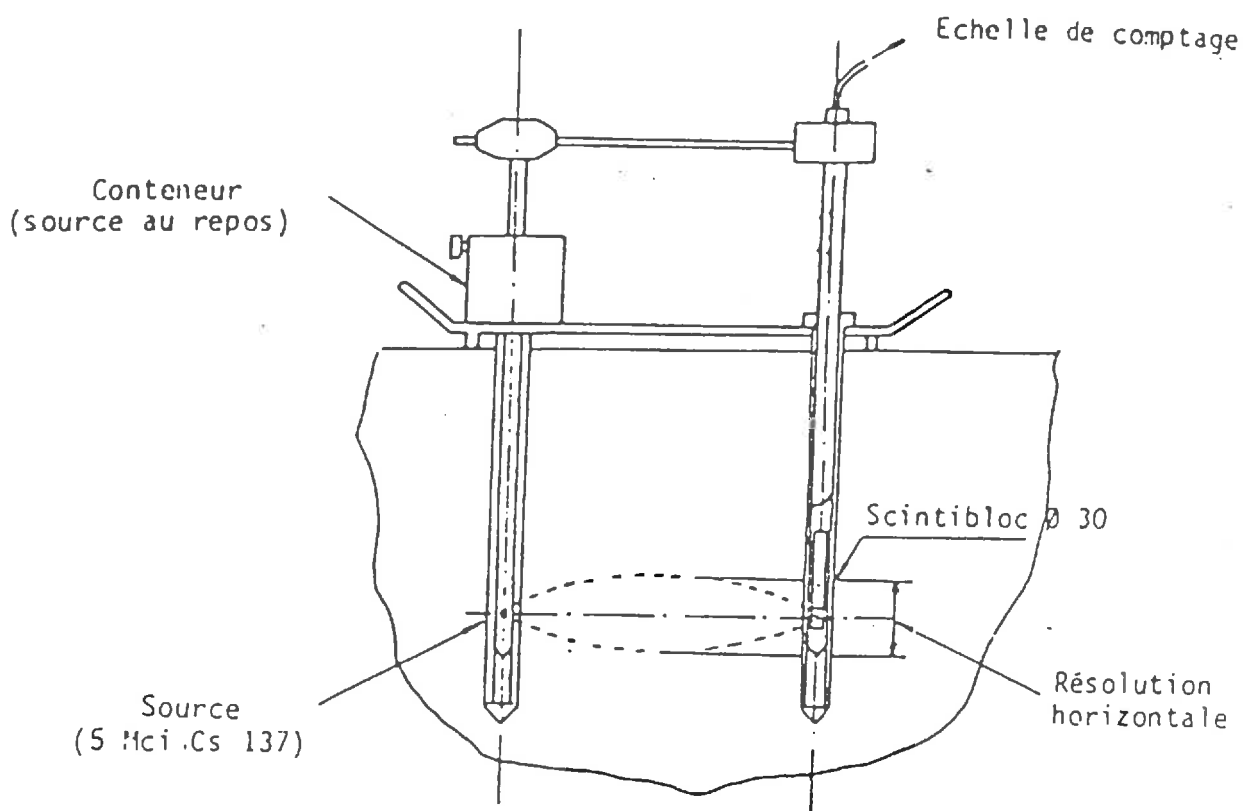


FIG II - LA DOUBLE SONDE GAMMAMETRIQUE

## DENSITES APPARENTES

### Traitements

On effectue un étalonnage sur trois blocs de matériaux homogènes et stables dans le temps. Il s'agit de technyl ( $\gamma = 1,270$ ) de Larris ( $\gamma = 2,477$ ) et de tercé ( $\gamma = 2,152$ ).

On établit la relation :

$$\gamma = -0,6223 \ln C + 5,8610$$

$$\gamma = -0,9995$$

et on trace la courbe correspondante.

Soit  $C_1$  et  $C_2$  les comptages à une profondeur  $z$

$d_o$  = distance entre les tubes.

$x_R$  = l'épaisseur réelle du matériau traversé à la profondeur  $z$

$$x_R = d_o - 2(e + \phi) + \frac{d_o - d_i}{h} z \text{ en cm}$$

$e$  = épaisseur de tube de réservation.

$\phi$  = diamètre des tubes.

