



HAL
open science

Conséquences du tassement sur l'organisation de l'espace poral des sols sableux. Contribution à la connaissance des mécanismes de compactage

Elodie Coulon

► **To cite this version:**

Elodie Coulon. Conséquences du tassement sur l'organisation de l'espace poral des sols sableux. Contribution à la connaissance des mécanismes de compactage. Sciences du Vivant [q-bio]. Université d'Orléans, 1988. Français. NNT : . tel-02855750

HAL Id: tel-02855750

<https://hal.inrae.fr/tel-02855750>

Submitted on 8 Jun 2020

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

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

TH-M 38
GF7

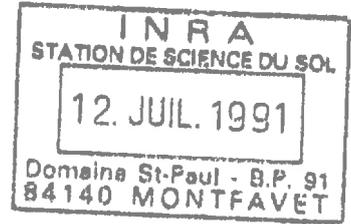
UNIVERSITE D'ORLEANS
U.E.R. DES SCIENCES FONDAMENTALES ET APPLIQUEES

THESE

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

par

Eric COULON



Conséquences du tassement sur l'organisation de l'espace poral des sols sableux. Contribution à la connaissance des mécanismes de compactage.

Soutenue le 13 décembre 1988 devant le Jury composé de

- | | | | |
|-----|-----------------|---|-------------|
| MM. | F. LELONG | : | Président |
| | J. C. BEGON | } | Rapporteurs |
| | J. CHRETIEN | | |
| | M. DE SOUMAGNAT | } | Examineurs |
| | G. MONNIER | | |
| | J. C. ROBINET | | |

Ce travail a pu être réalisé grâce au soutien financier de la Région Centre. Qu'à travers elle, soient remerciées toutes les personnalités qui ont bien voulu m'accorder leur confiance.

AVANT PROPOS

Je tiens à remercier les personnalités qui ont bien voulu suivre ce travail, contribué à sa réalisation et accepté de faire partie du Jury.

Monsieur F. LELONG qui a été le premier à m'accorder confiance et m'a assuré le parrainage scientifique.

Messieurs J.C. BEGON, J. CHRETIEN et G. MONNIER pour la pertinence de leurs critiques et l'attention qu'ils ont bien voulu porter à ce travail.

Monsieur M. DE SOUMAGNAT qui grâce à ses connaissances du milieu agricole et pédologique régional, a contribué à l'élaboration du projet.

Monsieur J.C. ROBINET pour sa disponibilité et sa participation à ce Jury.

Ma reconnaissance s'adresse également à toute l'équipe du SESCOF en particulier à son responsable, Monsieur M. JAMAGNE, qui m'a accueilli au sein du service et est resté attentif au bon déroulement de ce travail.

Messieurs A. BRUAND et R. DARTHOUT avec lesquels de fréquentes discussions ont été profitables à la réflexion, Monsieur M. HARDY et Madame LE BERRE pour les caractérisations minéralogiques et Monsieur C. LELAY pour la fabrication des lames minces.

Je remercie Mademoiselle B. NOIRTIN qui a assuré la réalisation des schémas et figures et Madame M. SOLER, la frappe et mise en forme du document. Elles ont toujours su reprendre, avec patience, les illustrations et les frappes nécessaires à la réalisation du mémoire.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

PREMIERE PARTIE : LE MILIEU D'ETUDE

CHAPITRE 1 - CADRE GENERAL DE L'ETUDE

CHAPITRE 2 - DESCRIPTIONS CARTOGRAPHIQUES ET ANALYTIQUES DES PARCELLES EXPERIMENTALES

CHAPITRE 3 - LES PRATIQUES CULTURALES

DEUXIEME PARTIE : EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES SOLS EN FONCTION DES TRAVAUX CULTURAUX

CHAPITRE 1 - ANALYSE QUANTITATIVE DES POROSITES

CHAPITRE 2 - CARACTERISATION DE L'ESPACE PORAL

CHAPITRE 3 - ANALYSE DU COMPORTEMENT DES MOTTES EN DESSICCATION

CHAPITRE 4 - CARACTERISATION DES TRANSFERTS EN EAU, AU TRAVERS D'UNE COLONNE DE SOL

CHAPITRE 5 - SYNTHESE - CONCLUSION

TROISIEME PARTIE : ANALYSE DU COMPORTEMENT AU COMPACTAGE DES MATERIAUX SABLEUX : EFFET DU POTENTIEL HYDRIQUE ET DE LA PRESSION APPLIQUEE SUR LES CARACTERISTIQUES DE L'ESPACE PORAL

CHAPITRE 1 - COMPACTAGE DES MASSIFS D'AGREGATS : EFFET DE LA PRESSION APPLIQUEE ET DU CONTENU EN EAU, SUR LA POROSITE TOTALE

CHAPITRE 2 - CARACTERISATION DE L'ESPACE PORAL DES MATERIAUX COMPACTES A L'OEDOMETRE

QUATRIEME PARTIE : SYNTHESE GENERALE - PERSPECTIVES

CHAPITRE 1 - ASPECTS METHODOLOGIQUES

CHAPITRE 2 - APPORT DES CONNAISSANCES SUR LES CARACTERISTIQUES
PHYSIQUES DES SOLS SABLEUX

CHAPITRE 3 - APPLICATION PRATIQUE DES RESULTATS

CHAPITRE 5 - PERSPECTIVES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

TABLE DES MATIERES

Liste des planches photographiques

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GENERALE

Traditionnellement, les sols sableux étaient considérés comme relativement perméables, faciles à travailler et d'une bonne praticabilité. C'est le cas en particulier des sols développés sur formations alluviales comme ceux du Val de Loire, où, très souvent, les agriculteurs ont destiné les surfaces à des cultures légumières exigeant des qualités physiques et une disponibilité élevée des parcelles.

La modernisation des techniques culturales, le développement des pratiques d'amendement avaient permis, jusqu'alors, l'intensification des cultures et l'augmentation des rendements.

Toutefois, ces dernières années, les agronomes décrivent de plus en plus de contextes où une diminution des rendements se manifeste. Elle s'accompagne d'une chute de la qualité des récoltes, d'une détérioration des conditions de travail du sol et d'un développement des surfaces inadéquates aux cultures légumières. Les exploitants confrontés à ces problèmes sont contraints à modifier ou adapter les assolements et, parfois, à abandonner certaines productions.

Cette diminution de potentialité agronomique des sols est attribuée essentiellement aux conséquences du tassement et par conséquent à la réduction de la porosité des sols. Un certain nombre de répercussions du tassement des sols sur leurs propriétés physiques sont bien connues. Ainsi, la modification de l'organisation du système poral des sols consécutive au compactage, provoque parallèlement une réduction de l'infiltrabilité des milieux (BULLOCK et al., 1985 ; CAMPBELL et al., 1986 ; KOOISTRA, 1987 ; ONI et ADEOTI, 1986). En surface, au niveau des traces de roues, l'intensité des pluies peut devenir supérieure à l'infiltrabilité du sol entraînant l'apparition de flaques, voire de ruissellement sur terrain en pente (COULON, 1985 ; RAHELIARISOA, 1986). De même, le tassement des sols modifie les propriétés de transfert en gaz et les capacités calorifiques des sols, augmentant ainsi les risques d'asphyxie (BLACKWELL et al., 1986 ; RICHARD et GUERIF, 1988). Enfin, le compactage d'un sol, c'est à dire l'application d'une pression ou d'une charge sur une surface, modifie ses caractéristiques mécaniques. Les résistances des matériaux à la pénétration et à la rupture deviennent plus importantes et induisent des difficultés de travail du sol et surtout une limitation des développements racinaires (COOPER et NICHOLS, 1950 ; CAMPBELL, 1986).

En définitive, toutes ces modifications de propriétés physiques dues au compactage diminuent la potentialité agronomique des milieux et ont, par conséquent, des répercussions défavorables vis à vis des végétaux.

En Val de Loire, et plus précisément en région d'Orléans, les problèmes culturels sont apparus avec acuité et se sont manifestés dans de nombreuses situations ; ils ont conduit à la réalisation d'un certain nombre d'études dans le but d'identifier leurs origines. Dans ce contexte régional, cette baisse de fertilité des sols semble essentiellement liée aux conséquences du tassement. En 1983, CHERIERE associe la chute de rendement et de qualité du petit pois précoce en Val d'Orléans, à la compacité élevée des sols. VERBEQUE (1986), lors d'une enquête agronomique menée auprès d'exploitants légumiers, révèle que dans la majorité des situations désignées à "problèmes" par les agriculteurs, un tassement est mis en évidence. Il constate parallèlement une diminution de l'infiltrabilité des milieux et une limitation des propagations racinaires. Le même auteur décrit des situations

conséquences du tassement. Ainsi, l'arrangement des grains du squelette peut générer des pores de dimensions supérieures à des pores d'origine biologique ou structurale. On comprend alors que les propriétés de transfert en milieux sableux doivent être reliées également aux caractéristiques porales du compartiment textural et, en particulier, lorsqu'il s'agit de milieu tassé où la porosité structurale est très faible.

En définitive, vouloir étudier les conséquences du tassement sur les propriétés physiques des sols sableux, nécessite de faire une analyse des caractéristiques des espaces poraux structuraux et texturaux. L'évaluation des conséquences du tassement demande également de connaître le comportement mécanique des matériaux.

L'objectif de notre étude sera d'observer les conséquences du tassement sur les caractéristiques physiques de sols sableux mais également d'analyser le comportement mécanique des mêmes matériaux, en conditions contrôlées de laboratoire.

C'est pour cette raison que notre étude comprendra deux phases importantes.

La première concernera la mise en évidence des effets des travaux culturaux et des compactages sur les propriétés physiques des sols de deux parcelles expérimentales. Plus précisément, après la description dans une première partie des caractéristiques des sols des deux parcelles expérimentales où ont lieu les mesures, des itinéraires culturaux et de l'état hydrique des sols au moment des interventions, nous décrirons dans une seconde partie, les effets des travaux culturaux et des compactages sur l'organisation de l'espace poral des sols tant du point de vue quantitatif (variation de volume poral) que qualitatif (description des distributions des tailles de pores). Nous examinerons conjointement les variations des relations potentiel-teneur en eau et des conductivités hydrauliques en saturé entre échantillons tassés et non tassés. La comparaison des caractéristiques de différentes situations granulométriques intra-parcellaires permettra de discuter des différences des propriétés physiques dues à ces variations de constitution.

Dans une seconde phase, qui constituera la troisième partie, l'étude portera sur l'analyse en laboratoire du comportement au compactage des matériaux sableux, réalisée à l'aide d'un test de compactage uniaxial. Dans des conditions expérimentales maîtrisées (état structural initial ; potentiel en eau ; intensité de pression appliquée), nous observerons l'évolution des volumes poraux de matériaux de constitutions granulométriques différentes, prélevés dans chacune des situations intra-parcellaires. Cette approche méthodologique permettra de relier les caractéristiques mécaniques aux constitutions des matériaux. Nous serons alors amenés à discuter des mécanismes intervenant lors du compactage.

La description de l'organisation du système poral de ces matériaux compactés en laboratoire sera faite de manière à observer les modifications de distribution des tailles des pores consécutives au compactage et à les comparer à celles des matériaux compactés au champ. Nous serons amenés ainsi à faire des hypothèses sur les conditions générales existant lors des compactages.

Enfin, dans une quatrième partie, nous ferons une synthèse générale des résultats acquis lors du suivi au champ et de mesures en laboratoire. Nous discuterons de l'intérêt que présentent ces deux approches méthodologiques et nous réfléchirons sur la possibilité qui existe, de généraliser les résultats à d'autres types de sols.

Ière PARTIE

LE MILIEU D'ETUDE

INTRODUCTION

L'étude de l'évolution des caractéristiques physiques des sols en place, en relation avec les travaux culturaux, nous imposait de choisir des sites où il y avait la possibilité de faire état des caractéristiques physiques (porosités, distributions des tailles des pores...) avant le travail du sol pour les nouvelles cultures, de manière à pouvoir les comparer à celles observées après mise en culture. Nous devons également posséder le maximum de connaissances (antécédents culturaux - techniques utilisées) sur les milieux où pouvaient se dérouler les mesures. C'est selon ces critères que nous avons décidé de sélectionner deux parcelles, parmi celles qui avaient fait l'objet d'observations par VERBEQUE (1986) dans le cadre de son enquête agronomique. Les raisons du choix de ces deux sites expérimentaux, en dehors des préoccupations précédentes, sont les suivantes :

- Les premières observations et données fournies par les agriculteurs faisaient apparaître des propriétés physiques différentes entre les deux parcelles, malgré des textures proches des horizons cultivés et des fréquences de culture en légume aussi importantes.
- Les deux parcelles présentent une variabilité texturale importante des horizons de surface. Nous pouvions donc envisager d'analyser l'influence des caractéristiques analytiques (textures, taux de matière organique) sur les propriétés physiques des sols et cela pour des antécédents culturaux et des techniques de travail du sol identiques par ailleurs.

Les caractéristiques physiques des sols cultivés et en particulier l'analyse des porosités, sont réalisées en trois points géographiques des parcelles, chacun d'entre eux correspondant à une situation texturale particulière.

Cette première partie est donc consacrée à la présentation générale des milieux d'étude. Après une description sommaire du contexte régional, nous examinerons les caractéristiques analytiques des deux parcelles et plus précisément celles de chaque situation intra-parcellaire où eurent lieu les suivis au champ et les prélèvements d'échantillon. Les pratiques culturales et la description des itinéraires culturaux feront l'objet d'un autre chapitre.

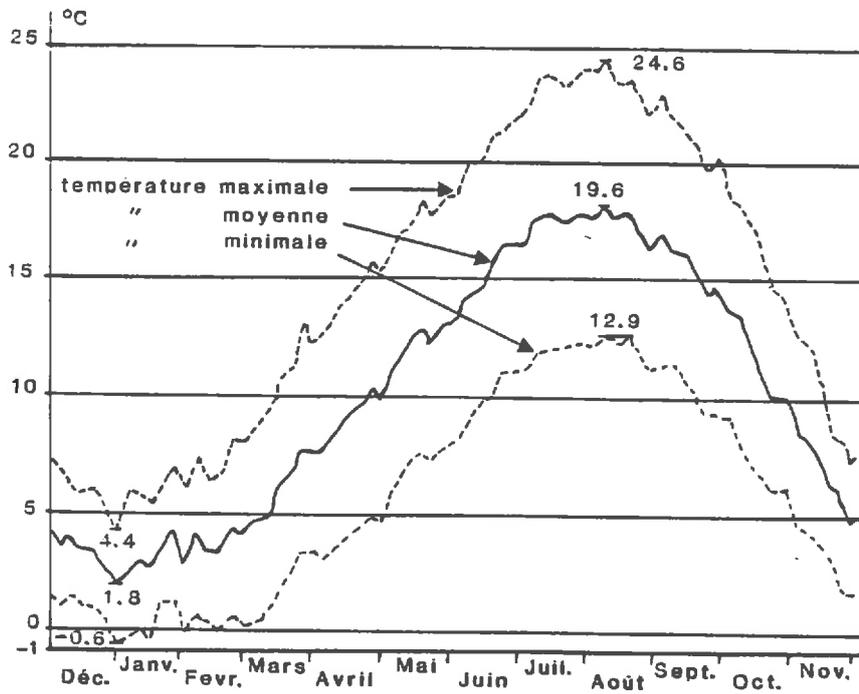


Figure 1 : Moyenne pentadaire des températures sous abri (1961/1980).

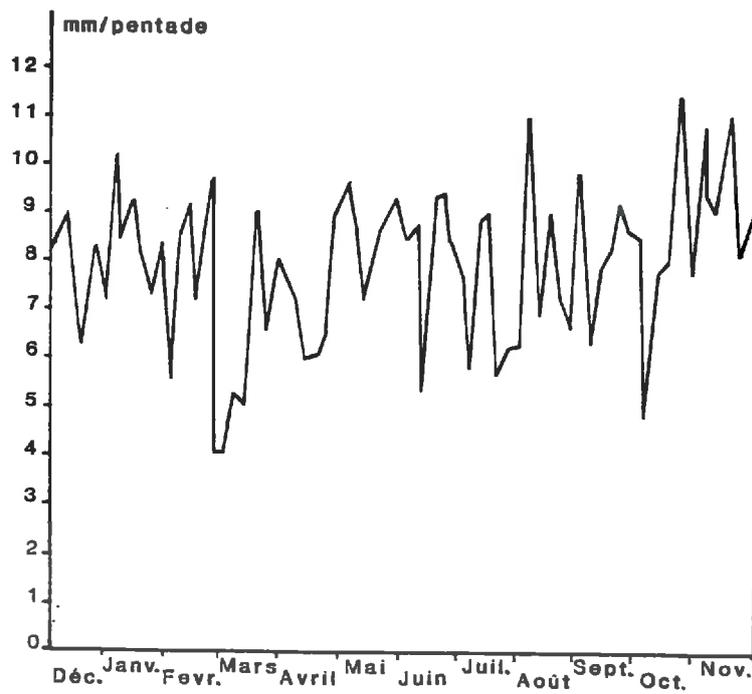


Figure 2 : Moyenne pentadaire des précipitations (1961/1980).

I - CADRE GENERAL DE L'ETUDE

1.1 - SITUATION GEOGRAPHIQUE

- Régionale

Le Val d'Orléans forme une large dépression autour de la Loire qui sépare la Sologne au sud, de l'Orléanais et de la Beauce au nord. La plaine alluviale monotone par son relief, est parsemée de buttes ou montilles de 2 ou 3 m de hauteur, séparées par des fossés ou collecteurs de limons fins de crues non endiguées. L'altitude de 115 m à l'est, décroît à 95 m à l'ouest. La nappe d'eau souterraine circule facilement rendant ainsi l'exploitation de l'eau aisée. Ce fait détermine la concentration du peuplement qu'il y a dans le Val (HOREMANS, 1961).

- Des parcelles

La première parcelle où fut réalisé le suivi au champ, est sur la commune de Bou (latitude 47° 51' 43" ; longitude 2° 2' 26"). Elle présente un microrelief assez marqué avec la présence de zones dépressives où l'eau stagne préférentiellement (figure 3).

La seconde appartient à la commune de St Benoit (latitude 47° 47' 47" ; longitude 2° 18' 54"). La surface est pratiquement plane d'une extrémité à l'autre.

1.2 - LE CLIMAT

1.21 - Climat général (LALUQUE, 1978 ; HUBERT, 1983)

Le Val d'Orléans appartient au domaine tempéré, océanique avec cependant des nuances continentales.

La température moyenne annuelle est de 10°5 C, avec un maximum en juillet de 19°6 C et un minimum en janvier de 1°8 C (fig. 1).

La pluviosité moyenne annuelle de 615 mm est relativement bien répartie au cours de l'année (fig. 2). Toutefois, le bilan climatique (P - ETP) reste largement déficitaire entre avril et septembre (tableau 1).

Tableau 1 - Données climatiques à Bricy - Moyennes des pluviosités et des évapotranspirations potentielles (formule Brochet-Gerbier) Période 1961/1980.

	avril			mai			juin			juillet			août			septembre		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Valeurs moyennes	21.1	26.4	27.5	26.9	32.8	36.1	38.0	36.5	38.9	41.8	38.5	44.2	37.3	34.1	35.7	26.8	23.5	19.1
ETP	75.0			95.8			113.4			124.5			107.1			69.4		
Valeurs moyennes	5.3	12.7	11.2	3.6	18.7	15.4	21.6	19.6	21.6	27.1	19.7	28.3	21.5	19.4	20.3	10.1	6.6	2.7
P-ETP (négatif)	29.2			37.7			62.8			75.1			61.2			19.4		

1.22 - *Climat pendant l'année d'étude*
(déc. 85 - nov. 86)

Tableau 2 - Données climatiques pendant l'année d'étude - Pluviosités et évapotranspirations potentielles de décembre 1985 à novembre 1986.

	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.
Pluviosité mensuelle	43,4	78,1	47,2	59,3	85,4	72,6	31,8	20,4	62,9	65,3	64,4	53,2
ETP en mm	-	-	-	-	58.9	87.6	117.0	162.9	105.2	71.1	-	-
P-ETP en mm	-	-	-	-	26.5	-15.0	-85.2	-142.5	-42.3	-5.8	-	-

La répartition des pluies de décembre à novembre 1986 est statistiquement hétérogène. Les précipitations sont très importantes en début d'année (en particulier en avril), et rares pendant les mois d'été (20.4 mm en juillet). En conséquence les bilans P - ETP sont très déficitaires en juin et juillet par rapport aux valeurs moyennes enregistrées (tableau 1).

1.3 - GEOLOGIE

Le Val d'Orléans est constitué essentiellement d'alluvions holocènes et modernes, (GIGOUT, 1969). Les premières, plus anciennes, forment "les montilles" du Val. Leur granulométrie varie du sable fin au galet ; l'épandage terminal est fin : sables et sablons. Elles sont siliceuses : les sables et graviers sont faits essentiellement de quartz et feldspaths. Les galets sont surtout des silex, quartz, grès et autres roches siliceuses. Les alluvions modernes ont la même composition et granulométrie. Elles sont dans l'ensemble plus fines à l'écart du cours actuel.

L'épaisseur de l'ensemble alluvial est en général de 6 à 8 mètres. Il repose à l'ouest de Sigloy, directement sur la formation karstique du calcaire de Beauce. Les dissolutions encore actives entraînent des effondrements. La nappe alluviale et la nappe circulant dans le réseau karstique communiquent.

Les parcelles de Bou et St Benoit appartiennent respectivement aux alluvions modernes et holocènes.

1.4 - PEDOLOGIE

Les sols développés sur ces dépôts alluvionnaires sont tous peu évolués, parfois légèrement lessivés sur les montilles. Seules, des variations granulométriques avec la profondeur apparaissent. Elles sont dues aux successions de crues et décrues qui par ailleurs ont provoqué de fortes hétérogénéités texturales intra-parcellaires (HOREMANS, 1961 ; BETREMIEUX et al, 1972 ; CHERIERE, 1983 ; CHERIERE et al., 1984).

Les constituants des sols sont toujours des sables de dimensions variées, en association avec l'argile ou le limon en proportions variables. A proximité immédiate de la Loire, sur les alluvions modernes, on retrouve très souvent des sols pauvres en éléments fins, dépourvus d'éléments nutritifs et sensibles à la sécheresse. Ils sont très souvent destinés aux cultures légumières. Sur alluvions plus anciennes, les textures varient davantage. Elles sont plus ou moins riches en éléments fins ce qui détermine le type de culture : céréales ou cultures intensives.

La parcelle de Bou appartient à l'unité de sol (12), qualifiée de sable pauvre en éléments fins localement avec un niveau argileux à moins de 120 cm, (BEGON et al, 1982). La parcelle de St Benoit est désignée comme un sable limoneux reposant à 40 ou 50 cm sur un sable argileux (unité 6). Des engorgements temporaires peuvent apparaître à faible profondeur (<40 cm), (SATTLER, 1984).

II - DESCRIPTIONS CARTOGRAPHIQUES ET ANALYTIQUES DES PARCELLES EXPERIMENTALES

2.1 - CARTOGRAPHIE

La cartographie fut réalisée sur chacune des parcelles avant les suivis au champ. Les sondages sont localisés tous les 10 mètres, suivant des transects espacés de 15 m.

Après levé cartographique et acquisition de quelques données granulométriques concernant les principaux matériaux, nous avons procédé à un regroupement des unités texturales en volumes pédologiques. La figure 3 représente leur répartition spatiale superficielle et en profondeur. Précisons que la dénomination des volumes pédologiques fut réalisée en référence au triangle de BETREMIEUX et al. (1962). Toutefois, nous avons ajouté des classes supplémentaires (Sa⁺, Sa⁻), de manière à rendre compte des faibles variations de teneurs en argile.

La forte variabilité texturale qui existe sur les deux parcelles, concerne les volumes superficiels et profonds.

A Bou, la couche labourée est constituée de sables moyens contenant plus ou moins d'éléments fins. Les textures demeurent relativement constantes jusqu'à 50 cm de profondeur. Au-dessous apparaissent des sables blonds parfaitement classés avec, localement, des niveaux beaucoup plus argileux voire des argiles sableuses (à 80 cm), (diagramme BETREMIEUX et al, 1962).

L'horizon cultivé semble peu organique et possède peu de traces d'activité biologique. A la date d'observation, c'est à dire à la sortie de l'hiver, le labour a fortement évolué et aucun espace lacunaire n'apparaît. A la base de la couche labourée dont l'épaisseur est d'environ 25 cm, on trouve un horizon compacté continu. Il semble généralisé quelle que soit la situation dans la parcelle.

A Saint-Benoit, les sables moyens (riches en fractions 200 - 500 μm) plus ou moins riches en argile occupent également la couche labourée. Ils sont de tailles voisines à celles des matériaux de Bou, quoique légèrement plus grossiers. A partir de 30 à 60 cm, les sols s'enrichissent en argile. Les volumes pédologiques profonds sont des sables argileux ou argiles sableuses, contenant localement quelques graviers. L'horizon cultivé est plus organique. On remarque des traces d'apport d'engrais, d'activité biologique. La couche labourée de 30 cm d'épaisseur repose sur un horizon beaucoup plus dense. Le profil s'enrichissant notablement en argile, la limite inférieure de cet horizon dense est diffuse. Des traces de décompactage au travers de cet horizon sont apparues. Elles sont alors soulignées par un ameublissement de l'horizon et des teneurs en eau supérieures à leur base. La parcelle est drainée. Les drains sont espacés de 8 m et enfouis à 1,20 m.

En définitive, les horizons cultivés des parcelles de Bou et de Saint-Benoit semblent avoir des compositions granulométriques très proches et se différencient essentiellement par leur activité biologique et leur contenu organique, nettement plus importants dans la dernière parcelle.

2.2 - DONNEES ANALYTIQUES

Nous présenterons successivement les données analytiques concernant Bou et St Benoit. Précisons que ces analyses furent réalisées avant les suivis au champ. Seuls deux échantillons prélevés sur chacune des parcelles, ont fait l'objet d'une analyse en diffraction des rayons X.

Les données analytiques correspondent aux trois situations intra-parcellaires où ont lieu les mesures. Notre objectif étant de disposer de milieux différents de manière à analyser l'effet de la texture sur les caractéristiques physiques des sols de chacune des parcelles, nous avons recherché des situations où les matériaux des horizons cultivés sont contrastés texturalement. Toutefois, nous avons évité toute implantation dans les points bas des parcelles de façon à éviter les effets, sur les mesures, d'éventuelles flaques.

2.21 - Bou

Les caractéristiques analytiques des trois situations où ont lieu les mesures (figure 3) sont reportées dans le tableau 3 et en annexe I.1.

Les granulométries des trois situations sont différentes surtout par leurs teneurs en éléments fins (< 50 μm). Les squelettes sableux présentent tous de fortes proportions d'éléments de dimensions comprises entre 200-500 μm , peu à des tailles supérieures à 500 μm , et nulles au dessus de 2 mm.

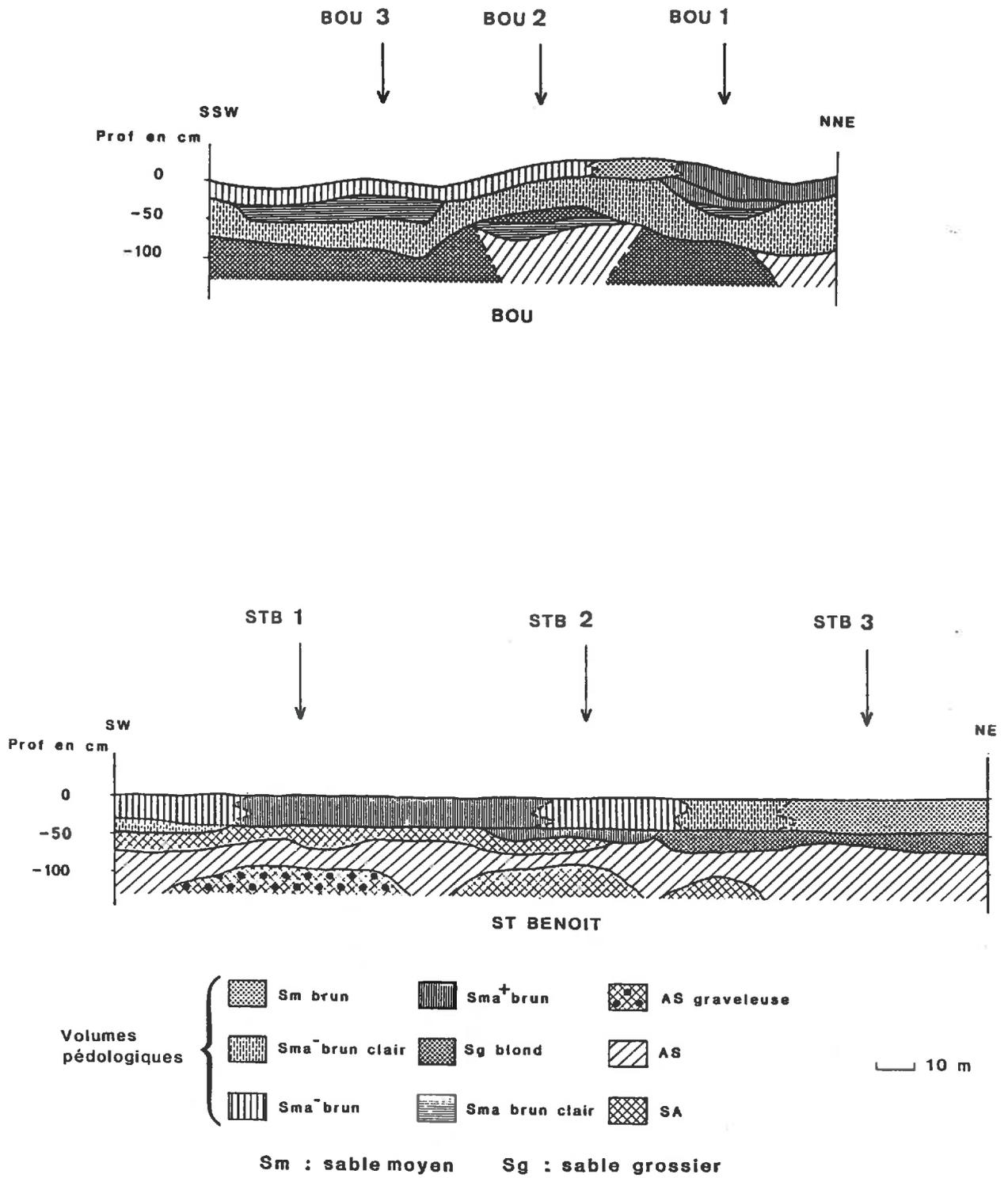


Figure 3 : Distribution des volumes pédologiques à Bou et St Benoit.

La première situation (Bou.1 : sablo-argileuse) est la plus riche en éléments inférieurs à 50 μm . Bou.2 et Bou.3 ont des granulométries proches avec cependant des teneurs en éléments 200-500 μm supérieures en Bou.3. Les granulométries sont homogènes dans les 50 premiers centimètres. Au dessous, il y a une diminution notable des quantités d'éléments fins au profit des fractions sableuses.

Le degré d'étalement des spectres granulométriques est exprimé à l'aide de l'indice d'hétérométrie H_q (annexe I.2). Sa valeur est d'autant plus élevée que le matériau présente une distribution des tailles des particules étalée et par conséquent qu'il possède un mauvais classement. Les valeurs de H_q (2-2000) calculées pour les huit fractions, sont maximales en situation 1. Si l'on considère uniquement les fractions sableuses (H_q 50-2000), les indices des matériaux superficiels sont identiques. Les distributions des squelettes sableux sont en définitive très proches d'une situation à l'autre et l'on peut considérer que les différences de granulométries entre situations intra-parcellaires proviennent uniquement d'une pollution plus ou moins accentuée du squelette par des particules plus fines. Les valeurs de médiane (M_d) calculées sur 5 fractions sont également analogues. Elles sont toutes comprises entre 200 et 300 μm .

Les fractions sableuses ($> 50 \mu\text{m}$) des matériaux prélevés dans les 50 premiers centimètres, sont composées en grande majorité de quartz et de feldpaths (environ 90 %), les micas et les minéraux lourds étant peu représentés. D'après les classifications de forme proposées par CAILLEUX et TRICART (1963), les grains observés sous binoculaire (Photo 1) ont un aspect sub-arrondi, quelques uns demeurant assez anguleux. Cette morphologie est typique des dépôts alluvionnaires (CHRETIEN, 1971).

Photo 1 - Morphologies des particules 200-500 μm .

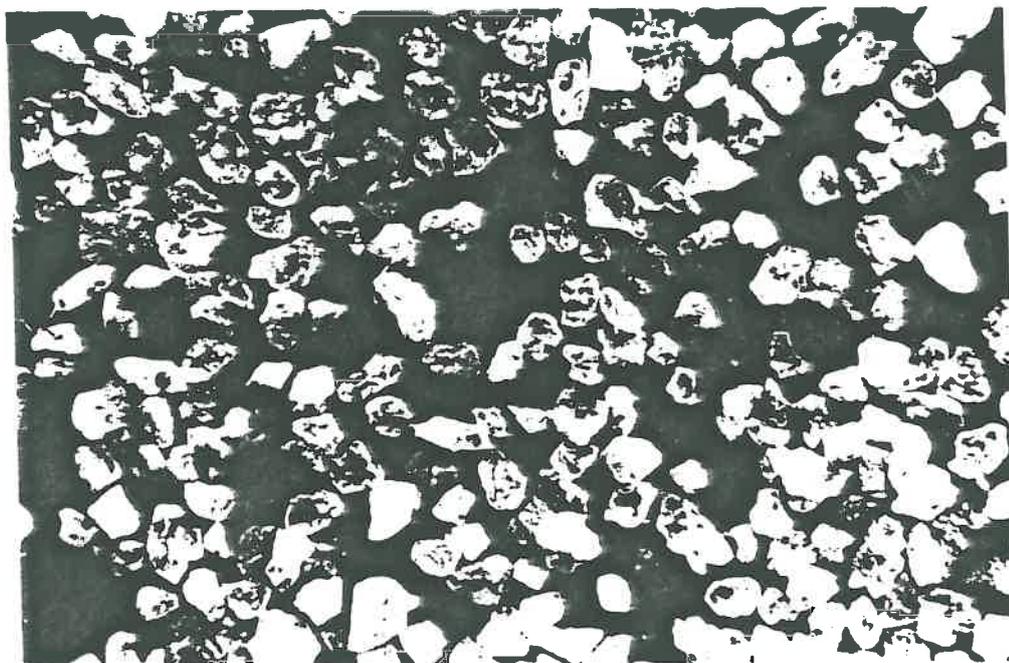


Tableau 3 - Caractéristiques analytiques à Bou.

Situations	Profondeur en cm	Granulométrie (µm)							
		<2	2- 20	20- 50	50- 100	100- 200	200- 500	500- 1000	1000- 2000
Bou.1	0- 20	12,4	10,5	8,9	12,3	18,6	33,4	3,6	0,3
	20- 30	13,2	10,8	9,0	13,7	20,5	29,5	3,0	0,3
	30- 40	13,6	11,0	8,6	11,4	16,6	33,8	4,3	0,7
	40- 60	8,6	7,6	7,1	13,2	20,5	37,8	4,8	0,4
	60- 80	6,8	6,7	5,9	9,0	18,8	47,8	4,7	0,3
Bou.2	0- 20	7,8	7,8	5,1	9,5	21,0	42,6	5,5	0,6
	20- 30	9,3	6,3	5,5	9,9	23,6	39,9	5,1	0,4
	40- 60	8,4	5,8	5,75	11,8	19,8	40,6	7,2	0,65
	60- 80	2,0	1,4	1,90	2,8	5,0	71,1	15,3	0,5
Bou.3	0- 20	8,0	5,6	4,4	8,6	19,5	47,2	6,1	0,6
	20- 40	11,3	7,3	6,5	9,5	19,0	41,5	4,5	0,4
	50- 60	10,8	7,9	7,2	7,2	18,5	45,9	2,4	0,1
	60- 70	9,9	8,7	6,1	10,3	17,8	42,1	4,9	0,2
	90-100	2,1	1,9	0,9	0,7	8,5	75,8	9,9	0,2

2-2000		50-2000		Mo %	Mo/ Ar %	pH	C libre/ C total %	CEC m.e.q./ 100 gr	CEC m.e.q./ 100 gr Ar
Hq	Md	Hq	Md						
0.53	125	0.23	218	0,99	8,0	5,9	17,7	6,2	61,3
0.53	112	0.24	195	1,20	9,1	6,6	8,8	/	/
0.57	125	0.23	232	1,08	5,0	5,8	/	/	/
0.38	158	0.23	224	0,49	5,7	6,8	/	/	/
0,32	211	0.20	254	0,44	6,5	6,9	/	/	/
0,34	192	0.21	243	0,75	9,6	5,5	21,7	4,9	62,8
0,34	175	0.22	229	0,67	7,2	5,8	15,7	/	/
0,35	189	0.23	242	0,47	5,6	6,5	/	/	/
0,14	322	0.13	333	0,18	9,0	6,8	/	/	/
0,30	216	0.20	257	0,70	8,8	5,4	19,1	4,6	57,5
0,41	175	0.21	244	0,53	4,7	6,1	14,6	/	/
0,43	188	0.19	251	0,44	4,1	6,6	/	/	/
0,40	179	0.21	246	0,53	5,3	6,3	/	/	/
0,13	309	0.12	318	0,17	8,0	6,8	/	/	/

Les taux de matière organique sont faibles. Rapportés aux pourcentages d'argile, on obtient des valeurs inférieures à 10 %. La détermination du taux de C libre nous montre que la matière organique est surtout constituée de fraction liée (80 à 90 %).

Les pH sont proches de la neutralité avec cependant une tendance acide en surface.

La capacité d'échange totale est maximale en zone 1, la plus riche en argile. Rapportées aux pourcentages d'argile, et pour des teneurs en matière organique relativement proches, les capacités ont des valeurs voisines de 60 méq./100 g quelle que soit la situation.

La diffractométrie des rayons X (annexe I.3) de la fraction inférieure à 2 μm des matériaux de Bou.1, révèle l'existence de traces de quartz, de feldspath potassique et sodique, de vermiculite et surtout la présence de kaolinite, d'illite et de smectite. Des analyses complémentaires permettent de quantifier le taux de quartz, de kaolinite et de minéraux gonflants (annexe I.3). Les résultats nous indiquent des taux approximatifs en quartz de 2,5 %, en kaolinite de 20 %, en smectite de 31 %. En négligeant les autres phases minérales, on déduit par différence, un taux d'environ 46,5 % d'illite.

2.22 - *Saint-Benoit*

Les caractéristiques analytiques des trois situations sont rassemblées dans le tableau 4 et en annexe I.1.

Comme à Bou, les différentes situations se distinguent surtout par leurs teneurs en éléments inférieurs à 50 μm . STB.1 est la zone la plus argileuse, STB.3 la plus sableuse. Les squelettes sableux sont constitués en majorité d'éléments fins et moyens, avec des constituants grossiers (500-1000 μm) plus nombreux que dans les matériaux de la précédente parcelle. Aucun élément de dimension supérieure à 2 mm n'est quantifié.

Pour chacun des profils, les variations granulométriques sont importantes dès 30 cm. Il y a en STB.1 et STB.2, un enrichissement important en argile. En STB.3, cette évolution n'apparaît qu'en profondeur, au dessous d'un horizon très sableux intercalé (80 % de la fraction 200-500 μm).

Les indices Hq (2-2000), calculés avec l'ensemble des fractions, sont conformes aux variations de teneurs en éléments inférieurs à 50 μm : faibles en milieux très sableux, importants en milieux plus argileux. Les valeurs de Hq et Md (50-2000), calculées avec 5 fractions sont similaires d'une situation à l'autre, montrant ainsi une identité des distributions des tailles des éléments des squelettes sableux.

La composition des sables (fractions $>$ 50 μm) comprend une majorité de quartz et feldspaths. On note la présence un peu plus importante de grains de micas dans les matériaux prélevés au dessous de 40 cm. Les particules, émoussées luisantes, sont de forme sub-arrondie.

Les taux de matière organique sont assez élevés. Rapportés aux pourcentages d'argile, on obtient de valeurs comprises entre 14 et 20 %.

Tableau 4 - Caractéristiques analytiques à St Benoit.

Situations	Profondeur en cm	Granulométrie (µm)							
		<2	2- 20	20- 50	50- 100	100- 200	200- 500	500- 1000	1000- 2000
STB.1	0- 20	12,6	11,7	8,6	10,0	17,6	31,1	6,8	1,6
	20- 30	11,2	12,4	9,1	8,8	14,8	31,7	9,6	2,4
	30- 40	17,0	12,9	9,9	9,7	11,6	30,2	7,2	1,5
	40- 50	18,0	12,1	7,6	7,3	14,2	31,5	7,3	2,0
	55- 85	20,2	6,3	5,0	3,4	12,8	39,3	9,7	3,3
	115-125	19,2	9,7	7,5	8,1	19,7	31,3	3,6	0,9
STB.2	0- 20	9,7	11,0	7,9	10,4	21,2	29,2	8,5	2,1
	20- 30	10,7	10,2	7,6	8,4	22,9	32,1	7,2	0,9
	35- 45	13,5	10,9	6,6	6,8	17,8	34,2	8,5	1,7
	65- 85	22,2	7,3	4,7	3,9	18,3	31,6	8,9	3,1
	100-115	17,9	10,5	3,5	5,9	17,5	39,7	3,8	1,2
	115-130	18,2	12,8	7,3	7,7	15,1	34,6	3,5	0,8
STB.3	0- 20	8,0	7,7	3,9	5,4	18,1	47,5	7,9	1,5
	20- 30	8,0	7,4	4,1	6,5	20,6	45,5	6,7	1,2
	35- 65	4,8	1,3	0,8	0,9	6,5	80,8	4,9	0,0
	45- 60	9,4	8,9	4,0	5,5	14,3	48,1	8,6	1,2
	65- 90	25,3	9,2	3,3	3,8	12,1	37,3	7,7	1,3
	105-120	22,2	7,9	4,0	4,4	14,2	44,9	2,1	0,3

2-2000		50-2000		Mo %	Mo/ Ar %	pH	C libre/ C total	CEC m.e.q./ 100 g	CEC m.e.q./ 100 g Ar
Hq	Md	Hq	Md						
0,58	132	0,24	238	1,82	14,4	6,8	19,6	7,1	56,3
0,59	149	0,24	267	1,90	16,9	7,3	10,1	/	/
0,78	103	0,24	261	1,03	6,1	6,9	/	/	/
0,81	128	0,22	265	0,73	4,1	7,1	/	/	/
0,76	211	0,17	304	0,41	2,0	6,9	/	/	/
0,77	121	0,22	225	0,41	2,1	7,0	/	/	/
0,49	143	0,25	228	1,80	18,5	7,0	19,5	6,0	61,9
0,49	149	0,23	227	1,53	14,3	7,2	18,9	/	/
0,59	161	0,22	261	0,70	5,2	7,1	/	/	/
0,93	157	0,22	273	0,61	2,7	6,9	/	/	/
0,76	162	0,19	256	0,49	2,7	7,0	/	/	/
0,81	120	0,21	248	0,44	2,4	7,0	/	/	/
0,28	229	0,18	276	1,53	19,1	6,7	18,1	5,4	67,5
0,30	214	0,20	261	1,73	21,6	6,7	28,2	/	/
0,12	300	0,11	312	0,22	4,6	6,7	/	/	/
0,36	232	0,16	288	0,36	3,8	6,8	/	/	/
1,06	162	0,17	291	0,49	1,9	6,6	/	/	/
0,92	175	0,16	268	0,46	2,1	6,7	/	/	/

Les pH sont voisins de la neutralité. Les capacités d'échange ramenées aux pourcentages d'argile, et pour des taux de matière organique voisins, sont relativement proches entre les situations de la parcelle.

La diffractométrie des rayons X (annexe I.3) montre la présence de quartz, de feldspath, de vermiculite et surtout de kaolinite, d'illite et de smectite. On détermine un taux moyen en quartz de 3 %, en kaolinite de 14 %, en smectite de 22 %. Par différence à 100 % de la phase argileuse totale, on obtient environ 61 % d'illite.

2.23 - Conclusion

- Les principaux résultats

Les granulométries des horizons cultivés des parcelles de Bou et Saint-Benoit sont similaires. Les situations intra-parcellaires se différencient par des teneurs en éléments inférieurs à 50 μm plus ou moins élevées et par conséquent des indices d'hétérométrie plus ou moins faibles. Les distributions des fractions sableuses demeurent néanmoins constantes d'une situation à l'autre, ce qui se traduit par des valeurs équivalentes d'indice d'hétérométrie du squelette. Enfin, il est à noter que tous les matériaux présentent des taux élevés en éléments moyens (200-500 μm).

En profondeur, les matériaux de Bou et Saint-Benoit ont des constitutions très différentes. A Bou, il s'agit de sables moyens pauvres en éléments inférieurs à 50 μm et, à Saint-Benoit, de sables argileux ou argiles sableuses à 60 cm qui rendent le milieu très imperméable et justifie le drainage.

Les morphologies et minéralogies des grains du squelette apparaissent identiques pour l'ensemble des matériaux. La forme sub-arrondie et le type émoussé luisant sont dus, sans aucun doute, au fait qu'il s'agit de matériaux ayant subi un transport par l'eau.

Les deux parcelles de Bou et de Saint-Benoit présentent des taux de matière organique très différents. Si on se réfère au rapport Mo/Ar, il est 1.5 à 2 fois plus élevé à Saint-Benoit. Cette différence provient d'apports d'amendements organiques probablement beaucoup plus fréquents dans la seconde parcelle.

La composition minéralogique de la phase argileuse est comparable entre les deux parcelles. On note cependant, une teneur en smectite légèrement supérieure à Bou malgré des capacités d'échange similaires. Le taux en matière organique plus élevé à Saint-Benoit peut expliquer ces valeurs de capacité.

- Comparaison des données analytiques aux caractéristiques de sols développés sur d'autres formations sableuses

Dans le but de situer les caractéristiques granulométriques des sols des deux parcelles, nous avons calculé les mêmes indices granulométriques (Hq et Md) pour des matériaux issus d'autres formations sableuses.

Précisons toutefois que nous n'avons sélectionné que des matériaux sableux ayant subi un transport hydraulique ou éolien, de manière à réduire la comparaison à des matériaux constitués de particules de formes proches (sub-arrondies).

Les matériaux des deux parcelles expérimentales ont des distributions de fractions granulométriques similaires aux sables issus des formations d'origine diluviale, fluviatile ou marine (tableau 5). Tous les matériaux ayant subi un transport hydraulique et non dunaires ont des indices Hq (2-2000) compris entre 0.25 et 0.56. Les hétérométries des squelettes sableux sont également similaires. Les valeurs de médiane, comprises entre 169 et 612 μm , soulignent des différences de grossièreté du squelette suivant l'origine géologique des matériaux.

Tableau 5 - Indices granulométriques de matériaux sableux issus d'autres formations.

Formations	origine	Hq 2-2000	Md 2-2000	Hq 50-2000	Md 50-2000
Sologne	diluviale	0.34	370	0.23	479
Orléanais	diluviale	0.56	153	0.24	278
Brenne	fluviatile	0.26	560	0.23	612
Seine	fluviatile	0.32	138	0.17	169
Cénomancien	marine	0.49	140	0.23	235
Albien	marine	0.25	212	0.22	237
Fontainebleau	marine et dunaire	0.16	114	0.13	120
Landes	marine et éolienne	0.12	294	0.11	305
Sissonne	marine et éolienne	0.11	137	0.09	148
Sable dunaire	marine et dunaire	0.11	314	0.10	317

Au contraire, les matériaux d'origine éolienne ont des distributions granulométriques nettement moins étalées. Les indices d'hétérométrie Hq (2-2000) sont tous proches de 0.11 et pratiquement équivalents à ceux définis entre 50 et 2000 μm , ce qui indique des teneurs en éléments inférieurs à 50 μm très faibles. Les valeurs de médiane, différentes d'un matériau à l'autre, paraissent indépendantes du type de transport.

En définitive, cette comparaison révèle que les matériaux sableux des deux parcelles s'apparentent par leurs formes et leurs distributions granulométriques, à de nombreux autres matériaux issus de formations géologiques différentes.

III - LES PRATIQUES CULTURALES

3.1 - GENERALITES SUR LES PARCELLES ET LES EXPLOITATIONS

3.11 - *Bou*

La parcelle de Bou appartient à une exploitation de 22 ha, où 50 % des terres en moyenne sont destinées aux légumes et en particulier aux pommes de terre.

La parcelle où a lieu le suivi, fut régulièrement cultivée en légumes jusqu'en 1986 :

- 1980 à 1983 : pommes de terre,
- 1984 : choux,
- 1985 : pommes de terre.

Aucun amendement calcaire ou organique n'est apporté régulièrement au sol.

L'agriculteur déclare observer une dégradation physique de cette parcelle depuis 3 à 4 ans. Elle se manifeste par un développement des zones de flaquage dans les dépressions, et de moins bonnes conditions de travail du sol. Les temps de ressuyage varient de 3 à 15 jours suivant la situation dans la parcelle. Ces problèmes ont conduit l'agriculteur à l'abandon de la culture de pommes de terre.

3.12 - *Saint-Benoit*

La parcelle appartient à une exploitation importante de 126 ha où 60 % des terres en moyenne, sont cultivées en légume. Quatorze personnes sont employées aux travaux des champs et au conditionnement. L'agriculteur implante préférentiellement les cultures légumières sur les parcelles les plus sableuses.

La parcelle expérimentale située à proximité des habitations peut être facilement irriguée. Ainsi du fait de sa texture, elle est régulièrement cultivée en légumes (en quinze ans, une seule céréale).

Les antécédents culturels des trois dernières années sont les suivants :

- 1983 : salade,
- 1984 : blé,
- 1985 : carotte et navet.

Des amendements organiques sont apportés à chaque culture et des amendements calcaires en moyenne tous les 2 ans.

Tableau 6 - Itinéraires cultureux et caractéristiques techniques des outils utilisés.

Parcelle de Bou								
	Date d'intervention	Largeur outil	Hp % 0-20 cm	Tracteur				
				Puissance CH	Pression gonflage bar	Largeur pneu pouce	Nombre roues motrices	Présence de roues jumelées
Labour	Déc. 85	2 socs 14 p	/	65	1,9	14	4	-
Hersage	06/05/86	4,0 m	13	65	1,9	14 + 12	4	+
Passage engrais	06/05/86	6 x 2 m	13	65	1,9	14 + 12	4	+
Passage vibro	09/05/86	3 m	14	65	1,9	14 + 12	4	+
Semis	10/05/86	2,4 m 4 rangs	14	45	1,7	10	2	-
Trait ^t herbicide	13/05/86	6 x 2 m	14	45	1,7	10	2	-
Passage vibro	07/06/86	3 m	11	45	1,7	7	2	-
Récolte	06/10/86	3,5 m	7	/	/	/	/	-
Parcelle de St Benoit								
Déchaumage au cover crop	07/05/86	2 m	16	120	1,8	18	4	-
Labour	11/06/86	4 socs 16p	10	120	1,8	18	4	-
Passage vibro- culteur	11/06/86	3,40 m	10	60	1,8	18+14	4	+
Passage Rota- vator	11/06/86	1,60 m	10	60	1,8	18	4	-
Plantation	11/06/86	1,60 m 4 rangs	10	45	1,5	14	2	-
Récolte (remorque 7t.)	19/07/86	/	10	60	1,8	18	4	-

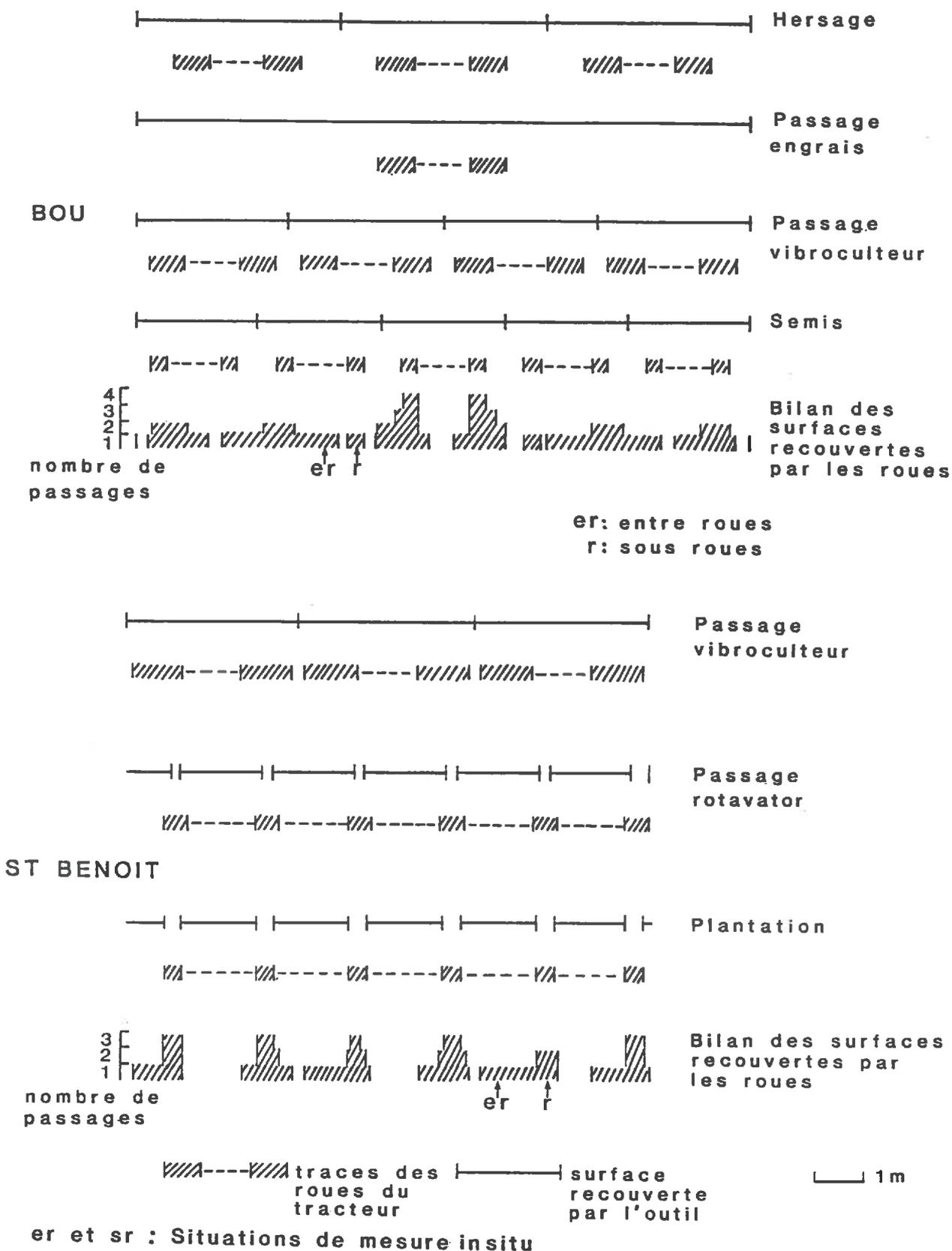


Figure 4 : Représentation des passages de roues de tracteur entre les labours et les semis ou plantation.

L'agriculteur juge cette parcelle favorablement, tant du point de vue de la qualité des récoltes, que de la facilité pour la travailler. Il considère une amélioration des conditions de travail du sol et des rendements, depuis la réalisation d'un drainage et les pratiques régulières de sous-solage. Il insiste également sur la nécessité, pour ces sols, d'apporter régulièrement des amendements.

3.2 - ITINERAIRES CULTURAUX PENDANT LE SUIVI AU CHAMP

Les cultures implantées pendant l'étude expérimentale sont un tournesol à Bou et une salade à St Benoit. Le tableau 6 synthétise les caractéristiques techniques des outils utilisés et les teneurs en eau (0-20 cm) durant les interventions.

Les itinéraires cultureux sont différents entre les deux contextes.

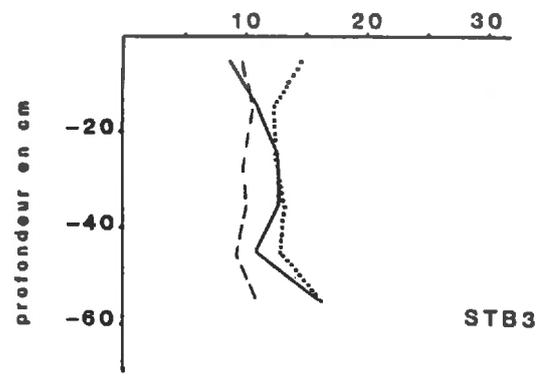
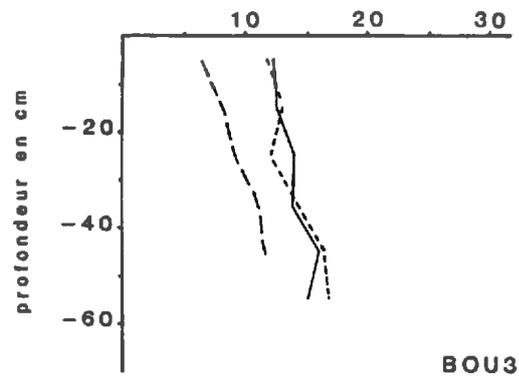
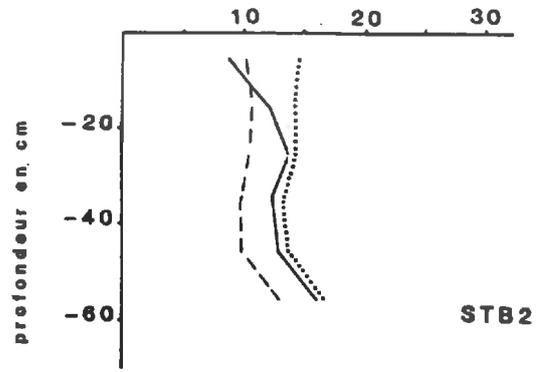
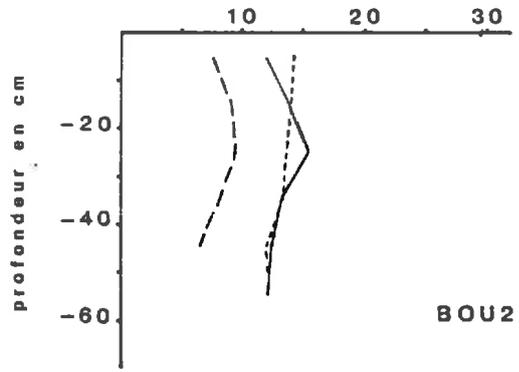
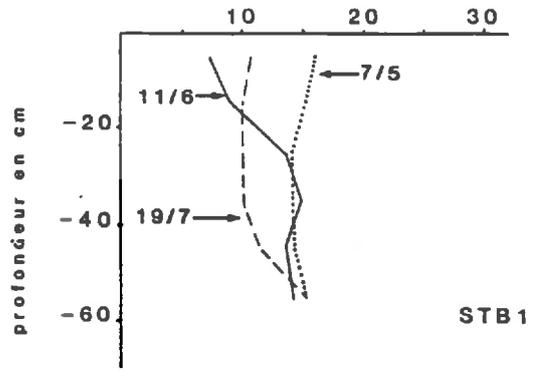
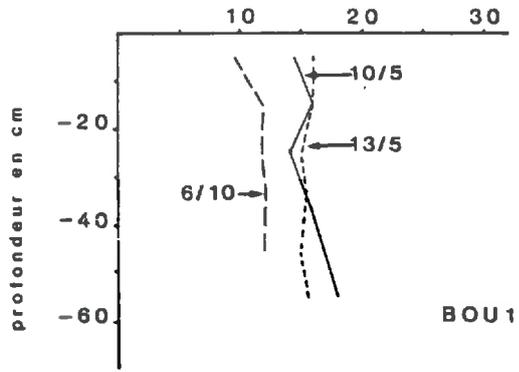
A Bou, quatre interventions sont nécessaires pour la mise en culture. Les largeurs d'outils étant très hétérogènes, le taux de recouvrement de la parcelle par les passages de roues est très important (80 % de la surface entre le hersage et le semis), (fig. 4). Il est également le résultat de l'utilisation de roues jumelées. Toutefois suivant la localisation, on constate un nombre cumulé de passages de roues de tracteur différent. Les points er et sr de la figure 4 représentent les situations de mesure implantées après semis sous roues (sr) et en entre-roues (er). Les teneurs en eau à la préparation de la parcelle sont des valeurs moyennes mesurées pour chacune des situations où a lieu le suivi (fig. 5). Elles atteignent 19 % (exprimé en pourcentage massique) dans les zones les plus humides de la parcelle (dépressions). Les teneurs en eau sont beaucoup plus faibles à la date de récolte.

A Saint-Benoit, à l'exception du déchaumage, toutes les interventions avant plantation sont cumulées le même jour. Les salades sont plantées manuellement suivant quatre rangs, sur des bandes de 1,60 m de large. L'horizon cultivé est alors remanié en terre fine sur 15 cm. Le taux de recouvrement de la parcelle par les passages de roues est inférieur à celui de Bou. La salade est régulièrement irriguée : au total, 75 mm d'eau sont apportés en 4 semaines, l'arrêt de l'irrigation étant le 7 juillet. Les teneurs en eau à la préparation de la parcelle ($\approx 10\%$) sont équivalentes à celles mesurées à la récolte (fig. 5). Cette dernière est réalisée manuellement, les ouvriers chargeant directement les salades sur les remorques.

3.3 - CONCLUSION

Les pratiques culturelles à Bou et St Benoit apparaissent convergentes pour les points suivants :

- de nombreux passages d'outils sont nécessaires pour préparer les parcelles. Ils conduisent à des taux élevés de recouvrement des surfaces par les roues de tracteur. Nous devons également considérer les conséquences du labour qui, du fait des largeurs de charrue, conduit à un recouvrement important de l'horizon sous cultural par les roues de raie.



— avant semis*
 traitement herbicide
 - - - récolte*

..... déchaumage
 — labour*
 - - - récolte*

* teneurs en eau au moment des actions dont on mesure les effets

* teneurs en eau au moment des actions dont on mesure les effets

Figure 5 : Profils de teneurs en eau à Bou et St Benoit.

- les matériels utilisés dépassent largement les puissances exigées par ce type de sol. En outre, les pneumatiques sont maintenus à des pressions assez élevées (tableau 6).

Elles sont également différentes à propos des faits suivants :

- A Saint-Benoit, l'agriculteur apporte régulièrement des amendements organiques et calcaires, contrairement à celui de Bou. Il est donc normal de déterminer une teneur en matière organique plus élevée à Saint-Benoit.

- sur la seconde parcelle, des sous-solages sont régulièrement effectués contrairement à Bou.

- Les conditions de teneur en eau lors des travaux culturaux sont différentes entre les deux milieux. Nous devons cependant avant toute comparaison, connaître les valeurs correspondantes de potentiel énergétique de l'eau.

CONCLUSIONS

Cette première partie fut consacrée à la description des caractéristiques analytiques (textures, taux de matière organique) et des pratiques culturales des deux parcelles. Les points importants qui ressortent de cette présentation sont les suivants :

- Les constitutions des sols de Bou et de Saint-Benoit au niveau des horizons cultivés sont relativement proches. Elles apparaissent analogues à celles de matériaux provenant d'autres formations sableuses, ayant subi un transport par l'eau. Les deux parcelles présentent de fortes variabilités texturales superficielles, mises en évidence en comparant les données analytiques de chacune des situations intra-parcellaires où fut réalisé le suivi au champ. Les différences correspondent essentiellement à des taux en éléments inférieurs à 50 μm plus ou moins élevés, les distributions des tailles des éléments du squelette demeurant pratiquement constantes.

- La seule différence importante entre les horizons travaillés des deux parcelles concerne le taux en matière organique, ce dernier étant beaucoup plus élevé à Saint-Benoit. En outre, nous avons constaté des traces d'activité biologique beaucoup plus nombreuses dans le cas de cette dernière parcelle.

- En profondeur (au dessous de 35 à 40 cm), les textures se différencient nettement entre les sols de Bou et Saint-Benoit : sable pauvre en argile à Bou ; sable argileux ou argile sableuse à Saint-Benoit.

- Les mises en culture pour les deux parcelles nécessitent de nombreuses interventions conduisant à un taux élevé de recouvrement des surfaces par les roues de tracteur. En outre, les engins utilisés sont très souvent de taille et de masse importantes, équipés de pneumatiques gonflés à des pressions élevées.

- Les pratiques d'amendement sont très différentes entre les deux parcelles : nombreuses à Saint-Benoit et rares à Bou. Cela explique les différences de teneurs en matière organique entre les horizons cultivés des deux parcelles.

IIème PARTIE

EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES SOLS
EN FONCTION DES TRAVAUX CULTURAUX

INTRODUCTION

Cette deuxième partie décrit les effets des travaux culturaux, et en particulier des compactages, sur les caractéristiques physiques des sols des deux parcelles expérimentales. Les résultats concernent chacune des situations intra-parcellaires présentées dans la première partie (chapitre II). Nous procéderons en deux étapes :

- Dans la première étape, nous décrirons les conséquences des compactages et des travaux culturaux sur :

- Les volumes apparents mesurés in situ
- Les composantes de la porosité.
- Les distributions des tailles des pores (comparaisons de l'organisation du système poral des mottes tassées et non tassées).

- Dans la seconde étape, nous observerons les conséquences des modifications de l'espace poral consécutives au compactage, sur les propriétés de rétention, de stockage et de transfert en eau. Plus précisément, nous examinerons les conductivités hydrauliques en condition saturée et les relations potentiel matriciel-teneur en eau de matériaux compactés ou non compactés.

A chacune de ces étapes, nous serons conduits à discuter de l'influence des caractéristiques granulométriques sur les propriétés physiques mesurées.

I - ANALYSE QUANTITATIVE DES POROSITES

Ce chapitre décrit les effets des travaux culturaux, et en particulier des compactages, sur les volumes apparents mesurés in situ, puis sur chacune des composantes de la porosité.

1.1 - PROFILS POROSIMETRIQUES

On appelle profil porosimétrique l'expression des volumes apparents en fonction des profondeurs.

Dans le but d'observer les effets des travaux culturaux et notamment des compactages sur les valeurs de volume apparent, les mesures sont établies à trois dates* des itinéraires culturaux :

- à l'état initial (avant reprise du labour à Bou ; avant labour à Saint-Benoit),
- après mise en place des cultures (tournesol à Bou ; salade à Saint-Benoit),
- après récolte.

Les mesures, établies à l'état initial sur chacune des parcelles, constituent des valeurs de référence pour permettre des comparaisons avec les mesures ultérieures. Après mise en place des cultures, les profils sont réalisés en entre-roues (ER) et sous passages de roues (SR)**. Les mesures permettent d'observer les effets du travail du sol (comparaison état initial - état après semis en entre-roues) et du compactage par les roues de tracteur (comparaison des situations ER et SR). Enfin, la dernière série de mesures après récolte a pour objectif de rendre compte des évolutions dues aux compactages liées aux pluies et aux passages d'engins lors de la récolte. Les profils sont implantés dans les mêmes situations ER et SR à Bou. À Saint-Benoit, les mesures ne concernent que la situation ER.

Les profils porosimétriques sont déterminés à l'aide d'une double sonde gammamétrique. Nous présenterons simplement les résultats acquis, le principe de mesure et le protocole expérimental étant rapportés en annexe II.1.

Dans un premier paragraphe, nous observerons l'évolution des volumes apparents avec les profondeurs (profils porosimétriques). Puis, dans un second paragraphe, nous examinerons les valeurs de taux de saturation correspondantes.

* les dates précises figurent en annexe III (tableau A.1).

**les situations des contextes SR et ER sont reportées sur la figure 4.

1.11 - *Evolution des volumes apparents avec les profondeurs*

a) Expression des résultats

De manière à pouvoir établir des bilans de volume entre différentes situations, nous devons disposer d'une variable additive, c'est-à-dire possédant un dénominateur constant. Deux modes d'expression de la porosité peuvent être utilisés (GUERIF, 1988a) :

- le volume apparent, équivalent à l'inverse de la densité apparente,
- l'indice des vides égal au rapport entre le volume des vides et le volume de solide. Ce dernier vaut $1/2.650$ puisque les densités solides déterminées au pycnomètre à gaz (annexe II.1) n'apparaissent pas significativement différentes entre les échantillons prélevés dans chacune des situations intra-parcellaires, la valeur moyenne étant de 2.650 ± 0.008 .

Du fait de cette égalité des volumes de solide, l'utilisation de l'indice des vides n'est plus justifiée et c'est pour cette raison que nous exprimerons, dans l'ensemble du mémoire, la porosité sous forme de volume apparent. Il en demeure pas moins que le paramètre "indice des vides", qui est un nombre sans dimension, possède l'avantage de permettre une comparaison avec des matériaux de constitution différente aux nôtres.

b) Résultats et interprétations

De manière à simplifier la présentation des résultats, nous procéderons en deux étapes.

- dans la première étape, nous examinerons les résultats concernant seulement deux situations, la première qualifiée de sablo-argileuse (SA), correspondant à Bou.1, et la seconde qualifiée de sableuse (S), correspondant à Bou.2.

- dans la seconde étape, les résultats obtenus dans les deux contextes précédents seront comparés à ceux acquis dans l'ensemble des situations, c'est-à-dire Bou.3 et Saint-Benoit 1, 2 et 3. Cette étape permettra de valider et de généraliser les premiers résultats.

. volumes apparents des deux situations S et SA (fig. 6)

- Au sein de l'horizon travaillé, les façons culturales entre l'état initial et le semis ne provoquent pas de modification importante des valeurs de volume apparent (fig. 6 a, c).

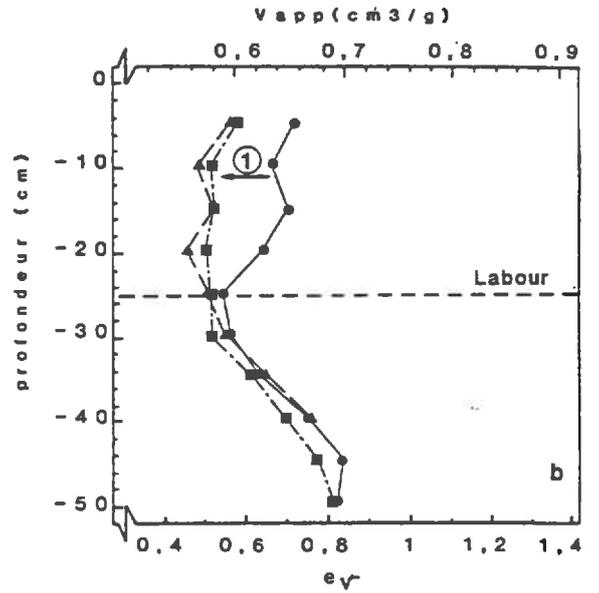
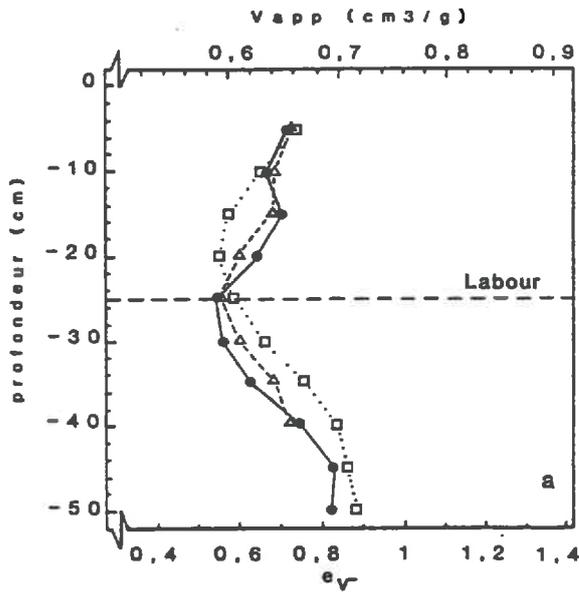
- La limite inférieure de l'horizon travaillé apparaît très nettement dans les deux situations à 25 cm de profondeur. Cette profondeur est d'ailleurs celle que nous avons déterminée lors de l'observation de profils culturaux (1ère partie, chapitre 2).

- Au delà, il y a similitude des profils de volumes apparents dans les deux situations S et SA avec un minimum entre 25 et 35 cm correspondant à un horizon de forte compacité. Deux facteurs peuvent expliquer son origine :

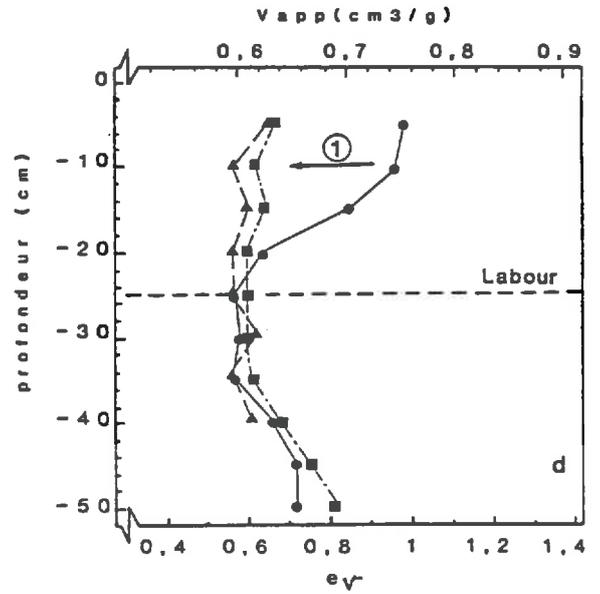
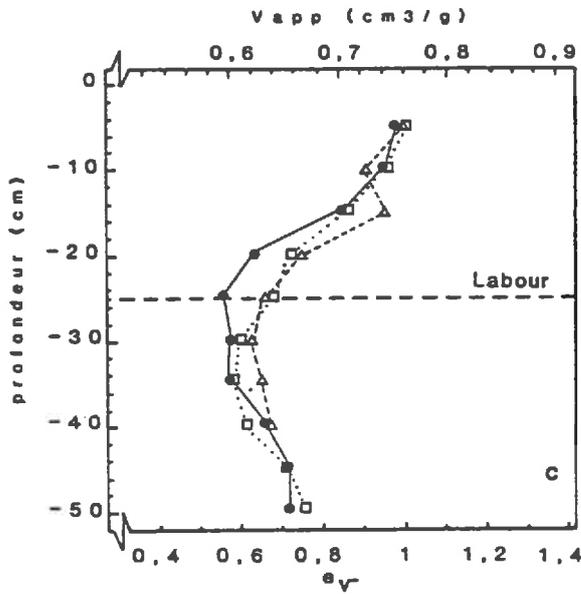
ENTRE ROUES

SOUS ROUES

Sablo-argileux
BOU 1



Sableux
BOU 2



●—● état initial

- entre roues (après semis)
- △--△ entre roues (après récolte)
- sous roues (après semis)
- ▲—▲ sous roues (après récolte)

Figure 6 : Evolution des volumes apparents totaux avec les profondeurs en situation sablo-argileuse et sableuse.

- 1 - **Le tassement mécanique.** Les passages successifs et cumulés du tracteur, en surface et surtout en fond de raie de labour, peuvent provoquer une réduction voire une disparition du volume poral structural (SOANE et al., 1986 ; LAMERS et al., 1986). Nous savons par ailleurs que dans le cas de matériau sableux, le compartiment textural peut être également modifié sous les effets du compactage (GUERIF, 1988a ; FIES et ZIMMER, 1982). Le volume apparent sera donc réduit du fait de ces modifications concernant les deux compartiments.
- 2 - **Les variations granulométriques.** Dans le cas de matériaux sableux, l'enrichissement en éléments fins conduit à une diminution de la porosité texturale (FIES et STENGEL, 1981 ; CHRETIEN, 1986) et en définitive de la porosité.

Or, les analyses granulométriques reportées dans le tableau 3 (Ière partie) montrent que dans les deux contextes (S et SA) les matériaux sont de constitutions similaires jusqu'à 50 cm de profondeur. Il paraît donc probable que cette diminution des volumes apparents provient essentiellement d'un tassement.

- Les profils établis sous passages de roues (fig. 6 b, d), dans les deux contextes S et SA, montrent que le compactage par les roues de tracteur provoque une réduction très importante (soulignée par la flèche n° 1) des volumes apparents des horizons cultivés. Les valeurs déterminées sont alors équivalentes à celles mesurées dans l'horizon dense sous la couche travaillée. Un seul passage d'engin, correspondant à celui du semis (figure 4, Bou), suffit à produire ces tassements, ce qui souligne la fragilité de ces sols dans les conditions existant au moment du travail.

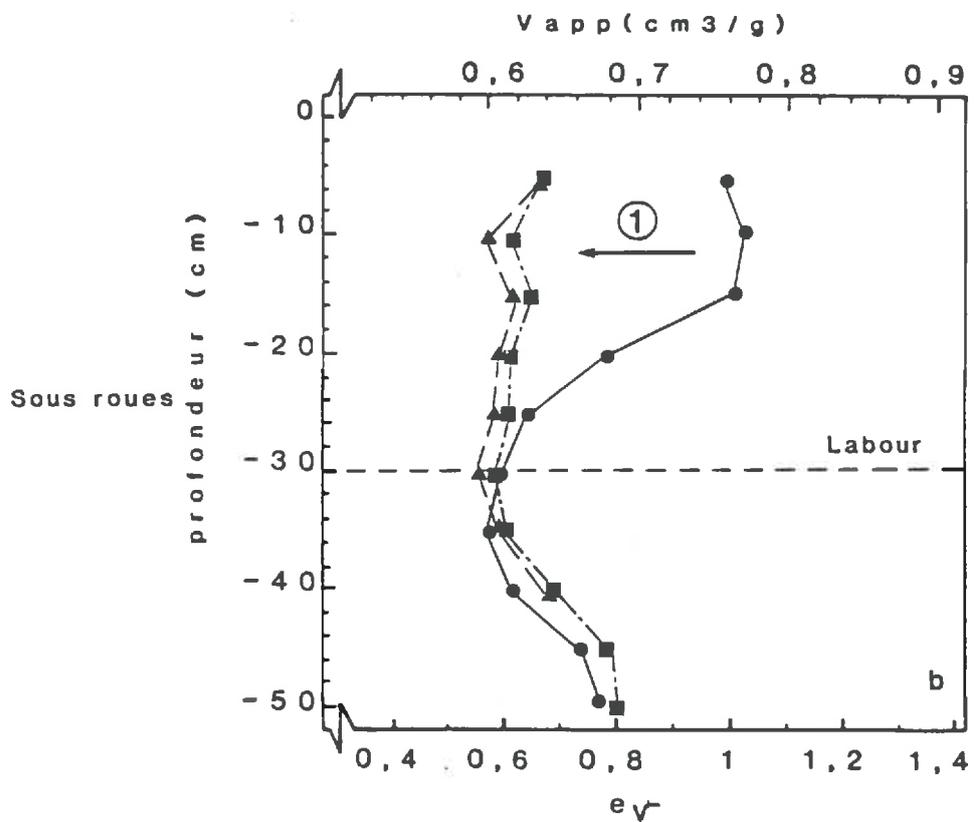
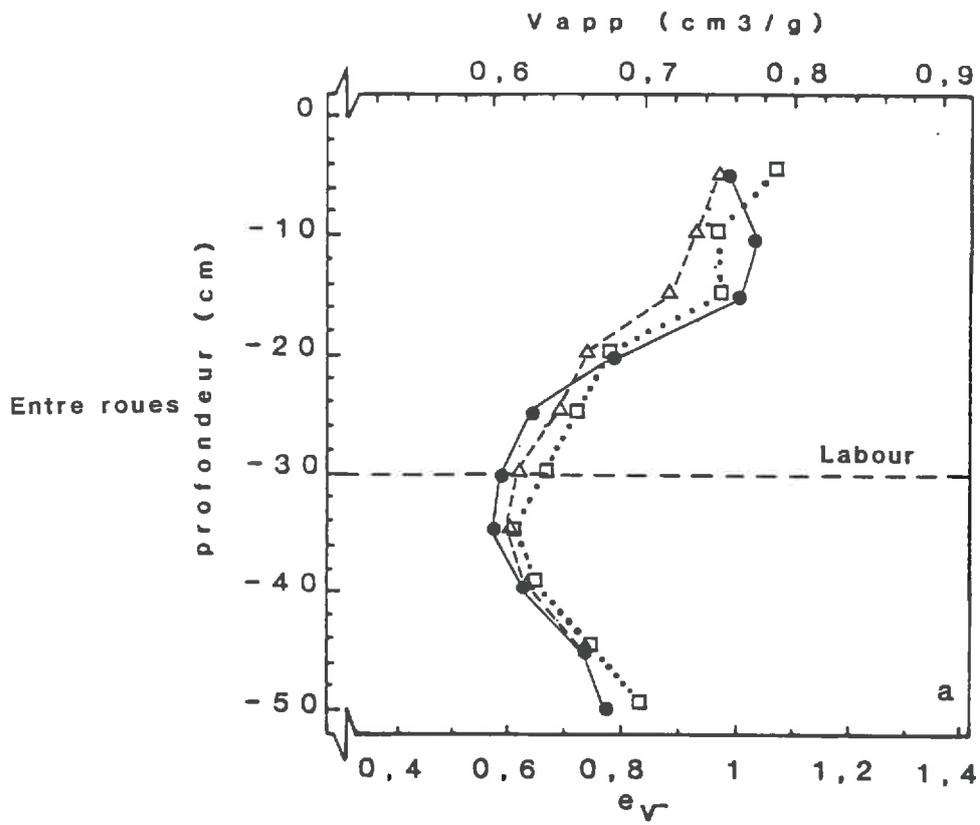
- Les volumes apparents mesurés après récolte en entre-roues et sous passages de roues, sont dans les deux contextes (S et SA) analogues à ceux déterminés après semis. Il n'y a donc pas d'effet marqué de l'action des pluies et du compactage lors de la récolte. Nous pouvons dans ce dernier cas, faire l'hypothèse que les bonnes conditions hydriques du sol au moment de la récolte ont limité les effets du compactage.

- D'une manière générale, et quel que soit le profil, les volumes apparents en contexte SA sont plus réduits qu'en contexte S. Ce constat est particulièrement net dans l'horizon tassé sous labour ou dans la couche travaillée au-dessous des passages de roues. Nous pouvons donc supposer que la différence de constitution entre les deux milieux conduit à une variation du volume poral du compartiment textural. Ceci devra être confirmé lors de l'analyse ultérieure des composantes de la porosité.

. cas des autres situations intra-parcellaires.

Bou.3 (fig. 7)

Cette situation a des caractéristiques granulométriques très proches de Bou.2, c'est-à-dire du contexte S précédent (tableau 3).



●—● état initial

□---□ entre roues (après semis)
 △--△ entre roues (après récolte)
 ■---■ sous roues (après semis)
 ▲---▲ sous roues (après récolte)

Figure 7 : Evolution des volumes apparents totaux avec les profondeurs en Bou.3.

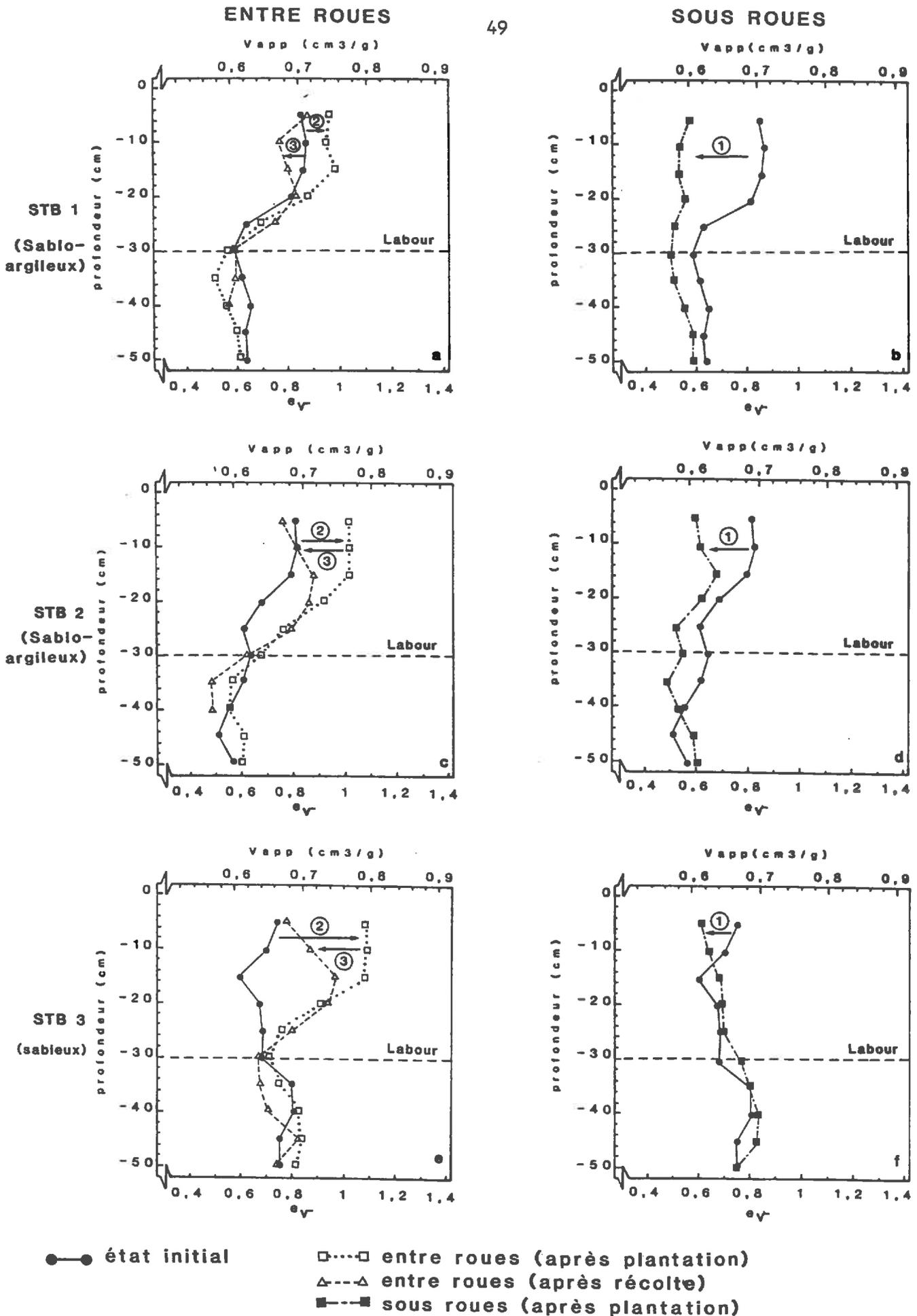


Figure 8 : Evolution des volumes apparents totaux avec les profondeurs à St Benoit.

On observe des profils de volumes apparents tout à fait analogues entre les deux contextes, avec simplement une profondeur d'horizon travaillé apparemment légèrement supérieure (30 cm). Nous pouvons donc considérer que cette situation intra-parcellaire a des caractéristiques identiques à celles décrites dans le cas de la situation S.

Les situations intra-parcellaires de Saint-Benoit (fig. 8)

- La limite inférieure de l'horizon travaillé apparaît très nettement, comme dans les deux précédents contextes. Elle se situe à une profondeur légèrement supérieure (30 cm) comme nous l'avions constaté précédemment (chapitre 2, 1ère partie).

- A la différence des contextes S et SA, nous n'observons pas de manière distincte un horizon à forte compacité. Seule une légère augmentation des volumes apparents apparaît au-dessous de 40 cm en STB.1 et STB.2. Cependant, si nous nous référons aux données granulométriques décrites dans la première partie (tableau 4), nous constatons, à la différence des contextes S et SA de Bou, des variations de texture importantes dans les cinquantes premiers centimètres. En STB.1 et 2, on observe un enrichissement en fractions inférieures à 50 μm au dessous de 30 cm. Nous pouvons donc supposer que l'absence d'augmentation importante des volumes apparents au dessous de 40 cm de profondeur, ce qui soulignerait la présence de l'horizon tassé, est due à une réduction du volume poral textural liée à l'augmentation des teneurs en argile et limon. Il demeure toutefois très probable qu'un tassement existe au dessous de l'horizon travaillé même si sa manifestation n'apparaît pas distinctement. En STB.3 au contraire, l'augmentation entre 35 et 50 cm des volumes apparents provient probablement essentiellement de valeurs plus élevées de volume poral textural, puisque un horizon très sableux est intercalé entre 30 et 60 cm (tableau 4).

- Le travail du sol entre l'état initial et après plantation en entre-roues (fig. 8 a, c, e), a provoqué une augmentation importante des volumes apparents de l'horizon travaillé (symbolisée par la flèche n° 2). Ce constat met en évidence les effets de travaux culturaux différents à Bou et Saint-Benoit. Deux points sont à signaler :

1 - L'état initial est différent à Saint-Benoit. Il correspond à un horizon superficiel retourné sur 15 cm par un passage de Cover Crop (outil à disque). En conséquence, il est normal d'y constater globalement, des volumes apparents à l'état initial plus réduits qu'à Bou où la parcelle est labourée.

2 - Les techniques de préparation avant plantation sont différentes. Il est probable que le retournement au rotavator (voir 1ère partie, chapitre 3) a généré une porosité en entre-roues plus importante ici que dans les milieux S et SA de Bou.

- Comme dans les deux précédentes situations de Bou (S et SA), les passages de roues (fig. 8 b, d, f) dus au passage de rotavator et aux travaux de plantation (voir 1ère partie, chapitre 3) ont provoqué une diminution très

importante des volumes apparents dans l'horizon cultivé (flèche n° 1). Les granulométries étant proches (Bou.1-STB.1 ; Bou.3-STB.3), nous pouvons en déduire que les taux de matière organique, pourtant beaucoup plus élevés à Saint-Benoit, n'ont pas d'effet marqué sur les valeurs de compacité atteintes dans ces horizons cultivés, du moins dans les conditions hydriques constatées au moment des interventions.

- Il apparaît également, qu'indépendamment du contexte cultural, les volumes apparents minimaux mesurés dans les horizons travaillés sous les passages de roues, sont très proches dans les situations à granulométries similaires (Bou.1-STB.1 ; Bou.3-STB.3). Nous pouvons donc estimer que dans ces contextes tassés (SR), les valeurs de volumes apparents dépendent essentiellement des textures.

- Les trois situations de Saint-Benoit montrent une différence significative entre les valeurs de volume apparent mesurées en entre-roues après plantation et celles obtenues après récolte (fig. 8 a, c, e ; la flèche n° 3). Trois hypothèses peuvent être formulées pour expliquer ce phénomène non observé pour les situations de Bou :

1 - Les récoltes sont réalisées dans des conditions hydriques plus défavorables qu'à Bou. Cet aspect devra être discuté dans un prochain chapitre, lors de l'analyse des potentiels hydriques aux dates d'intervention.

2 - L'irrigation très importante de la salade à Saint-Benoit a pu provoquer un tassement. Cette hypothèse est probable dans la mesure où de tels effets furent déjà constatés pour des matériaux sableux (COULON, 1985 ; RAHELIARISOA, 1986).

3 - Les valeurs de volume apparent étaient beaucoup plus élevées à Saint Benoit après travail du sol (flèche n°2).

1.12 - Evolution correspondante des taux de saturation

L'objectif de ce paragraphe est de montrer les effets des variations de compacité sur les valeurs de taux de saturation. Les évolutions observées entre les dates de mesure ne seront pas discutées puisqu'elles sont liées aux conditions climatiques.

Les teneurs en eau sont mesurées aux mêmes dates que les volumes apparents. Elles sont déterminées par gravimétrie sur les matériaux extraits lors du perçage des trous pour les tubes de la double sonde (voir annexe II. 12).

a) Expression des résultats

De manière à considérer l'influence des variations de compacité, la quantité d'eau dans les milieux est exprimée en taux de saturation, c'est-à-dire sous le rapport :

$$\frac{V_{\text{eau}}}{V_{\text{vide}}} = \frac{H_v}{n}$$

H_v : teneur en eau volumique
 n : porosité

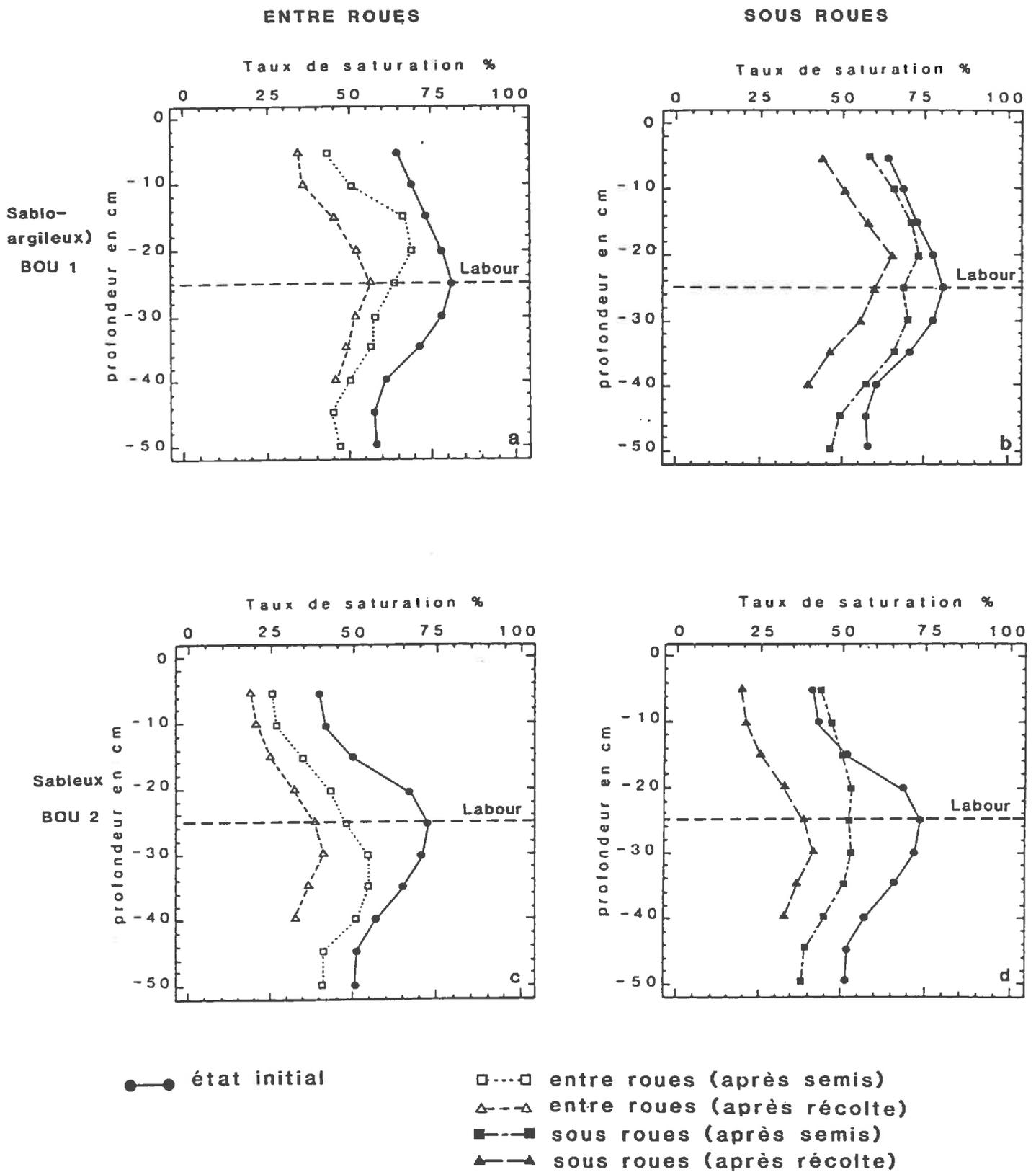


Figure 9 : Evolution des taux de saturation avec les profondeurs en situation sablo-argileuse et sableuse.

b) Résultats et interprétations

Dans le but de simplifier la présentation, nous reprendrons la même chronologie que précédemment, c'est-à-dire que nous présenterons tout d'abord les résultats concernant les contextes S et SA de Bou pour les confronter ensuite à ceux obtenus sur les autres situations intra-parcellaires de Bou et Saint-Benoit.

. Taux de saturation des deux situations S et SA (fig. 9)

- Effets de l'horizon à forte compacité

Les taux de saturation sont relativement plus importants en limite inférieure de l'horizon travaillé et au niveau de la couche compactée. Ils sont par ailleurs très importants à l'état initial : 80 et 75 % en situations SA et S. Aux autres dates de mesures, les valeurs diminuent dans l'ensemble des profils, mais restent néanmoins plus importantes à la base de l'horizon cultivé en contexte SA et dans l'horizon tassé sous labour en contexte S.

Les augmentations des taux de saturation proviennent de deux facteurs principaux :

1 - **Les augmentations de compacité.** A chaque réduction du volume poral correspond, par définition, une augmentation du taux de saturation.