Le comptage moyen  $\bar{c}$  :

$$\bar{c} = \frac{C_1 + C_2}{2} \pm AC$$

Ecart aléatoire AC :

$$\Delta C = \sqrt{\frac{8C}{t}}$$

Au comptage moyen  $\bar{c}$  correspond  $\gamma x$  lu sur la courbe d'étalonnage :

on calcule  $(\gamma x)$  réel ou  $\gamma_R x_R$

$$\gamma_R x_R = \gamma x + \frac{1}{\mu'}, \text{ lu } \left( \frac{x \text{ nominal}}{x_R} \right)^2$$

$\mu'$  = coefficient d'absorption massique du calcaire pris comme référence d'étalonnage.

$$\mu' = 0,0774 \text{ cm}^2/\text{g}$$

La masse volumique est égale :

$$\gamma_R = \frac{\gamma_R x_R}{x_R}$$

La masse volumique humide vraie :

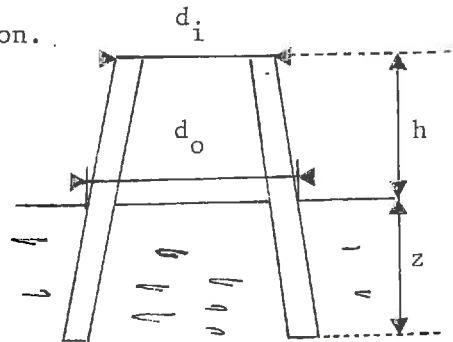
$$\gamma_V = \frac{\mu' \text{ étalonnage}}{\mu' \text{ matériau}} \times \gamma_R \times \frac{100 + \omega}{100 + 1,1\omega}$$

On a considéré que

$$\frac{\mu' \text{ étalonnage}}{\mu' \text{ matériau}} = 1$$

La masse volumique sèche  $\gamma_d$  est égale :

$$\gamma_d = \gamma_V \frac{100}{100 + \omega}$$



## Performances

La résolution verticale est de 4 cm, ce qui permet d'observer les variations de couches de faible épaisseur dans le plan vertical (c'est-à-dire que pour une distance source-émetteur de 30 cm, le volume de mesure est de 400 cm<sup>3</sup>).

La double sonde a l'avantage de donner des mesures indépendantes de la nature des matériaux.

La double sonde, normalement conçue pour fonctionner dans des conditions générales de chantier, est un appareil de terrain demeurant relativement fragile. Beaucoup de précautions doivent être prises lors des manipulations, il apparaît notamment des problèmes de verrouillage de la source dans son conteneur mais aussi de rupture de câble entre le boîtier électronique et le détecteur.

## Précision des mesures

On distingue trois types d'erreurs :

### ● Erreurs dues au calcul des humidités

La mesure des humidités, nécessaire pour la connaissance de la densité apparente, introduit des erreurs assez importantes.

L'incertitude relative est de l'ordre de plus ou moins 5 % dans de bonnes conditions. Elle conduit à une erreur de la densité sèche de l'ordre de plus ou moins 0,06 à 0,09 (soit 4,1 à 5 %).

Dans des conditions très favorables, une erreur de plus ou moins 2 % d'humidité n'engendre que plus ou moins 0,025 à 0,039 d'incertitude sur la densité sèche calculée.

Il est donc indispensable d'opérer dans d'excellentes conditions (terrains ressuyés) afin de diminuer le plus possible ces écarts.

### ● Erreurs dues au parallélisme des tubes

Le non respect du parallélisme des tubes peut conduire à une variation importante des densités mesurées.

Ainsi, si nos tubes écartés à 30 cm de surface, ne le sont que de 28,5 en profondeur, une erreur de 2,62 % est commise soit un écart de 0,043.

C'est pour cela que nous préconisons une vérification systématique du parallélisme. Il suffit d'enfoncer deux tubes de 90 cm dans les trous et de mesurer leur écartement extérieur à différentes hauteurs par rapport au sol.

Si une différence est constatée, une correction devra être faite au niveau du traitement des comptages, décrit au paragraphe "Traitements".

### ● Erreurs de comptage

On constate parfois une légère dérive des comptages. Le phénomène est souvent constaté lorsque l'appareil demeure trop longtemps au soleil. Il serait souhaitable de mesurer l'évolution sur bloc-étalons des comptages à différentes températures. En dehors de cette perturbations, la variabilité des comptages demeure faible, de l'ordre de plus ou moins 5 ce qui correspond à plus ou moins 0,01 (soit 0,6 %) d'écart sur la densité sèche calculée.

Au total, dans de bonnes conditions de mesures, l'erreur à considérer est en moyenn de plus ou moins 0,075. Toutefois, nous avons vu qu'elle peut dépasser largement cette valeur, notamment à cause des humidités, si certaines précautions ne sont pas prises.

Enfin, un étalonnage sur ces matériaux sableux et sablo-  
limoneux à l'aide de prélèvements cylindres, nous permettrait de vérifier la validité même de ces mesures.