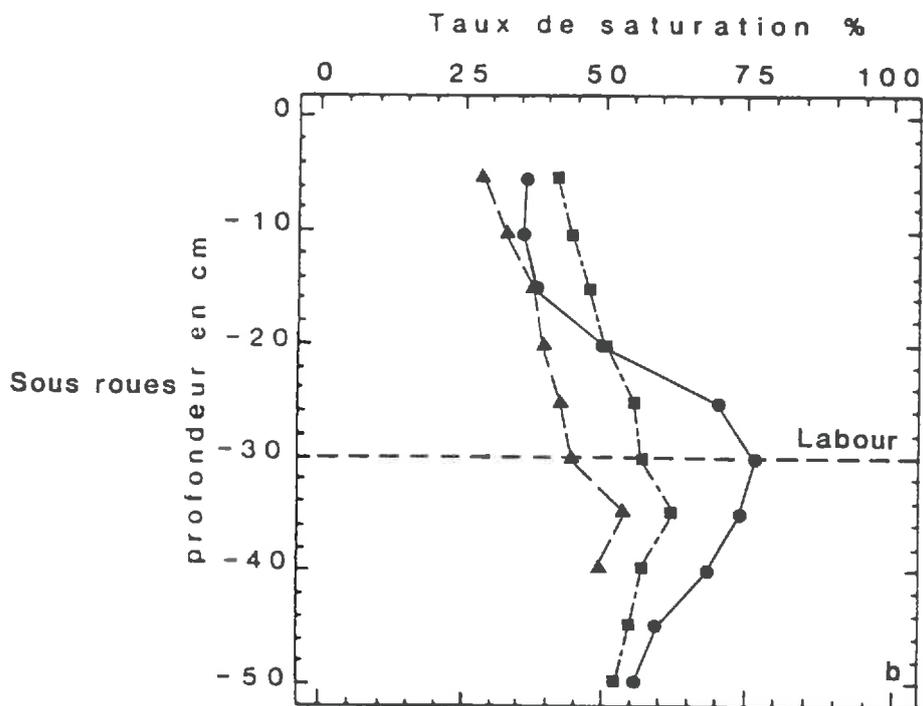
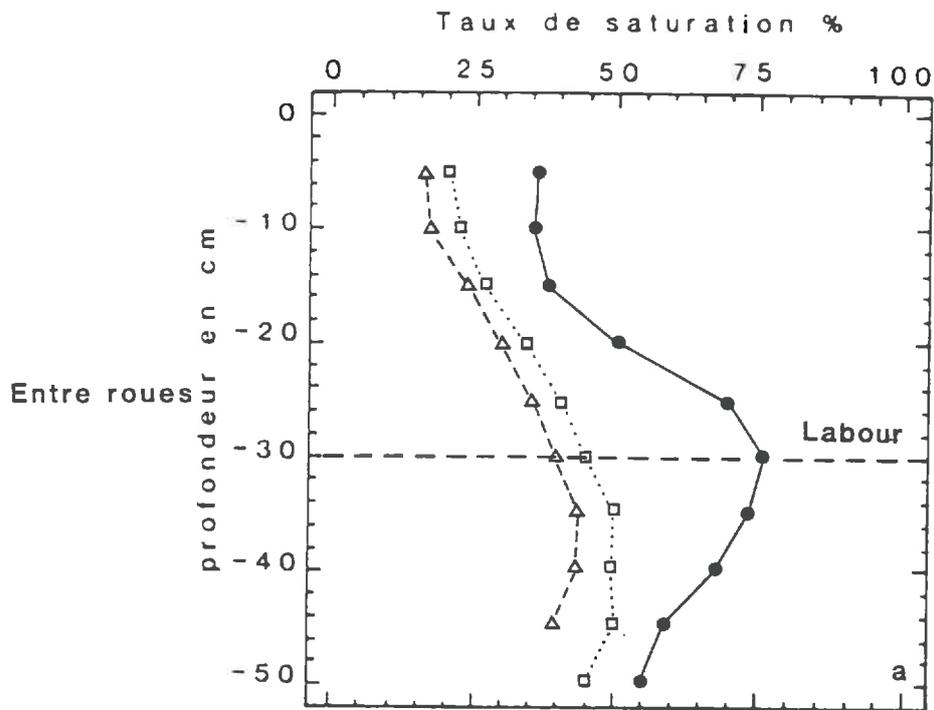
2 - **Les modifications des systèmes poreux.** Le tassement modifie la distribution des tailles des pores et par conséquent les capacités de transfert et de rétention des milieux. Ces modifications peuvent donc conduire à des teneurs en eau différentes entre milieux tassés et non tassés.

De fait, l'examen des courbes de volumes apparents (fig. 6) montre que l'importance du taux de saturation est liée essentiellement au degré de compacité. Toutefois, au moins à l'état initial, les taux de saturation sont plus élevés juste au dessus de la couche tassée située à 25 cm de profondeur. Nous pouvons donc supposer que cela est du à une limitation des capacités de transfert hydrique, entraînant une saturation plus élevée à l'interface horizon travaillé-horizon dense.

- Effets des passages de roues

Les taux de saturation mesurés sous les passages de roues (fig. 9 b, d) sont toujours plus importants que ceux déterminés aux mêmes dates en entre-roues (fig. 9 a, c). Là encore, le tassement peut en être la cause.

Mais nous pouvons également supposer, comme précédemment, que les teneurs en eau sont plus importantes au niveau des traces de roues du fait des modifications des caractéristiques de l'espace poral des sols.



●—● état initial

□---□ entre roues (après semis)
 △--△ entre roues (après récolte)
 ■---■ sous roues (après semis)
 ▲--▲ sous roues (après récolte)

Figure 10 : Evolution des taux de saturation avec les profondeurs en Bou.3.

ENTRE ROUES

SOUS ROUES

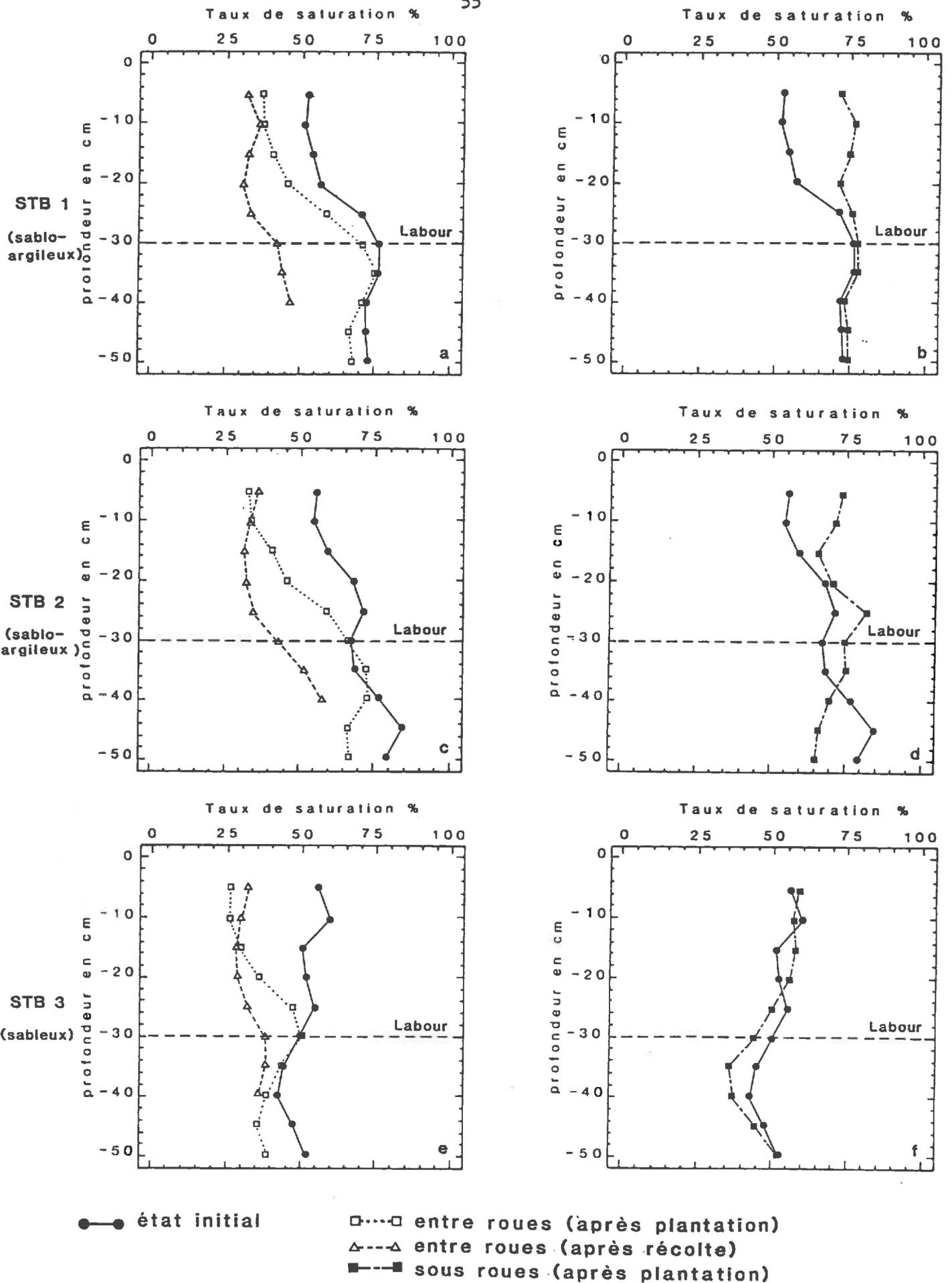


Figure 11 : Evolution des taux de saturation avec les profondeurs à St Benoit.

Enfin, l'enracinement différent entre milieu tassé et non tassé pourrait constituer un autre facteur d'explication des différences de taux de saturation entre les situations ER et SR. Toutefois, le rôle de l'enracinement n'est pas à considérer aux périodes de mesure des teneurs en eau (après semis ou récolte).

- *Effet de la texture*

La situation SA est caractérisée par des taux de saturation plus élevés que la situation S. Cette propriété est à relier aux différences de compacités constatées entre les deux milieux, mais également aux différences de teneurs en argile (% $Ars_A = 12.4$, % $Ars = 7.8$ %).

. *Cas des autres situations intra-parcellaires*

Ce constat, réalisé pour les deux contextes S et SA, se généralise dans le cas des autres situations intra-parcellaires.

En Bou.3 (fig. 10), les profils de taux de saturation sont très proches de ceux correspondant au contexte S. La seule différence concerne la profondeur d'apparition du maximum de taux de saturation : ici à 30 cm au lieu de 25 cm.

A Saint-Benoit (fig. 11), les augmentations de compacité ont les mêmes conséquences que pour les contextes S et SA, à savoir qu'elles conduisent à des taux de saturation plus élevés.

Les valeurs sont maximales à la base de la couche travaillée (à 30 cm) et sous les passages de roues. Il est à noter les valeurs extrêmement élevées de taux de saturation sous les passages de roues après plantation (fig. 11 b, d, f), par rapport aux situations entre-roues (fig. 11 a, c, e). Il est très probable qu'indépendamment des différences de porosités entre situations ER et SR, ces valeurs sont dues à des teneurs en eau pondérales plus élevées en situation SR. Elles soulignent, par conséquent, les différences de pouvoir "filtrant" entre ces deux situations. Là encore, les effets de l'enracinement de la salade paraissent peu probables à ce stade précoce de développement racinaire.

Enfin, l'effet de la texture demeure valide. Les situations plus riches en éléments inférieurs à 50 μm ont des taux de saturation moyens plus élevés.

1.13 - *Conclusion*

Les mesures de volume apparent et les déterminations de taux de saturation aux différents stades des itinéraires culturaux ont permis d'observer les points suivants :

- Quelle que soit la situation intra-parcellaire, un horizon à

forte compacité existe au dessous de la couche travaillée à Bou et Saint-Benoit. Il correspond à un tassement sur les deux parcelles, mais également à une diminution probable du volume poral textural à Saint-Benoit du fait de l'enrichissement des matériaux en argile et limon en profondeur. L'analyse ultérieure des composantes de la porosité permettra de quantifier chacune de ces sources de variation de volume poral.

- Les milieux sableux sont fragiles. La comparaison des profils de volumes apparents établis en entre-roues et sous passages de roues, révèle qu'un seul passage de tracteur en surface suffit pour porter les volumes apparents des horizons travaillés à des valeurs équivalentes à celles mesurées en profondeur au dessous de cette couche. Ce constat est cohérent avec les observations faites par COULON (1985) et RAHELIARISOA (1986).

- Un effet texture est apparu. Dans toutes les situations riches en éléments inférieurs à 50 μm , les volumes apparents sont plus faibles que dans les situations dites sableuses. Là encore, nous pouvons émettre l'hypothèse d'une différence de valeurs de volume poral textural entre ces deux pôles granulométriques.

- Un effet matière organique sur les valeurs de compacité n'a pu être mis en évidence. Dans des situations granulométriques équivalentes au niveau des horizons cultivés à Bou et Saint-Benoit, les volumes apparents mesurés sous les passages de roues sont équivalents, malgré des rapports Mo/Ar très différents. Nous pouvons donc en déduire que cette différence de teneurs en matière organique ne conduit pas à des valeurs de compacité distinctes, du moins dans les conditions de compactage qui étaient celles des parcelles. Nous devons néanmoins préciser qu'elles étaient les potentiels hydriques au moment des interventions.

- L'augmentation de compacité des milieux a pour conséquence d'élever de manière importante les taux de saturation. Des valeurs extrêmement élevées ont pu être mesurées au niveau des zones tassées ou à la base des couches cultivées, conduisant ainsi à des risques d'anoxie. Ces taux de saturation sont dus non seulement à la diminution du volume poral des milieux, mais également aux modifications de leurs capacités de transfert et de leurs propriétés de rétention, qui peuvent engendrer une augmentation des saturations en eau aux interfaces milieux tassés-non tassés.

1.2 - ANALYSE DES COMPOSANTES DE LA POROSITE

1.21 - Introduction

L'analyse précédente des porosités ne nous permet pas de discuter des valeurs de chacune de ses composantes, et d'examiner plus précisément comment ces dernières évoluent au cours des travaux culturaux. L'évaluation des effets du travail du sol, et notamment du compactage, nécessite d'isoler les propriétés dues à l'assemblage des constituants de celles provenant des actions anthropiques (STENGEL, 1979). Cette même nécessité fut d'ailleurs mise en évidence lors de l'analyse précédente des variations de volumes apparents.

C'est pourquoi nous appliquerons cette démarche analytique dans le but d'évaluer le degré de compacité des sols tassés, c'est-à-dire de voir ce que représente la valeur de volume poral (égal à la différence entre le volume apparent et le volume de solide), par rapport au volume poral textural (déterminé ici sur un échantillon préparé de manière standard). En outre, nous pourrions préciser à quelles échelles d'organisations de l'espace poral, le travail du sol, et surtout le compactage, modifient les valeurs de volume apparent.

Enfin, l'analyse des volumes apparents texturaux permettra de préciser les relations qui existent entre ces variables et les caractéristiques granulométriques.

L'analyse des composantes de la porosité peut comporter d'autres objectifs. Ainsi CHRETIEN (1982, 1986) a pu, à partir de la confrontation de volumes poraux obtenus à différentes échelles (sur échantillons naturels ou remaniés), discuter des évolutions des profils pédologiques.

1.22 - *Protocole expérimental*

L'analyse des composantes de la porosité consiste en une comparaison des valeurs de porosité déterminées sur des échantillons de sol à l'état "naturel" de différents volumes, puis à l'état remanié (CHRETIEN, 1982). Chacune des valeurs mesurées est appelée composante de la porosité.

La porosité structurale n'est donc connue que par différence entre les porosités totale et texturale relatives à un même volume de sol (STENGEL, 1979). La mesure de la porosité structurale exige donc une détermination de la porosité texturale.

Classiquement, l'estimation de la porosité texturale se fait sur un faible volume d'échantillon de manière à augmenter la probabilité d'éliminer de l'échantillon un espace poral grossier lié à l'activité biologique, à la fissuration et aux actions anthropiques (FIES et STENGEL, 1981). Cependant, dans le cas des matériaux sableux, l'organisation des constituants demeure dépendante de "l'histoire du sol" et, par conséquent, ce protocole ne permet pas d'assurer un état de référence lié uniquement à la constitution (et ne permet donc pas non plus la comparaison des porosités texturales de différents échantillons). La seule possibilité était donc "d'effacer" cette "histoire du sol" en remaniant les échantillons selon un protocole standard. Nous avons utilisé celui mis au point par KHEYRABI et MONNIER (1968) pour estimer les volumes apparents texturaux. Le mode opératoire de préparation des pâtes est reporté en annexe II.2.

Les volumes apparents correspondent aux mesures gammamétriques précédentes, mais également aux volumes apparents déterminés sur cylindre (1000 cm³) et sur mottes (10 cm³). Les prélèvements sont tous localisés entre les tubes de la double sonde gammamétrique et ont lieu par conséquent aux mêmes dates (tableau A.1, annexe III). Cette démarche permet de réduire progressivement la maille de mesure, 30 cm en gammamétrie, 13.5 cm sur cylindre, 2 à 3 cm sur motte. Les principes de mesure des volumes apparents sur cylindre, sur motte et sur pâte texturale (matériau remanié) sont développés en annexe II.1.

Une première série d'échantillons est prélevée à l'état initial (INI) entre 0-10 cm et entre 25-35 cm de profondeur. Précisons qu'il s'agit de valeurs moyennes et qu'en réalité les échantillons sont prélevés systématiquement au dessous de la couche travaillée dans la zone qui nous apparaissait être la plus dense. La seconde série est prélevée, après préparation des parcelles, dans la couche cultivée (0-10 cm), sous les passages de roues (SR) et en entre-roues (ER).

De manière à mieux observer à quel niveau d'organisation de l'espace poral les volumes apparents sont modifiés par le travail du sol et le compactage, nous avons subdivisé le compartiment structural en deux sous-compartiments : intra- et interpédique. Nous avons donc repris le formalisme proposé par CHRETIEN (1982) considérant le ped* comme une unité structurale équivalente à la motte. On appelle porosité intrapédique**, la différence entre la porosité sur mottes humides et la porosité texturale, donc une porosité structurale intramottière. La porosité interpédique correspond à la différence entre la porosité gammamétrique ou sur cylindre et la porosité sur motte, donc à une porosité structurale due à l'arrangement entre mottes.

1.23 - Résultats et interprétations

Nous présenterons tout d'abord les résultats concernant deux situations intra-parcellaires de Bou (Bou.1 et Bou.2), la première sablo-argileuse (SA) et la seconde sableuse (S).

a) Cas des situations S et SA de Bou

Le tableau 7 rassemble les volumes poraux concernant ces deux échantillons, les volumes apparents correspondants étant reportés en annexe III (tableau A2).

Les volumes poraux des situations S et SA sont nettement plus faibles en milieu compacté c'est-à-dire dans l'horizon sous labour au stade initial (INI 25-35), et sous les passages de roues (SR) après préparation des parcelles, qu'en milieu non compacté (INI 0-10 ; ER 0-10). Ces différences existent quelle que soit la maille de mesure et concernent en particulier les mottes.

Les volumes poraux minimaux mesurés dans les zones compactées et les volumes poraux texturaux sont toujours plus faibles en contexte SA.

* la définition du ped est différente de celle attribuée classiquement en pédologie, puisque la motte obtenue n'est pas une unité morphologique en soi, mais le résultat d'une séparation mécanique.

** à la différence de la définition donnée par CHRETIEN (1982), il s'agit de mottes humides et non de mottes sèches. Les variations de volumes apparents à l'état humide et sec étant négligeables (voir prochain chapitre), nous pouvons considérer les deux définitions équivalentes.

Tableau 7 - Bilans des volumes poreux (V_v) des situations sablo-argileuses et sableuses

$$V_v = V_{\text{apparent}} - V_{\text{solide}} \quad (V_{\text{solide}} = 1/2.65)$$

SITUATIONS	Volumen poreux ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)							
	gamma- métrie (1) $\sigma = \pm 0.01$ à 0.06	cylindre (2) $\sigma = \pm 0.05$	motte (3) $\sigma = \pm 0.012$	pâte (textural) (4) $\sigma = \pm 0.005$	(3)-(4) intra- pédique	(1)-(3) inter- pédique	(2)-(3) inter- pédique	(1)-(4) struc- tural
Sablo-argileuses								
Bou.1 ini 0-10	0.263	0.279	0.231	0.171	0.060	0.032	0.048	0.092
ini 25-35	0.207	0.210	0.173	0.167	0.006	0.034	0.037	0.040
er 0-10	0.270	0.241	0.233	0.171	0.062	0.037	0.008	0.099
sr 0-10	0.202	0.183	0.186	0.171	0.015	0.016	- 0.003	0.031
Sableuses								
Bou.2 ini 0-10	0.372	0.257	0.201	0.192	0.009	0.171	0.056	0.180
ini 25-35	0.217	0.220	0.194	0.188	0.006	0.023	0.026	0.029
er 0-10	0.362	0.296	0.243	0.192	0.051	0.119	0.053	0.170
sr 0-10	0.235	0.221	0.198	0.192	0.006	0.037	0.023	0.043

Tableau 8 - Bilans des volumes des pores des situations intra-parcellaires de Bou et St Benoit

SITUATIONS	Volumen des pores ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)				
	pâte (textural) V_{tex}	intra- pédique $V_{\text{mo}} - V_{\text{tex}}$	inter- pédique $V_{\text{s}} - V_{\text{mo}}$	inter- pédique $V_{\text{cy}} - V_{\text{mo}}$	struc- tural $V_{\text{s}} - V_{\text{tex}}$
Sablo-argileuses					
STB.1 ini 0-10	0.167	0.017	0.145	0.093	0.162
ini 25-35	0.164	- 0.009	0.070	0.021	0.061
er 0-10	0.167	0.044	0.153	0.177	0.197
sr 0-10	0.167	- 0.001	0.043	0.035	0.042
STB.2 ini 0-10	0.183	0.017	0.113	0.093	0.130
ini 25-30	0.170	- 0.009	0.075	0.082	0.066
er 0-10	0.183	0.096	0.110	0.132	0.206
sr 0-10	0.183	0.008	0.040	0.024	0.048
Sableuses					
Bou.3 ini 0-10	0.202	- 0.003	0.185	0.129	0.182
ini 25-35	0.180	0.010	0.030	0.019	0.040
er 0-10	0.202	0.051	0.109	0.036	0.160
sr 0-10	0.202	0.001	0.037	0.006	0.038
STB.3 ini 0-10	0.207	0.016	0.056	0.040	0.072
ini 25-35	0.196	0.023	0.043	0.034	0.066
er 0-10	0.207	0.062	0.158	0.160	0.220
sr 0-10	0.207	0.002	0.029	0.021	0.031

Les volumes poraux intrapédiques sont très faibles dans les situations compactées, les volumes poraux déterminés sur mottes n'étant pas significativement différents de ceux correspondant aux mêmes matériaux remaniés (pâte). C'est le cas également de la situation 0-10 cm (INI) en contexte S.

En ce qui concerne les valeurs de volume poral interpédique, elles apparaissent également très réduites dans les zones tassées. Ceci est particulièrement net en contexte SA sous les passages de roues, où les différences de volumes poraux sur cylindres et mottes peuvent être nulles. En conséquence, les volumes des pores d'origine structurale, c'est-à-dire intra- et interpédique, sont très faibles en milieu compacté et cela quelle que soit la situation granulométrique (SA ou S). Dans ces conditions, les volumes poraux mesurés sont quasiment indépendants des mailles de mesure et sont liés essentiellement aux valeurs de volume apparent textural.

Cependant, les volumes poraux mesurés avec la sonde gammamétrique sont très souvent supérieurs à ceux déterminés sur cylindres. Différentes explications peuvent être apportées. La première est que les mailles de mesure sont différentes entre les deux techniques (30 cm en gammamétrie ; 13.5 cm avec cylindre) et que, par conséquent, une partie des vides structuraux dus à l'action mécanique des outils peut être prise en compte plus facilement par la mesure gammamétrique. La seconde est le biais que peut générer le prélèvement de cylindre. Il est difficile en effet d'éviter, avec ce type de dispositif, un léger tassement lors d'un prélèvement d'échantillon meuble.

b) Cas des autres situations intra-parcellaires

Le tableau 8 fait le bilan des volumes des pores intra- et interpédiques, structuraux et texturaux des autres situations.

Les principales caractéristiques observées dans les deux précédentes situations demeurent valides dans le cas des autres situations intra-parcellaires. Les milieux compactés (INI 25-35 ; SR 0-10) sont donc caractérisés par des volumes poraux intrapédiques très faibles, voire nuls compte tenu des écarts types moyens en STB.1 et STB.2. Nous observons également des volumes intrapédiques très faibles au stade initial (INI 0 - 10 cm) en situations sableuses : STB.3 et surtout Bou.3.

Les volumes poraux interpédiques apparaissent également très réduits dans les contextes tassés. Toutefois, en STB.1 et STB.2, une porosité interpédique ($V_s - V_{motte}$) subsiste dans l'horizon sous labour (INI 25-35). Nous pouvons faire l'hypothèse qu'il existe une macroporosité à l'échelle de l'horizon induite par le travail du sol (décompactage) et absente au niveau des éléments structuraux individualisés (mottes). Cette propriété pourrait être la conséquence des actions de sous-solage menées régulièrement sur cette parcelle (voir 1^{ère} partie, chapitre 3).

Les volumes poraux déterminés en gammamétrie demeurent d'une façon générale plus élevés que ceux mesurés avec les cylindres. Enfin, nous constatons des volumes poraux texturaux d'autant plus faibles que les matériaux sont riches en éléments inférieurs à 50 μm (situations sablo-argileuses).

1.24 - Analyse des variations des volumes apparents texturaux

L'analyse des composantes de la porosité montre que ce sont les situations intra-parcellaires les plus riches en argile ou éléments inférieurs à 50 µm qui présentent les volumes poraux texturaux les plus faibles dans les horizons compactés.

Tableau 9 - Relation entre les volumes apparents texturaux et les caractéristiques analytiques des matériaux

Echantillons	V _{app} cm ³ /g	% Ar	H _q	1/(1+S)	C °/..	C libre °/..
Sablo-argileuses						
Bou.1 0-10	0.548	12.4	0.53	0.21	5.8	1.0
25-35	0.544	13.2	0.53	0.24	7.0	0.6
STB.1 0-10	0.544	12.6	0.58	0.23	10.7	2.1
25-35	0.541	11.2	0.59	0.22	11.2	1.1
STB.2 0-10	0.560	9.7	0.49	0.22	10.6	2.1
25-35	0.547	10.7	0.49	0.20	9.0	1.7
Sableuses						
Bou.2 0-10	0.569	7.8	0.34	0.14	4.4	0.9
25-35	0.565	9.3	0.34	0.12	3.9	0.6
Bou.3 0-10	0.579	8.0	0.30	0.09	4.1	0.8
25-35	0.557	11.3	0.41	0.14	3.1	0.5
STB.3 0-10	0.584	8.0	0.28	0.12	9.0	1.6
25-35	0.573	8.0	0.30	0.12	10.2	2.9

En conséquence, les volumes apparents texturaux sont minimaux dans ces contextes (tableau 9). Nous sommes donc tentés d'établir des corrélations entre les caractéristiques granulométriques et les volumes apparents texturaux. Le meilleur ajustement est obtenu en corrélant ceux-ci à l'indice hétérométrique H_q :

$$1/V_{app} = 0.3861 H_q + 1.6226 \quad r^2 = 0.91 \quad n = 12$$

$$1/V_{app} = 0.0213 Ar + 1.5719 \quad r^2 = 0.81 \quad n = 12$$

Ce résultat signifie que même si la teneur en argile explique l'essentiel de la variance de $1/V_{app}$, la prise en compte par l'indice H_q de la répartition granulométrique totale améliore nettement l'ajustement.

Cette analyse est cohérente avec les résultats développés par CHRETIEN (1986) qui souligne, dans le cas de matériaux naturels, un effet non négligeable de "l'éventail granulométrique du squelette". FIES et STENGEL (1981) rapportent également que l'effet propre de l'argile sur la valeur de densité texturale est moins marqué dans le cas de matériaux à squelette grossier. Ainsi, les mêmes auteurs mettent en évidence, dans le cas d'échantillons naturels, une augmentation de la densité apparente texturale lorsque le rapport $1/(1+S)$ tend vers 0.2, puis une diminution de la densité lorsque

le même rapport est compris entre 0.2 et 1.0 (l et S étant respectivement les taux en limon fin et sable grossier).

Cette observation se vérifie dans le cas de nos échantillons remaniés. Leur densité apparente texturale ($1/V_{app}$) augmente avec le rapport $l/(l+S)$, ce rapport étant toujours inférieur ou égal à 0.24 (tableau 9).

En outre, il apparaît que l'indice Hq est fortement corrélé au rapport $l/(l+S)$ pour cette gamme de matériaux :

$$Hq = 2.050 \frac{l}{l+S} + 0.081 \quad r^2 = 0.80$$

Nous pouvons donc considérer que nos résultats sont en accord avec ceux de FIES et STENGEL (1981) et qu'en définitive, la distribution granulométrique explique davantage que la teneur en argile, les valeurs de volume apparent textural. Le résultat est cohérent avec les observations faites par CHRETIEN (1986) sur la possibilité de remplissage entre les grains grossiers de sable, par des particules limoneuses.

La matière organique, et en particulier la fraction libre, peut constituer également une variable explicative de la porosité (STENGEL, 1979). L'élaboration d'une régression multiple en considérant comme autre variable le taux en matière organique, ou le pourcentage de carbone libre, n'améliore pas l'ajustement ($r^2 = 0.40$). Ce paramètre ne semble donc pas constituer une variable explicative des valeurs de volume apparent textural.

1.3 - CONCLUSION

Ce chapitre avait pour objectif de montrer les conséquences du travail du sol, et surtout du compactage, sur les valeurs de volume apparent.

L'analyse quantitative des porosités à Bou et à Saint-Benoit, à divers stades des travaux culturels, nous montre que les sols sableux sont particulièrement sensibles à l'action des outils et des passages d'engins. Un passage de tracteur suffit pour réduire, voire annuler les valeurs de volume poral structural dans l'horizon travaillé. Ainsi, la restructuration induite par le travail du sol peut être très brève si un passage de tracteur a lieu en surface.

Cette fragilité des sols sableux avait déjà été observée dans le Val de Loire (COULON, 1985). Elle est décrite également dans d'autres contextes culturels. Ainsi ONI et ADEOTI (1986) et LAMERS et al. (1986) décrivent une diminution semblable des volumes apparents des milieux en relation avec les passages de tracteur.

Au dessous de la couche travaillée, d'une épaisseur comprise entre 25 et 30 cm, un horizon à forte compacité existe dans chacune des situations intra-parcellaires. Toutefois, les valeurs des composantes de la porosité varient d'une situation à l'autre. A Bou, le compartiment structural semble très réduit, voire absent quelle que soit la maille de mesure. A Saint-Benoit, la composante interpédique semble avoir un volume poral non négligeable. Il est donc permis de penser que la pratique du sous-solage sur cette parcelle (décrite dans la 1 ère partie) a induit une porosité structurale absente à Bou. De tels effets sont décrits par KOOISTRA et al. (1986).

Les variations importantes de porosité intrapédique soulignent la nécessité pour ces matériaux de déterminer les volumes apparents texturaux sur matériaux remaniés, puisque les mottes sensées constituer la plus petite unité de mesure possible (FIES et STENGEL, 1981) ont un volume poral qui varie beaucoup suivant leur état physique.

Les diminutions de volume poral engendrent des augmentations très importantes des taux de saturation. Ainsi, des taux proches de 80 % ont été mesurés à la base des horizons travaillés. Nous pouvons considérer qu'un risque d'anoxie existe dans ces milieux (CAMPBELL et al., 1986).

Dans chacune des parcelles, un effet granulométrique est mis en évidence. Ce dernier est particulièrement net en milieu compacté, où les volumes apparents mesurés sont très proches des volumes texturaux. Une relation a pu être établie entre les valeurs de volume apparent textural et la distribution granulométrique exprimée par l'indice d'hétérométrie H_q : les volumes apparents diminuent avec l'étalement granulométrique des sque-lettes. Ce résultat est cohérent avec ceux décrits par FIES et STENGEL (1981) et CHRETIEN (1986) dans le cas de matériaux riches en éléments grossiers.

Les différences de quantité de matière organique à Bou et Saint-Benoit n'ont pas induit des différences de compacité entre les zones compactées des deux parcelles, à constitution granulométrique identique. De même, le taux de matière organique ne constitue pas pour nos échantillons une variable explicative des valeurs de volume apparent textural.

Cette première approche rend compte des changements qu'ont provoqué les travaux culturaux sur les volumes apparents. Nous ne disposons cependant pas de donnée quant à la caractérisation des modifications qualitatives de l'espace poral et en particulier sur les évolutions de distribution des tailles des pores. Cet aspect sera développé dans le prochain chapitre.

II - CARACTERISATION DE L'ESPACE PORAL

L'étude de l'évolution des volumes apparents due aux effets du travail du sol, et notamment du compactage, ne rend pas compte précisément de la nature des modifications dans l'organisation du système poral, et en particulier, des modifications au niveau de la forme et de la taille des pores entre particules. Cette prise en compte des évolutions morphologiques est nécessaire à l'analyse des conséquences du tassement et à la prédiction du comportement (MONNIER et GUERIF, 1988).

Deux méthodes sont utilisées ici pour réaliser cette caractérisation : la porosimétrie au mercure et l'observation micromorphologique.

2.1 - UTILISATION DE LA POROSIMETRIE AU MERCURE

2.11 - Introduction

La porosimétrie au mercure est une méthode de description de l'espace poral, couramment utilisée en science du sol (VACHIER et al., 1979 ; ZIMMER, 1981 ; FIES, 1984 ; CHRETIEN, 1986), mais également dans des perspectives géotechniques (PELLERIN, 1980 ; AUDIGUIER et al., 1987). Le principe et la démarche expérimentale sont développés en annexe II.31. Cette technique permet la description du système poral d'échantillons secs de quelques cm³ de volume. Elle consiste, plus précisément, à associer les volumes introduits de mercure aux diamètres de constriction des pores (ou diamètres équivalents) de dimensions comprises entre 250 et $6.5 \cdot 10^{-3}$ μm .

Les modifications de distribution des volumes des pores, que les matériaux sableux ont subi au cours des compactages, et les différences d'organisation des espaces poreux dues aux variations de constitution des échantillons seront décrites.

2.12 - Matériels

Les premiers échantillons sont prélevés après semis, à Bou, dans l'horizon cultivé (0-10 cm) de chacune des situations intra-parcellaires, dans les entre-roues et sous les passages de roues. Une seconde série est prélevée après récolte, dans les horizons à forte compacité sous labour (25-35 cm) des deux parcelles (Bou.1, Bou.2, STB.1, STB.3). Les dates précises des prélèvements sont reportées en annexe III (tableau A 1).

L'organisation du système poral des mottes est comparée à celle obtenue avec les mêmes matériaux remaniés (pâte). Nous pourrions ainsi examiner si l'organisation d'une motte compactée au champ est identique à celle d'une pâte dont la porosité est considérée comme étant celle due à l'assemblage des constituants élémentaires.

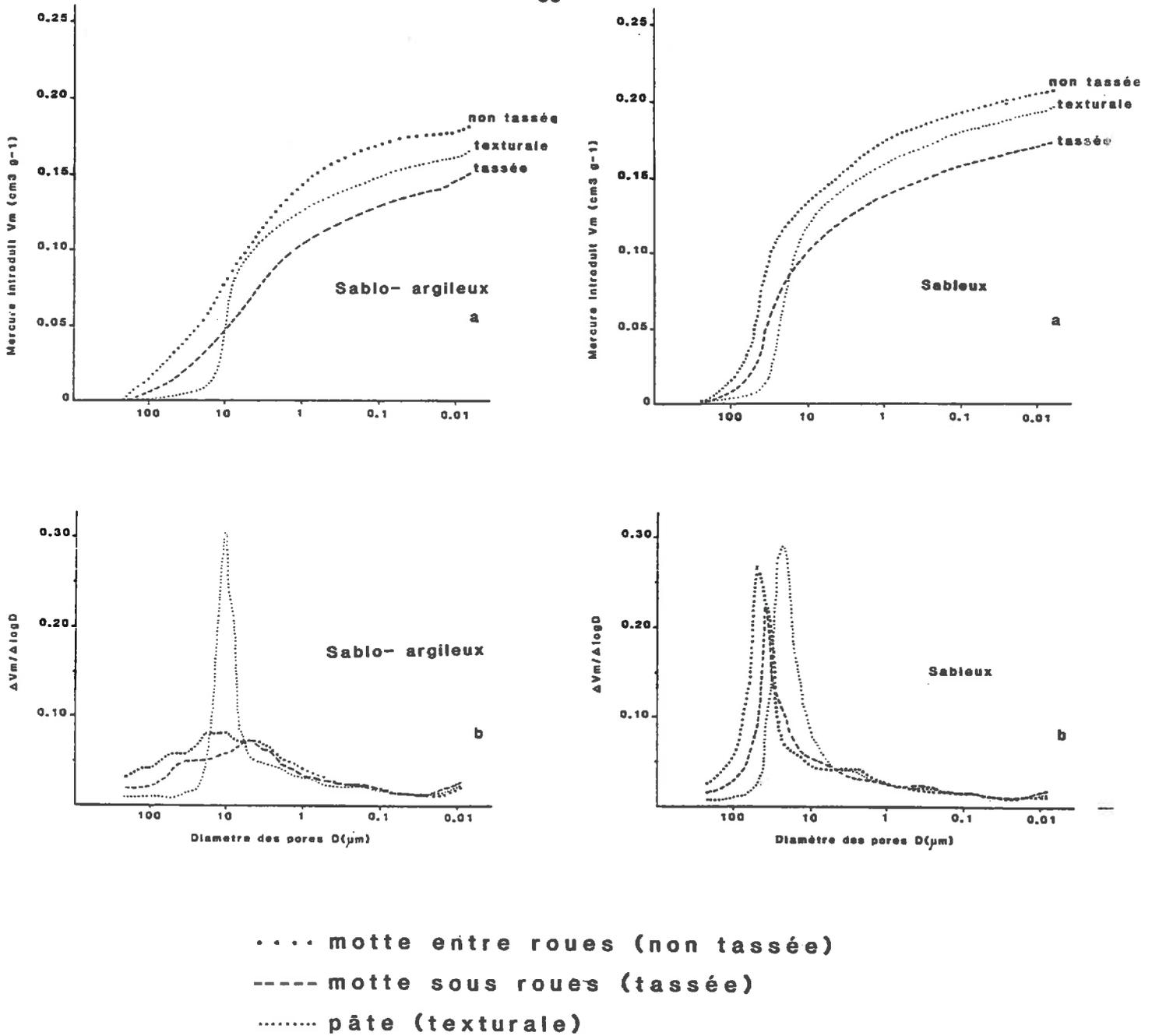


Figure 12 : Courbes de porosité au mercure des échantillons sablo-argileux (Bou.1; 0-10 cm) et sableux (Bou.2; 0-10 cm) ;
 a : courbes cumulatives d'entrée de mercure
 b : courbes correspondantes des distributions des volumes des pores.

2.13 - Résultats

Comme il est précisé en annexe II.31, les résultats sont présentés sous forme de courbes cumulatives d'intrusion de mercure (ou courbes des volumes cumulés des pores : $v_c p$) en fonction du logarithme des diamètres équivalents, mais également sous forme de courbes dérivées exprimant la distribution des volumes des pores ($d_v p$) (FIES, 1984).

Nous présenterons tout d'abord les résultats concernant les échantillons prélevés après semis en Bou.1 (SA) et Bou.2 (S). Ils correspondent aux échantillons prélevés dans l'horizon travaillé en situation tassée (sous roues : SR) et non tassée (entre-roues : ER). Nous examinerons ensuite les caractéristiques des autres échantillons.

a) Caractéristiques des échantillons SA et S

- Cas des mottes

° Effets de la texture

Les échantillons naturels SA et S présentent des courbes de volumes cumulés des pores ($v_c p$) différentes (fig. 12a). L'introduction de mercure dans les mottes SA est plus graduelle, et les volumes totaux cumulés sont plus faibles (tableau 10). Les tangentes aux courbes $v_c p$ sont presque horizontales en leur point haut. En leur point bas, elles sont relativement sécantes aux axes des abscisses, en particulier dans le cas des mottes non tassées (ER).

Les courbes dérivées ($d_v p$) soulignent les précédentes observations (fig. 12b). Les courbes correspondant aux mottes SA sont très étalées entre 200 et 1 μm , avec des maxima correspondant à des diamètres D_{eq} de 12.0 μm sur mottes ER et 5 μm sur mottes SR. Pour les échantillons du contexte S, on observe au contraire des pics très marqués correspondant à des diamètres équivalents supérieurs : 47.0 et 35.0 μm respectivement, sur échantillons ER et SR (tableau 10). Au delà de ces valeurs, les intrusions de mercure demeurent relativement importantes jusqu'à 1 μm .

° Effets du tassement

Les volumes de mercure introduit (fig. 12a, tableau 10) sont nettement plus faibles pour les mottes tassées (SR) que pour les mottes non tassées (ER). Les introductions de mercure pour les échantillons ER sont beaucoup plus importantes en début de mesure, c'est-à-dire pour des diamètres de constriction supérieurs à 50 μm pour les mottes S, et 7 μm pour les mottes SA.

Dans chacune des situations (S ou SA), les mottes (SR) sont caractérisées, au maximum d'intrusion, par des diamètres équivalents plus faibles que ceux correspondant aux mottes (ER) (tableau 10, fig. 12b). On note que quel que soit l'échantillon (SA ou S), il y a peu de différence entre les courbes dérivées pour des $D_{eq} < 1.0 \mu m$.

Tableau 10 - Données obtenues en porosimétrie au mercure concernant les échantillons sablo-argileux et sableux

Echantillons	Volume de mercure introduit (V_m) cm^3/g $\sigma=\pm 0.01$	Valeurs de $D_{e,q}$ aux maxima d'intrusion de mercure (μm)
Mottes non tassées (0-10cm) entre roues (ER) SA (Bou.1) S (Bou.2)	0.182 0.212	12.0 47.0
Mottes tassées (0-10cm) sous roues (SR) SA (Bou.1) S (Bou.2)	0.152 0.174	5.0 35.0
Pâtes texturales (0-10cm) SA (Bou.1) S (Bou.2)	0.166 0.196	9.0 23.0

Tableau 11 - Données obtenues en porosimétrie au mercure concernant l'ensemble des échantillons de Bou et St Benoit.

Echantillons	Volume de mercure introduit (V_m) cm^3/g $\sigma=\pm 0.01$	Valeurs de $D_{e,q}$ aux maxima d'intrusion de mercure (μm)
Mottes non tassées (0-10cm) entre roues (ER) Bou.3	0.242	57.0
Mottes tassées (0-10cm) sous roues (SR) Bou.3	0.189	37.0
Mottes tassées (25-35cm) Bou.1 Bou.2 STB.1 STB.3	0.136 0.187 0.125 0.164	5.0 58.0 - 3.7 4.0 40.0 - 5.0
Pâtes texturales (0-10cm) 0-10 cm Bou.3	0.200	23.0
Pâtes texturales (25-35cm) Bou.1 Bou.2 STB.1 STB.3	0.149 0.198 0.155 0.196	9.0 30.0 9.0 25.0

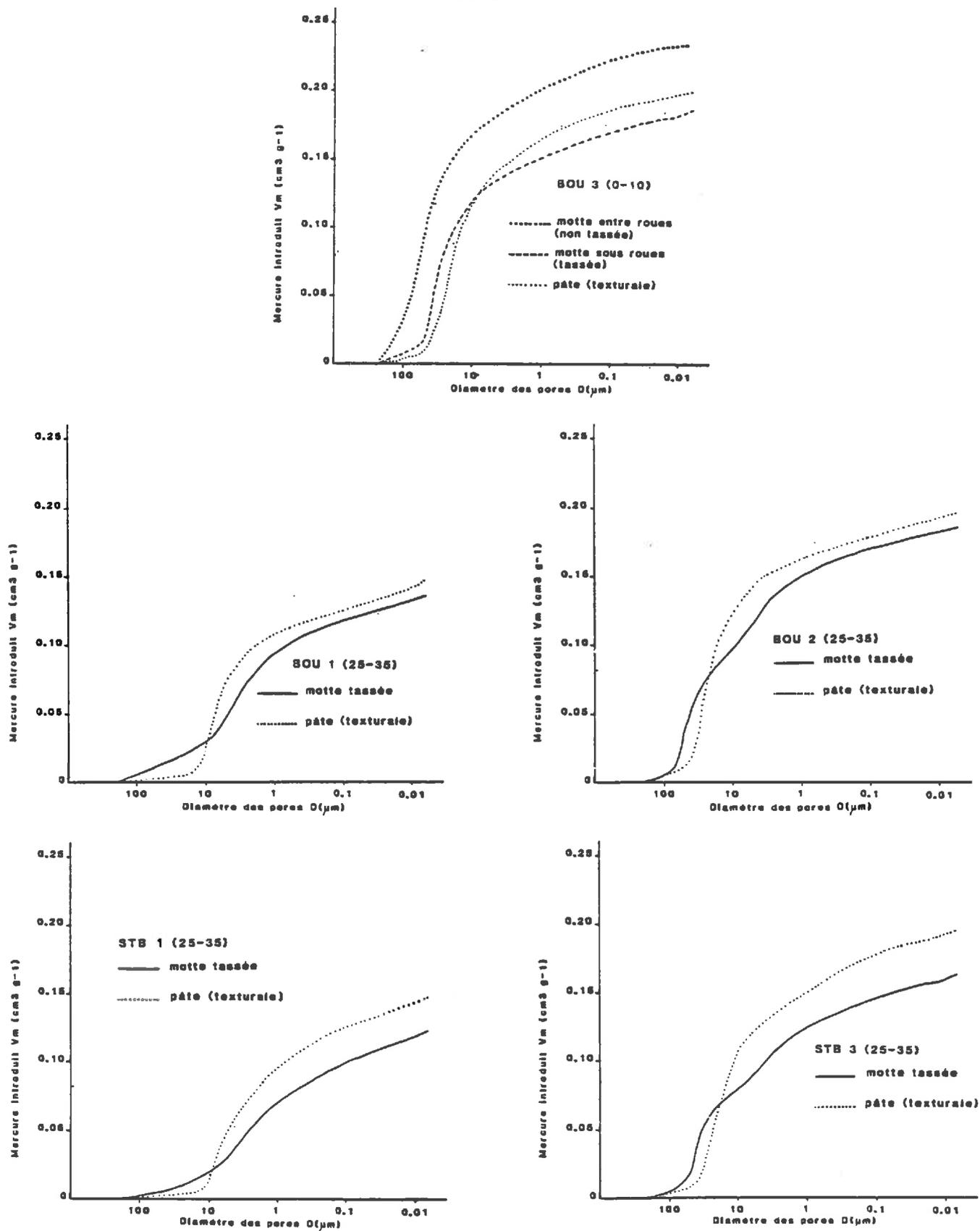


Figure 13 : Courbes cumulatives d'entrée de mercure des échantillons prélevés dans chacune des situations intra-parcellaires.

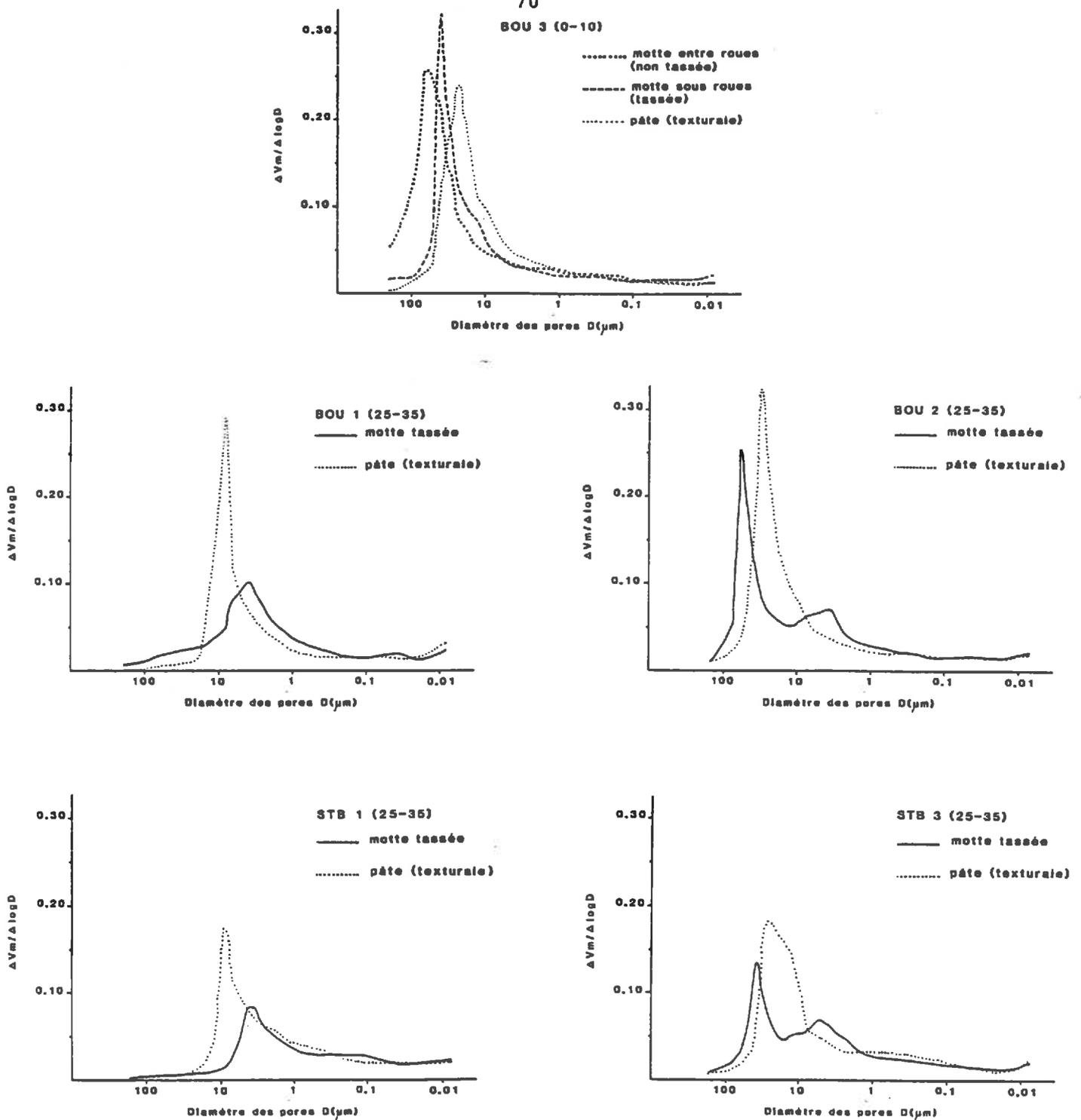


Figure 14 : Courbes des distributions des volumes des pores ou spectres de porosité des échantillons prélevés dans chacune des situations intra-parcellaires.

- Cas des pâtes

Les porosités au mercure des échantillons remaniés (pâte) sont supérieures à celles mesurées sur mottes (SR) de même nature (fig. 12a, tableau 10). A la différence des échantillons naturels, les volumes de mercure introduit sont très faibles pour les pores très grossiers, supérieurs à 25.0 μm pour le matériau SA, et 50.0 μm pour le matériau S ; les courbes $v_c p$ tendent asymptotiquement vers les axes des abscisses. Au dessous de ces valeurs, les intrusions sont brutales et importantes, les volumes intrudés étant plus élevés avec le matériau S (tableau 10).

Les courbes $d_v p$ (fig. 12b) obtenues sur pâte se distinguent nettement des courbes dérivées précédentes, en particulier pour l'échantillon SA, où la classe de pores dominante est très serrée autour de $D_{e\alpha} = 9.0 \mu\text{m}$. Les volumes de mercure introduit au dessus de $D_{e\alpha} = 20 \mu\text{m}$ sont ainsi très faibles. En ce qui concerne la pâte S, il y a également moins de mercure introduit pour les pores très grossiers. Le maximum correspond à un diamètre inférieur à celui mesuré sur les mottes (tableau 10).

Quelle que soit la nature de la pâte (SA ou S), la courbe $d_v p$ se différencie peu de celles correspondant aux mottes pour des diamètres inférieurs à 1.0 μm .

b) Cas des autres échantillons

Les principales caractéristiques décrites précédemment se généralisent à l'ensemble des échantillons. Les figures 13 et 14 montrent que nous retrouvons les deux formes typiques d'organisation des volumes des pores :

- l'une similaire aux matériaux sablo-argileux SA (Bou.1, STB.1),
- l'autre correspondant aux matériaux sableux S (Bou.3, Bou. 2, STB.3).

Pour les mottes tassées (25-35 cm) de Bou.1 et STB.1, les intrusions de mercure sont progressives et maximales entre $D_{e\alpha} = 10 \mu\text{m}$ et 1.0 μm (tableau 11). Comme pour les mottes tassées SA, les courbes dérivées (fig. 14) sont étalées avec des maxima correspondant à $D_{e\alpha} \approx 4$ à 5 μm .

Sur les pâtes texturales (25-35 cm) comme sur la pâte SA (0-10 cm), les volumes introduits sont très faibles jusqu'à certaines valeurs de $D_{e\alpha}$, puis augmentent brutalement au delà de ces seuils. Les courbes $d_v p$ montrent chacune un pic correspondant à $D_{e\alpha} = 9.0 \mu\text{m}$ (Fig. 14).

L'ensemble des échantillons de Bou.3 (mottes non tassée et tassée, et pâte) présentent des courbes $v_c p$ et $d_v p$ tout à fait similaires à celles correspondant aux échantillons S précédents. Les volumes intrudés de mercure (à l'exception de ceux correspondant aux mottes ER) et les valeurs de $D_{e\alpha}$ aux maxima d'intrusion sont équivalents (tableau 11).

Les mottes tassées (25-35 cm) de Bou.2 et STB.3 ont des volumes de pores occupés par le mercure largement supérieurs aux échantillons de Bou.1 et STB.1, ou aux mottes SA (0-10 cm) (fig. 13, tableau 11). A la différence des mottes tassées S précédentes, les courbes $d v p$ présentent deux maxima bien marqués (fig. 14). Le premier correspond à des diamètres de pores élevés, pas très différents du pic d'intrusion de la motte tassée S, et le second à des diamètres proches de ceux obtenus sur les échantillons tassés SA. Les courbes dérivées des pâtes de Bou.2 et STB.3 ont des pics situés à $D_{eq} = 30$ ou $25 \mu m$, c'est-à-dire à des valeurs très proches de celles concernant la pâte S (0-10 cm).

2.14 - *Interprétation - Conclusion*

L'analyse des données peut être faite en considérant la terminologie définie par FIES (1984) et FIES et STENGEL (1984), pour l'étude de la distribution des volumes des pores de mélanges argile-squelettes avec la porosimétrie au mercure. Il définit deux compartiments de l'espace poral : 1 - le volume des pores lacunaires dû au retrait de la phase argileuse entre les grains du squelette, 2 - celui dû à l'arrangement même de la phase argileuse. La porosimétrie au mercure ne permet que d'étudier les pores les plus grossiers de la phase argileuse. L'analyse complète de l'organisation du système poral de l'argile exige une méthode complémentaire : la méthode de l'isotherme de désorption d'azote (MURRAY et al., 1985 ; BRUAND et PROST, 1987).

a) Les pâtes

A la différence des courbes $v c p$ obtenues par FIES (1984) dans le cas de mélanges binaires aux teneurs en argile semblables à celles de nos matériaux, les courbes ici indiquent des intrusions importantes de mercure pour des diamètres équivalents compris entre 0.02 et $1.0 \mu m$. Du fait que nous pouvons considérer que le protocole de préparation des pâtes permet de fabriquer des échantillons de porosité uniquement due à l'assemblage des constituants, ces intrusions continues de mercure traduisent un remplissage progressif des espaces lacunaires générés par les squelettes, dont l'accès se fait par des pores de diamètres équivalents inférieurs à $25 \mu m$ pour les échantillons sablo-argileux (Bou.1, STB.1) et $70 \mu m$ pour les échantillons sableux (Bou.2 et 3, STB.3). Dans les deux cas, ces intrusions graduelles sont à relier à la présence de squelettes de distributions granulométriques étalées qui induisent des répartitions plus diversifiées des volumes des espaces lacunaires, contrairement aux matériaux de FIES constitués d'une seule classe granulométrique.

L'organisation du système poral des échantillons remaniés (pâte) est différente de celle observée sur échantillons naturels (tassés ou non tassés).

Il semble que le remaniement conduit à une disparition des diamètres d'accès élevés, au profit de diamètres plus réduits. Les distributions des volumes des pores sont alors très resserrées, même pour les échantillons sablo-argileux de Bou.1 et STB.1. Paradoxalement, les volumes totaux de mercure introduit sont plus importants que ceux sur mottes compactées. Cependant, si on se réfère aux valeurs de porosités globales déterminées avec la technique mise au point par MONNIER et al. (1973) (tableau 12), on observe que dans le cas des pâtes, la porosimétrie prend en compte pratiquement la totalité de la porosité, contrairement aux mottes où une partie de la porosité échappe à la mesure. Nous pouvons considérer qu'il s'agit des pores les plus grossiers, les courbes étant identiques pour les diamètres les plus fins et les tangentes aux courbes v c p d'entrée de mercure étant obliques à l'axe des abscisses en leur partie basse à cause d'une intrusion précoce et importante.

Tableau 12 - Comparaison des volumes apparents (V_{tm}) déterminés en porosimétrie au mercure aux volumes apparents totaux mesurés dans le pétrole

Echantillons	$V_{tm} = V_m + V_s$ ($V_s = 1/2.65$)	V_{app} dans le pétrole	$V_{app} - V_{tm}$
Mottes non tassées (0-10cm) entre roues :			
SA Bou.1	0.559	0.610	0.051
S Bou.2	0.589	0.620	0.031
Bou.3	0.619	0.630	0.011
Mottes tassées (0-10cm) sous roues :			
SA Bou.1	0.529	0.563	0.034
S Bou.2	0.551	0.575	0.024
Bou.3	0.566	0.580	0.014
Mottes tassées (25-35cm)			
Bou.1	0.513	0.550	0.037
Bou.2	0.564	0.571	0.007
STB.1	0.502	0.532	0.030
STB.3	0.541	0.596	0.055
Pâtes 0-10 cm			
SA Bou.1	0.543	0.548	0.005
S Bou.2	0.573	0.569	- 0.004
Bou.3	0.577	0.579	0.002
Pâtes 25-35 cm			
Bou.1	0.526	0.544	0.018
Bou.2	0.568	0.565	- 0.003
STB.1	0.532	0.541	0.009
STB.3	0.573	0.573	0

Les différences de distribution des volumes des pores entre mottes et pâtes peuvent également résulter de phénomènes de percolation. RENAULT (1988) souligne que lorsque le milieu est infini, c'est-à-dire quand la "profondeur" du réseau des pores est suffisamment importante, l'intrusion de mercure est tardive et soudaine. Au contraire, avec une faible "profondeur" de réseau, l'introduction du mercure est plus précoce et graduelle. L'application de ces considérations théoriques, basées sur des modèles de porosité, signifierait que les pâtes, à la différence des matériaux naturels, sont des milieux quasi-infinis.

b) Les mottes

La distribution des volumes des pores varie avec la nature granulométrique et l'état structural de l'échantillon (tassé ou non tassé).

- Effets du tassement

Quelle que soit la constitution de l'échantillon, le tassement provoqué par les roues de tracteur modifie l'organisation interne des mottes. Les modifications concernent les pores de diamètre d'accès supérieurs à 7 μm pour les mottes SA et 50 μm pour les mottes S. Nous pouvons considérer, du fait de ces dimensions, que le tassement provoque une diminution des volumes des pores structuraux et lacunaires.

- Effets de la texture

Les distributions des volumes des pores des mottes SA (Bou.1, STB.1) se différencient nettement de celles correspondant aux mottes S (Bou.1 et 3, STB.3).

Il apparaît une relation entre la distribution granulométrique et celles des volumes des pores. Plus le matériau est mal classé et plus il se caractérise par un étalement de la distribution des volumes des pores. Parallèlement, l'enrichissement en éléments fins provoque une diminution des diamètres équivalents correspondant aux pics d'intrusion de mercure. Ces résultats sont conformes à ceux décrits par CHRETIEN (1986, 1987).

Par rapport à la terminologie définie par FIES (1984), ces différences de $d_v p$ entre échantillons S et SA concernent essentiellement l'espace poral lacunaire. La légère intrusion de mercure pour des pores inférieurs à 0.015 μm , en particulier pour les situations 1 à Bou et Saint-Benoit, peut être attribuée au début de la pénétration du liquide dans la phase argileuse.

Dans le cas des mottes de Bou.2 (25-35) et STB.3 (25-35), il est intéressant de constater que les distributions sont bimodales à la différence des autres échantillons sableux qui ne présentent qu'un seul pic. Toutefois, les volumes introduits de mercure, relativement importants entre 10 et 1 μm pour ces derniers échantillons, laissent supposer qu'une seconde phase d'intrusion existe entre ces valeurs. Une telle bimodalité a été mise en évidence par FIES (1987) dans des mélanges à squelette complexe constitué de 80 % de sable 200-500 μm et 20 % de limon 2-10 μm , associé à 10 et 15 % argile. Cet auteur propose, comme interprétation, de considérer ces mélanges comme des assemblages à double compartiment : un système argile-limon - avec

ses pores lacunaires propres - qui entoure les grains de sables en ménageant à son tour un espace lacunaire plus grossier. Cette interprétation, propre à des échantillons artificiels, pourra être discutée lors de l'analyse micromorphologique.

En définitive, il ressort de ces observations les points importants suivants :

- le tassement mécanique provoque une modification de l'organisation du système poral intra-motte,
- la préparation de pâte ne conduit pas un arrangement des constituants équivalent à celui des mottes compactées.
- les distributions des volumes des pores sont d'autant plus étalées que les matériaux sont riches en éléments fins et ont une distribution granulométrique étalée.

2.2 - ANALYSE MICROMORPHOLOGIQUE

2.21 - Introduction

Les analyses micromorphologiques nous renseignent sur la forme des macropores* d'une section de sol imprégné. Cette technique permet d'avoir accès directement à la dimension des sections de pores, à la différence de la porosimétrie au mercure qui fournit les volumes des pores correspondant aux différentes valeurs de diamètre de constriction.

Les applications agronomiques et pédologiques des analyses micromorphologiques sont nombreuses. Elles permettent notamment l'observation des effets de tel ou tel travail du sol. Ainsi KOOISTRA et al. (1984) discutent les conséquences d'une reprise d'un horizon compacté sur la morphologie des pores. BULLOCK et al. (1985) décrivent les restructurations naturelles des horizons préalablement compactés, et DESTAIN et LE JEUNE (1985) comparent l'action de différents outils. Citons également KOOISTRA (1987) qui reporte les caractéristiques micromorphologiques de sols soumis à trois techniques culturales.

Les résultats micromorphologiques peuvent être également comparés aux données acquises en porosimétrie au mercure ou avec d'autres techniques. L'utilisation d'un analyseur d'image a permis d'optimiser cette technique et de quantifier la macroporosité. CHRETIEN (1986, 1987) établit, à partir de photogrammes, des comparaisons des répartitions dimensionnelles des macropores entre matériaux issus de différents horizons et profils pédologiques. Il confronte par ailleurs les valeurs de porosité quantifiées sur lame mince aux données acquises en porosimétrie au mercure, ou aux mesures des volumes apparents. BULLOCK et THOMASSON (1979) comparent les données fournies par l'analyse d'image à celles obtenues avec les mesures de rétention d'eau.

* la définition retenue de la macroporosité, est celle donnée par VAN OORT (1984).

L'objectif, en ce qui nous concerne, sera précisément d'observer les variations de formes et de tailles des pores d'échantillons de sol, consécutives au compactage. Nous pourrions également, à cette occasion, discuter et valider les interprétations faites lors de l'analyse en porosimétrie au mercure.

2.22 - *Matériels et méthode*

a) Matériels

Les échantillons observés en lame mince sont prélevés uniquement sur la parcelle de Bou, dans chacune des situations intra-parcellaires et à trois niveaux :

- 1) 0-10 cm en entre-roues (ER),
- 2) 0-10 cm sous roues (SR),
- 3) dans l'horizon tassé (25-35 cm), sous la couche labourée.

Les dates précises des prélèvements figurent en annexe III (tableau A 1).

Dans le cas de Bou.1 (horizon 0-10 cm), nous avons également imprégné des matériaux remaniés à l'état de pâte suivant le protocole mis au point par KHEYRABI et MONNIER (1968).

b) Méthodes

Nous n'avons pas pu, pour des questions matérielles, faire une analyse micromorphologique quantitative. Nous avons simplement fait une description qualitative des lames minces préparées suivant le protocole décrit en annexes II.32, et observées à deux grossissements ; sous binoculaire ($G \approx 9$) et sous microscope équipé d'une lampe à ultra-violet ($G \approx 140$). Notre objectif est de confronter les observations micromorphologiques aux résultats acquis en porosimétrie au mercure et lors des mesures de volume apparent.

2.23 - *Résultats*

Dans la mesure où les morphologies des échantillons sableux de Bou. 2 et Bou.3 sont apparues identiques, nous ne présenterons que les résultats concernant une seule des deux situations (Bou.2). De même, nous ne ferons référence qu'aux échantillons tassés 0-10 cm (SR), les échantillons du niveau 25-35 cm présentant les mêmes caractéristiques.

Les comparaisons portent finalement sur les 2 situations, Bou.1 et Bou.2, et pour les deux états : sous roues (SR) et entre-roues (ER).

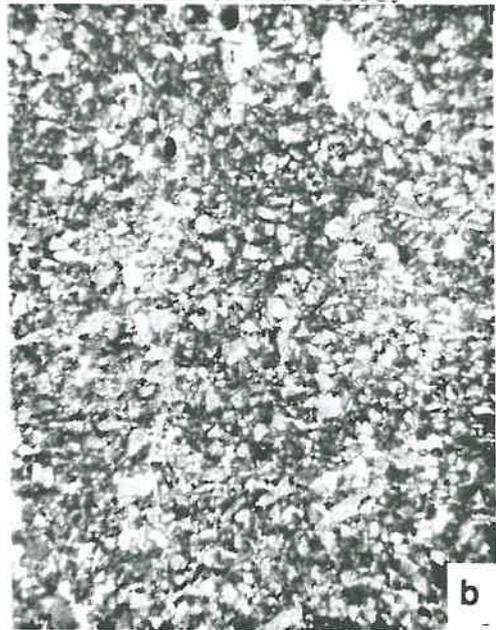
a - A faible grossissement, en situation non tassée (ER), une macroporosité importante existe (planches 1a-1c). Les éléments structuraux sont relativement bien individualisés, en particulier dans la situation sablo-argileuse (Bou.1), laissant entre eux une macroporosité importante (vides, de section proche de 2 mm).

Planche 1 : Morphologie des échantillons naturels et remaniés

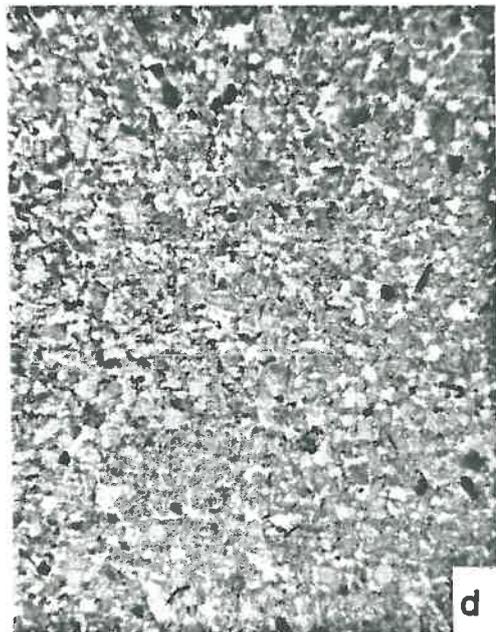
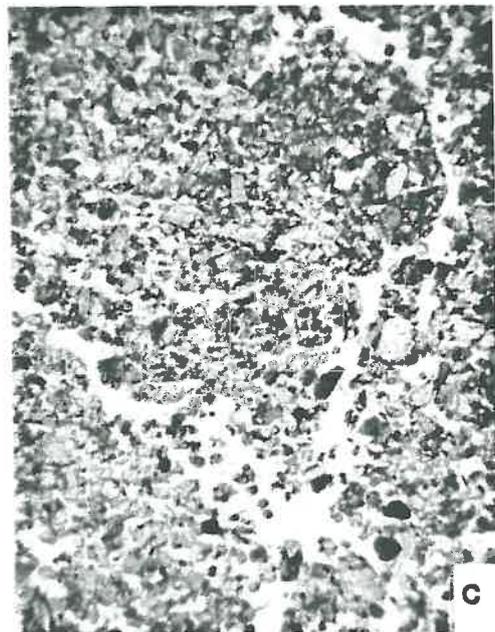
non tassé (entre roues)

tassé (sous roues)

BOU 1
(0-10cm)
Sablo-
argileux



BOU 2
(0-10cm)
Sableux



matériau de BOU 1 remanié (pâte)

BOU 1
(0-10cm)



2mm

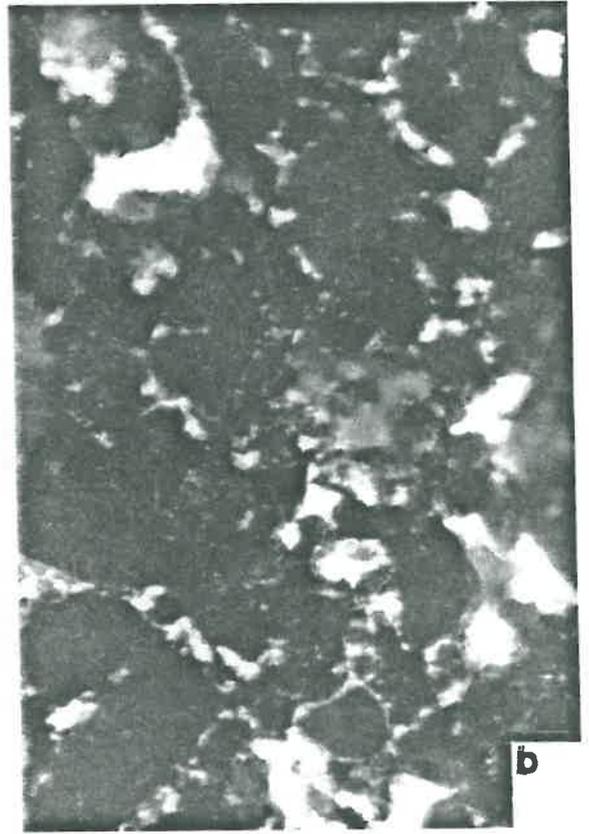
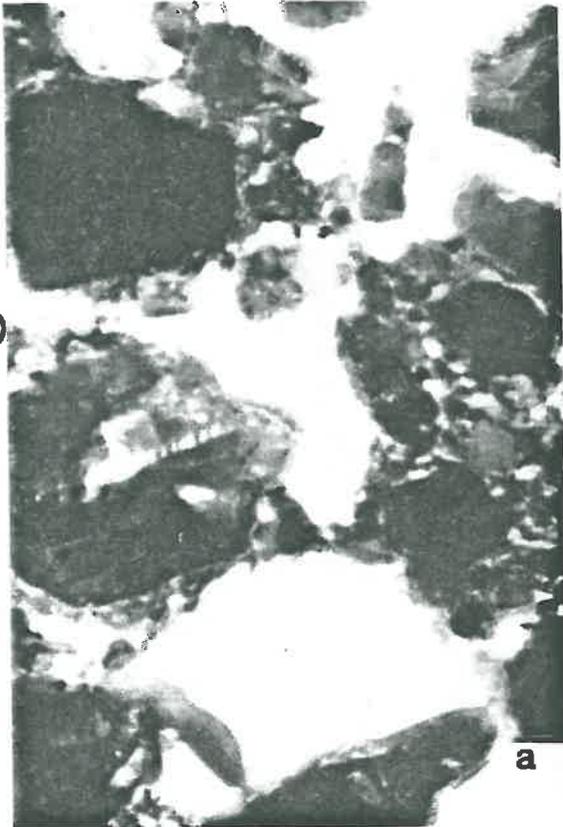
Planche 2: Morphologie des assemblages des échantillons naturels

non tassé (entre roues)

tassé (sous roues)

**BOU 1
(0-10cm)**

**Sablo-
argileux**



**BOU 2
(0-10cm)**

Sableux

0.1mm
└───┘



Dans le cas des horizons compactés (0-10 cm SR) (planches 1b, 1d), les limites entre mottes ne sont plus visibles. Les grains des squelettes sont fréquemment jointifs, avec cependant, localement la présence de pores très grossiers (300 à 800 μm).

Les échantillons prélevés dans la situation sablo-argileuse (Bou.1) ont visiblement une macroporosité plus faible que ceux provenant de la zone sableuse (Bou.2). Des particules fines, plus nombreuses, semblent occuper la porosité d'assemblage induite par le squelette.

A la différence des échantillons naturels, les pâtes ne présentent aucun pore de dimension supérieure à 150 μm (planche 1e). Les grains de squelette apparaissent jointifs et la porosité relativement homogène.

b - A fort grossissement (planche 2), les assemblages des grains des squelettes sont plus lâches pour les matériaux non tassés ER (planche 2a, 2c). De nombreux pores de dimensions supérieures à 150 μm sont observés.

Sur les matériaux issus des niveaux compactés (planche 2b, 2d), les grains des squelettes sont plus jointifs et les sections de pores observées sont en moyenne plus faibles. Leur taille est comprise entre 60 et 150 μm , et dépend de la nature granulométrique des matériaux.

En milieu sablo-argileux tassé (Bou.1), des zones riches en éléments fins et particulièrement denses apparaissent. Ainsi, de nombreuses plages observées ont des pores de sections inférieures à 10 μm . En milieu sableux tassé (Bou.2), les grains de squelette jointifs laissent une porosité d'assemblage plus importante et les plages de forte densité sont plus rares.

Quelle que soit l'origine de l'échantillon prélevé au champ (contexte SA et S), la distribution de la macroporosité est relativement hétérogène à cette échelle d'observation et varie beaucoup avec les plages observées (planche 3). Sur pâtes, on observe au contraire des répartitions homogènes des vides induits par les squelettes. La quasi-totalité des pores ont des sections de dimensions comprises entre 10 et 50 μm , et aucune zone très dense n'a pu être observée.

2.24 - Discussion - Conclusion

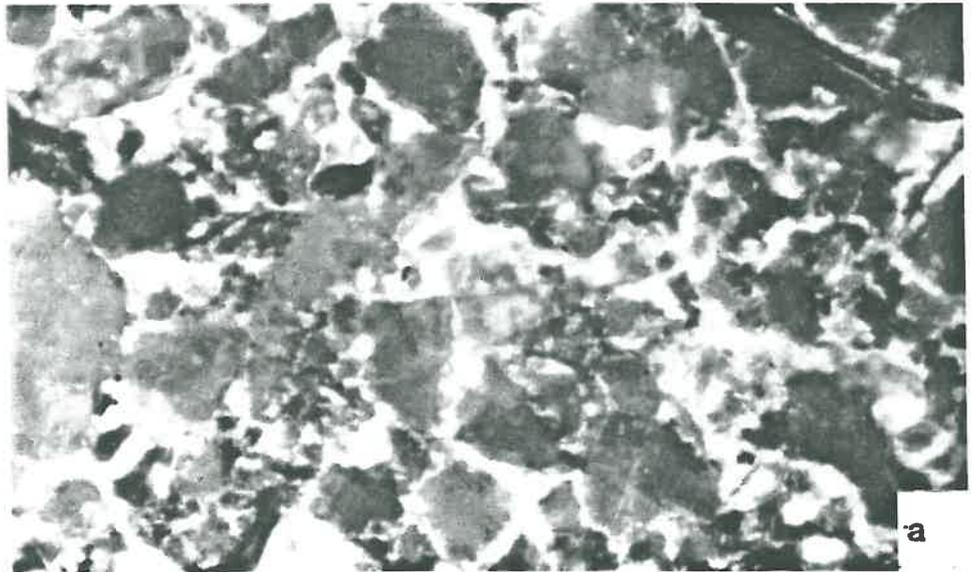
L'observation des lames minces nous aide à l'interprétation et la validation des données obtenues lors des mesures de volumes apparents et de l'analyse en porosimétrie au mercure. Elle apporte une interprétation aux différences de caractéristiques observées entre milieux sablo-argileux et sableux d'une part, et entre contextes tassés et non tassés d'autre part.

- Effets de la texture

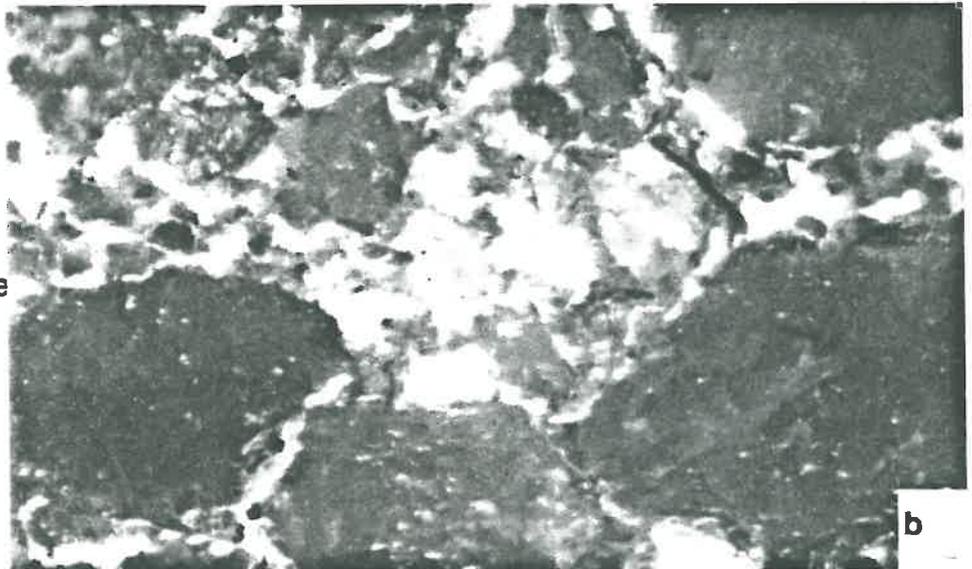
Les différences de valeurs de volume apparent entre échantillons sablo-argileux (Bou.1) et sableux (Bou.2 et 3) sont liées aux différences de valeur de volume poral du compartiment lacunaire.

Planche 3 : Morphologie des assemblages

matériau remanié
(pâte)
Sablo-argileux



motte tassée
Sablo-argileuse



motte tassée
Sablo-argileuse



0.1mm
└───┘

a - En milieu sablo-argileux, la porosité matricielle due à l'arrangement des grains de squelette sableux (CHRETIEN, 1979) est plus réduite et les quantités de particules susceptibles de combler les vides inter-grains sont plus élevées. Les valeurs de volume apparent sont donc dépendantes de la taille des lacunes générées par l'assemblage des grains du squelette, mais également de la proportion de particules fines susceptibles de combler les vides.

En ce qui concerne les mottes, la distribution très étalée des volumes des pores provient de la coexistence de pores fins et très grossiers. Il apparaît en particulier, même sur matériau compacté, une porosité lacunaire très hétérogène avec quelques vides structuraux. L'intrusion de mercure dans l'échantillon peut donc être très précoce, et très progressive. On comprend également, en particulier sur mottes non tassées (ER), qu'une partie de la porosité grossière n'est pas prise en compte par la mesure en porosimétrie au mercure puisque cette dernière ne concerne, au maximum, que des pores de diamètre d'accès équivalent à 250 μm .

b - Dans le cas de matériaux sableux (Bou.2 et Bou.3), les vides lacunaires sont de dimensions souvent supérieures et sont moins occupés par des particules fines. Il est donc normal de constater, en porosimétrie, des intrusions de mercure importantes pour des diamètres d'accès des pores élevés (40 μm au lieu de 5.0 μm).

L'observation à fort grossissement montre que les particules fines (Ar+L) se localisent préférentiellement dans des lacunes générées par les grains grossiers du squelette. Les organisations naturelles semblent par conséquent plus complexes que celles décrites par FIES (1987) dans le cas de mélanges ternaires artificiels. Toutefois, l'interprétation du double compartiment apparaît validé du fait qu'indépendamment de cette différence de localisation des particules fines (Ar+L), le deuxième pic d'intrusion de mercure peut être le résultat de la pénétration du liquide dans les zones à forte densité occupées par ces mêmes particules.

- Effets du tassement

Les échantillons tassés présentent tous des porosités lacunaires et structurales plus réduites. Le tassement provoque un rapprochement des grains du squelette, la plupart d'entre eux étant alors jointifs. Toutefois, une partie des vides structuraux subsistent dans les échantillons tassés, et le compactage n'homogénéise pas la distribution des pores lacunaires. En conséquence, les diminutions des volumes poraux lacunaires et structuraux sont à l'origine des différences entre courbes $d v p$ des mottes tassées et courbes $d v p$ des mottes non tassées.

- Cas des pâtes

Sur pâte, au contraire, le spectre poral très resserré - observé en porosimétrie au mercure - est cohérent avec une porosité lacunaire à distribution des tailles de pores homogènes et l'absence de macropores de tailles supérieures à 100 μm . Il est à noter que, contrairement aux résultats obtenus par FIES et ZIMMER (1982) dans le cadre d'une analyse de la porosité de

mélange binaire (S-Ar), le diamètre de pore au maximum d'intrusion de mercure ne correspond pas à une valeur sept fois supérieure au diamètre réel observé sur lame mince.

L'analyse micromorphologique nous a donc permis d'expliquer les résultats acquis en porosimétrie au mercure et lors des déterminations des volumes apparents. Elle rend compte, en particulier, de la différence d'organisation de la porosité lacunaire qui existe entre pâte, échantillons tassés et non tassés.

2.3 - CONCLUSION

L'analyse de l'espace poral des sols nous a permis d'observer les effets de la texture et les conséquences du tassement sur l'organisation de la porosité.

La distribution des tailles des pores apparaît liée à la constitution granulométrique. Lorsque le matériau présente une granulométrie à fraction dominante, son système est lui-même caractérisé par une famille de pores dominante. En revanche, lorsque le matériau est plus hétérométrique, son système poral présente une distribution beaucoup plus étalée.

Le tassement provoque une modification de la porosité lacunaire et par conséquent texturale. Les grains de squelette des échantillons tassés sont plus proches, diminuant ainsi les espaces lacunaires. Le tassement réduit également la proportion de vides structuraux, sans toutefois les éliminer.

A la différence des échantillons naturels à porosité lacunaire hétérogène, les matériaux remaniés ont une famille de pores dominante. Le remaniement uniformise la porosité lacunaire et fait disparaître les pores les plus grossiers, en particulier ceux d'origine structurale. Toutefois, les sections les plus denses observées sur les échantillons naturels tassés, n'apparaissent plus sur matériaux remaniés. En définitive, les pâtes dites texturales ont une organisation de leur système poral très différente de celle correspondant aux échantillons compactés in situ, même si paradoxalement leur volume apparent est très proche.

III - ANALYSE DU COMPORTEMENT DES MOTTES EN DESSICCATION

3.1 - INTRODUCTION

La relation entre la teneur en eau d'un échantillon de sol et son état énergétique est étroitement dépendante des caractéristiques de l'espace poral, et en particulier de la distribution des tailles des pores (HILLEL, 1974). Dans le précédent chapitre, l'étude en porosimétrie au mercure nous a permis de décrire les effets du tassement sur les spectres de porosité d'échantillons pris au champ. Toutefois, celle-ci ne nous informe pas sur les capacités de rétention en eau et de retrait de ces matériaux.

Rappelons également que lors de l'analyse des composantes de la porosité, dans le premier chapitre (voir p. 59), nous avons négligé la porosité due au retrait des mottes qui constitue normalement une source de variation des valeurs de porosité intrapédique (CHRETIEN, 1986). Cette considération n'a pu être faite qu'après connaissance des comportements en dessiccation des mottes présentés précisément dans ce chapitre.

Dans un premier temps, nous étudierons l'évolution des volumes apparents et des teneurs en eau en fonction des contraintes hydriques (succions). Puis, dans un deuxième temps, nous ferons une nouvelle description de l'organisation de l'espace poral des échantillons d'après les résultats fournis par cette méthode. En effet, si l'on se réfère à la loi de LAPLACE - applicable dans le cas de systèmes rigides, où seules les forces de capillarité commandent le remplissage et la vidange des pores - , les états énergétiques de l'eau peuvent être reliés aux tailles maximales des pores correspondants et saturés en eau (TESSIER, 1984 ; GRIMALDI, 1981 ; VAN OORT, 1984). C'est le cas des matériaux sableux, considérés justement comme des systèmes très peu déformables (CHRETIEN, 1986).

Enfin, les données obtenues permettront de discuter les valeurs de potentiel matriciel correspondantes aux dates des travaux culturaux, et de comparer les valeurs mesurées dans chacune des situations.

3.2 - MATERIELS ET METHODES

Les échantillons sont des mottes extraites de blocs décimétriques prélevés dans les trois situations intra-parcellaires de chacune des parcelles, à l'état initial, et après semis ou plantation. Il s'agit des mêmes séries d'échantillons* qui avaient fait l'objet de mesures de volume apparent, lors de l'analyse des composantes de la porosité (chapitre I). A l'état initial, les échantillons proviennent de deux horizons : celui en surface (0- 10 cm) et en profondeur sous labour (25-35 cm). Après préparation des parcelles, les blocs sont extraits uniquement en surface (0-10 cm), en entre-roues (ER), et sous passages de roues (SR).

Les mottes sont soumises à l'histoire hydrique suivante : après avoir été maintenues à une teneur** en eau constante et égale à celle du prélèvement, les mottes sont réhumectées sous vide jusqu'à saturation pendant 24 heures, puis subissent une dessiccation par étapes jusqu'à pF 4.2. La technique utilisée, est celle mise au point par RICHARDS (1941, 1947) (Annexe II.33). L'appareillage est composé de cellules pneumatiques qui permettent de soumettre les échantillons à des contraintes hydriques ou succions croissantes comprises entre 1 kPa (pF 1) et $16 \cdot 10^2$ kPa (pF 4.2).

Pour chaque valeur de succion, on détermine la teneur en eau pondérale par gravimétrie et le volume apparent par poussée d'Archimède dans le pétrole (MONNIER et al, 1973). Les volumes de mesure (10 à 15 cm³) sont suffisamment importants pour s'assurer de l'obtention de valeurs correctes des volumes apparents (FIES et STENGEL, 1981).

* les dates des prélèvements sont reportées en annexe III (tableau A1).

**les teneurs en eau moyennes correspondent à des succions comprises entre pF 1 et pF 2.

Les résultats sont représentés par des courbes qui expriment les volumes apparents ou les volumes d'eau en fonction des contraintes hydriques.

3.3 - RESULTATS

Nous analyserons, successivement, l'évolution des volumes massiques apparents et des teneurs en eau au cours des dessiccations. Enfin, dans un dernier paragraphe, nous ferons les bilans volumiques de chaque phase (air et eau) occupant les vides entre pF 1 et pF 3.

3.31 - Evolution des volumes apparents en dessiccation

Les volumes massiques apparents ne varient pas de manière significative en fonction des succions croissantes. La prise en considération des écarts types moyens - correspondant aux mesures - ne nous permet pas de mettre en évidence des phénomènes de retrait. La précision des mesures (donnée en annexe II.33) est, en fait, minimale pour les mottes extraites de la couche cultivée non tassée ($\pm 0.020 \text{ cm}^3/\text{g}$) et maximale pour celles extraites de milieux compactés ($\pm 0.010 \text{ cm}^3/\text{g}$). La figure 15 montre un exemple d'évolution des volumes apparents au cours de la dessiccation ; les variations n'apparaissent pas significatives, même pour ces matériaux tassés.

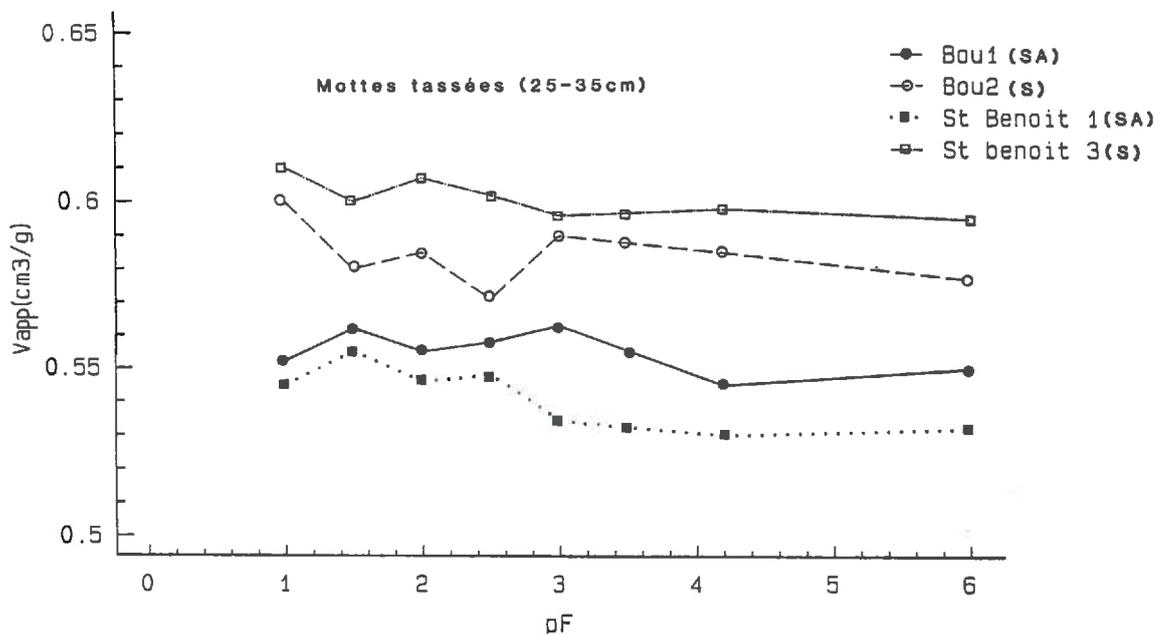
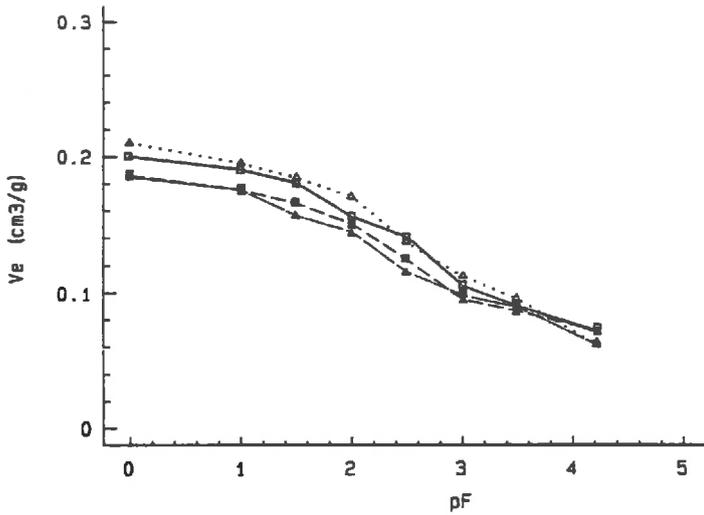


Figure 15 : Evolution des volumes apparents mesurés sur mottes au cours de la dessiccation.

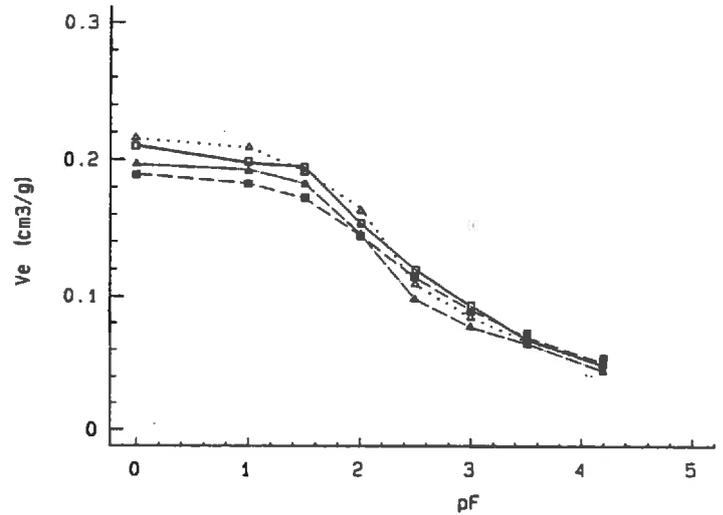
Ces résultats nous amènent donc à considérer les volumes apparents des mottes comme constants au cours des dessiccations. Ils valident la considération de non retrait que nous avons faite au cours de l'analyse des composantes de la porosité.

a) Sablo-argileux
BOU 1



—■— 0-10 cm INI non tassé
- - ■ - 25-35 cm INI tassé

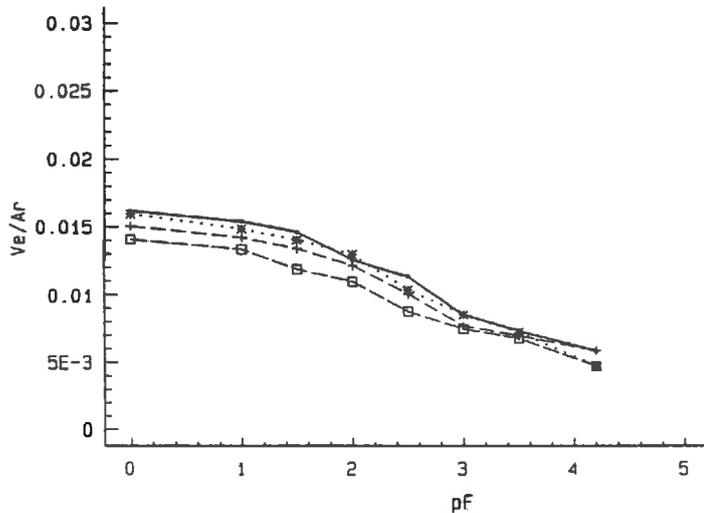
b) Sableux
BOU 2



·▲· 0-10 cm ER non tassé
—▲— 0-10 cm SR tassé

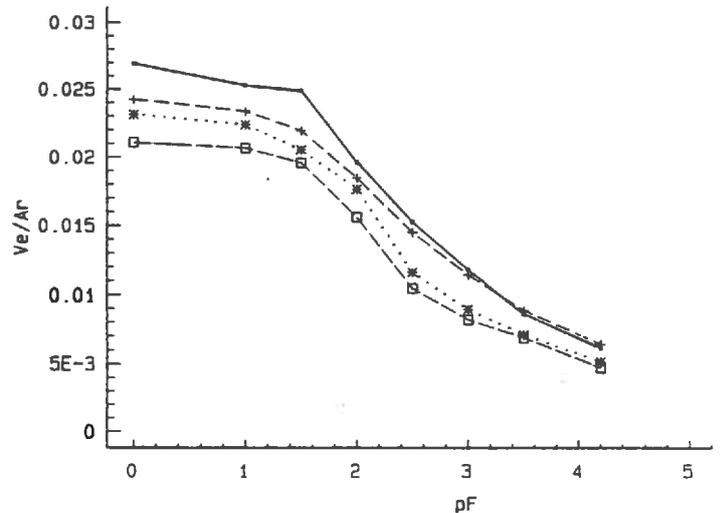
Figure 16 : Evolution des volumes d'eau au cours de la dessiccation des échantillons sablo-argileux (a) et sableux (b).

a) Sablo-argileux
BOU 1



—■— 0-10 cm INI non tassé
- - ■ - 25-35 cm INI tassé

b) Sableux
BOU 2



·*· 0-10 cm ER non tassé
—■— 0-10 cm SR tassé

Figure 17 : Evolution des volumes d'eau rapportés aux taux d'argile au cours de la dessiccation des échantillons sablo-argileux (a) et sableux (b).

3.32 - Evolution des teneurs en eau en dessiccation

Comme nous l'avions fait précédemment, nous présenterons dans un premier temps, les résultats concernant deux situations de Bou : sablo-argileuse (Bou.1) et sableuse (Bou.2). Puis, dans un deuxième temps, nous observerons les comportements en dessiccation concernant l'ensemble des échantillons.

a) Cas des échantillons SA et S

- effets de la texture

La forme générale des courbes (fig. 16) diffère suivant la nature de l'échantillon (S ou SA). Sur mottes sablo-argileuses (SA), la diminution des teneurs en eau au cours de la dessiccation est graduelle, à la différence de celle concernant les échantillons sableux (S). L'amplitude totale moyenne des variations de teneurs en eau entre l'état saturé et pF 4.2 ($16 \cdot 10^2$ kPa) est d'environ $0.13 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour les échantillons SA et $0.20 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour les échantillons S.

Les variations maximales des volumes d'eau se situent à des succions comprises entre pF 2.0 (10 kPa) et pF 4.2 (100 kPa) en milieu SA et entre pF 1.5 (3.2 kPa) et pF 2.5 (32 kPa) pour les mottes S.

Si on se réfère à une teneur en argile constante, de manière à pouvoir comparer les différents échantillons, l'expression du rapport V_e/Ar (volume d'eau/teneur en argile) ne modifie pas l'allure précédemment décrite des courbes (fig. 17). Ce mode de représentation semble même amplifier les différences entre les courbes SA et S, les variations étant maximales pour les échantillons S.

- effets du tassement

Quelle que soit la nature granulométrique de l'échantillon (S ou SA), les mottes tassées (25-35 cm INI ; 0-10 cm SR) présentent des courbes de dessiccation différentes des mottes non tassées (0-10 cm INI ; 0-10 cm ER) (fig 16). Aux faibles succions, les volumes d'eau sont plus élevés pour les échantillons non compactés que pour les échantillons compactés. Ces différences se réduisent et disparaissent au cours de la dessiccation au delà d'une valeur de succion. Cette dernière est égale à pF2 (10 kPa) pour les échantillons S et SA prélevés à l'état initial (INI). Elle est supérieure à cette valeur pour les mottes SA prélevées après semis, puisque les courbes ER et SR se différencient jusqu'à pF 3.0 (100 kPa).

Indépendamment des teneurs en argile, les courbes des mottes tassées ou non tassées demeurent différentes aux faibles succions (fig. 17).

b) Comportements des autres échantillons

Les échantillons prélevés dans les autres situations intra-parcellaires ont des comportements en dessiccation qui s'apparentent totalement à ceux décrits précédemment, qu'il s'agisse de matériaux sablo-argileux ou sableux (fig. 18).

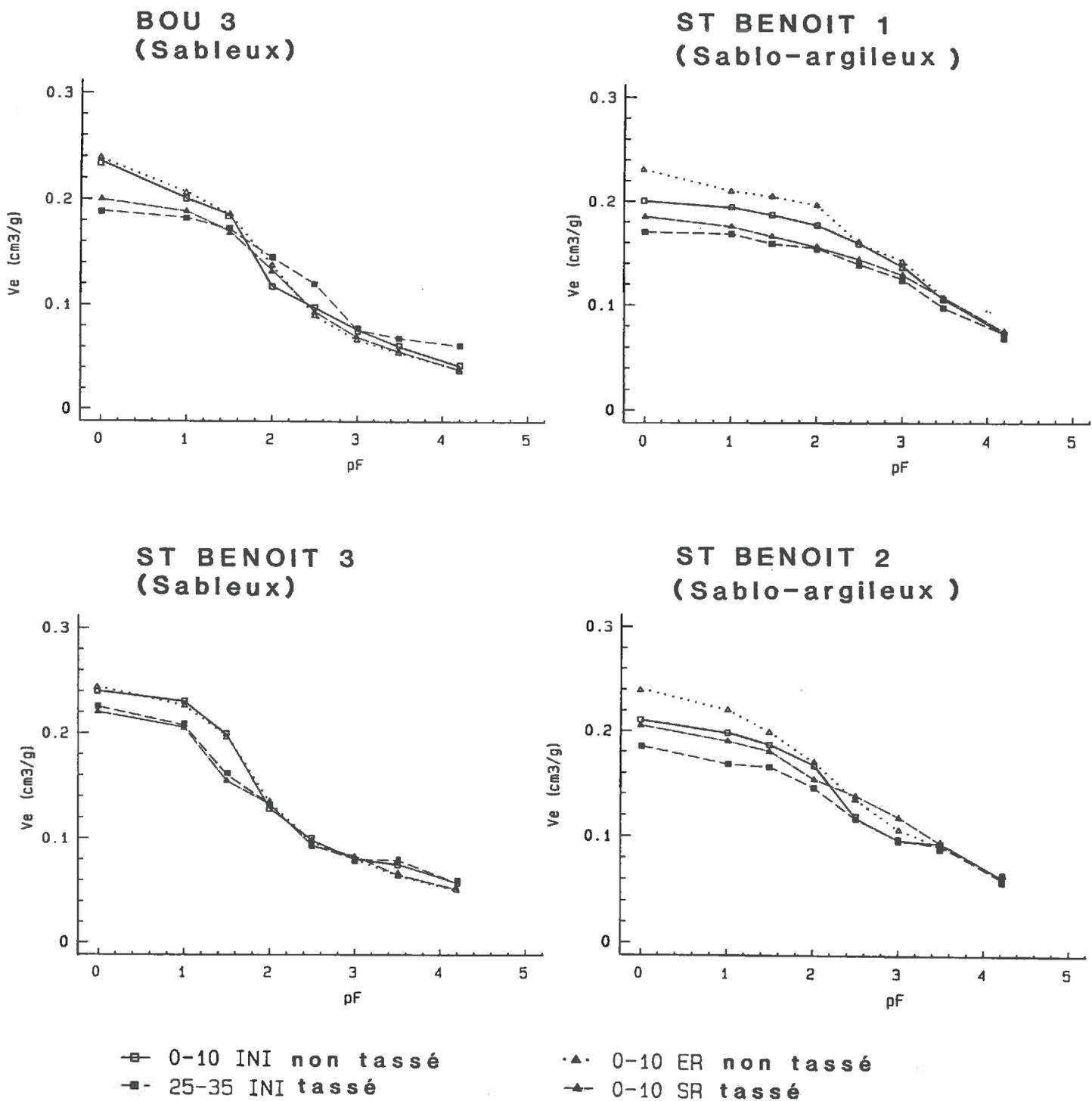
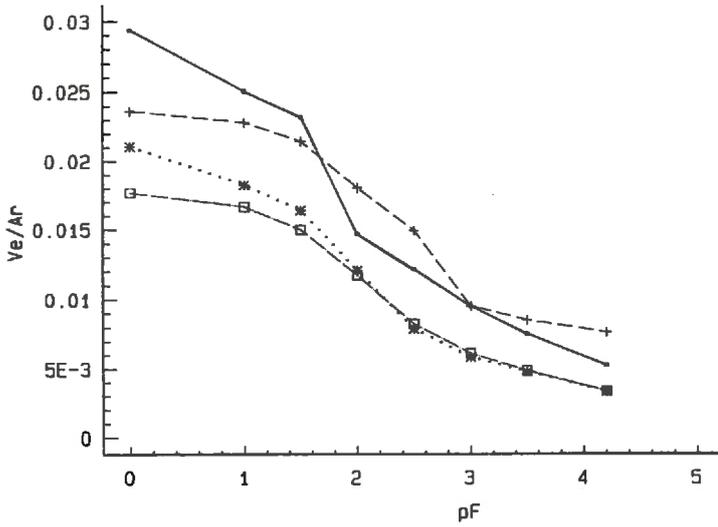
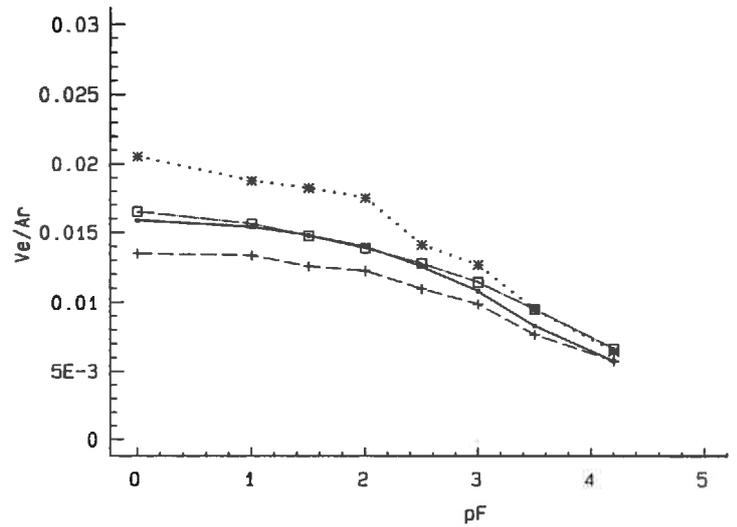


Figure 18 : Evolution des volumes d'eau au cours de la dessiccation des échantillons prélevés à Bou et St Benoit.

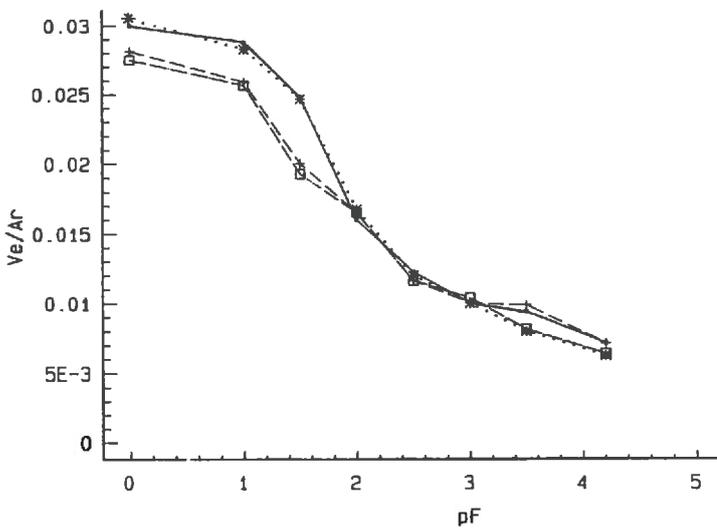
**BOU 3
(Sableux)**



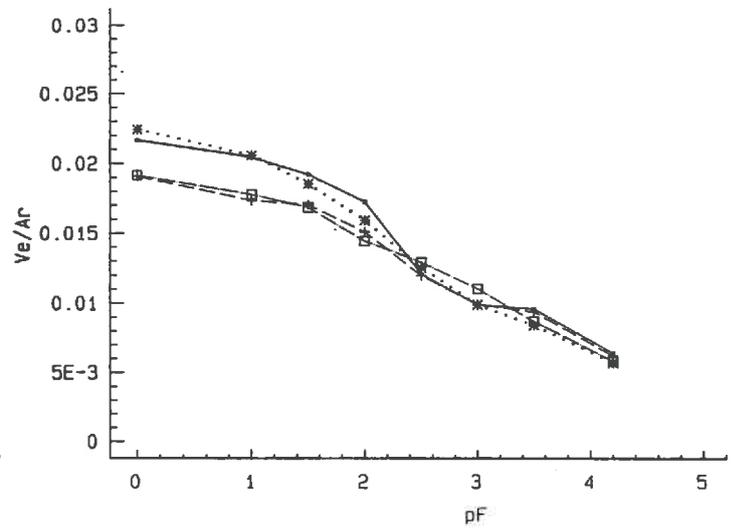
**ST BENOIT 1
(Sablo-argileux)**



**ST BENOIT 3
(Sableux)**



**ST BENOIT 2
(Sablo-argileux)**



—●— 0-10 cm INI non tassé
-+- 25-35 cm INI tassé

·*· 0-10 cm ER non tassé
-□- 0-10 cm SR tassé

Figure 19 : Evolution des volumes d'eau rapportés aux taux d'argile au cours de la dessiccation des échantillons prélevés à Bou et St Benoit.

Nous observons des effets tout à fait similaires de la texture. Les diminutions de volumes d'eau - en fonction des suctions croissantes - sont plus graduelles pour l'échantillon sablo-argileux (STB.1) que pour les échantillons sableux (Bou.3 et STB.3). Les mottes de STB.2 ont cependant un comportement qui semble être légèrement différent de celui des mottes de STB.1. Ce résultat peut être lié à la nature granulométrique de ces matériaux, et en particulier, à leur teneur légèrement plus faible en éléments inférieurs à 50 μm (tableau 4, 1ère partie). Les diminutions des volumes d'eau entre pF 1 (1 kPa) et pF 4.2 (16.10^2 kPa) sont par conséquent maximales pour les mottes sableuses (Bou.3 et STB.3) ($\approx 0.20 \text{ cm}^3/\text{g}$), intermédiaires pour les mottes de STB.2 ($\approx 0.15 \text{ cm}^3/\text{g}$), et minimales pour les mottes de STB.1 ($\approx 0.13 \text{ cm}^3/\text{g}$). De même, les variations relatives maximales des teneurs en eau se trouvent entre pF 1.5 et pF 2.5 pour les mottes sableuses et à des valeurs supérieures à pF 2 pour les mottes sablo-argileuses de STB.1 et 2.

Le tassement a également des conséquences de la même nature sur ces échantillons. Il diminue sensiblement les capacités de rétention aux faibles suctions. A l'état initial, les mottes non tassées de surface ont des teneurs en eau supérieures à celles des mottes tassées pour des suctions inférieures à pF 2 (mottes sableuses) voire pF 3.5 (mottes sablo-argileuses de STB.1). Cette même différenciation peut être faite entre les mottes prélevées après préparation des parcelles en entre-roues (ER) et sous roues (SR).

L'expression des volumes d'eau en référence aux taux d'argile (Ve/Ar) (fig. 19) augmente les différences de formes de courbes entre échantillons SA et S. Les effets du tassement demeurent très nets avec ce mode de représentation.

3.33 - Taux de saturation entre pF 1 et pF 3

Les taux de saturation permettent de connaître les volumes de vides occupés par l'eau aux différentes suctions. Les valeurs, rapportées dans le tableau 13, nous montrent qu'à pF 1 et pF 1.5 la quasi-totalité des mottes sont saturées en eau. Les seules présentant des taux de saturation inférieurs à 90 % sont les mottes non tassées, prélevées en entre-roues (ER) après préparation des parcelles. Il est intéressant de noter que ces taux très élevés correspondent toujours à des échantillons présentant une porosité structurale intra-mottière (et donc intrapédique) très réduite (voir tableaux 7 et 8). Nous pouvons, par conséquent, considérer que c'est la réduction du volume poral des mottes qui est à l'origine de ces taux très élevés aux faibles suctions (\leq pF 1.5).

Les échantillons sableux ont des taux de saturation moyens nettement moins élevés, à partir de pF 2, que les matériaux sablo-argileux. A cette succion, le taux de saturation moyen des matériaux sableux est de 64 % et celui des matériaux sablo-argileux, de 83 %.

Aux fortes suctions (pF 3), les différences relatives entre mottes tassées et non tassées sont plus importantes lorsqu'elles sont de nature sablo-argileuse.

Tableau 13 - Taux de saturation en eau (θ_w) de la porosité des nottes pour des succions comprises entre pF 1 et pF 3 ; ($\sigma = \pm 4 \%$; $\theta_w = V_{eau}/V_{vide}$)

Echantillons	θ_w à pF1	θ_w à pF1.5	θ_w à pF2	θ_w à pF2.5	θ_w à pF3
Bou.1					
ini 0-10	82	78	67	61	45
ini 25-35	100	95	87	72	55
er 0-10	84	79	73	58	48
sr 0-10	95	84	77	62	52
Sablo-argileuses					
STB.1					
ini 0-10	100	100	95	86	74
ini 25-35	100	100	99	89	80
er 0-10	99	97	93	75	67
sr 0-10	100	99	94	86	77
STB.2					
ini 0-10	99	93	84	59	48
ini 25-35	100	100	90	72	59
er 0-10	79	71	61	48	38
sr 0-10	99	94	81	72	62
Bou.2					
ini 0-10	98	97	76	59	46
ini 25-35	94	88	74	58	46
er 0-10	86	79	67	44	34
sr 0-10	97	92	73	49	38
Sableuses Bou.3					
ini 0-10	100	93	59	49	38
ini 25-35	100	90	76	62	40
er 0-10	81	73	53	35	26
sr 0-10	95	83	65	46	34
STB.3					
ini 0-10	100	89	57	44	36
ini 25-35	94	73	60	42	36
er 0-10	84	73	50	36	30
sr 0-10	99	74	63	44	40

3.4 - INTERPRETATION

a) Volumes apparents

Les premiers résultats nous montrent que les volumes apparents ne varient pas de manière significative au cours des dessiccations et qu'en d'autres termes, nous n'observons pas de retrait. Ce comportement est donc différent de celui décrit par CHRETIEN (1986) qui, dans le cas d'un matériau sablo-argileux (contenant 8.4 % d'argile), met en évidence un retrait significatif entre pF 1 et pF 3 ($\Delta V = 0.064 \text{ cm}^3/\text{g}$). Toutefois, il ne s'agit pas d'un échantillon rigoureusement semblable aux nôtres. Il présente, en particulier, des quantités beaucoup plus importantes en limon et sable fin. Ainsi, pouvons nous faire l'hypothèse que l'absence de retrait constatée ici est due à la grossièreté du squelette.

Les fortes dispersions des valeurs de volume apparent, en particulier pour les mottes non tassées ($\sigma = \pm 0.020 \text{ cm}^3/\text{g}$), sont sans aucun doute à attribuer à l'action du travail du sol. On comprend aisément que les travaux culturaux font un mélange de mottes issues de niveaux tassés ou meubles et conduisent, par conséquent, à une hétérogénéité de leur volume poral. Il est alors normal d'obtenir les écarts types plus importants pour les mottes extraites de la couche cultivée non tassée. Précisons, à ce propos, que MANICHON (1988) a montré également, dans le cas de matériau limoneux, une dispersion plus importante des volumes apparents pour les mottes à forte macroporosité (Γ) par rapport aux mottes à faible macroporosité (Δ).

b) Application des résultats à l'analyse de l'espace poral

Les milieux pouvant être considérés comme rigides (CHRETIEN, 1986), les teneurs en eau peuvent être reliées aux tailles maximales de pores correspondant aux différents états énergétiques de l'eau (considération de la loi de LAPLACE) (TESSIER, 1984 ; VAN OORT, 1984). La validité de cette relation reste donc limitée à l'application de la loi de LAPLACE.

Tableau 14 - Relation entre l'état énergétique de l'eau dans le sol, la pression externe exercée et la taille maximale des pores correspondants.

Pression appliquée (kPa)	pF	Taille maximale des pores remplis d'eau (diamètres équivalents en μm)
1	1	300
3.2	1.5	100
10	2	30
31.6	2.5	10
100	3	3
316.2	3.5	1
1585	4.2	0.1

L'ensemble des précédents résultats nous montre deux types de comportement en dessiccation :

. Cas des échantillons sablo-argileux (Bou.1-STB.1-STB.2)

Les dessiccations sont progressives entre pF 1 et pF 4.2, avec de légères augmentations entre pF 2 et pF 3. Cette évolution correspond, selon la loi de LAPLACE, à des distributions étalées des tailles des pores pour ces échantillons, avec une dominance de pores de diamètre équivalent ($D_{e,q}$) compris entre 30 et 3 μm . A la différence des échantillons sableux, il y a moins de pores très grossiers et davantage de pores de $D_{e,q} < 1 \mu\text{m}$. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus en porosimétrie au mercure, où nous avons observé, toujours pour les matériaux riches en éléments fins, des distributions des volumes de pores plus étalées, avec des pics d'intrusion situés entre 5 et 12 μm (tableaux 10 et 11).

Le tassement mécanique affecte l'organisation des systèmes poraux, en particulier la macroporosité. En effet, les courbes de dessiccation des mottes SA tassées et non tassées se différencient jusqu'à pF 2, voire pF 3, soit pour des pores de diamètres équivalents supérieurs à 30 μm ou 3 μm . Ce résultat est en accord avec les observations faites en porosimétrie au mercure décrivant, suite au compactage, une diminution des volumes des pores les plus grossiers ($D_{e,q} > 8 \mu\text{m}$) et un déplacement du maximum d'intrusion, situé à $D_{e,q} = 12 \mu\text{m}$ pour les mottes non tassées, et 5 μm pour les mottes tassées.

. Cas des échantillons sableux (Bou.2-Bou.3-STB.3)

Contrairement aux précédents échantillons, les dessiccations sont irrégulières et maximales à des suctions inférieures à pF 2 (10 kPa), soit pour des pores de $D_{e,q}$ supérieurs à 30 μm . Ce résultat apparaît lié au fait qu'il s'agit de matériaux plus grossiers et moins argileux. La porosimétrie au mercure nous a fourni des données semblables : les distributions des volumes des pores apparaissent très resserrées, avec des maxima correspondant à $D_{e,q}$ compris entre 30 et 58 μm (tableaux 10 et 11).

Nous devons ajouter que l'expression des volumes d'eau ramenés aux taux correspondants d'argile (V_e/Ar), souligne les différences entre les courbes des mottes SA et S ; elles sont à associer aux morphologies différentes de leur espace poral et par conséquent aux distributions différentes des volumes des pores. L'argile intervient à deux niveaux dans les propriétés de rétention : *i* - Tout d'abord, un rôle lié à ses propriétés propres de rétention en eau, qui se manifeste aux fortes suctions ; *ii* - Ensuite, un effet d'encombrement de la porosité lacunaire déterminant les capacités de rétention aux faibles suctions. En ramenant à une teneur en argile constante, on diminue le premier effet et amplifie le second.

A la différence des échantillons sablo-argileux, le tassement provoque uniquement une réduction des volumes d'eau à des suctions inférieures à pF 2, soit pour des pores de diamètre de constriction $D_{e,q} > 30 \mu\text{m}$. Il y a, là encore, une parfaite concordance avec les résultats acquis en porosimétrie au mercure.

Tableau 15 - Succions lors des travaux culturaux exprimées en kPa.

* travaux culturaux dont on a mesuré les effets sur les caractéristiques physiques des sols.

SITUATIONS	D A T E S		
	9/5* avant semis	13/5 herbicide	6/10* récolte
Bou.1 0-10	20	10	316
10-20	10	10	63
20-30	13	10	40
30-40	6	6	32
Bou.2 0-10	32	16	251
10-20	16	16	79
20-30	8	13	79
30-40	15	15	158
Bou.3 0-10	10	13	158
10-20	10	10	50
20-30	10	25	63
30-40	13	10	40
	7/5 Déchaumage	11/6* avant labour	19/7* récolte
STB.1 0-10	32	1585	251
10-20	40	631	398
20-30	32	40	316
30-40	32	13	251
STB.2 0-10	10	631	79
10-20	20	40	79
20-30	25	13	63
30-40	16	20	100
STB.3 0-10	8	63	32
10-20	13	20	20
20-30	6	13	25
30-40	10	13	25

3.5 - APPLICATION DES RESULTATS A L'ANALYSE DES CONTRAINTES HYDRIQUES LORS DES TRAVAUX CULTURAUX

Les résultats nous permettent également d'examiner les valeurs de contrainte hydrique existant au moment des travaux cultureux. A la différence des teneurs en eau pondérales, les valeurs de potentiel obtenues dans chacune des situations granulométriques peuvent être comparées entre elles. Le tableau 15 présente les valeurs de succion déduites des courbes de dessiccation, pour chacune des situations et des dates d'intervention des agriculteurs.

On observe des variations importantes des succions en fonction des dates de mesure, des situations intra-parcellaires, et des profondeurs.

A Bou, à la reprise du labour (entre le 9 et le 13 mai), les succions dans l'horizon travaillé, et pour toutes les situations, sont comprises entre 8 et 30 kPa. Les passages d'engins ont donc lieu sur une surface aux succions comprises entre ces valeurs, puisque les façons culturales provoquent un remaniement des 15 à 20 premiers centimètres du sol. Les valeurs sont largement supérieures le 6 octobre, à la récolte, en particulier en surface (0-10 cm).

A Saint-Benoit, les contraintes hydriques sont comprises entre 8 et 40 kPa à la première intervention : un déchaumage (le 7 mai). Avant labour (le 11 juin), les horizons travaillés présentent des états d'hydratation très différents d'un milieu à l'autre et suivant la profondeur (de 20 à 1600 kPa). Nous pouvons considérer cependant que les interventions postérieures (suite au labour) se font sur un horizon travaillé à un état d'hydratation intermédiaire entre ces deux pôles, le labour homogénéisant les gradients de succions. Enfin, à la récolte, les succions sont comprises entre 32 et 250 kPa dans les 10 premiers centimètres de sols.

En définitive, l'expression du contenu en eau en terme de succion montre que dans les deux contextes, les travaux cultureux se déroulent souvent dans des conditions défavorables où les taux de saturation sont élevés, en particulier au mois de mai (tableau 13). L'état d'hydratation dans ces conditions (≈ 10 kPa) est proche de celui correspondant à la capacité au champ (BETREMIEUX, 1975).

Cette analyse permet également d'observer que les réductions de volume apparent observées au champ sous les passages de roues, après préparation des parcelles (voir chapitre 1), ont lieu dans des conditions de potentiel hydrique relativement semblables à Bou et Saint-Benoit si l'on considère les valeurs moyennes correspondant aux horizons travaillés. En conséquence, les valeurs équivalentes de volume poral mesurées sous passages de roues à Bou et Saint-Benoit, dans des contextes granulométriques analogues (mais avec des taux en matière organique très différents), ne sont pas dues à des conditions hydriques plus défavorables à Saint-Benoit.

A la récolte, les succions sont par contre nettement plus faibles à Saint-Benoit qu'à Bou. Ce constat peut constituer une des explications des évolutions importantes de volume apparent observées en entre-roues à Saint-Benoit.

Le tassement des sols étant étroitement lié aux valeurs de contrainte hydrique existant lors des travaux culturaux, il conviendra de se replacer dans des conditions identiques quand on voudra reproduire ce tassement en laboratoire, par des essais de compactage, afin d'examiner l'évolution des volumes apparents des différents matériaux et des tailles des pores, à ces valeurs de succion.

3.6 - CONCLUSION

Cette analyse a permis de décrire les effets de la texture et du tassement sur les comportements en dessiccation des mottes.

Les premiers résultats montrent que ces matériaux sableux ne présentent pas des retraits significatifs. Ils soulignent, par conséquent, l'absence de possibilité de régénération des structures par le phénomène de retrait. Ce caractère spécifique des matériaux sableux est décrit par STENGEL et al. (1984).

L'analyse des évolutions de teneurs en eau au cours des dessiccations a permis d'observer les points suivants :

Les échantillons sablo-argileux, à granulométrie équilibrée, ont une dessiccation graduelle, conforme à la distribution étalée des volumes des pores que nous avons observée en porosimétrie au mercure. Au contraire, les échantillons sableux, à fraction granulométrique dominante, sont caractérisés par une dessiccation plus irrégulière et par une forte diminution des teneurs en eau entre pF 1.5 et pF 2.5, conformément à une distribution des volumes des pores caractérisée par une famille de pores dominante, située entre 100 et 10 μm de diamètres équivalents. Des relations analogues entre les caractéristiques observées en porosimétrie au mercure et les comportements en humectation des mottes sont décrites par CHRETIEN et TESSIER (1988).

Le tassement réduit les capacités de rétention des mottes aux faibles succions (pF < 2 à 3). La diminution du volume poral a pour effet d'augmenter les taux de saturation aux faibles contraintes hydriques. Dans de nombreuses situations, les mottes sont proches de la saturation jusqu'à pF 2 (10 kPa). Notons que CURMI (1987) observe les mêmes résultats pour des matériaux limoneux : les mottes à forte macroporosité (Γ) ont des capacités de rétention supérieures à celles des mottes compactées (Δ). En outre, il souligne qu'à pF 1, les mottes tassées sont saturées en eau, tandis que les mottes non tassées présentent encore une porosité libre à l'air.

Il apparaît, là encore, que les modifications des propriétés de rétention dues au tassement sont tout à fait cohérentes avec les variations de distributions des volumes des pores que nous avons observées en porosimétrie au mercure. Cette concordance des résultats, acquis avec les deux méthodologies, a été également mise en évidence par BULLOCK et al (1985).

Enfin, l'analyse des valeurs de succion lors des travaux culturaux a révélé que, dans de très nombreuses situations, les sols sont travaillés à des faibles succions et par conséquent à des taux de saturation élevés.

IV - CARACTERISATION DES TRANSFERTS D'EAU AU TRAVERS D'UNE COLONNE DE SOL

4.1 - INTRODUCTION

Les transformations de l'organisation de l'espace poral, consécutives au tassement, modifient inéluctablement les capacités d'infiltration de l'eau dans les sols (MONNIER et GUERIF, 1988).

L'analyse des conductivités hydrauliques constitue un moyen de caractérisation du fonctionnement de l'espace poral des sols. Elle permet d'exprimer non seulement les effets des variations de volume poral global, mais surtout les conséquences des modifications des tailles des pores, de leur tortuosité et degré de connexion (BOUMA et KOOISTRA, 1987 ; GRAS, 1969 ; KOOISTRA et al., 1984).

4.2 - GENERALITES

La première formulation empirique des mouvements de l'eau dans le sol est fournie par DARCY (1856). La vitesse de V_D de l'eau au travers d'un milieu poreux saturé est égale à :

$$V_D = - K i$$

K : coefficient analogue à une vitesse et dépendant du milieu (annexe II.4).

$$i : \frac{\Delta H}{L}$$

avec ΔH : variation de charge hydraulique
 L : longueur du massif poreux

La charge hydraulique exprime l'énergie d'eau en unité de poids. Elle résulte d'une charge de pression positive (supérieure à la pression atmosphérique) et d'une charge liée à l'altitude relative. En prenant S comme section de volume poreux, le débit q d'eau à travers cette section vaut :

$$q = VS = - K \frac{S \Delta H}{L}$$

L'équation complète, dans le cas d'une colonne de sol saturée où l'eau circule vers le bas, est donnée en annexe II.4.

La constante K , appelée conductivité hydraulique, permet de caractériser le milieu poral par son "pouvoir filtrant". La conductivité est évidemment influencée par la structure et la texture : elle sera plus élevée si le sol est très poreux, fracturé ou aggrégué, que s'il est compact et dense (HILLEL, 1974). Elle dépend par conséquent des valeurs de contraintes hydriques et mécaniques que les sols ont pu subir auparavant (LESSARD, 1981).

La conductivité hydraulique K n'est pas seulement une propriété du sol. Elle dépend également des caractéristiques du fluide (densité, viscosité) (annexe II.4).

Les sols étant rarement saturés dans les conditions naturelles, la loi de Darcy fut généralisée aux milieux désaturés. On a alors l'expression :

$$q = -K(\Gamma) \frac{dH}{dZ} \quad \text{où } H = -\Gamma - Z$$

Γ : potentiel matriciel

Z : potentiel gravitaire

Le régime d'écoulement dépend donc du potentiel matriciel - et par conséquent de l'humidité volumique initiale - le stockage de l'eau entre deux points d'un itinéraire liquide étant d'autant plus important que le gradient de succion est élevé (fig. 20) (HILLEL, 1974).

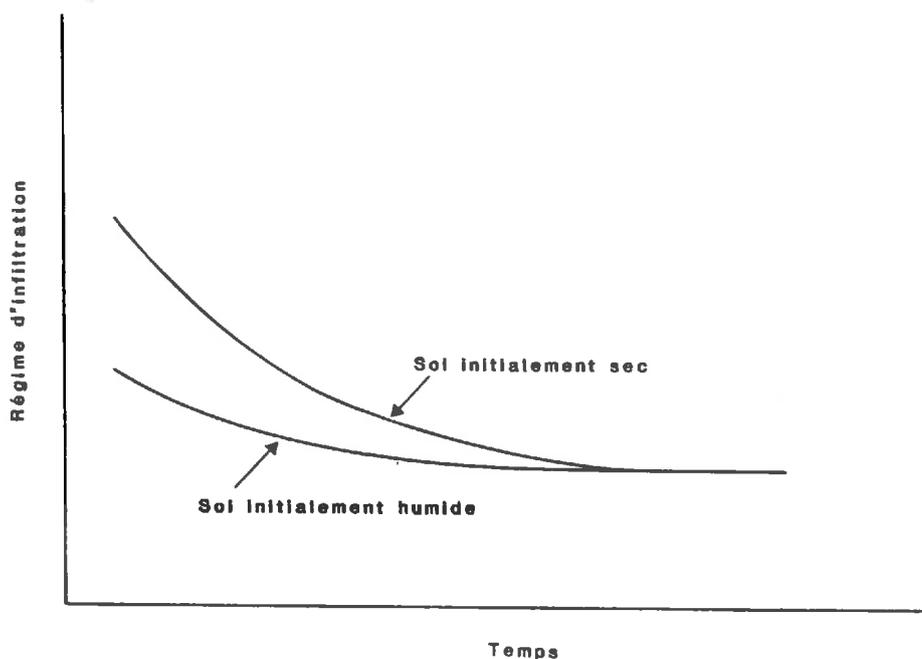


Figure 20 : Intensité d'infiltration d'un sol initialement sec ou humide (HILLEL, 1974).

4.3 - METHODE D'ANALYSE

De manière à faire une simple analyse des conséquences du tassement (et des modifications de l'espace poral associées) sur les caractéristiques de transfert en eau, nous nous sommes limités à la mesure des conductivités en régime saturé. La méthode générale appliquée est décrite en annexe II.4. Elle a l'avantage de donner la possibilité d'acquérir rapidement et simplement les valeurs de conductivité (K_{sat}).

Les échantillons étudiés sont les matériaux non remaniés prélevés avec les cylindres de 1000 cm³ et utilisés lors des mesures de volumes apparents (chapitre I.3). Ils proviennent donc de chacune des situations intra-parcellaires de Bou et de Saint-Benoit.

Au stade initial (INI), les échantillons tassés sont ceux de la couche 25-35 cm et les non tassés ceux de la couche 0-10 cm.

Après préparation des parcelles, les échantillons tassés sont prélevés sous les passages de roues (SR) et les non tassés, en entre-roues (ER).

4.4 - RESULTATS ET INTERPRETATIONS

La figure 21 représente les valeurs de conductivité hydraulique en régime saturé (K_{sat}), en fonction des volumes massiques apparents. Les valeurs de K_{sat} augmentent avec celles des volumes apparents. Elles sont comprises entre 0 et 70 mm.h⁻¹. Les augmentations sont d'autant plus importantes, que les conductivités concernent des milieux très poreux.

De manière à montrer les effets de l'état structural et de la texture, nous avons reporté les points avec des symboles différents et ajouté des indices.

Les échantillons prélevés dans les horizons tassés (25-35 cm INI ; 0-10 cm SR) présentent des valeurs extrêmement faibles de K_{sat} (parfois inférieure au mm/h). A l'inverse, les échantillons de l'horizon superficiel non compacté sont très "filtrants", surtout en présence de macropores d'origine biologique.

Tableau 16 - Exemple d'évolution des conductivités hydrauliques (K_{sat} en mm.h⁻¹) en régime saturé en fonction du temps (après une heure de mise à l'équilibre)

Echantillons	Temps écoulé en mn							
	15'	30'	45'	60'	75'	90'	105'	120'
Bou.1								
ini 0-10	56.0	53.4	54.2	55.9	53.0	48.8	48.1	48.0
ini 25-35	1.2	1.6	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
er 0-10	26.0	23.3	17.5	15.5	13.5	12.4	11.0	10.9
sr 0-10	0	0.1	0.05	0	0	0.1	0.05	0.1
Bou.2								
ini 0-10	56.0	45.5	38.6	35.1	30.3	25.5	21.8	22.0
ini 25-35	3.7	3.7	3.5	3.4	3.6	3.6	3.6	3.6
er 0-10	29.0	27.7	26.0	24.2	22.6	21.8	21.0	20.8
sr 0-10	9.4	9.2	8.8	8.2	8.1	7.6	7.6	7.7
Bou.3								
ini 0-10	81.5	78.0	78.0	78.0	77.1	76.9	74.9	75.5
ini 25-35	3.7	1.9	1.5	1.4	1.5	1.4	1.3	1.5
er 0-10	39.0	37.0	36.5	35.7	34.5	33.9	33.8	33.8
sr 0-10	5.7	5.6	5.7	6.0	5.9	5.8	5.5	5.4

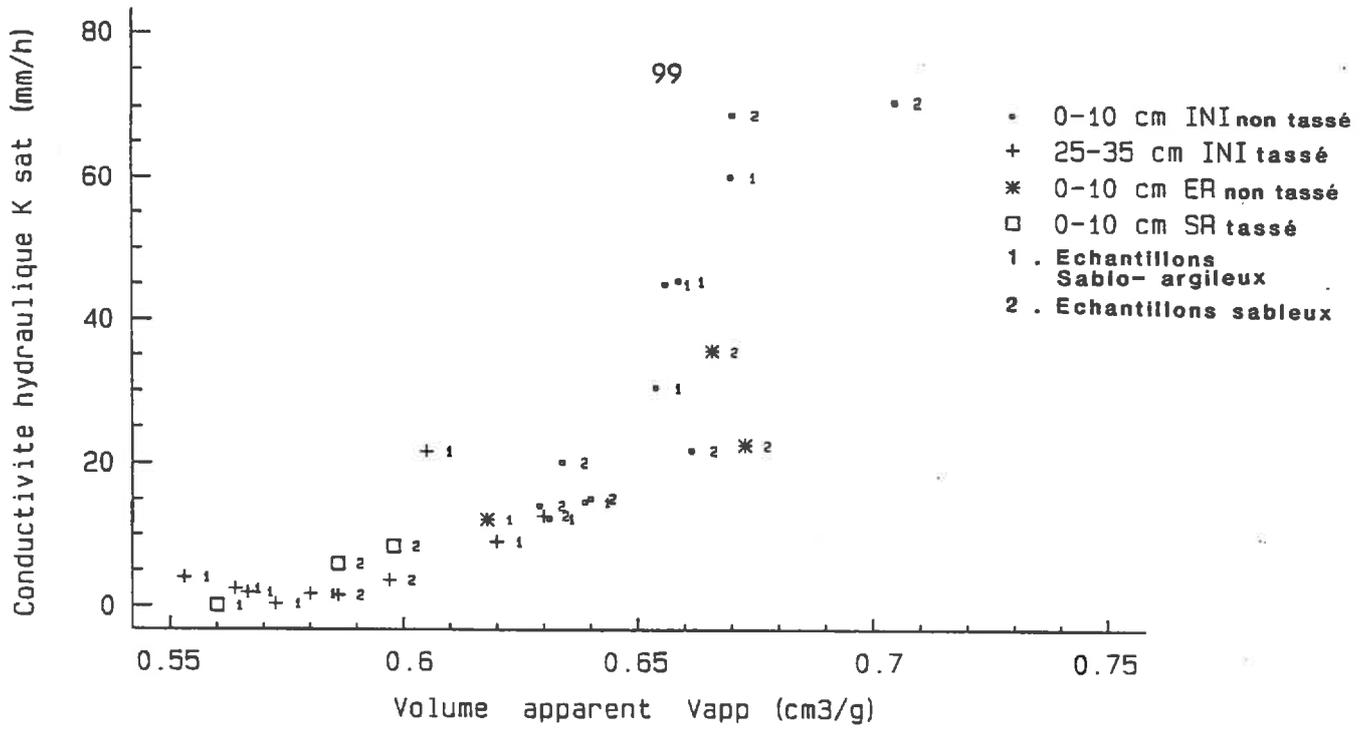


Figure 21 : Relation entre les conductivités hydrauliques en saturé (K_{sat}) et les volumes apparents totaux.

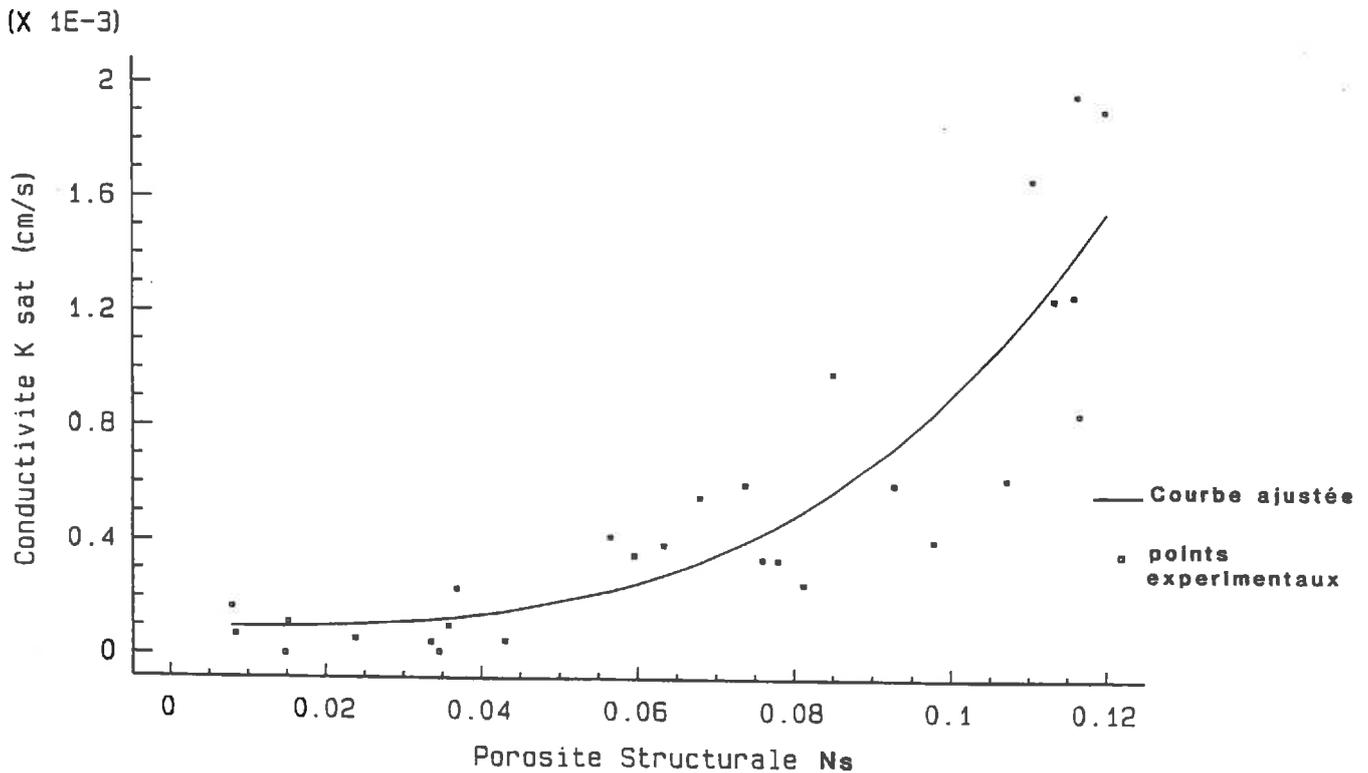


Figure 22 : Ajustement entre la conductivité hydraulique en saturé et la porosité structurale par la formule de Kozeny.

Ainsi, pour une texture donnée (tableau 16), les valeurs de K_{sat} peuvent varier de 0 mm.h^{-1} pour des échantillons tassés (SR), à 56 mm.h^{-1} pour les non tassés (ER). Un effet texture peut être également mis en évidence. Les valeurs minimales de K_{sat} concernent généralement le contexte sablo-argileux (figure 21). Un rapide calcul donne une valeur moyenne en milieu compacté égale à 1.7 mm.h^{-1} pour les échantillons sablo-argileux et 6.7 mm.h^{-1} pour les échantillons sableux. Toutefois, cet effet de texture s'estompe sensiblement en milieu non compacté.

Les conductivités hydrauliques apparaissent donc nettement plus faibles que celles correspondant à des milieux mono-particulaires. En effet, HILLEL (1974) décrit, pour de tels milieux, des K_{sat} compris entre 36 et 360 mm.h^{-1} .

Deux facteurs expliquent ces différences :

- 1 - nous disposons ici de matériaux présentant une granulométrie diversifiée,
- 2 - le tassement a modifié les capacités de transfert.

A la différence des matériaux compactés, très stables, les matériaux non compactés semblent évoluer structurellement au cours de l'expérience. Cette évolution conduit à une réduction importante des valeurs de K_{sat} en début de mesure (tableau 16).

Cette instabilité très importante des milieux non compactés, au cours des expérimentations, est décrite par SELVANATHAN (1976) comme la conséquence d'une migration des particules fines pendant l'écoulement, sous l'effet des gradients de charge existant dans les colonnes de sol. De fait, l'observation des cylindres au cours des expérimentations montre que, très souvent, dans le cas d'échantillons très poreux, une baisse de la surface et par conséquent un léger tassement se produisent. Il y aurait donc une diminution du volume poral en cours de mesure.

Comme la conductivité est liée aux caractéristiques de l'espace poral des milieux, nous sommes tentés d'établir une relation permettant de relier les caractéristiques des milieux poreux aux valeurs de K_{sat} . Une des théories le plus largement acceptées, est celle de Koseny modifiée par Carman (HILLEL, 1974). L'équation est de la forme :

$$k = \frac{f^3}{ca^2 (1-f)^2}$$

où f est la porosité, " a " la surface en contact avec le fluide et c une constante dépendant de la forme de la particule.

FIES (1982) a montré que la conductivité (K_{sat}) pouvait être ajustée de façon satisfaisante avec cette équation en ne faisant intervenir que la porosité structurale (N_s). Cet ajustement a l'avantage de constituer un modèle explicatif.

L'application de cette formule à nos échantillons nous donne l'équation suivante :

$$K_{sat} = 0.6538 \frac{N_s^3}{(1 - N_s)^2} + 0.1 \cdot 10^{-3} \quad r^2 = 0.79 \quad (fig. 22).$$

$n = 28$

$$(FIES : K_{sat} = 0.2130 \frac{N_s^3}{(1 - N_s)^2} + 0.2 \cdot 10^{-3})$$

Nous obtenons par conséquent une relation relativement satisfaisante pour l'ensemble de la population (échantillons tassés et non tassés). Précisons que dans notre cas, la porosité structurale correspond à la différence entre la porosité totale (mesurée sur cylindre) et la porosité dite texturale (correspondant à celle déterminée sur matériau remanié).

Il est intéressant de noter ici un coefficient ($1/ca^2$) différent de celui obtenu par FIES. De manière à mettre en évidence les effets du compactage sur ce coefficient, nous avons refait le même calcul en distinguant les échantillons compactés et non compactés :

$$\text{compactés} \quad K_{sat} = 0.3536 \frac{N_s^3}{(1 - N_s)^2} + 0.1 \cdot 10^{-3} \quad r^2 = 0.35 \quad n = 16$$

2.828

$$\text{non compactés} \quad K_{sat} = 0.6111 \frac{N_s^3}{(1 - N_s)^2} + 0.2 \cdot 10^{-3} \quad r^2 = 0.63 \quad n = 12$$

1.636

Nous constatons une diminution des coefficients de corrélation. Toutefois, ces relations mettent en évidence un effet, déjà constaté, de la diminution des coefficients ($1/ca^2$) avec le compactage. Dans ces conditions, les conséquences des variations de volume sont très vraisemblablement à associer aux modifications de la configuration et de l'orientation des pores résiduels, pour expliquer les diminutions des valeurs de K_{sat} puisque la valeur ca^2 augmente (MONNIER et GUERIF, 1988). Enfin, il est intéressant d'observer des différences d'ordonnée à l'origine entre échantillons compactés et non compactés.

4.5 - CONCLUSION

Ce chapitre a permis de mettre en évidence les conséquences du tassement sur les valeurs de conductivité hydraulique en régime saturé. Une diminution très importante des capacités de transfert en eau est apparue pour les échantillons tassés, les valeurs de K_{sat} étant largement inférieures à celles mesurées dans le cas de milieux monoparticulaires.

Même si un effet de texture a été souligné, il demeure néanmoins d'amplitude nettement inférieure à celle concernant l'état structural du milieu.

La diminution des volumes des pores les plus grossiers semble la première responsable de cette réduction des valeurs de conductivité. Le même constat fut établi par SELVANATHAN (1976) et GRABA (1986) dans le cas de matériaux compactés en laboratoire. Ce dernier auteur souligne une diminution maximale des conductivités lorsque les sables sont plus riches en éléments fins (Ar + L).

Toutefois, la seule prise en considération des variations de porosité ne permet pas d'expliquer les variations de conductivité. L'ajustement de la formule de KOZENY montre, en effet, que les coefficients de forme augmentent sensiblement pour les échantillons tassés, traduisant ainsi une plus grande dépendance vis à vis de la morphologie de l'espace poral (degré de tortuosité et de connexion). Les résultats sont cohérents avec ceux de KOOISTRA et al. (1987) qui observe un effet très important de la continuité des pores sur les valeurs de K_{sat} . De même, COOPER et NICHOLS (1959) montrent que le tassement provoque non seulement une réduction du volume poral, mais également une diminution de la continuité des pores.

V - SYNTHÈSE - CONCLUSION

Ce chapitre avait pour objectif de décrire l'évolution des caractéristiques de sols sableux soumis aux travaux culturaux et, plus précisément, de l'évolution de leur espace poral.

- L'analyse des profils porosimétriques nous a montré, que quelle que soit la situation intra-parcellaire, il existe un horizon dense sous la couche cultivée où les porosités mesurées sont proches ou équivalentes aux porosités texturales déterminées sur échantillons remaniés. Précisons, toutefois, que dans le cas de la parcelle de Saint-Benoit, l'analyse des composantes de la porosité a révélé l'existence d'une porosité interpédique dans ce même horizon.

- Il apparaît également que la restructuration de la couche cultivée, consécutive au travail du sol, peut être très brève si un passage d'engin a lieu postérieurement. En effet, un seul passage de tracteur, dans des conditions de teneur en eau proche de la capacité au champ, suffit pour réduire le volume poral des horizons travaillés à une valeur équivalente au volume poral textural.

- Les valeurs de porosité texturale sont minimales pour les matériaux à distribution granulométrique étalée, et donc dans les situations sablo-argileuses.

- Le tassement affecte l'organisation de l'espace poral intra-motte. Plus précisément, il conduit à une diminution de l'espace poral lacunaire et une réduction du volume des pores structuraux. Ce résultat montre, par conséquent, que l'évaluation des volumes massiques structuraux de matériaux sableux ne peut être faite qu'en référence aux volumes massiques des mêmes

matériaux remaniés qui, a priori, ont un volume poral plus stable. Toutefois, il est intéressant de constater que les distributions des volumes des pores des matériaux compactés en plein champ sont très différentes de celles concernant les pâtes ou "gâteaux" à porosité texturale.

- Les matériaux à granulométrie équilibrée ont un système poral à distribution étalée. Au contraire, lorsqu'un matériau présente une fraction granulométrique dominante, son système poral est lui-même caractérisé par une famille de pores dominante.

- Les caractéristiques mises en évidence en porosimétrie à mercure convergent totalement avec celles obtenues lors de l'analyse des courbes de dessiccation. Les mottes compactées ont des teneurs en eau inférieures, aux faibles succions, aux mottes non compactées. De plus, à pF 1, les mottes tassées sont saturées en eau, à la différence des mottes non tassées où subsiste un volume poral libre à l'air. Ces propriétés sont dues à une réduction du volume des macropores (pores de diamètre à 30 μm), voire des pores de dimensions plus réduites (compris entre 3 et 30 μm).

- Les déformations de l'espace poral des matériaux tassés conduisent à des modifications des conductivités hydrauliques des milieux. La réduction des capacités de transfert en eau est à corrélérer à la diminution du volume poral, mais aussi, certainement, à une réduction de la continuité des pores. Les matériaux tassés peuvent présenter des valeurs de conductivité hydraulique extrêmement faibles (inférieures à 1 mm/h).

En définitive, cette première analyse nous a permis de montrer les principales conséquences du tassement sur l'espace poral et le transfert hydrique des sols. Toutefois, elle ne permet pas de dire s'il existe des différences d'aptitude au tassement entre les matériaux étudiés. C'est précisément l'objectif de la troisième partie, que de préciser le comportement au compactage de ces matériaux en conditions contrôlées.

IIIème PARTIE

ANALYSE DU COMPORTEMENT AU COMPACTAGE DES MATERIAUX SABLEUX :
EFFET DU POTENTIEL HYDRIQUE ET DE LA PRESSION APPLIQUEE SUR LES
CARACTERISTIQUES DE L'ESPACE PORAL

INTRODUCTION

L'étude précédente a montré que les sols sableux sont particulièrement sensibles au compactage provoqué par les roues de tracteur. Nous avons ainsi observé, dans toutes les situations granulométriques intra-parcellaires, qu'un seul passage de tracteur suffit pour réduire les porosités des horizons travaillés à des valeurs équivalentes aux porosités dites texturales.

Cependant, cette première approche ne permet pas d'analyser l'aptitude au tassement des sols et d'examiner, en particulier, si les matériaux présentent des caractéristiques mécaniques semblables. Or, c'est précisément ces propriétés qui déterminent les évolutions constatées d'organisation de l'espace poral des sols et, en particulier, les modifications du compartiment structural. L'analyse du comportement au compactage apparaît donc indispensable à la compréhension des évolutions de la porosité des sols, voire à la prévision des comportements.

C'est pourquoi nous analyserons, dans cette troisième partie, le comportement au compactage de ces matériaux. L'étude consistera en une analyse de l'évolution des volumes apparents totaux des massifs d'agrégats soumis à une contrainte statique dans des conditions contrôlées, de manière à comparer les comportements au compactage de l'ensemble des matériaux. Nous chercherons, en particulier, à établir des relations entre les caractéristiques analytiques des matériaux et leur aptitude au tassement mécanique.

Après cette analyse du comportement mécanique, l'organisation de l'espace poral des échantillons compactés sera décrite de manière à contrôler les effets du compactage. Nous verrons plus précisément quelle est l'influence des potentiels hydriques initiaux des agrégats sur la morphologie et la taille des pores des matériaux compactés. Enfin, cette dernière étude permettra la comparaison de l'organisation de l'espace poral de matériaux compactés au champ et en laboratoire.

I - COMPACTAGE DES MASSIFS D'AGREGATS : EFFET DE LA PRESSION APPLIQUEE ET DU CONTENU EN EAU SUR LA POROSITE TOTALE

1.1 - INTRODUCTION

L'étude du comportement au compactage de différents matériaux nécessite de disposer d'une méthode permettant la mesure des variations de compacité, et de maîtriser l'ensemble des paramètres qui déterminent les caractéristiques mécaniques, c'est-à-dire : les états structuraux initiaux, les valeurs de contrainte hydrique et mécanique. Parmi les méthodes existantes, le test Proctor permet la mise en évidence de seuils hydriques de changement de comportement au compactage, dont les valeurs dépendent de l'énergie mise en jeu et des caractéristiques analytiques des matériaux traités (teneur en argile ; constitution de la matière organique) (PELTIER, 1959 ; TERZAGHI, 1961 ; FELT, 1965 ; FAURE et FIES, 1972 ; FAURE, 1978 ; GUERIF, 1979 ; GUERIF et FAURE, 1979). Cependant, cette méthode rapide ne permet pas d'apprécier les variations de volume poral (l'état initial demeurant non défini), ni de traduire l'énergie mise en jeu en terme de pression appliquée (GUERIF, 1982). C'est pour cette raison que le même auteur préconise l'utilisation d'une autre technique, le test oedométrique ou test de compactage uniaxial, qui est couramment utilisé en Génie Civil (MIEUSSENS et al., 1985) et qui est repris pour des applications agronomiques (ZIMMER, 1981 ; GUERIF, 1982 ; CORDIER, 1983).

Pour la réalisation de notre travail, nous avons donc choisi le test oedométrique, afin de disposer d'une technique de compactage la plus performante possible.

Notre objectif sera précisément de montrer quelle est l'influence de l'intensité de la pression appliquée et des teneurs en eau, sur les variations de volume poral de massifs d'agrégats sableux. En outre, l'expression du contenu en eau en terme de potentiel permettra de relier les comportements au compactage aux valeurs de contrainte hydrique et de comparer les caractéristiques mécaniques de matériaux de texture différente.

Après une description de la méthodologie appliquée, nous présenterons les courbes expérimentales de déformation et les comparerons aux courbes de compression théorique. Les paragraphes suivants seront consacrés à la présentation des évolutions des volumes poraux en relation avec les teneurs en eau pondérales puis les potentiels hydriques. Enfin, une discussion générale sera proposée sur l'interprétation des résultats obtenus en oedométrie et sur l'origine des différences de comportement au compactage.

1.2 - MATERIELS ET METHODE

1.2.1 - Matériels

Les échantillons proviennent de chacune des situations intraparcellaires de Bou et de Saint-Benoit ayant fait l'objet d'un suivi au champ. Ils sont prélevés après récolte*, dans les horizons tassés (25-40 cm) sous les couches travaillées. De manière à disposer d'échantillons présentant des

* les dates précises des prélèvements sont reportées en annexe III, tableau A.1.

caractéristiques granulométriques plus diversifiées deux matériaux supplémentaires sont extraits. Le premier provient de l'horizon tassé sous labour (25-40 cm) d'une autre parcelle : Le Colombier ; le second de la situation 1 à Saint-Benoit dans l'horizon (35-50 cm). Nous distinguerons donc les matériaux de Saint-Benoit 1(1) (25-40 cm) et de Saint-Benoit 1(2) (35-50 cm). Les données analytiques correspondantes sont reportées dans le tableau 17. Par rapport aux autres matériaux, celui du Colombier a la particularité de présenter un squelette plus fin avec une dominance de la fraction 100-200 μm et celui de STB.1(2), d'être beaucoup plus riche en fraction argileuse.

Tableau 17 - Données analytiques des matériaux compactés avec l'oedomètre

Matériaux	Granulométrie (μm)								Hq	Mo %.	Mo / % Ar	C.libre / C.total
	< 2	2- 20	20- 50	50- 100	100- 200	200- 500	500- 1000	1000 2000				
Bou.1	12.9	10.8	8.4	12.0	18.5	32.3	4.7	0.4	0.55	7.5	5.8	11.0
Bou.2	8.6	5.9	5.2	8.7	23.6	41.9	5.6	0.5	0.32	6.5	7.6	14.5
Bou.3	7.0	5.3	4.2	8.3	20.5	47.6	6.4	0.7	0.27	5.9	8.4	14.3
Colombier	12.2	12.5	9.0	12.9	33.3	15.1	3.4	1.6	0.47	12.9	10.6	8.7
STB.1(1)	11.2	12.4	9.1	8.8	14.8	31.7	9.6	2.4	0.59	19.0	17.0	19.0
STB.1(2)	17.0	12.6	8.5	8.3	11.6	31.9	8.2	1.9	0.79	10.3	6.1	10.1
STB.2	10.8	10.7	8.1	10.6	19.6	32.3	7.0	0.9	0.51	16.1	14.9	18.9
STB.3	7.7	7.5	4.0	6.3	17.8	48.8	6.6	1.3	0.29	15.3	19.9	28.2

Nous avons choisi les horizons tassés des fonds de labour comme lieux de prélèvement, de manière à obtenir des matériaux présentant une organisation structurale a priori homogène et stable. C'est en effet dans les milieux tassés que nous avons la plus forte probabilité d'obtenir des matériaux à structure comparable du fait que les études précédentes ont montré que la porosité était essentiellement d'origine texturale. Cette démarche nous prive toutefois d'une possible analyse du tassement intra-agrégat, dans la mesure où ce dernier a déjà eu lieu dans le matériau soumis au test. Cependant, la prise en considération de cette autre évolution aurait considérablement alourdi l'analyse, puisque nous n'étions pas sûrs de disposer de matériaux présentant rigoureusement le même état structural. Elle aurait donc constitué un obstacle à la confrontation des comportements mécaniques entre matériaux.

Après séchage à l'air, des agrégats 2-3 mm sont fabriqués par tamisage. Le choix de cette taille tient compte de la nature grossière des échantillons et de la valeur du diamètre interne de la cellule de compression. Notons, à ce propos, que les travaux de BODDAERT (1976) montrent que le comportement sous charge des agrégats est le même quelle que soit la taille des éléments structuraux, même si les valeurs absolues de porosité γ sont liées. Après saturation sous vide pendant 24 heures, les agrégats sont déposés dans une cellule de RICHARDS, et mis à une pression donnée pendant une durée minimale de 7 jours. Les succions à l'équilibre sont équivalentes à

pF 1, pF 1.5, pF 2, pF 3, pF 4.2 et pF 6*. Après une mesure de teneur en eau pondérale sur aliquote, on dépose délicatement une quantité précise d'agrégats dans la cellule de l'oedomètre de manière à assurer une masse sèche constante à l'état initial avant compression. Le volume initial étant constant, le volume apparent total reste identique ($V_{app} = 1.140 \text{ cm}^3/\text{g}$). Précisons que la masse sèche initiale fut déterminée, préalablement, après pesée de massifs d'agrégats secs mis en place par écoulement et occupant la totalité du volume de mesure.

1.22 - Méthode

Les caractéristiques techniques de l'appareillage utilisé et la précision des mesures sont décrites en annexe II.7. L'oedomètre permet d'appliquer une pression statique d'intensité et de durée connues, les valeurs de déplacement étant acquises simultanément. Les deux plaques poreuses limitant l'échantillon laissent libre l'évacuation de l'eau excédentaire.

Huit intensités de pression sont appliquées aux échantillons (P en $\text{kg/cm}^2 = 0.25 - 0.5 - 1 - 1.5 - 2 - 3 - 4 - 6$), l'ensemble se répartissant en deux séries de mesures :

- La première série comprend une succession de paliers de pression, d'intensités comprises entre 0.25 et 2 kg/cm^2 (25 et 200 kPa) ;
- La seconde série correspond aux pressions supérieures ou égales à 2 kg/cm^2 (200 kPa).

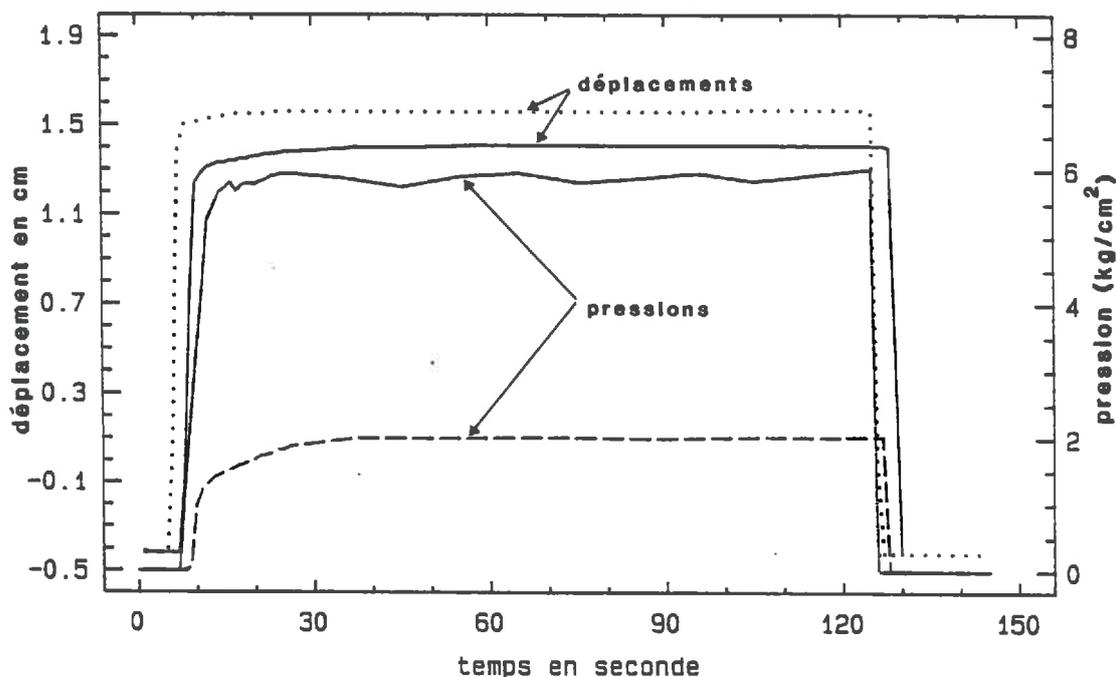


Figure 23 : Evolution des pressions et des déplacements au cours du temps, lors d'essais oedométriques à 2 et 6 kg/cm^2 .

* Cette valeur correspond à un état séché à l'air

** Le Pascal (Pa) constitue l'unité de référence internationale

Chacune de ces séries de mesures concernent le même échantillon. La reproduction de la pression de 2 kg/cm² (200 kPa) nous a permis d'observer que les résultats étaient semblables quelle que soit la position du palier, en début ou fin de série.

Le temps d'application de la charge est de 3 mn entre 0.25 et 1.5 kg/cm² et de 2 mn pour des valeurs supérieures. Les pressions appliquées sont donc proches de celles exercées lors des passages d'engins agricoles (VANDERBERG et al., 1957 ; COHRON, 1979 ; CORDIER, 1983 ; VITLOX, 1985), mais les temps d'application sont largement supérieurs à ceux des passages d'engins : 0.2 à 0.4 seconde selon HADAS (1987). Ils sont cependant nécessaires pour s'assurer que les valeurs de déplacement mesurées sont celles de l'équilibre. La figure 23 illustre l'évolution du tassement en fonction de la durée d'application des charges (2 et 6 kg/cm² soit 200 à 600 kPa). Après 30 secondes de mise à l'équilibre, les valeurs de déplacement affichées ne varient alors pratiquement plus. En outre, les temps de palier de charge permettent une bonne répétabilité des mesures.

Pour chaque valeur d'état d'hydratation, trois mesures sont réalisées.

1.23 - *Expression des résultats*

On exprime l'état de compacité des matériaux sous forme de volume apparent mesuré sous charge. A la différence des matériaux argileux, l'espace poral intra-agrégat des matériaux sableux peut être affecté par une contrainte mécanique (ZIMMER, 1981). En outre, nous n'avons pas à considérer les variations de volume apparent textural dues au retrait. En conséquence, il apparaît plus pratique d'exprimer les variations de porosité totale (égale à la somme des porosités texturale et structurale) et, plus précisément, les variations de volume apparent.

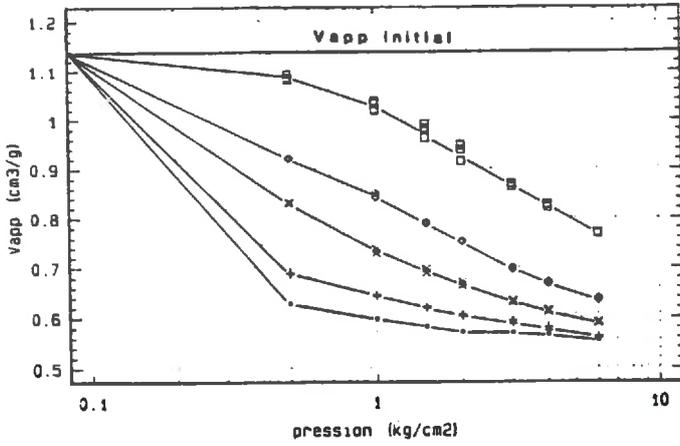
1.3 - RESULTATS

De manière à éclaircir la présentation des résultats, nous ne reporterons dans le texte que les figures concernant quatre échantillons. Il s'agit des matériaux les plus distincts texturalement (tableau 17), à savoir ceux de Bou.1, Bou.3, du Colombier et de Saint-Benoit 1(2). Toutefois, le lecteur pourra se reporter en annexe IV pour examiner les courbes correspondant aux autres contextes.

1.31 - *Relation volume apparent - pression appliquée*

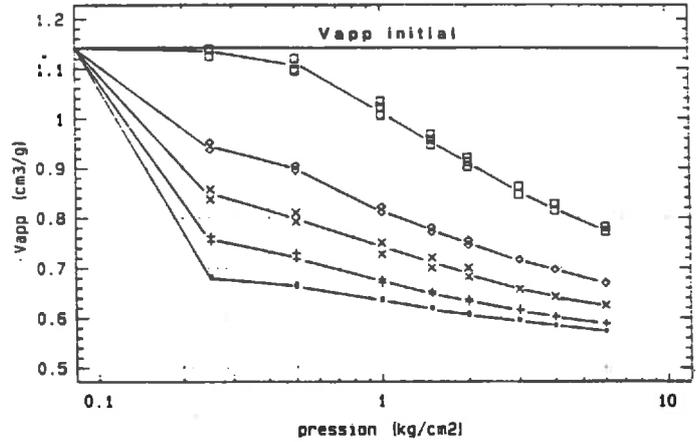
Les volumes apparents des massifs d'agréats correspondant aux quatre matériaux sont exprimés en fonction des pressions appliquées, reportées sur une échelle logarithmique, et pour cinq valeurs de succion : pF 1, pF 2, pF 3, pF 4.2 et pF 6 (figure 24).

Par rapport au volume initial ($V_1 = 1.14 \text{ cm}^3/\text{g}$), les massifs d'agréats compactés à l'état sec ont une réduction de leur volume poral négligeable à des pressions inférieures ou égales à 0.5 kg/cm².

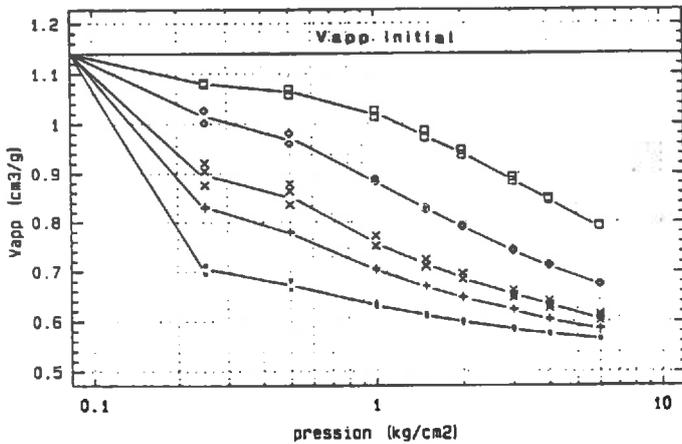


BOU 1

BOU 3



COLOMBIER



ST BENOIT 1(2)

- pF1
- + pF2
- × pF3
- ◊ pF4.2
- ◻ pF6

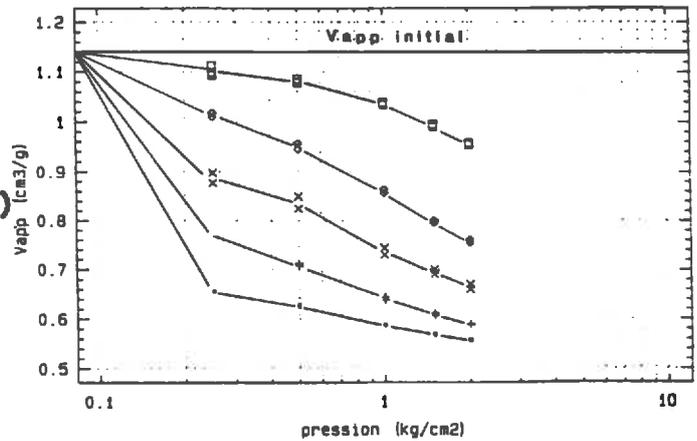


Figure 24 : Variations des volumes apparents en fonction des pressions appliquées (échelle logarithmique) : effet de la succion.

En revanche, à des suctions plus faibles, ou pour des pressions supérieures, une diminution très nette des volumes apparents apparaît. L'essentiel de cette diminution de volume se produit dès l'application de la première charge - correspondant à une pression de 0.25 ou 0.50 kg/cm² - . Après cette première phase de déformation, on observe une seconde phase de déformation où quelle que soit la nature de l'échantillon, les points se placent sur une droite dont la pente diminue avec le pF initial ou le volume apparent du massif d'agrégats acquis après la première déformation.

Ce constat nous a conduit à établir une série d'ajustements linéaires de la forme ($V_{app} = A \log P + B$) reliant les volumes apparents des massifs d'agrégats, aux pressions appliquées supérieures à 0.5 kg/cm² (tableau 18). On note, en fait, que la valeur de la pente (A) ne varie jamais que dans la mesure où les valeurs du volume apparent sont différentes après application de la première charge de 0.5 kg/cm².

Les mêmes observations peuvent être faites en ce qui concerne les quatre autres échantillons (Bou.2, STB.3, STB.1(1), STB.2) (annexe IV, figure IV.I).

1.32 - Relation volume apparent - teneur en eau pondérale

Nous avons repris une représentation graphique classique, qui exprime l'influence des teneurs en eau sur les comportements au compactage. Nous pourrions ainsi comparer l'allure générale des courbes à celle obtenue par d'autres auteurs sur des matériaux de texture différente.

La figure 25 montre que deux formes de courbe caractérisent les comportements sous charge des massifs d'agrégats. Pour les échantillons de Bou.1 et Bou.3, les volumes apparents diminuent suivant une courbe de forme exponentielle lorsque les teneurs en eau augmentent, et ceci quelle que soit la valeur de la pression appliquée. En ce qui concerne les matériaux du Colombier et de Saint-Benoit 1(2), il existe deux domaines : un premier où le tassement des massifs d'agrégats est moyen, en particulier pour des faibles valeurs de pression ; un second où la forme des courbes est identique à celles des autres échantillons, avec un tassement plus élevé aux faibles teneurs en eau. Le premier domaine concerne des teneurs en eau pondérales inférieures à 9 % pour les échantillons de Saint-Benoit 1(2) et existe quelle que soit la pression exercée. Au Colombier, seuls les massifs d'agrégats compactés à moins d'1 kg/cm² semblent présenter ces deux phases de comportement. Précisons toutefois, que rien ne prouve qu'il y ait changement de comportement exactement au deuxième point de mesure, et qu'en revanche, il est toujours possible de placer un changement de comportement entre les deux premiers points expérimentaux (correspondant à pF 6 et pF 4.2). Cette considération retenue nous conduit à modérer l'affirmation selon laquelle les matériaux ont des formes de courbe différentes.

Pour une pression statique donnée, les différences entre les valeurs de volume apparent correspondant à chaque échantillon dépendent des teneurs en eau (fig. 26). Aux très faibles teneurs en eau et pour des pressions appliquées supérieures ou égales à 1 kg/cm², les volumes apparents

Tableau 18 - Analyse statistique des résultats oedométriques :
Corrélation de la forme : $V_{app} = A \log_{10} P + B$,
entre les pressions appliquées (supérieures à 0,5 kg/cm²)
et les volumes apparents mesurés.

		BOU.1	BOU.3	COL	STB.1(2)	BOU.2	STB.3	STB.1(1)	STB.2
pF 1	n	9	9	12	6	12	9	12	18
	r ²	0.92	0.99	0.97	0.99	0.89	0.99	0.98	0.98
	A	-0.053	-0.081	-0.087	-0.100	-0.053	-0.091	-0.088	-0.092
	B	0.593	0.634	0.628	0.587	0.634	0.659	0.625	0.624
pF 2	n	16	9	12	6	12	9	12	12
	r ²	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.99	0.98	0.99
	A	-0.106	-0.111	-0.153	-0.175	-0.120	-0.117	-0.114	-0.135
	B	0.640	0.670	0.699	0.641	0.685	0.701	0.650	0.677
pF 3	n	12	8	18	6	18	9	12	18
	r ²	0.99	0.96	0.97	0.96	0.97	0.99	0.98	0.99
	A	-0.186	-0.152	-0.194	-0.239	-0.129	-0.143	-0.166	-0.177
	B	0.727	0.737	0.751	0.737	0.718	0.741	0.736	0.734
pF 42	n	12	9	12	6	12	9	12	12
	r ²	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.97	0.99	0.99
	A	-0.275	-0.191	-0.271	-0.342	-0.181	-0.196	-0.199	-0.219
	B	0.839	0.811	0.877	0.859	0.786	0.819	0.805	0.797
pF 6	n	17	14	12	6	12	9	8	12
	r ²	0.99	0.98	0.99	0.99	0.97	0.99	0.99	0.99
	A	-0.340	-0.317	-0.297	-0.269	-0.293	-0.308	-0.316	-0.319
	B	1.032	1.013	1.026	1.037	0.975	0.992	1.031	1.007

Tableau 19 - Comparaison des volumes apparents des massifs d'agrégats compactés à 2 et 6 kg/cm² et pF 1, aux volumes apparents texturaux.

MATERIAUX	V _{app} (1) agrégats com- pactés à 2 kg/cm ²	V _{app} (2) agrégats com- pactés à 6 kg/cm ²	V _{textural} (3)	(1)-(3)	(2)-(3)
Bou.1	0.571	0.556	0.544	0.027	0.009
Bou.3	0.609	0.573	0.557	0.052	0.016
COLOMBIER	0.599	0.564	0.552	0.047	0.012
STB.1(2)	0.557	-	0.525	0.032	-
Bou.2	0.610	0.590	0.565	0.045	0.025
STB.3	0.631	0.591	0.573	0.058	0.018
STB.1(1)	0.600	0.558	0.541	0.059	0.017
STB.2	0.593	0.557	0.547	0.046	0.010

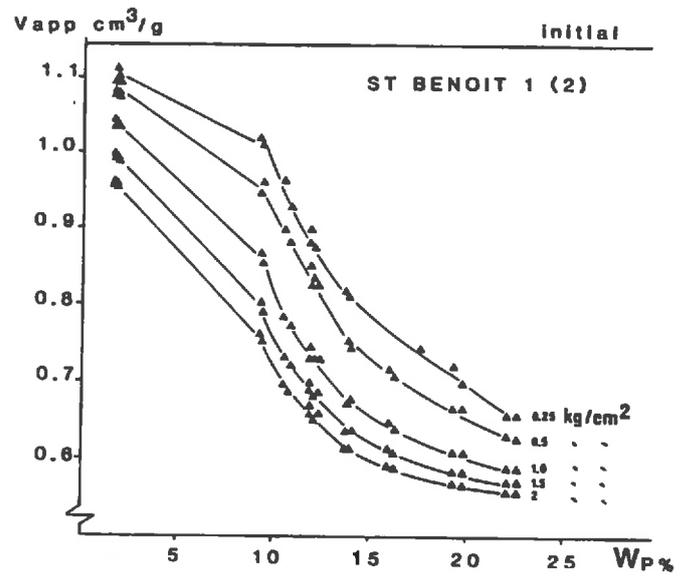
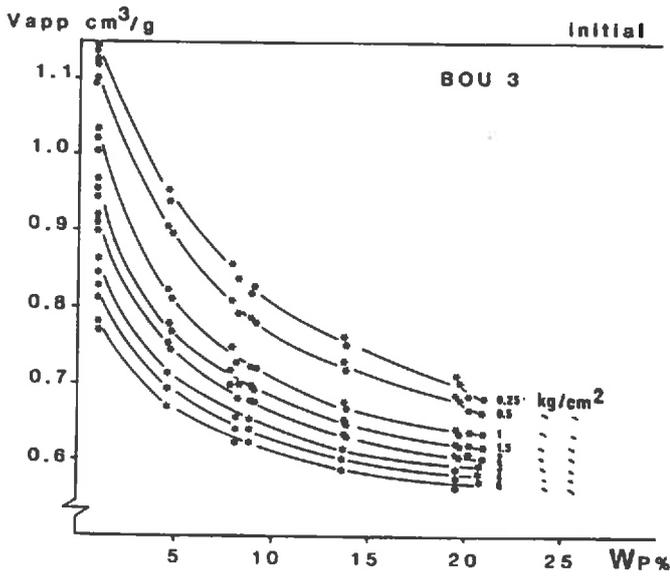
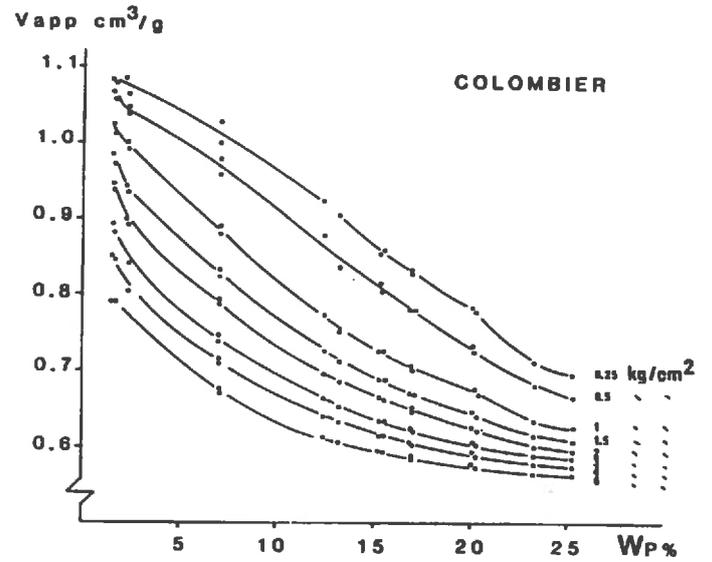
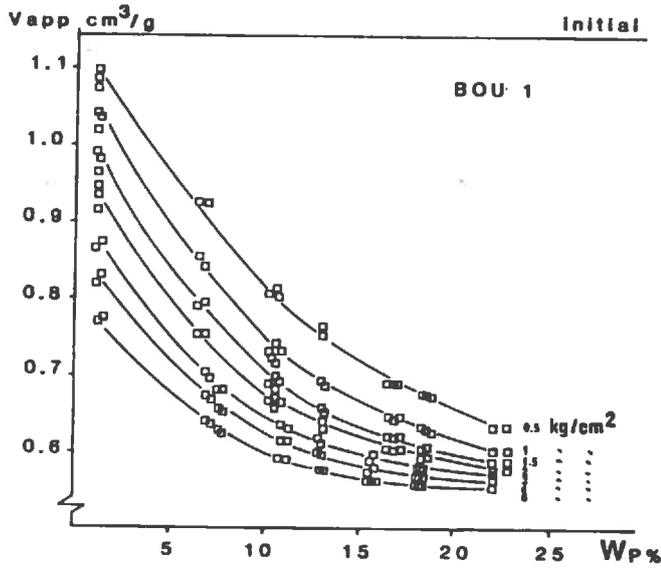


Figure 25 : Variations des volumes apparents en fonction des teneurs en eau. Effet de l'intensité de pression.

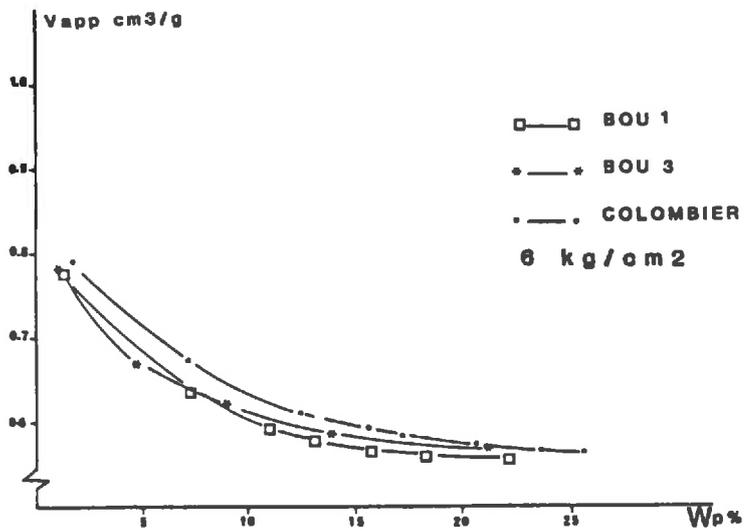
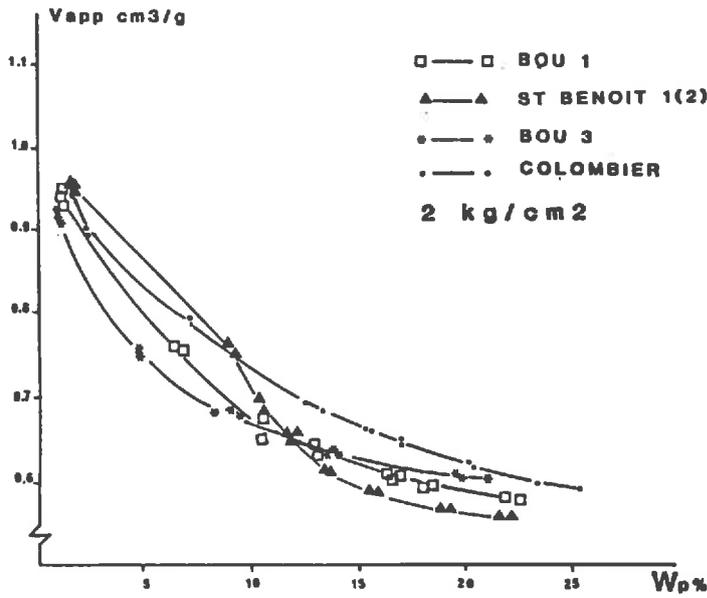
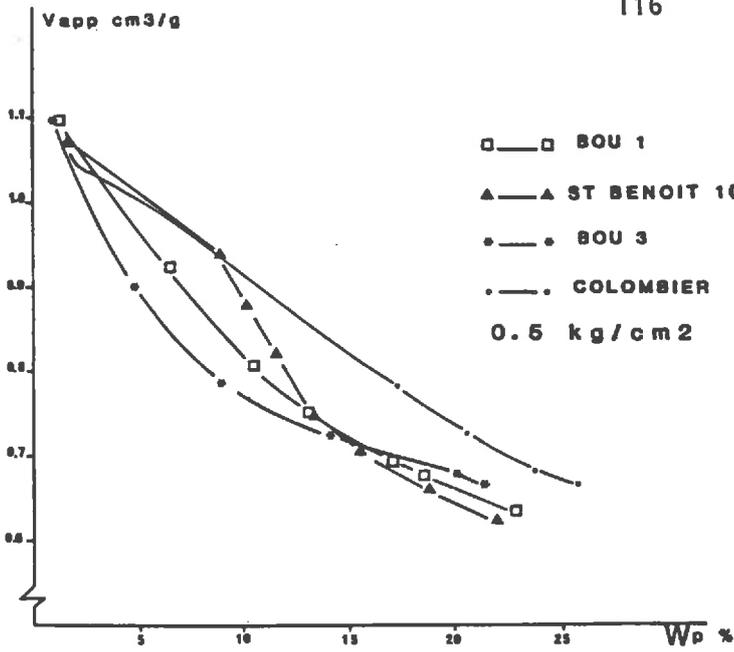


Figure 26 : Comparaison des variations des volumes apparents en fonction des teneurs en eau des différents échantillons compactés à 0.5, 2 et 6 kg/cm².

sont plus élevés pour les échantillons de STB.1(2) et du Colombier que pour les échantillons de Bou.1 et Bou.3. Aux fortes teneurs en eau, les volumes apparents les plus élevés correspondent aux massifs d'agrégats du Colombier et de Bou.3. Il existe par conséquent des teneurs en eau où le compactage conduit à des volumes apparents semblables.

Les caractéristiques décrites pour les échantillons de Bou.1 et Bou.3, peuvent être généralisées aux autres échantillons (voir annexe IV, figure IV.2).

1.33 - *Relation volume apparent - succion en eau*

L'expression en terme de succion du contenu en eau ne modifie pas de manière importante l'allure générale des courbes (fig. 27). Nous observons une décroissance maximale des volumes apparents des massifs d'agrégats compactés entre pF 6 et pF 2.5 et, en particulier entre l'état sec à l'air (pF 6) et pF 4.2. A des succions inférieures, les variations de volume apparent ont de plus faibles amplitudes, surtout lorsque les pressions appliquées sont de grande intensité.

Les matériaux du Colombier et de Saint-Benoit 1(2) ont des courbes de formes différentes pour des charges appliquées comprises entre 0.25 et 0.5 kg/cm². Entre pF 6 et pF 4.2, les diminutions de volume apparent sont moyennes. Elles augmentent entre pF 4.2 et pF 2.5. Cette représentation ne montre donc pas davantage, l'existence de seuil hydrique de changement de comportement au compactage.

La confrontation des courbes obtenues pour les quatre matériaux à des intensités de pression données (fig. 28), fait apparaître les différences de volume apparent déjà décrites dans le précédent paragraphe. Les massifs d'agrégats de STB.1(2) et du Colombier présentent les volumes apparents les plus importants à pF 6 et pour des pressions supérieures à 1 kg/cm². A pF 1, les mêmes échantillons présentent, au contraire, les volumes apparents les plus réduits.

Les autres matériaux présentent des caractéristiques semblables à ceux de Bou.1 et Bou.3 (annexe IV : figure IV.3).

Les volumes apparents mesurés à 6 kg/cm² et à pF 1 de succion sont proches des volumes apparents texturaux correspondant aux mêmes matériaux remaniés (tableau 19). Le volume apparent structural inter-agrégats est donc très faible voire nul pour ces matériaux compactés. A 2 kg/cm², un volume apparent structural plus important semble subsister. Toutefois, sa valeur est parfois très faible (Bou.1).

1.34 - *Etat hydrique des échantillons compactés*

Les teneurs en eau avant et après compactage à 2 et 6 kg/cm² sont reportées dans le tableau 20. On constate à pF 1, une chute significative des teneurs en eau entre l'état initial (agrégats non compactés) et l'état final (massifs d'agrégats soumis à une charge de 2 ou 6 kg/cm²). A pF 1.5, les

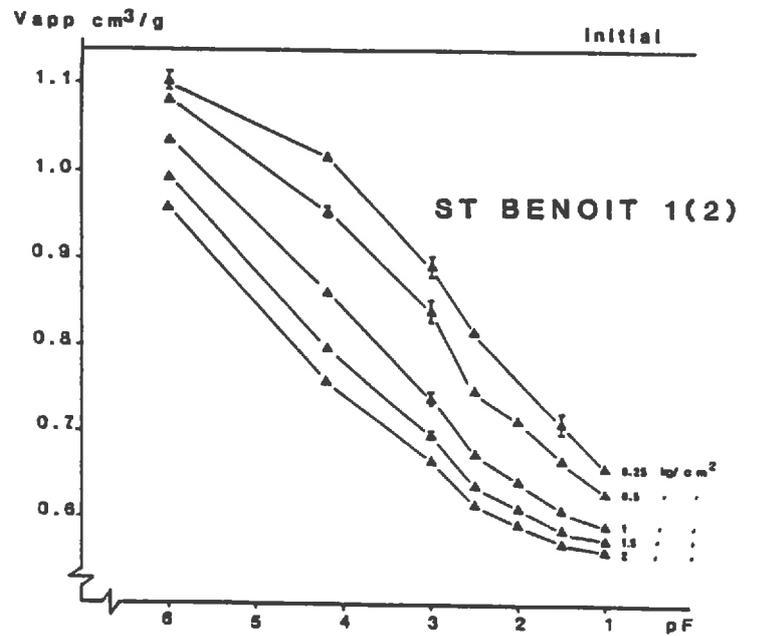
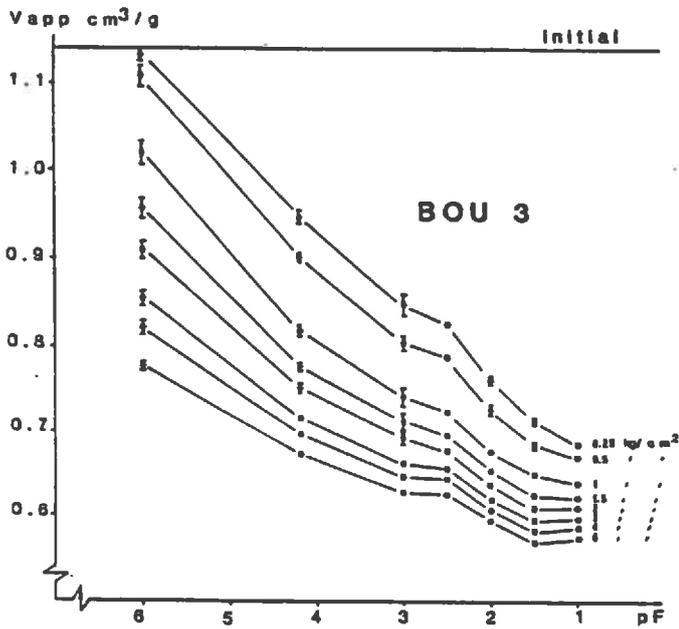
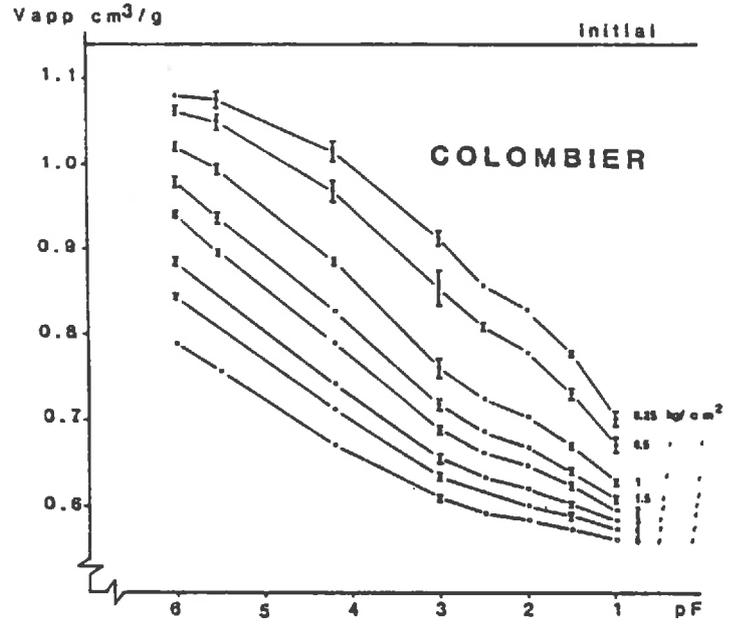
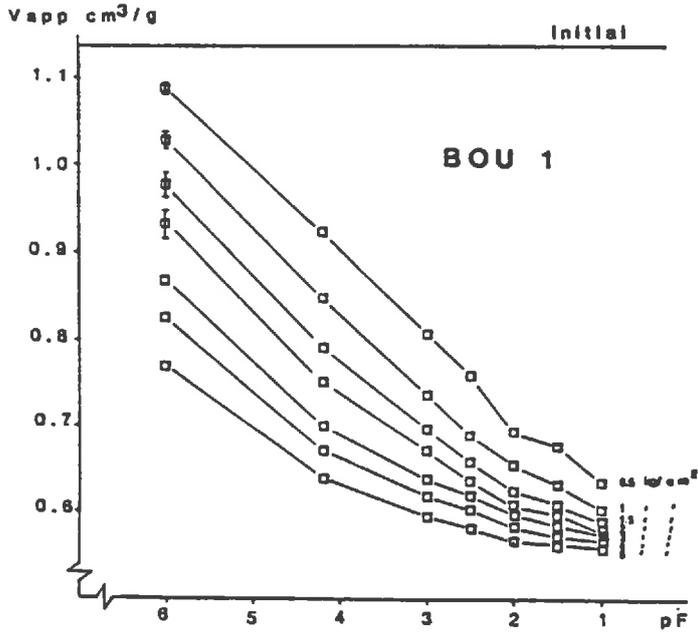


Figure 27 : Variations des volumes apparents en fonction des succions en eau. Effet de l'intensité de pression.

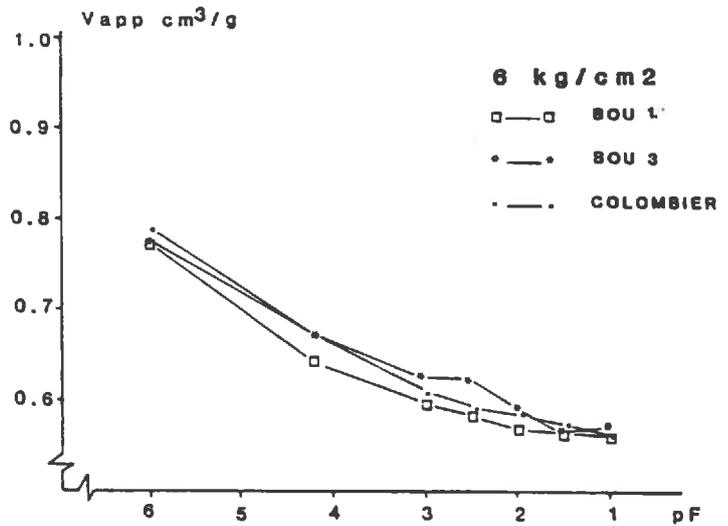
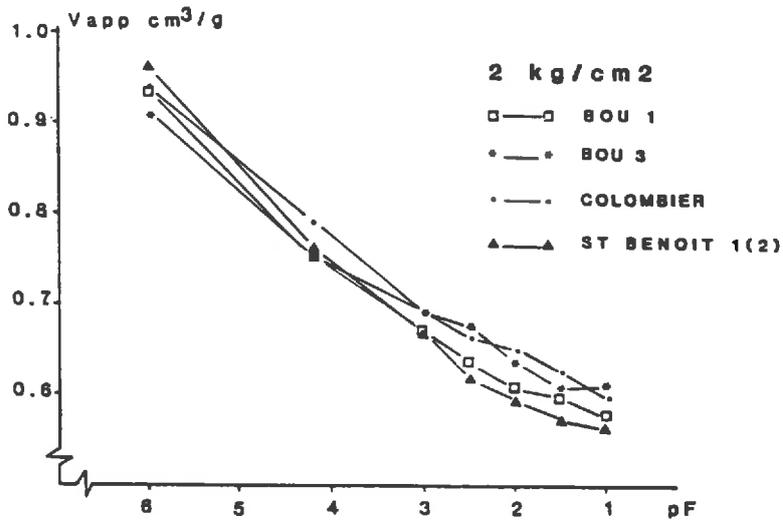
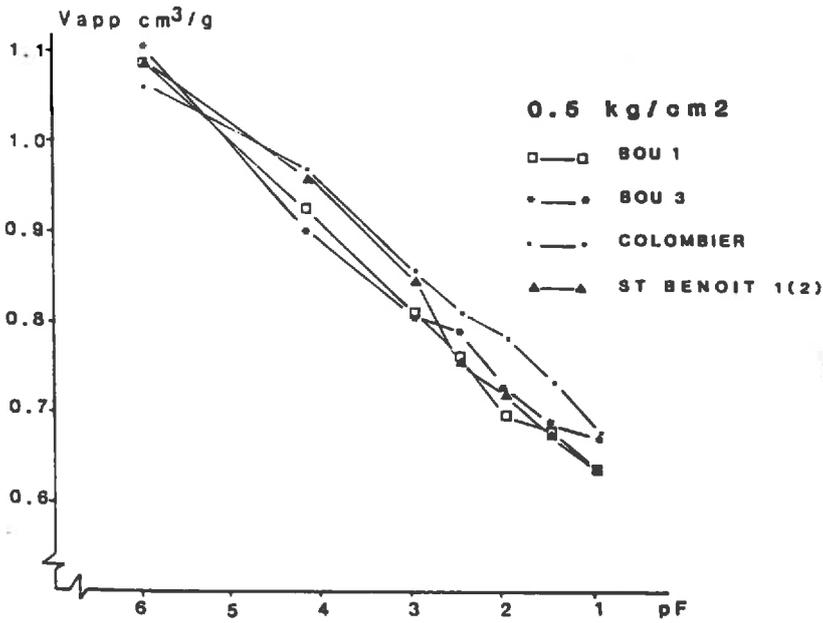


Figure 28 : Comparaison des variations des volumes apparents en fonction des succions en eau des différents échantillons compactés à 0.5, 2 et 6 kg/cm².

Tableau 20 - Bilan volumique : Volumes d'eau et taux de saturation (θ_s) lors du test oedométrique.

MATERIAUX	$V_{eau} (cm^3/g)$ $\sigma = \pm 0.008$				θ_s %	
	Avant compactage à 2 kg/cm ²	Après compactage à 2 kg/cm ²	Avant compactage à 6 kg/cm ²	Après compactage à 6 kg/cm ²	sous charge à 2 kg/cm ²	sous charge à 6 kg/cm ²
BOU.1 pF1	0.223	0.199	0.220	0.187	100	100
pF1.5	0.185	0.182	0.181	0.173	85	96
pF2	0.168	0.164	0.158	0.157	73	86
pF3	0.106	0.105	0.110	0.109	36	51
BOU.3 pF1	0.202	0.188	0.208	0.185	81	94
pF1.5	0.195	0.183	0.197	0.178	79	94
pF2	0.137	0.130	0.138	0.131	50	62
pF3	0.078	0.077	0.082	0.081	23	33
COL pF1	0.254	0.210	0.233	0.204	95	100
pF1.5	0.203	0.194	0.201	0.190	78	96
pF2	0.169	0.165	0.169	0.162	61	78
pF3	0.124	0.119	0.132	0.127	38	54
STB.1 (2) pF1	0.224	0.177	-	-	98	-
pF1.5	0.196	0.174	-	-	92	-
pF2	0.161	0.157	-	-	74	-
pF3	0.119	0.119	-	-	41	-
BOU.2 pF1	0.210	0.199	0.216	0.193	85	91
pF1.5	0.172	0.166	0.176	0.173	67	82
pF2	0.120	0.117	0.143	0.140	43	64
pF3	0.092	0.090	0.095	0.095	30	38
STB.3 pF1	0.197	0.185	0.200	0.190	73	88
pF1.5	0.157	0.150	0.159	0.153	54	67
pF2	0.134	0.128	0.132	0.127	45	54
pF3	0.092	0.089	0.090	0.088	28	34
STB.1 (1) pF1	-	-	0.212	0.181	-	100
pF1.5	-	-	0.183	0.176	-	97
pF2	-	-	0.173	0.166	-	89
pF3	-	-	0.114	0.113	-	49
STB.2 pF1	0.206	0.183	0.205	0.181	85	100
pF1.5	0.188	0.178	0.189	0.177	79	98
pF2	0.152	0.148	0.153	0.146	74	73
pF3	0.118	0.117	0.117	0.115	52	51

différences sont de moins grandes amplitudes et à des succions supérieures, elles sont pratiquement nulles. Le calcul des taux de saturation des massifs d'agrégats compactés à 2 et 6 kg/cm² nous permet de constater qu'à pF 1 voire pF 1.5, les massifs d'agrégats, compactés à 6 kg/cm² parfois 2 kg/cm², sont proches de l'état saturé. Pour les agrégats portés à des valeurs supérieures de succion, les volumes d'eau après compactage restent largement inférieurs aux volumes des pores.

1.4 - INTERPRETATION - DISCUSSION

1.41 - Analyse des courbes $V_{APP} - \log P$

La représentation des courbes volume apparent - pression nous montre qu'au delà d'une valeur de charge appliquée (0.50 kg/cm²), les variations de volume apparent enregistrées suivent, lors de la seconde phase de déformation, une loi linéaire du type :

$$V_{APP} = A \log_{10} P + B \quad (1)$$

A : pente V_{APP} : volume apparent mesuré sous charge
B : constante P : intensité de la pression appliquée

On déduit donc l'expression :

$$\Delta V_{APP} = A \log_{10} \frac{P}{P + \Delta P} \quad (2)$$

ΔV_{APP} : variation de volume apparent (qui est donc une valeur négative)
 ΔP : variation de pression

Cette relation est analogue à la formulation proposée par TERZAGHI (cité par CORDIER, 1983) pour décrire la compressibilité d'un milieu continu saturé.

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{1}{C} \ln \frac{\sigma_0}{\sigma_1} \quad (3)$$

Δh : raccourcissement de l'échantillon lorsque la contrainte normale passe de σ_0 à σ_1
h : épaisseur initiale de l'échantillon
 σ_0 : contrainte normale initiale
 σ_1 : contrainte normale après l'accroissement de la charge
C : constante de compressibilité

En effet, en considérant l'égalité suivante :

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta V}{V_0} \quad (4) \quad V_0 : \text{volume apparent initial}$$

On déduit des expressions (3) et (4)

$$\frac{\Delta V_{APP}}{V_0} = \frac{2.3}{C} \log_{10} \frac{\sigma_0}{\sigma_1} \quad (5)$$

$$\text{d'où } A = \frac{2.3 V_0}{C} \quad (\text{d'après (2) et (5)})$$

D'après CORDIER (1983), A est une expression analogue à l'indice de compression. Cette relation générale fut appliquée dans le cas d'un matériau non saturé discontinu (HARRIS, 1971 ; BRAUNACK et DEXTER, 1978 ; CORDIER, 1983). Les résultats obtenus montrent que l'application de cette relation n'est possible que pour la seconde phase de déformation, c'est à dire celle qui fait suite à l'application d'une première contrainte de 0.25 ou 0.50 kg/cm². Ce comportement, propre à nos échantillons sableux, apparaît donc différent de celui d'agrégats argileux (soumis au même test uniaxial) qui présentent une courbe de compression similaire à la courbe de consolidation théorique d'un échantillon saturé (GUERIF, 1982).

Les travaux de CORDIER (1983) montrent que l'aptitude au tassement d'un matériau peut être définie à partir des valeurs de l'indice de compression (pente de la droite traduisant la fonction (1)), des porosités initiale et finale, et du seuil de sensibilité ou contrainte critique (σ_c) (valeur au dessus de laquelle le tassement est significatif).

L'application de cette démarche analytique à nos résultats est délicate, du fait que la validité de la relation, $V_{app} = A \log_{10} P + B$ n'est respectée qu'au delà d'une valeur de volume apparent obtenue après une première déformation. On observe notamment qu'il existe une relation entre les valeurs d'indice de compression (A) et les volumes apparents initiaux, c'est-à-dire ceux mesurés à 0.50 kg/cm². Ainsi, sur l'ensemble de la population (40 valeurs de A), la relation suivante peut être établie :

$$A = -0.4943 X_1 + 0.2249 \quad r^2 = 0.89 ; n = 40$$

X_1 : volume apparent initial calculé pour une pression de 0.5 kg/cm²

A : indice de compression (tableau 18, A)

Cet ajustement montre qu'en définitive l'état initial, et plus précisément la valeur de volume apparent correspondant à une pression de 0.5 kg/cm², détermine en grande partie la valeur de l'indice de compression (A). Nous devons donc être prudent sur la signification des variations de l'indice A, puisque la valeur du volume apparent initial constitue une variable explicative essentielle.

L'influence de la teneur en argile sur l'indice de compression est néanmoins mise en évidence pour des valeurs de succion égales à pF 3 et pF 4.2 :

$$\text{à pF 3} \quad A = -9.93 \cdot 10^{-3} Y_1 - 0.065 \quad r^2 = 0.88 ; n = 8$$

$$\text{à pF 4.2} \quad A = -0.0162 Y_1 - 0.0578 \quad r^2 = 0.36 ; n = 8$$

Y_1 : % d'argile (tableau 17)

A ces mêmes valeurs de succion, on a la relation entre le volume apparent initial et la teneur en argile :

$$\text{à pF 3} \quad X_1 = 3.3722 \cdot 10^{-3} Y_1 + 0.750 \quad r^2 = 0.44 ; n = 8$$

$$\text{à pF 4.2} \quad X_1 = 0.0112 Y_1 + 0.772 \quad r^2 = 0.61 ; n = 8$$

Ces ajustements montrent, en définitive, que le taux d'argile détermine la valeur de volume apparent initial et par conséquent la valeur de l'indice A. L'ensemble de ces observations nous incite donc à utiliser la régression multiple linéaire pour exprimer les relations qui existent entre l'indice A et les variables explicatives que constituent la teneur en argile et le volume apparent initial. Ainsi une régression multiple peut être établie :

$$\text{à pF 3} \quad A = -0.833 X_1 - 0.007 Y_1 + 0.561 \quad r^2 = 0.95 ; n = 8$$

$$\text{à pF 4.2} \quad A = -0.601 X_1 - 0.009 Y_1 + 0.406 \quad r^2 = 0.95 ; n = 8$$

Après examen de ces ajustements, il apparaît que les deux variables explicatives permettent d'expliquer 95 % de la valeur de l'indice A.

Nous retiendrons, en définitive, que la valeur de l'indice A est liée essentiellement au volume apparent obtenu après une phase de chargement ou de pression.

La valeur de la contrainte ou pression critique (σ_c), qui ne peut être définie que pour les échantillons secs, est atteinte dès l'application d'une pression proche de 0.5 kg/cm². En effet, le calcul des pressions correspondant aux contraintes critiques pour les échantillons secs (pF 6) à partir des ajustements statistiques (tableau 18), donne les résultats suivants :

Tableau 21 - Contraintes critiques (σ_c) des matériaux compactés à l'état sec (pF 6) :

Echantillons	Bou.1	Bou.3	Col.	STB.1(2)	Bou.2	STB.3	STB.1(1)	STB.2
σ_c (kg/cm ²)	0.48	0.40	0.41	0.41	0.27	0.33	0.45	0.38

On observe, quelle que soit la nature des échantillons, des valeurs de contrainte critique extrêmement faibles. Ces valeurs sont liées, d'une part, aux fortes porosités initiales des massifs d'agrégats (CORDIER, 1983) et, d'autre part, à la fragilité des échantillons qui, contrairement aux massifs d'agrégats d'argile (GUERIF, 1982), se tassent à de très faibles pressions malgré une porosité initiale semblable. Cette fragilité des matériaux sableux est d'ailleurs décrite par GUERIF (1988c) lors d'une analyse des résistances en traction.

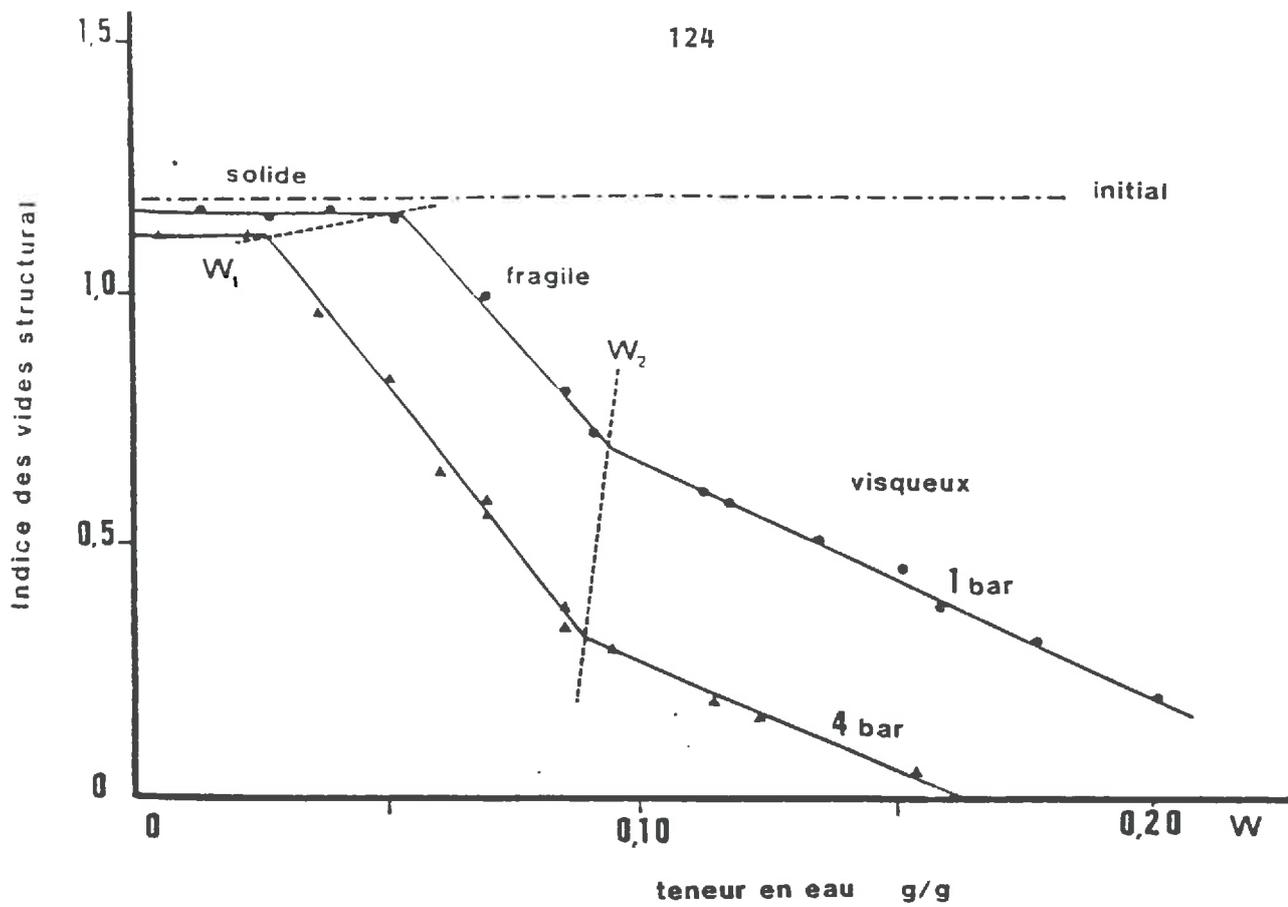


Figure 29 : Variations des indices des vides en fonction des teneurs en eau pour un matériau limono-argileux (GUERIF, 1987).

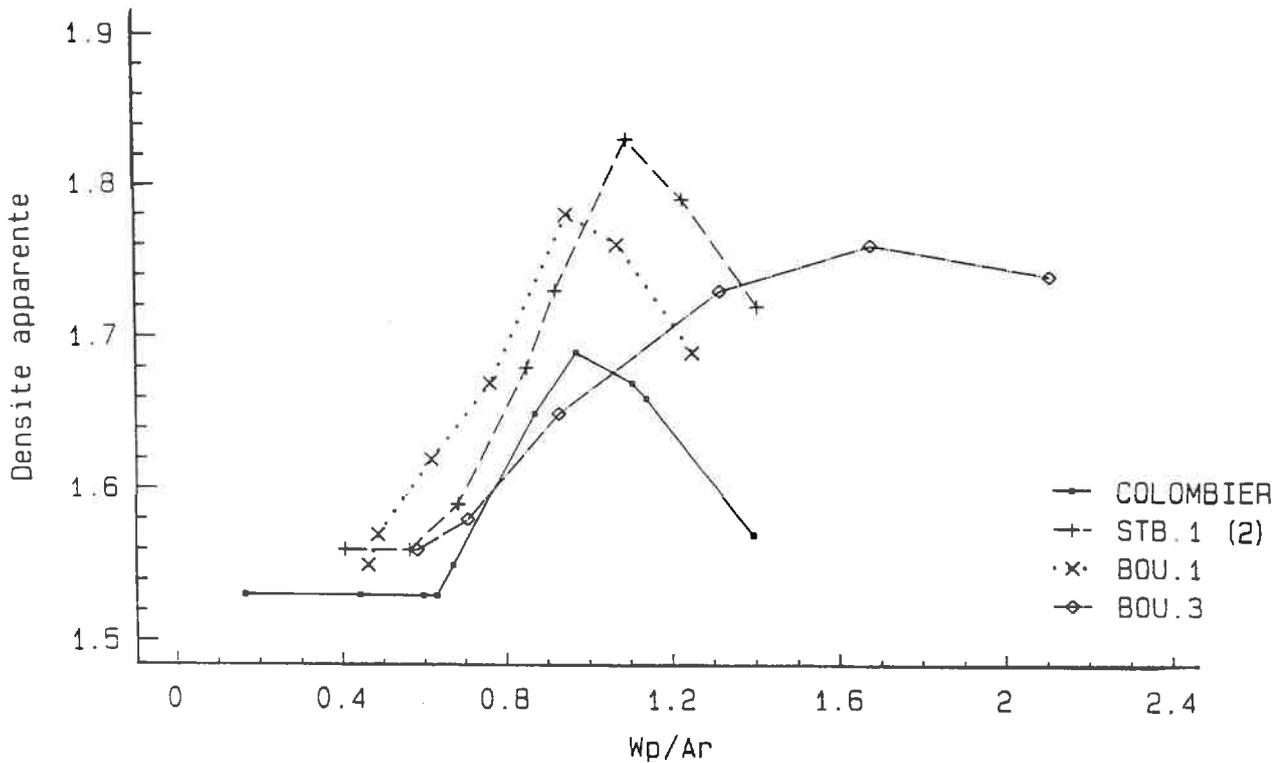


Figure 30 : Relation entre le rapport W_p/Ar et la densité mesurée lors d'un essai Proctor (GRABA, 1986).

1.42 - Analyse des courbes $V_{app} - W_p$

a) Définition des domaines de comportement

La forme générale des courbes exprimant les volumes apparents mesurés sous charge en fonction des teneurs en eau, se différencie de celles concernant les matériaux argileux ou limono-argileux (GUERIF (1982, 1987)). Rappelons, que dans ces cas précis, le test de compactage permet de définir trois domaines hydriques de comportement au compactage (fig. 29) :

- $W < W_1$, l'amplitude du tassement est faible. Elle est indépendante du temps d'application de la charge et de la teneur en eau du massif, mais est fonction de son intensité. On a alors un "comportement solide" des agrégats, proche de celui de pseudo-sables, avec un réarrangement entre agrégats sans modification interne de leur organisation ni rupture.

- $W_1 < W < W_2$, l'amplitude du tassement est fonction de la teneur en eau et de la pression appliquée, mais reste indépendante du temps d'application. W_2 varie avec la valeur de pression appliquée. A W_1 , la résistance à l'écrasement des agrégats devient inférieure à l'intensité de la contrainte appliquée. Il y a rupture et "comportement fragile" des agrégats, le tassement étant le résultat d'un réarrangement des petits morceaux issus de la rupture.

- $W_2 < W < W_3$, l'amplitude du tassement devient dépendante du temps d'application et on a un remaniement interne de l'assemblage des constituants. Le comportement sous charge est alors "visqueux".

En ce qui concerne les matériaux étudiés, le domaine solide semble avoir disparu. On observe en effet, y compris à l'état sec, un tassement important pour des pressions appliquées supérieures à 0.5 kg/cm^2 . L'observation des massifs d'agrégats compactés montre alors l'existence de ruptures intra-agrégat. En outre, pour de faibles pressions statiques appliquées, une dépendance très nette existe entre les volumes mesurés sous charge et les valeurs de teneur en eau. Notons que le même résultat est décrit par GUERIF (1988a) au sujet de matériau sableux.

Nous pouvons maintenant nous interroger sur l'existence ou non d'un domaine fragile, puisque l'ensemble des matériaux, à l'exception de ceux correspondant au Colombier et St Benoit 1(2), présentent une courbe monotone décroissante. Nous devons rappeler, à ce propos, que compte tenu des écarts importants de teneurs en eau existant entre le premier et second point de mesure, deux domaines de comportement peuvent exister pour tous les échantillons, la limite entre les deux pouvant se situer dans cet intervalle.

L'inconvénient du dispositif oedométrique à alimentation hydraulique est qu'il ne permet pas de suivre la cinétique de déformation. La "montée en pression" étant progressive, il n'est pas possible de rendre compte de la limite de la phase de tassement instantané et, par conséquent, du point de passage W_2 au domaine visqueux. Ajoutons, qu'à la différence des

matériaux argileux, la valeur du volume apparent à l'équilibre peut être rapidement atteinte pour ces échantillons sableux y compris en phase de consolidation (HILLEL, 1982).

La similarité de la limite entre les domaines fragile et visqueux (GUERIF, 1982) et le seuil de sensibilité au compactage (W_2) défini par FAURE (1978) nous permet cependant de calculer statistiquement la position de W_2 . En effet, GUERIF et FAURE (1979) ont obtenu, avec une population de 90 échantillons naturels, l'ajustement suivant :

$$W_2 = 0.27 Ar + 1.52 Mo \quad r = 0.84$$

Ar : % d'argile
Mo : % de matière organique

L'application à nos résultats nous donne les valeurs de W_2 suivantes :

Tableau 22 - Seuil du domaine visqueux (W_2) calculé à l'aide de l'ajustement statistique proposé par GUERIF et FAURE (1979).
(test Proctor ; 0.6 kg.J/dm³).

Echantillons	Bou.1	Bou.3	Col.	STB.1(2)	Bou.2	STB.3	STB.1(1)	STB.2
W_2 (%)	4.5	2.8	5.3	6.2	3.3	4.4	5.9	5.4

Après examen de ces résultats, tout laisse à penser que le domaine fragile peut exister quel que soit le matériau, mais que nous ne disposons pas de suffisamment de points de mesure aux faibles teneurs en eau pour le visualiser. En effet, nous pouvons parfaitement faire l'hypothèse que le seuil W_2 se situe entre l'état sec - pF 6 - et la teneur en eau correspondant à pF 4.2 de succion. Nous devons toutefois considérer que l'ajustement établi par GUERIF et FAURE (1979), pour le calcul de W_2 , concerne une valeur de pression équivalente à 0.6 kg.J/dm³. Or la valeur de W_2 est précisément liée à l'énergie de compactage et en particulier augmente lorsque l'énergie diminue (FAURE, 1978). En conséquence, les valeurs de W_2 sont probablement plus élevées à des pressions inférieures à 0.6 kg.J/dm³, comme celles correspondant à nos essais oedométriques. Ajoutons cependant que si nous observons les courbes Proctor établies par GRABA (1986) concernant quatre matériaux prélevés sur les mêmes parcelles et compactés avec une énergie de 0.34 kg.J/dm³, l'expression du contenu en eau ramené au taux d'argile permet d'observer que le seuil W_2 n'est visible que pour des matériaux de constitution granulométrique proche de celle des échantillons du Colombier et de STB.1(2), se situant à des valeurs de W_p/Ar comprises entre 0.55 et 0.65 (figure 30). En ce qui concerne les deux autres matériaux, le point W_2 , s'il existe, se situe à une valeur W_p/Ar inférieure à 0.5.

Nous avons reporté dans le tableau 23, les valeurs du rapport W_p/Ar concernant les premiers points de mesure au dessous de l'état sec, c'est-à-dire pF 4.2.

Tableau 23 - Rapport W_p/Ar des échantillons à pF 4.2 :

Echantillons	Bou.1	Bou.3	Col.	STB.1(2)	Bou.2	STB.3	STB.1(1)	STB.2
W_p/Ar	0.54	0.65	0.57	0.55	0.65	0.77	0.73	0.80

Les résultats de ces calculs constituent un deuxième argument pour considérer que le domaine fragile peut exister et se situer à des valeurs de teneur en eau correspondant à des suctions inférieures à pF 4.2. Signalons, enfin, que FAURE (1974) a observé lors d'une étude effectuée avec le test Proctor ($E_p = 0.6 \text{ kg.J/dm}^3$) sur 27 échantillons naturels comprenant des sables, un rapport W_2/Ar pratiquement constant et égal à 0.38. Cette valeur reste donc largement inférieure au même rapport calculé pour nos échantillons aux premiers points de mesure à pF 4.2. Selon le même auteur, le rapport $W_2/Ar = 0.38$ correspond à un pF de 4.6.

En définitive, la différenciation des comportements au compactage faite entre les échantillons du Colombier et de St Benoit 1(2), d'une part, et ceux des autres des situations, d'autre part, n'apparaît plus justifiée. Il est probable que, dans toutes les situations, il existe bien deux domaines de comportement, mais qu'en ce qui concerne les deux matériaux du Colombier et de St Benoit 1(2), le passage domaine fragile-domaine visqueux est simplement plus proche du point de mesure à pF 4.2. Ajoutons aussi que la proximité de W_2 de ce point de mesure est certainement plus grande à de faibles pressions oedométriques qu'à des seuils correspondants à des pressions supérieures, puisque l'augmentation de l'énergie de compactage a pour effet de diminuer la valeur de W_2 (FAURE, 1978).

b) Interprétation des comportements mécaniques

L'interprétation de ces différentes propriétés peut être réalisée en faisant référence aux caractéristiques mécaniques des agrégats et des massifs qu'ils constituent (BRAUNACK et DEXTER, 1978 ; GUERIF, 1982). Ainsi, les auteurs distinguent deux niveaux d'investigation :

- les caractéristiques concernant les agrégats, dues à l'assemblage des particules élémentaires (cohésion des agrégats, C_a ; angle de frottement interne intra-agrégat, ψ_a).
- les caractéristiques résultant de l'assemblage des éléments structuraux (cohésion du massif d'agrégats, C_s ; angle de frottement interne inter-agrégat, ψ_s).

Cette interprétation peut être généralisée à nos matériaux. L'absence de domaine solide dans la totalité des situations tend à prouver que les

agrégats n'ont pas une cohésion suffisante pour empêcher leur rupture. Elle est en accord avec les résultats de mesure de résistance en traction des agrégats à l'état sec (GUERIF, 1988c), puisque les valeurs minimales de résistance mesurées concernent les matériaux sableux contenant moins de 20 % d'argile.

Quand la teneur en eau augmente, la résistance diminue rapidement et tend asymptotiquement vers 0 (GUERIF, 1988c). Par conséquent, nous pouvons considérer ici que dès le passage dans le domaine visqueux la résistance au compactage des agrégats sableux est très faible. C'est le cas, en définitive, de tous les échantillons compactés à des suctions en eau inférieures ou égales à pF 4.2.

Le passage rapide à un domaine continu, assimilable au domaine plastique ou visqueux décrit par GUERIF (1982), doit correspondre à une diminution rapide de l'angle de frottement interne ψ résultant de la combinaison de ψ_a et ψ_s . Notons que les travaux de FAURE (1974, 1978) montrent que le seuil de sensibilité au compactage W_2 , déterminé avec le test Proctor, correspond à une diminution brutale de l'angle de frottement interne ψ mesuré lors d'un essai de compression triaxiale sur la même éprouvette. Le même auteur (1978) associe cette diminution de ψ à une saturation de l'argile et son entrée en phase de plasticité, et décrit la cohésion comme une fonction de l'état de saturation du mélange.

En conséquence, à l'état sec, les tassements plus faibles obtenus avec les matériaux sableux riches en argile s'expliquent par une meilleure résistance à l'écrasement due à une plus grande cohérence des agrégats, les particules argileuses, plus nombreuses, assurant un meilleur lien des éléments structuraux. Au contraire, aux fortes teneurs en eau, la cohésion de l'ensemble diminue, l'eau excédentaire et l'argile assurant un pouvoir de lubrification.

Nous pouvons émettre l'hypothèse, dans le cas de notre étude, que la diminution des volumes apparents dans les massifs d'agrégats riches en argile (STB.1 (2)) provient d'une action lubrifiante combinée de l'eau et de l'argile. Au contraire, dans le cas de matériaux pauvres en argile, elle ne serait pas en quantité suffisante dans le milieu pour avoir une action mécanique significative lors du compactage, l'eau excédentaire assurant l'essentiel de l'action lubrifiante. En effet, selon FAURE (1971), pour qu'un échantillon soit compacté au maximum, un volume d'eau excédentaire est nécessaire. Cette eau, qui n'appartient pas à la phase argileuse, a une action lubrifiante. La lubrification due à l'argile, qui s'ajoute à l'action de l'eau, n'est effective que pour des teneurs en fractions $\leq 2 \mu\text{m}$, supérieures à 10 %. Notre hypothèse est donc d'autant plus plausible qu'à la différence des mélanges binaires que FAURE (1971) a étudiés, la surface totale développée par les grains du squelette des matériaux naturels est beaucoup plus importante et les particules argileuses sont localisées de manière hétérogènes dans les milieux, en particulier au niveau des lacunes générées par les particules grossières (chapitre II ; 2^{ème} partie). En conséquence, la teneur en argile doit être plus élevée pour qu'elle puisse avoir une action lubrifiante appréciable. En outre, l'action lubrifiante de

l'argile, plus marquée dans le cas de certains matériaux (STB.1 (2)), expliquerait les relations établies entre les indices de compression à pF 4.2 et 3.0 et les taux d'argile. Cela montrerait en définitive, que l'effet lubrifiant de l'argile est appréciable essentiellement en début de domaine visqueux, c'est-à-dire lorsqu'il n'y a pas trop d'eau excédentaire dans le système.

c) Explication du degré de compacité

Si les variations de volume apparent sont liées aux propriétés mécaniques des matériaux, le degré de compacité des matériaux dépend essentiellement des caractéristiques géométriques des particules qui les constituent (CHRETIEN, 1986 ; FAURE, 1978 ; FIES, 1978). Ainsi, nous avons eu l'occasion dans la deuxième partie, lors de l'analyse des porosités de matériaux compactés au champ, d'observer une influence très nette des formes et des dimensions des particules sur l'organisation de l'espace poral et les valeurs de volume apparent. Nous avons vu, en particulier, que les volumes apparents texturaux (chapitre 1.2 ; 2ème partie) sont liés à l'étalement des fractions granulométriques et en particulier à l'indice d'hétérométrie H_q et au rapport $1/1+S$, exprimant les proportions de mélanges d'éléments fins et grossiers. De même, les valeurs minimales de volume apparent (total) mesurées sous charge correspondent aux échantillons les plus riches en éléments fins (inférieurs à 50 μm) et présentant les indices d'hétérométrie les plus élevés (tableau 17).

1.43 - Analyse des courbes pF - V_{app}

L'expression en pF du contenu en eau permet de rendre compte implicitement de la constitution granulométrique et de comparer les courbes correspondant aux matériaux de différentes caractéristiques analytiques (teneurs en argile ; taux de matière organique).

Les courbes représentant les volumes apparents des massifs d'agrégats en relation avec les suctions, montrent que les évolutions de volumes apparents - pour une gamme de suctions données - sont différentes suivant la nature des matériaux. Considérant le même état énergétique de l'eau dans les systèmes, et en particulier un même état d'hydratation de la phase argileuse, les variations de comportement apparaissent liées aux différences de caractéristiques analytiques des matériaux.

En définitive, ce mode d'expression permet d'observer qu'en domaine visqueux, c'est-à-dire pour des suctions supérieures à pF 4.2, des variations substantielles de comportement mécanique existent, vraisemblablement dépendantes des teneurs différentes en argile (\pm d'action lubrifiante) et des distributions des squelettes. Enfin, ces courbes confirment que le point singulier W_2 concernant le passage domaine fragile-visqueux correspond à une succion supérieure à pF 4.2. Toutefois, il est possible de penser qu'aux faibles pressions oedométriques (0.25 à 1.0 kg/cm^2), ce seuil se situe à proximité du point de mesure à pF 4.2 pour les échantillons de St Benoit 1(2) et du Colombier, expliquant ainsi ces formes particulières de courbes.

1.44 - Analyse des variations des taux de saturation

La diminution des teneurs en eau et la saturation des massifs d'agrégats après compactage à 2 ou 6 kg/cm², pour une succion initiale égale à p_F 1 ou 1.5 (tableau 20), laisse supposer que les conditions sont celles requises pour une consolidation des milieux (HILLEL, 1982 ; AZZAOUTI, 1988). En outre, l'analyse des taux de saturation réalisée sur des mottes issues de mêmes milieux (chapitre 3, 1ère partie) a montré qu'à ces mêmes succions, les matériaux sont proches de la saturation. Il apparaît donc très probable que les agrégats demeurent saturés tout au long de l'expérience, et que les conditions sont proches de celles nécessaires à une consolidation, des pertes d'eau étant observées. Cela signifie donc, que dans une première phase, c'est l'eau du système qui s'oppose à la contrainte exercée (σ_{tot}).

En conséquence, l'équation de TERZAGHI peut être appliquée (HILLEL, 1982) :

$$\sigma_{eff} = \sigma_{tot} - u$$

où σ_{eff} : contrainte effective, à savoir celle qui s'exerce sur la matrice du sol,
 σ_{tot} : contrainte totale en un point du sol qui est due ici à la surcharge de pression,
 u : pression matricielle.

Considérant que le milieu draine librement, la contrainte σ_{eff} dans les matériaux sableux devient rapidement égale à σ_{tot} , la pression intersticielle (u) s'annulant.

$$\text{d'où } \sigma_{eff} = \sigma_{tot}$$

La modification de l'espace poral textural nécessitant l'existence d'une phase de consolidation, il est probable qu'il existe, dans ces conditions, des répercussions du compactage au niveau de l'espace poral lacunaire des agrégats sableux. Ce comportement les différencie de celui d'agrégats argileux qui, pour la même gamme de pressions, n'ont pas leur porosité texturale modifiée, le potentiel de l'eau restant trop élevé (en valeur absolue) (GUERIF, 1982).

1.45 - Rôle de la matière organique

Après l'examen du rôle de l'argile sur le comportement d'un massif d'agrégats au compactage, nous pouvons également nous interroger sur l'effet de la matière organique. Ainsi, disposant de matériaux à granulométries proches à Bou et à Saint-Benoit (tableau 17), avec des taux en matière organique largement différents (rapports M_o/A_r deux fois plus élevé à Saint-Benoit), nous pouvons comparer les comportements au compactage des situations concernées.

La comparaison des courbes de Bou.1 et STB.1(1) nous montre que les évolutions de volume apparent en fonction des succions en eau sont similaires

pour les deux matériaux, pour des pressions appliquées comprises entre 2 et 6 kg/cm². Précisons cependant qu'à pF 1, les massifs d'agrégats de STB.1(1) compactés à 2 kg/cm² ont un volume apparent plus important (tableau 19).

Si on confronte les courbes obtenues pour les matériaux de Bou.3 et STB.3, on observe des volumes apparents mesurés (sous charge) identiques jusqu'à pF 2.5. Par contre, à des suctions inférieures, les volumes apparents sont plus importants pour les matériaux de STB.3 (tableau 19).

L'efficacité de la matière organique sur le comportement au compactage de massifs d'agrégats n'apparaît donc pas de manière évidente, et cela malgré des matériaux aux rapports M_o/A_r très contrastés. Toutefois, il est intéressant de noter que les volumes apparents minimaux sont toujours obtenus sur les matériaux de Bou plus pauvres en matière organique. Ainsi, les volumes poraux minimaux, plus élevés pour les massifs d'agrégats de STB.3 par rapport à ceux de Bou.3, sont sans doute la conséquence de taux en matière organique plus élevés, et en particulier de la présence plus importante de fractions libres (tableau 17).

Rappelons que les constituants organiques du sol interviennent à différents niveaux vis à vis du comportement au compactage (GUERIF, 1979).

- ils modifient les lois d'assemblages des particules (effet stérique),
- ils affectent les propriétés physico-chimiques de la phase argileuse (propriétés d'hydratation et rhéologiques),
- ils modifient, par leurs caractéristiques mécaniques propres, le rendement d'application d'une contrainte mécanique.

Ainsi, la matière organique libre provoque-t-elle une augmentation du volume poral de l'échantillon compacté par effet stérique, mais également par les capacités de relaxation qu'elle confère au matériau. Inversement, une augmentation de la compressibilité des massifs d'agrégats aux faibles teneurs en eau peut avoir lieu du fait de la diminution de la résistance en traction texturale engendrée par les matières organiques (GUERIF, 1988c).

En conséquence, ces effets antagonistes de la matière organique expliquent l'absence d'une différenciation nette des comportements au compactage entre les matériaux riches et pauvres en matières organiques. Toutefois, nous pouvons émettre l'hypothèse d'un léger effet stérique de la matière organique pour les massifs d'agrégats compactés à l'état humide (suctions inférieures à pF 2).

1.46 - *Discussion de la notion de sensibilité au compactage*

L'étude des variations de volume apparent en fonction des teneurs en eau ou des suctions, nous montre que la notion de sensibilité au compactage doit être nuancée. Un tassement peut se produire quelle que soit la teneur en eau, et ceci pas seulement dans le domaine plastique, mais aussi dans le domaine fragile où il y a concassage des agrégats et tassement. Nos résultats montrent, en particulier, que cette phase peut être très importante en milieu sableux.

Cette notion de sensibilité au compactage qui est définie, d'une manière générale, par rapport aux phénomènes de variations de compacité ne permet en aucun cas de préjuger des conséquences sur le fonctionnement des sols, et en particulier, sur les propriétés de transfert liées au volume des pores mais surtout à leurs tailles, continuité et morphologie. En outre, l'application d'une telle notion, à l'évaluation des variations de compacité d'un sol sous une charge, nécessiterait de prendre en compte les teneurs en eau probables qui existent au moment des compactations.

En tout état de cause, il est important de se rappeler que la sensibilité au compactage d'un sol ne préjuge pas de sa potentialité agronomique et qu'un sol qualifié de "dégradé physiquement" n'est pour autant sensible au compactage.

II - CARACTERISATION DE L'ESPACE PORAL DES MATERIAUX COMPACTES A L'OEDOMETRE

2.1 - INTRODUCTION

L'étude précédente du comportement au compactage des matériaux sableux nous a permis d'observer l'évolution des volumes apparents en relation avec les potentiels en eau et les pressions appliquées. Ainsi, nous avons cherché à relier les comportements mécaniques aux caractéristiques analytiques des matériaux. Cependant, l'expression seule du volume apparent total ne nous renseigne pas sur la nature des modifications qui affectent l'espace poral, et en particulier comment évoluent la forme et la taille des pores lors du compactage.

Ainsi, GRIMALDI (1986) montre, dans le cas d'un matériau limoneux, que malgré une même valeur du volume poral, la distribution de la taille des pores est différente suivant la teneur en eau à laquelle le compactage Proctor est effectué. Les résultats de TOURET (1983) aboutissent également au même constat : un échantillon argilo-limoneux compacté à l'oedomètre ne présente pas de tassement mesurable, mais a cependant une morphologie de son espace poral qui varie suivant les conditions de teneur en eau lors du compactage. Dans le cas d'un mélange binaire argilo-sableux ou argilo-limoneux, ZIMMER (1981) et TOURET (1983) constatent un tassement textural et une modification du système poral, avec une distribution différente des tailles des pores selon que les matériaux sont compactés à l'état saturé ou non saturé.

La porosité texturale étant constituée de deux sous-espaces poraux (FIES, 1984) : 1 - l'espace poral lacunaire ; 2 - l'espace poral propre à la phase argileuse, toutes ces études rapportent que seule la fraction lacunaire est affectée par le compactage.

L'objectif de ce chapitre est d'analyser les effets du compactage à l'oedomètre sur l'organisation des systèmes poraux et de voir, plus précisément, quels sont les effets des potentiels en eau et des pressions appliquées sur les tailles et les morphologies des pores. En outre, cette analyse permettra de comparer l'organisation de matériau compacté au champ et en laboratoire avec l'oedomètre.

Deux méthodes sont utilisées pour réaliser cette analyse. Il s'agit de la porosimétrie au mercure et de l'observation micromorphologique.

2.2 - UTILISATION DE LA POROSIMETRIE AU MERCURE

Ce paragraphe est consacré à la description des distributions des volumes des pores de massifs d'agrégats compactés dans différentes conditions de potentiel hydrique et d'intensité de pression oedométrique, et à la comparaison avec les espaces poraux des matériaux naturels (mottes ou agrégats) ou remaniés (pâte).

2.21 - Matériels et méthodes

Parmi l'éventail des échantillons compactés à l'oedomètre, nous en avons sélectionné cinq de constitution granulométrique relativement contrastée : Bou.1, Bou.2, Saint-Benoit 1(1), Saint-Benoit 3 et le Colombier.

Rappelons que ces échantillons proviennent des horizons tassés (25-40 cm) sous labour. Leurs caractéristiques analytiques figurent au Tableau 17.

La description des espaces poraux concerne :

- Les massifs d'agrégats obtenus après compactage à l'oedomètre, sous une pression de 6 kg/cm² (600 kPa) et à trois valeurs de succion : 1 kPa (pF 1), 10 kPa (pF 2) et 100 kPa (pF 3). Dans le cas de Bou.1 et STB.3, une analyse complémentaire est faite sur des agrégats compactés à 2 kg/cm² (200kPa). Avant passage au porosimètre, les échantillons sont séchés à l'air et mis à l'étuve (à 105°C) pendant 24 heures.
- Les agrégats initiaux de 2-3 mm pris avant compactage et les mottes d'où sont extraits ces agrégats.
- Les pâtes ou matériaux remaniés, fabriqués à partir des mottes selon le protocole de KHEYRABI et MONNIER (1968) (annexe II.3).

Précisons qu'une partie des courbes d'intrusion de mercure obtenues sur mottes et sur pâtes a déjà été présentée à l'occasion de l'analyse des matériaux compactés au champ (chapitre 2.1, IIème partie). Nous les représenterons cependant de manière à pouvoir les comparer à celles obtenues ici avec les agrégats initiaux et les agrégats compactés.

2.22 - Résultats

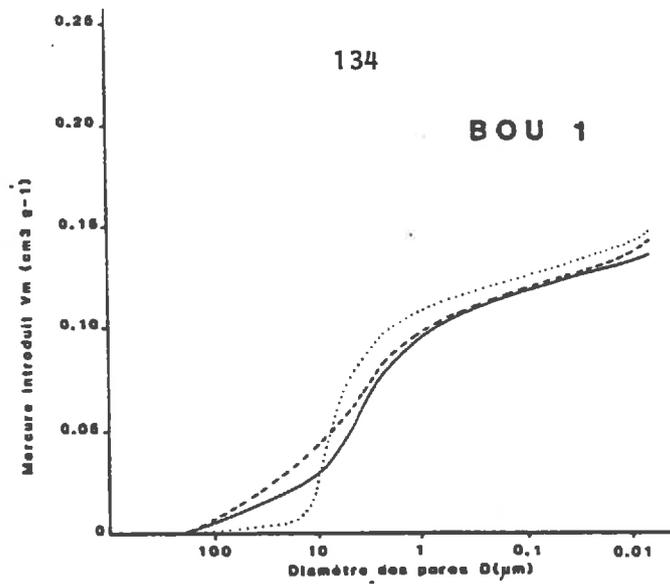
a) Données de la porosimétrie au mercure

De façon à simplifier la présentation des résultats, nous observerons successivement les données concernant les mottes, les agrégats, les pâtes et les massifs d'agrégats.

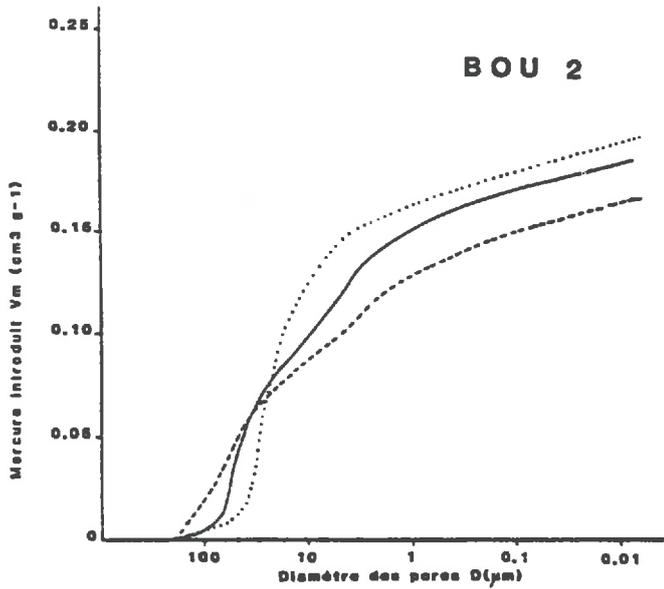
. Les mottes

Les volumes de mercure introduits (V_m) et les valeurs de diamètre équivalent ($D_{e\sigma}$) correspondant aux maxima d'intrusion, sont rassemblés dans

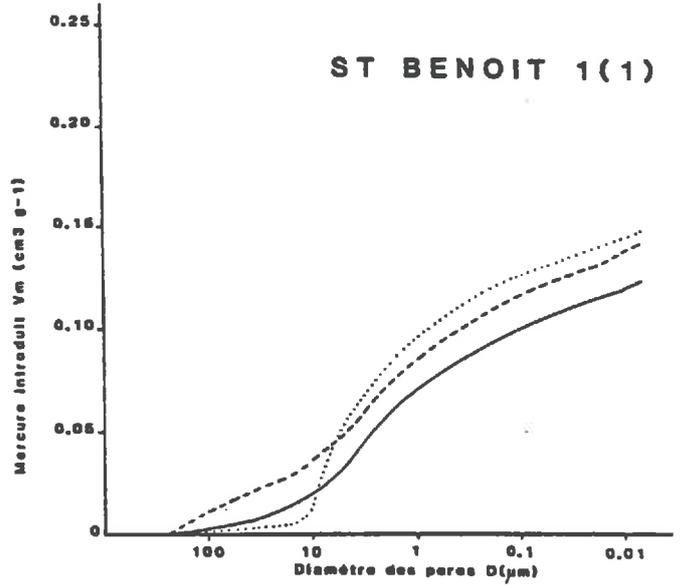
BOU 1



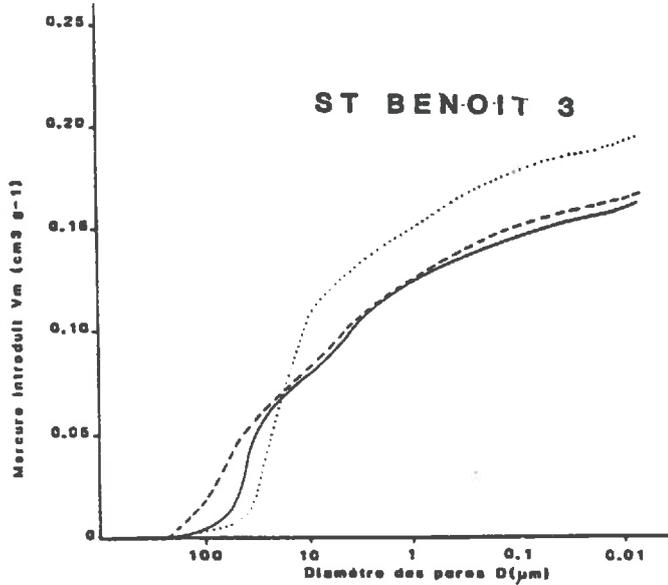
BOU 2



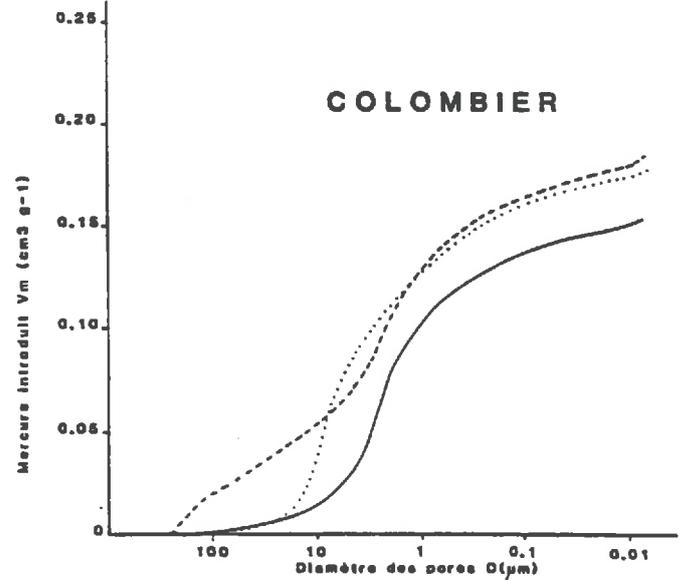
ST BENOIT 1(1)



ST BENOIT 3



COLOMBIER



— motte
 --- agrégats initiaux 2-3mm

..... pâte (texturale)

Figure 31 : Courbes cumulatives d'entrée de mercure des échantillons naturels et remaniés prélevés dans les horizons tassés (25-40 cm) sous labour.

Tableau 24 - Données obtenues en porosimétrie au mercure concernant les mottes, les agrégats initiaux et les pâtes.

Echantillons	Volume de mercure introduit V_m (cm ³ /g)	D_{eq} aux maxima d'intrusion de mercure (µm)
Mottes sablo-argileuses		
Bou.1	0.136	5.0
STB.1(1)	0.125	4.0
Colombier	0.155	2.6
Mottes sableuses		
Bou.2	0.187	58.0 - 3.7
STB.3	0.164	40.0 - 5.0
Agrégats initiaux sablo-argileux		
Bou.1	0.144	4.0
STB.1(1)	0.143	4.5
Colombier	0.188	2.8
Agrégats initiaux sableux		
Bou.2	0.170	70.0 - 4.0
STB.3	0.169	65.0 - 4.5
Pâtes texturales sablo-argileuses		
Bou.1	0.149	9.0
STB.1(1)	0.155	9.0
Colombier	0.180	8.5
Pâtes texturales sableuses		
Bou.2	0.191	30.0
STB.3	0.196	25.0

Tableau 25 - Données obtenues en porosimétrie au mercure. Cas des massifs d'agrégats compactés.

Echantillons	pF initial	Volume de mercure introduit V_m (cm ³ /g)	D_{eq} aux maxima d'intrusion de mercure (µm)
Agrégats compactés à 6kg/cm² + Sablo-argileux			
Bou.1	pF 1	0.160	10.0
"	pF 2	0.170	55.0 - 6.0
"	pF 3	0.198	55.0 - 4.5
STB.1(1)	pF 1	0.162	10.0
"	pF 2	0.167	56.0 - 5.0
"	pF 3	0.191	65.0 - 3.5
Colombier	pF 1	0.182	9.0
"	pF 2	0.204	55.0 - 4.0
"	pF 3	0.212	55.0 - 2.5
+ Sableux			
Bou.2	pF 1	0.200	23.0
STB.3	pF 1	0.197	23.0
"	pF 3	0.237	75.0
Agrégats compactés à 2 kg/cm² + Sablo-argileux			
Bou.1	pF 1	0.175	12.0
	pF 2	0.194	70.0 - 7.0
	pF 3	0.225	>200 - 4.0
+ Sableux			
STB.3	pF 1	0.216	100.0 - 23.0

le tableau 24. La figure 31 représente les courbes de volumes cumulés des pores occupés par le mercure (vcp) en fonction des diamètres de constriction. La figure 32 correspond aux courbes dérivées exprimant les distributions des volumes des pores (dvp).

Les distributions des volumes des pores et les valeurs de volume de mercure intrudé (V_m) des mottes se différencient suivant deux types :

- dans le groupe des échantillons sablo-argileux (SA) de Bou.1, du Colombier (COL) et de STB.1, les volumes V_m sont faibles, en particulier pour les mottes de Bou.1 et STB.1 (tableau 24 ; figure 31). Les courbes dvp (figure 32) sont toutes relativement étalées, autour de maxima d'intrusion enregistrés pour des diamètres $D_{e,q}$ valant respectivement 5.0, 2.6 et 4.0 μm (tableau 24).

- dans le groupe des échantillons sableux (S) de Bou.2 et STB.3, les volumes V_m sont plus importants (tableau 24 ; figure 31). Chaque courbe dérivée (dvp) présente deux pics d'intrusion correspondant à des diamètres $D_{e,q}$ valant 58.0 - 3.7 pour les mottes de Bou.2, et 40.0 - 5.0 pour celles de STB.3 (figure 32).

Précisons enfin que quelle que soit la nature granulométrique de l'échantillon, les tangentes aux courbes vcp établies avec les mottes sont horizontales en leur point haut et peu sécantes à l'axe des abscisses en leur point bas.

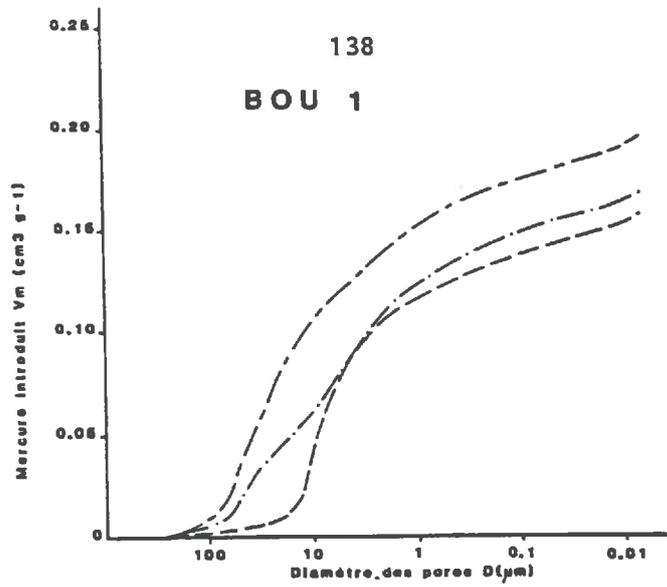
. Les agrégats

Les agrégats initiaux présentent les mêmes formes de courbes vcp et dvp que les mottes (figures 31 et 32). Les volumes V_m mesurés sont plus élevés que ceux correspondant aux mottes, à l'exception des agrégats de Bou.2 (figure 31, tableau 24). Les courbes dvp (figure 32) indiquent que cette différence de volume poral concerne des pores de diamètres de constriction supérieurs à 10 μm pour les échantillons de Bou.1, COL et STB.1, et supérieurs à 70 μm pour ceux de Bou.2 et STB.3. On observe parallèlement un déplacement des premiers pics d'intrusion des courbes de Bou.2 et STB.3 vers des valeurs supérieures de diamètre équivalent : $D_{e,q} = 70.0$ et $65.0 \mu\text{m}$ (tableau 24). Notons également, qu'à la différence des mottes, les tangentes aux courbes vcp sont nettement obliques à l'axe des abscisses dans leur partie basse.

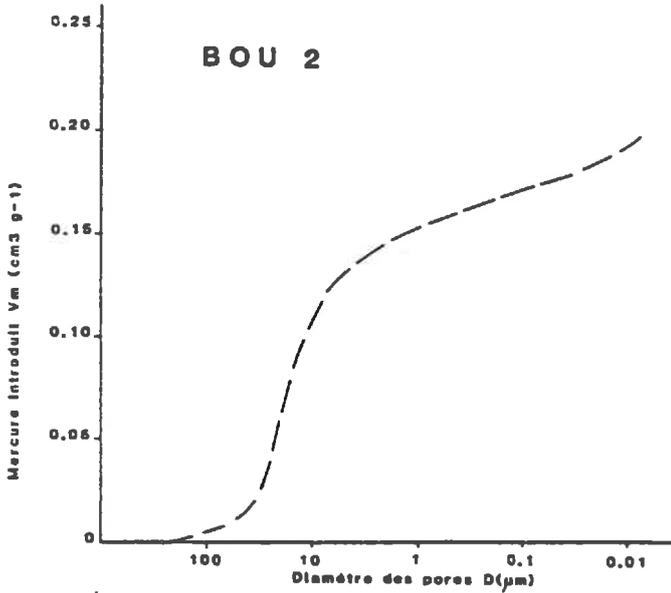
. Les pâtes

A la différence des courbes obtenues avec les mottes et les agrégats des échantillons sablo-argileux (SA) de Bou.1, COL et STB.1, les pics d'intrusion des courbes dvp correspondant aux pâtes sont très marqués (figure 32). Ils sont enregistrés pour des valeurs de $D_{e,q}$ supérieures à celles correspondant aux maxima des mottes et des agrégats : 9.0 μm pour les échantillons de Bou.1 ; 8.5 μm et 9.0 μm pour ceux de COL et STB.1. On note également des volumes de mercure intrudé V_m plus élevés que ceux mesurés avec les mottes (tableau 24). Contrairement aux échantillons naturels, les pâtes (S) de Bou.2 et STB.3 ont des courbes dvp ne présentant chacune qu'un seul pic,

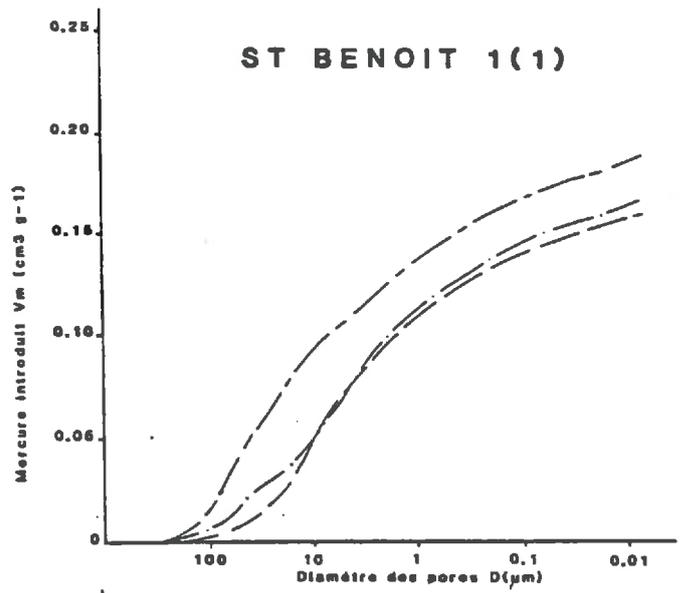
BOU 1



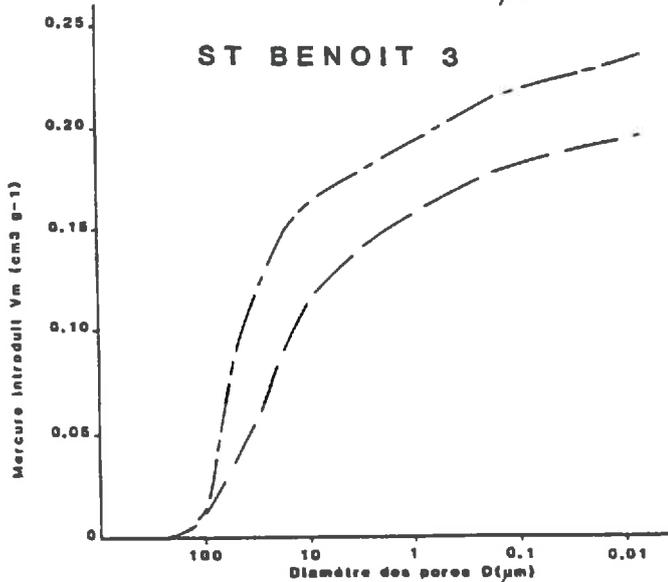
BOU 2



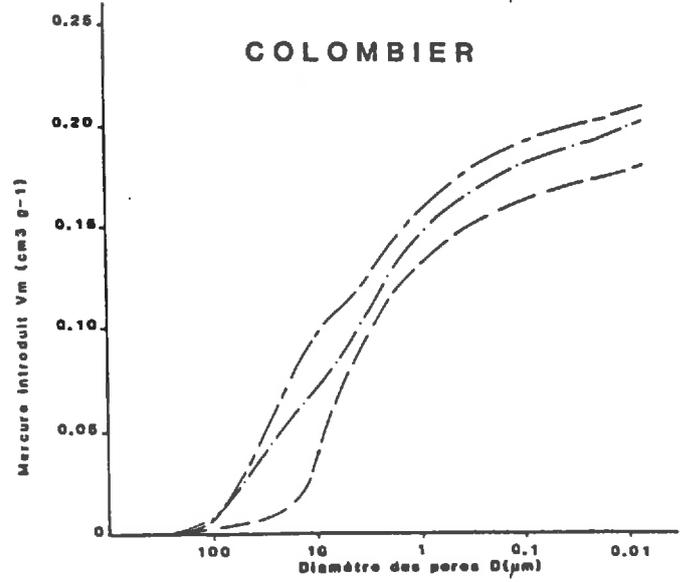
ST BENOIT 1(1)



ST BENOIT 3



COLOMBIER



--- pF3 de succion
 - · - pF2 de succion

— — pF1 de succion

Figure 33 : Courbes cumulatives d'entrée de mercure des massifs d'agrégats compactés à l'oedomètre sous une pression de 6 kg/cm². Effet de la succion initiale des agrégats.

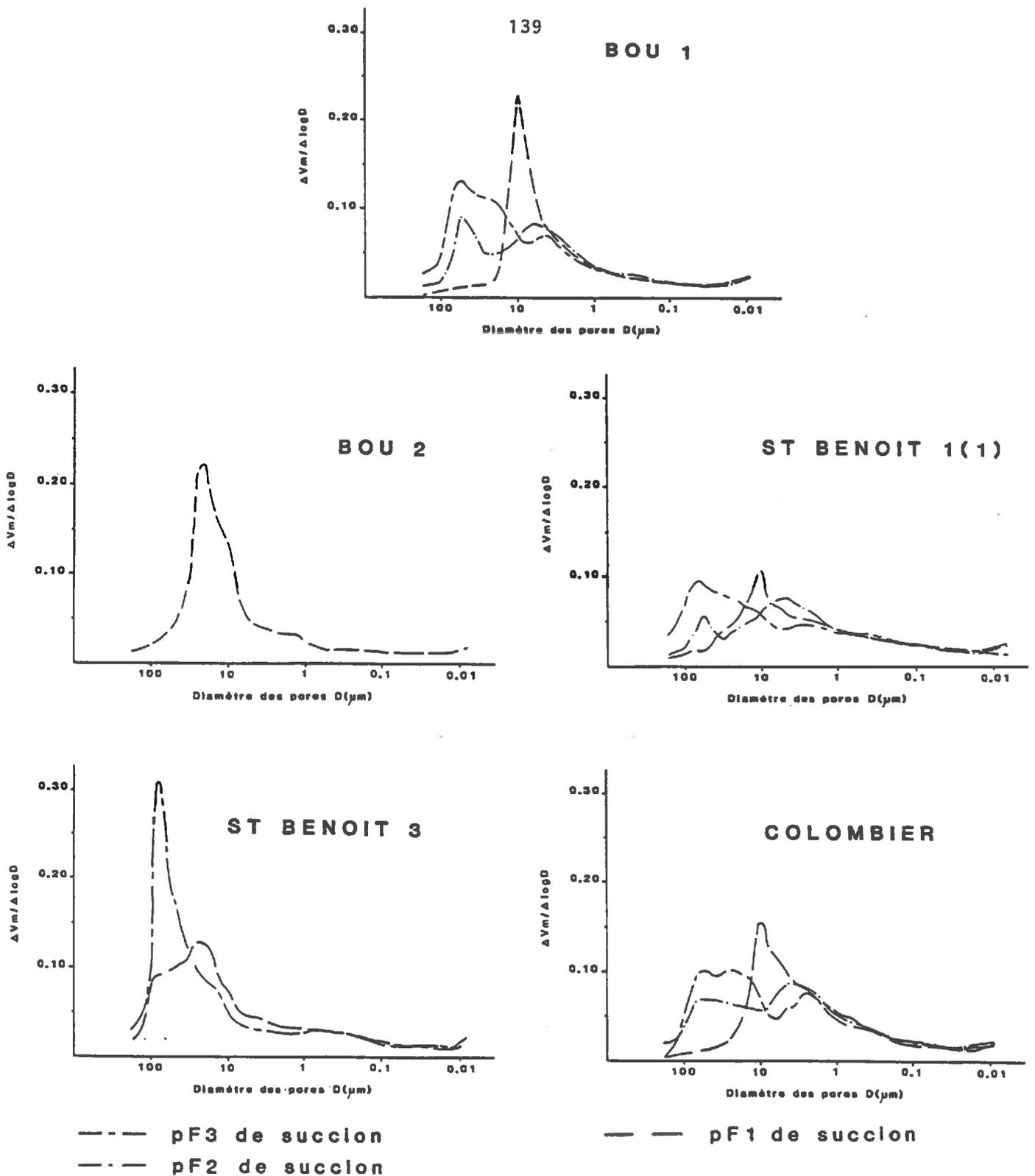


Figure 34 : Courbes des distributions des volumes des pores ou spectres de porosité des massifs d'agrégats compactés à l'oedomètre sous une pression de 6 kg/cm². Effet de la succion initiale des agrégats.

enregistré pour un diamètre $D_{e\alpha}$ valant respectivement 30.0 et 25.0 μm (tableau 24). Entre matériaux sablo-argileux et sableux, il demeure néanmoins une différence notable des valeurs de diamètre $D_{e\alpha}$ aux maxima d'intrusion de mercure. Notons enfin que, quelle que soit la nature de l'échantillon, la différence de d_{vp} entre les mottes, les agrégats et les pâtes, ne concerne que les pores de diamètres d'accès supérieurs à 1.0 μm .

. Les massifs d'agrégats compactés

Les courbes v_{cp} et d_{vp} sont reportées sur les figures 33, 34 et 35, et les données correspondantes dans le tableau 25.

Nous examinerons, successivement, les effets de la succion initiale des agrégats et ceux de l'intensité de pression de compactage.

- Effets de la succion initiale

Pour l'ensemble des massifs d'agrégats compactés, le volume intrudé de mercure (V_m) augmente avec la succion initiale de l'échantillon (figure 33 et 35 ; tableau 25), les différences de d_{vp} concernant des pores de diamètres de constriction supérieurs à 1.0 μm .

Pour une pression appliquée de 6 kg/cm^2 (figure 34), les courbes d_{vp} des échantillons sablo-argileux (SA) présentent toutes deux maxima d'intrusion lorsque la succion initiale est égale à pF 2 (10 kPa) ou pF 3 (100 kPa), et un seul pic lorsque cette dernière est égale à pF 1 (1 kPa). Les volumes de mercure intrudé, au niveau des diamètres de pores les plus élevés (premier pic d'intrusion sur les courbes d_{vp}), sont d'autant plus importants, que les succions initiales des échantillons sont élevées. Pour des diamètres de pores inférieurs à 10 μm , les volumes de mercure intrudé sont similaires entre les massifs d'agrégats compactés à pF 2 ou pF 3. Les maxima des courbes d_{vp} des agrégats compactés à pF 1, correspondent pratiquement aux mêmes diamètres que les pics d'intrusion des pâtes (tableau 24). En outre, les volumes V_m sont analogues entre les deux types d'échantillon.

Pour la même intensité de pression statique (6 kg/cm^2), un seul pic d'intrusion est observé à pF 3 de succion pour l'échantillon sableux de St Benoit 3 (figure 33). A pF 1, on retrouve une distribution des volumes des pores semblable à celle des pâtes, pour les massifs de Bou.3 et STB.3.

- Effets de l'intensité de compactage

Pour un état hydrique donné, le volume V_m est plus important pour les massifs d'agrégats compactés à 2 kg/cm^2 , que pour ceux compactés à 6 kg/cm^2 (cas des échantillons de Bou.1 et STB.3 : figure 33 et 35a ; tableau 25).

A 2 kg/cm^2 , les courbes d_{vp} concernant les échantillons de Bou.1 (figure 35b) indiquent des intrusions de mercure beaucoup plus importantes en début de mesure qu'à 6 kg/cm^2 : sur la courbe à pF 2, le premier pic est plus

Tableau 26 - Bilans de volume des échantillons initiaux et compactés.

Echantillons		$V_{oed0} - V_m$ - 1/2.65 (cm ³ /g) (1)	$V_p - V_m$ -1/2.65 (cm ³ /g) (2)
Mottes sablo-argileuses			
Bou.1		-	0.037
STB.1(1)		-	0.030
Colombier		-	0.008
Mottes sableuses			
Bou.2		-	0.007
STB.3		-	0.055
Pâtes texturales sablo-argileuses			
Bou.1		-	0.018
STB.1(1)		-	0.009
Colombier		-	-0.005
Pâtes texturales sableuses			
Bou.2		-	-0.003
STB.3		-	0
Agrégats compactés à 6 kg/cm² + Sablo-argileux			
Bou.1	pF 1	0.019	0.003
"	pF 2	0.013	0.003
"	pF 3	0.015	-0.002
STB.1(1)	pF 1	0.019	-
"	pF 2	0.019	-
"	pF 3	0.040	-
Colombier	pF 1	0.005	-
"	pF 2	0.004	-
"	pF 3	0.022	-
+ Sableux			
Bou.2	pF 1	0.013	-
STB.3	pF 1	0.017	-
"	pF 3	0.021	-
Agrégats compactés à 2 kg/cm² + Sablo-argileux			
Bou.1	pF 1	0.019	0.002
"	pF 2	0.032	-0.006
"	pF 3	0.066	0.009
+ Sableux			
STB.3	pF 1	0.038	-

important, et sur la courbe à pF 3, la position de ce même pic ne peut être définie celui ci se situant vraisemblablement à des diamètres supérieurs à 250 μm .

A pF 1, la courbe dvp des massifs d'agrégats de Bou.1 ne comporte qu'un seul pic enregistré pour $D_{eq} = 12.0 \mu\text{m}$, comme celle correspondant à 6 kg/cm^2 de pression (tableau 25). En revanche, à cette même valeur de pF, un deuxième pic subsiste sur la courbe dvp de l'échantillon STB.3 compacté à 2 kg/cm^2 , contre un seul pic pour une compaction à 6 kg/cm^2 .

b) Confrontation des mesures de volume poral

Le tableau 26 montre les différences de volume poral obtenues en comparant les porosités mesurées avec le comparateur de l'oedomètre (V_{oedo}) ou par la méthode au pétrole (V_p) (MONNIER et al., 1973), aux porosités déterminées par porosimétrie au mercure (V_m).

. Les mottes

Les valeurs calculées de la colonne 2, qui exprime les différences entre les volumes des vides mesurés avec la technique au pétrole ($V_p - 1/2.65$) et les volumes de mercure introduit (V_m), sont relativement importantes pour l'ensemble des mottes à l'exception de celles de Bou.2 et Colombier. En d'autres termes, un volume de vide non négligeable concernant des pores de diamètres d'accès supérieurs à 250 μm ou inférieurs à $6.5 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}$ existe dans ces mottes.

. Les agrégats initiaux

En ce qui concerne les agrégats, aucune détermination de volume apparent dans le pétrole n'a pu être réalisée du fait de la nature très grossière des échantillons (FIES et STENGEL, 1981).

. Les pâtes

Sur pâte, les différences de volume poral entre ces deux types de mesure ne sont pas significatives, à l'exception de la pâte de Bou.1 ($\sigma = 0.018 \text{ cm}^3/\text{g}$).

. Les massifs d'agrégats

Dans le cas des massifs d'agrégats de Bou.1, le même calcul montre que les volumes apparents mesurés dans le pétrole sont proches de ceux déterminés en porosimétrie au mercure. En revanche, les volumes des vides mesurés avec le capteur de déplacement ou comparateur ($V_{oedo} - 1/2.65$) sont largement supérieurs aux volumes de mercure introduit (colonne 1), en particulier à pF 3 et pF 2, et supérieurs par conséquent aux volumes des vides mesurés avec la technique au pétrole. Tout laisse donc à penser que la technique utilisant le pétrole est inadaptée pour la mesure de volume apparent de massifs d'agrégats à forte macroporosité (agrégats compactés à des succions élevées), une partie des pores les plus grossiers se désaturant avant la détermination du volume dans le pétrole. Au contraire, toute la porosité est prise en compte par le

capteur de déplacement. C'est pourquoi ne figurent pas les valeurs de volume apparent mesurées dans le pétrole pour les autres massifs d'agrégats. D'une manière générale, on observe donc que le volume des vides non pris en compte par la porosimétrie au mercure augmente avec la succion initiale des agrégats avant compactage ou la diminution de la contrainte oedométrique.

2.23 - Discussion - conclusion

a) les pâtes

Comme dans un précédent paragraphe (2ème partie ; chapitre 2.1), l'analyse des courbes porosimétriques peut se prêter à une comparaison avec celles établies par FIES (1984) pour des mélanges binaires contenant de mêmes quantités d'argile.

Les courbes vcp diffèrent de celles de FIES (1984) en raison d'une intrusion plus continue du mercure, par des pores de diamètres équivalents compris entre 1 et 0.02 μm . L'hétérogénéité dimensionnelle du squelette peut expliquer cette différence. L'espace poral lacunaire est accessible par des pores de diamètres équivalents $D_{eq} < 30 \mu\text{m}$ pour les échantillons de Bou.1, COL et STB.1, et $D_{eq} < 70 \mu\text{m}$ pour les échantillons de Bou.2 et STB.3. Son remplissage est graduel, le début d'intrusion du mercure dans la phase argileuse se situant à $D_{eq} < 0.02 \mu\text{m}$. Les pics d'intrusion des courbes dvp expriment les maxima d'intrusion dans les espaces lacunaires.

b) les mottes et les agrégats

L'organisation de l'espace poral des agrégats est similaire à celle des mottes d'origine. La différence de mercure introduit semble due à la porosité générée lors du remplissage de la cellule du porosimètre avec les agrégats. Cela explique l'intrusion du mercure très précoce en début de mesure et l'allure oblique des tangentes aux courbes.

- Effets de la texture

Les distributions des volumes des pores des mottes et des agrégats se différencient nettement entre les échantillons de Bou.1, COL, STB.1 et ceux de Bou.2 et STB.3. Les courbes dvp sont beaucoup plus étalées dans le cas des premiers échantillons, et les volumes des pores de diamètres d'accès supérieurs à 20 μm sont plus réduits. Les différences de distribution des volumes des pores concernent l'espace poral lacunaire. Le taux croissant en éléments fins et la diminution du taux des fractions les plus grossières conduit à l'étalement du "spectre" de porosité.

- Comparaison aux pâtes

Les pics d'intrusion sur mottes ou agrégats sont enregistrés à des diamètres équivalents inférieurs à ceux des pâtes, mais c'est surtout la forme des courbes dvp qui diffère entre échantillons naturels et remaniés. Quelle que soit la nature de la motte ou des agrégats, l'intrusion de mercure est plus progressive que dans le cas des pâtes. La détermination du volume

apparent (V_{app}) montre qu'un volume des vides non négligeable n'est pas pris en compte en porosimétrie à mercure. Du fait que les distributions des volumes des pores sont similaires au dessous de $D_{eq} = 1.0 \mu m$, nous pouvons considérer qu'à la différence des pâtes, il existe un volume poral important dans les mottes ou agrégats de diamètres d'accès supérieurs à $30 \mu m$ pour les échantillons de Bou.1, COL et STB.1, et supérieurs à $70 \mu m$ pour les échantillons de Bou.2 et STB.3. Une partie de ce volume poral concernant des pores de diamètres équivalents supérieurs à $250 \mu m$, n'est pas pris en compte par la mesure au porosimètre à mercure. Ce volume, absent dans les matériaux remaniés, correspond à l'espace poral lacunaire plus hétérogène des mottes ou des agrégats naturels. Il correspond également à l'existence de pores d'origine structurale observés sur lame mince dans le cas des mottes (2ème partie ; chapitre 2.2) et aux pores dus à l'assemblage des éléments structuraux dans la cellule du porosimètre dans le cas des agrégats.

La différence de distributions des volumes des pores entre échantillons naturels et remaniés peut être également le résultat d'un phénomène de percolation, les pâtes se rapprochant de milieux considérés comme infinis (RENAULT, 1988).

c - les massifs d'agrégats

- Effets du potentiel initial

A une succion de 1 kPa (pF 1), les massifs d'agrégats sont à un état proche de la saturation en eau après application d'une charge de 6 kg/cm^2 (tableau 20 ; chapitre 1.3). Avec une pression de 2 kg/cm^2 , les massifs d'agrégats de Bou.1 sont toujours saturés, contrairement à ceux de STB. 3.

Les mesures établies au porosimètre à mercure montrent que, dans des conditions de saturation en eau, les courbes dvp ne présentent qu'un seul pic et sont similaires aux courbes correspondant aux pâtes des mêmes matériaux. L'état de saturation lors du compactage mécanique induit donc une organisation de l'espace poral identique à celle d'une pâte fabriquée suivant le protocole de KHEYRABI et MONNIER (1968). Il y a donc, en définitive, modification de l'espace poral lacunaire intra-agrégat, le compartiment inter-agrégats ayant disparu. Ce résultat confirme l'hypothèse préalablement émise (Chapitre 13) d'une modification de la porosité texturale du fait de cet état de consolidation. Dans le cas des agrégats de STB.3 compactés sous une charge de 2 kg/cm^2 avec une succion de 1 kPa (pF 1), une partie très faible de l'espace poral inter-agrégats semble avoir subsisté, les conditions de teneur en eau étant différentes de la saturation. Il apparaît néanmoins, conjointement, une modification de l'espace poral lacunaire intra-agrégat.

Avec une succion initiale de 10 kPa (pF 2) ou 100 kPa (pF 3) et une pression oedométrique de 6 kg/cm^2 , les massifs d'agrégats ne sont pas saturés après compression. Les deux pics d'intrusion observés sur les courbes dvp correspondent aux intrusions successives du mercure dans l'espace poral inter- et intra-agrégats. Le second pic, qui correspond à l'espace poral lacunaire, est identique à celui observé avec les agrégats initiaux. Dans ces conditions de potentiel hydrique, l'espace poral lacunaire ne semble donc pas modifié par la compression mécanique.

- Effets de la pression appliquée

Lorsque la pression oedométrique est plus faible (2 kg/cm^2) et les suctions égales à 10 kPa (pF 2) ou 100 kPa (pF 3), les valeurs de volume des pores inter-agrégats augmentent, la porosité lacunaire intra-agrégat demeurant constante. Ainsi, à pF 3, la courbe vcp des massifs d'agrégats de Bou.1 compactés à 2 kg/cm^2 (figure 35a) nous montre qu'une partie de la porosité inter-agrégats est partiellement remplie par le mercure avant la première mesure, la tangente à la courbe étant oblique à l'axe des abscisses.

La valeur du volume des pores inter-agrégats apparaît donc liée à l'intensité de la charge appliquée. Toutefois, il est probable que lorsque l'augmentation de charge est importante, il y a modification également de la porosité intra-agrégat puisque la hausse de pression peut conduire à une saturation du milieu (tableau 20 ; chapitre 1).

d) Conclusion

Il apparaît, finalement, que si l'intensité de la charge appliquée doit être prise en compte, la valeur du **potentiel hydrique est déterminante sur l'organisation de l'espace poral**. La disparition de l'espace poral inter-agrégats, et la modification de la porosité lacunaire intra-agrégat, n'apparaissent qu'en condition de faible succion (pF 1) conduisant à une saturation des milieux.

Pour des valeurs différentes de succion (pF 2 ou pF 3), seule la porosité inter-agrégats est modifiée. Nous aboutissons donc au même résultat que GRIMALDI (1986), à savoir que la teneur en eau lors du compactage de massifs d'agrégats est déterminante pour l'organisation de l'espace poral. En outre, comme ZIMMER (1981) et TOURET (1983), nous constatons que la distribution des volumes des pores est différente pour les matériaux compactés à l'état saturé ou non saturé, le pic d'intrusion correspondant à des pores de diamètres équivalents inférieurs dans le second cas.

Afin de conforter la précédente analyse, nous présenterons dans le prochain paragraphe les observations faites en micromorphologie.

2.3 - OBSERVATIONS MICROPHORPHOLOGIQUES

2.31 - Matériel et méthode

Les observations micromorphologiques sont réalisées uniquement sur les échantillons de Bou.1. Elles concernent : les mottes d'origine (issues de l'horizon 25-35 cm), les agrégats initiaux et les massifs d'agrégats compactés sous une charge de 6 kg/cm^2 , à des suctions de 1 kPa (pF 1), 10 kPa (pF 2) et 100 kPa (pF 3). Nous reporterons également les descriptions faites sur pâte du même matériau (25-35 cm), pour comparaison.

Les observations* sont faites avec deux grossissements : sous binoculaire : $G \approx 9$; et sous microscope équipé d'une source à ultra-violet : $G \approx 140$.

* Le protocole de fabrication des lames est reporté en annexe II.32.

2.32 - Résultats

a) Les matériaux originels : Mottes et agrégats

A faible grossissement, les mottes issues de l'horizon compacté sous labour (planche 4a) présentent quelques macropores de dimensions comprises entre 300 et 800 μm . Les mêmes observations peuvent être faites dans le cas des agrégats initiaux (planche 4b). Il apparaît également, à la même échelle d'observation, que ce massif d'agrégats initial correspond à un mélange d'éléments structuraux à porosité très réduite ou au contraire relativement importante.

A fort grossissement, sous une lumière à ultra-violet, on observe au sein du même agrégat ou de la même motte, la présence de zones particulièrement denses ou au contraire très riches en pores (planche 5b, c). Il apparaît, par conséquent, une forte hétérogénéité de la répartition dimensionnelle des pores.

b) Les pâtes

Sur pâte fabriquée à partir du même matériau, les macropores observés à faible grossissement sur les échantillons naturels n'existent plus (planche 4c).

A fort grossissement (planche 5a), seule une porosité due à l'assemblage des particules élémentaires existe. Cet espace poral, qui correspond au compartiment lacunaire décrit par FIES (1984), a une répartition homogène, les valeurs de porosité étant relativement indépendantes des plages observées. Les pores ont des dimensions relativement constantes, comprises entre 10 et 50 μm .

c) Les massifs d'agrégats compactés

En ce qui concerne les massifs d'agrégats (planche 6) soumis à une charge de 6 kg/cm^2 , un réseau de larges pores (200 à 1000 μm) est observé à faible grossissement lorsque la succion initiale des agrégats est égale à 100 kPa (pF 3) (planche 6a). Lorsqu'elle est égale à 10 kPa (pF 2), de larges pores sont toujours présents (200 à 500 μm), mais ne sont pas reliés entre eux comme précédemment (planche 6b). Ainsi, les limites entre agrégats deviennent diffuses. Enfin, avec une succion initiale de 1 kPa (pF 1), tous ces macropores ont disparu.

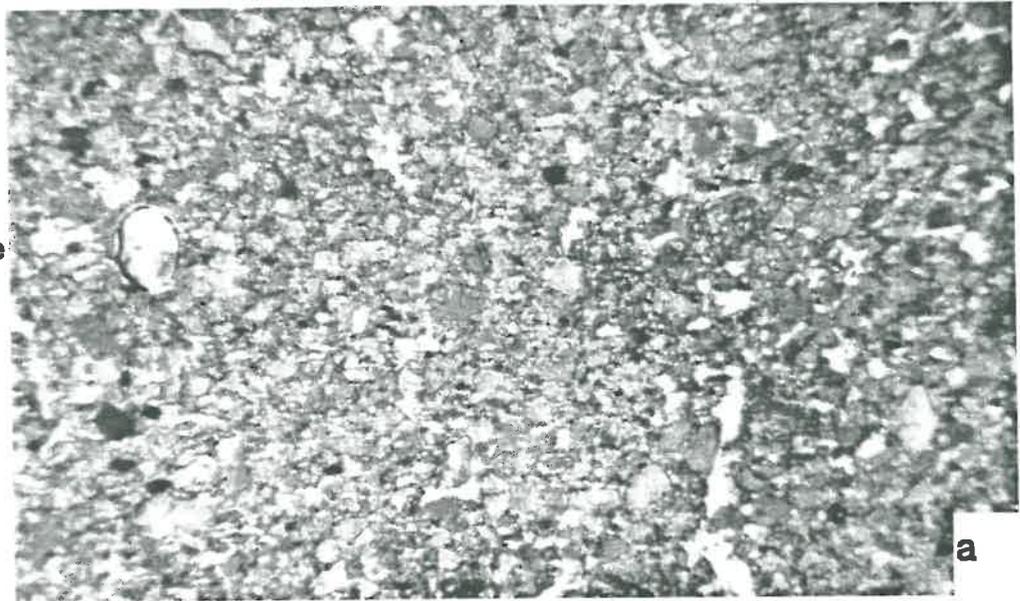
A fort grossissement, il est intéressant d'observer que l'organisation interne des agrégats compactés à pF 3 ou pF 2 est très proche de celle observée dans les agrégats initiaux (planche 5b). En revanche à pF 1, l'espace poral a une morphologie similaire à celle des pâtes (planche 5a).

2.33 - Interprétations - Conclusion

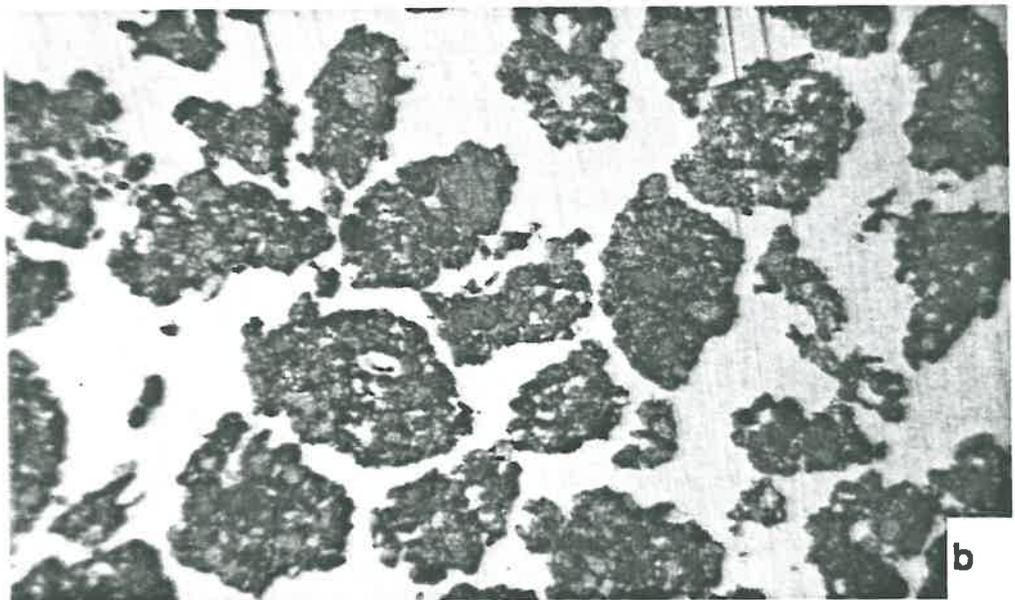
L'observation des lames minces confirme les données acquises en porosimétrie à mercure.

Planche 4: Morphologie des matériaux naturels compactés à l'oedomètre. Comparaison au matériau remanié

motte initiale
tassée
(25-35cm)



agrégats
initiaux

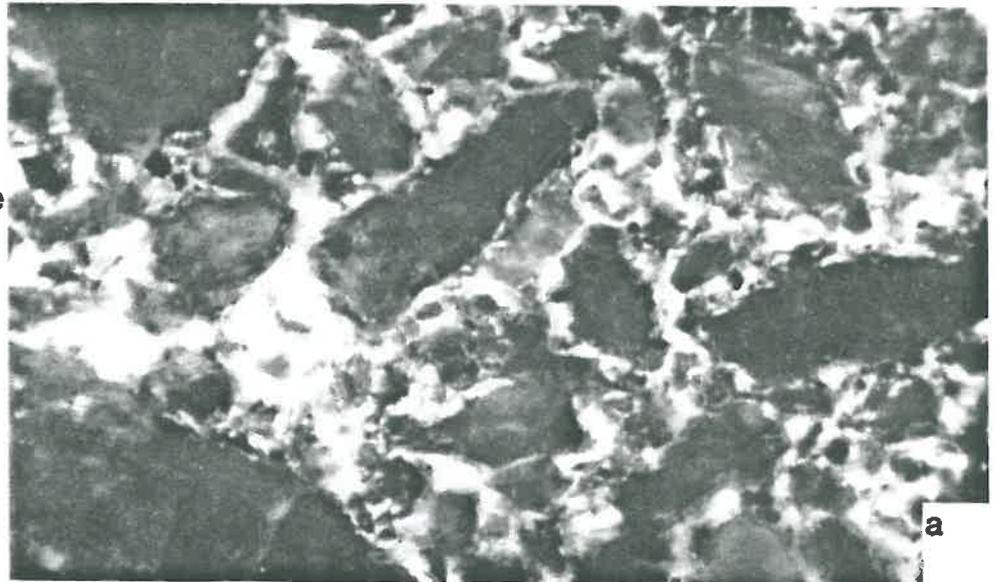


matériau
remanié
(pâte)



Planche 5: Morphologie des assemblages

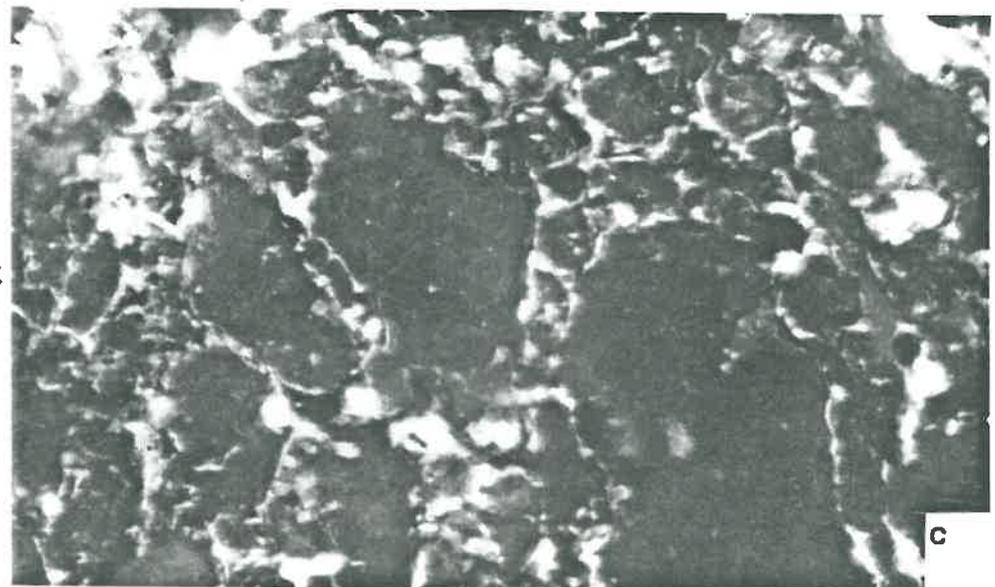
matériau remanié
(pâte)



agrégats initiaux



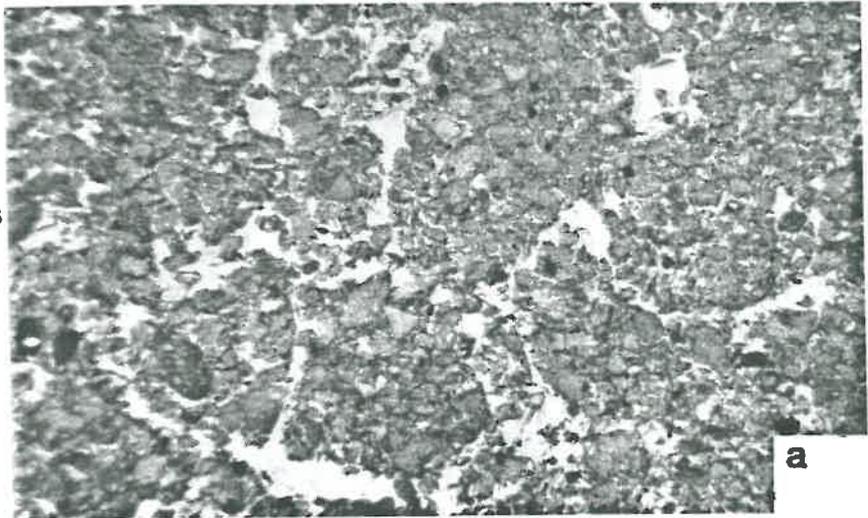
agrégats initiaux



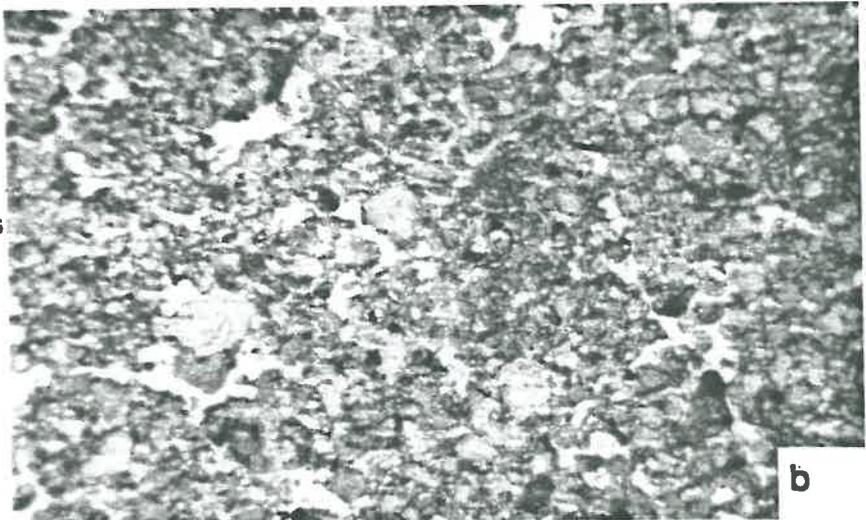
0.1mm

**Planche 6 : Effet de la succion initiale sur la morphologie
des massifs d'agrégats compactés**

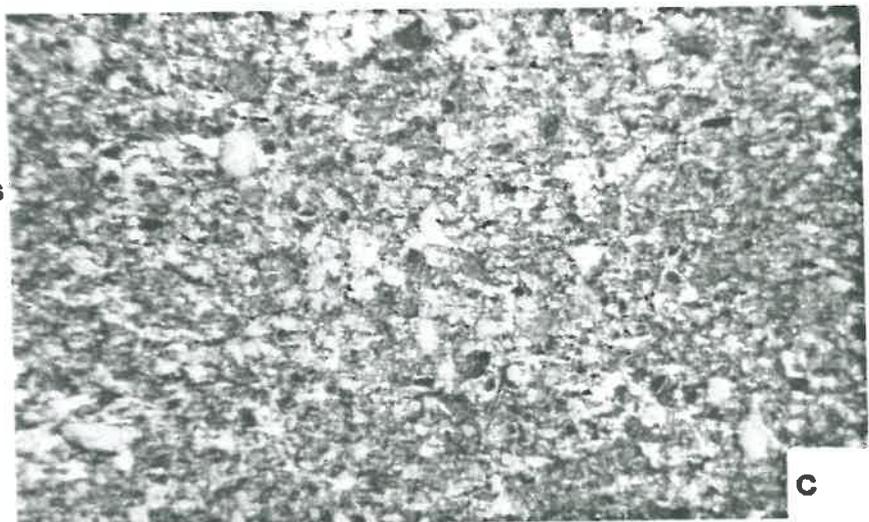
**agrégats compactés
à pF3**



**agrégats compactés
à pF2**



**agrégats compactés
à pF1**



2 mm
└───┘

Sur pâte, l'organisation homogène de la porosité lacunaire, et l'absence de vide d'origine structurale, sont cohérentes avec une distribution des volumes des pores à classe dominante, de diamètres équivalents inférieurs à 30 μm . Cela fut d'ailleurs décrit dans un précédent paragraphe (2ème partie ; chapitre 2.2), dans le cas d'une pâte fabriquée avec le matériau superficiel de Bou.1 (0-10 cm).

En ce qui concerne les agrégats, l'observation de lames minces nous a permis de constater que l'organisation du système poral est identique à celle des mottes. Il y a une répartition hétérogène de la porosité lacunaire, avec une juxtaposition de zones denses ou au contraire poreuses. En outre, il existe des pores structuraux de tailles importantes dans les mottes ou les agrégats. Aussi la pénétration du mercure au sein des mottes ou des agrégats, et à la différence des pâtes, peut être beaucoup plus précoce, le liquide s'acheminant au travers de ces macropores, puis des zones à fortes porosités lacunaires. On comprend donc l'allure très étalée des courbes dvp obtenues sur les échantillons naturels. Lors de l'interprétation de l'introduction de mercure plus précoce dans les agrégats que dans les mottes, nous avons proposé l'hypothèse de la création d'une macroporosité inter-agrégats lors du remplissage des cellules du porosimètre avec les agrégats.

On comprend également, à l'observation des lames minces, que la surface externe en contact avec le mercure est beaucoup plus importante dans le cas des agrégats que dans le cas des mottes. Un rapide calcul montre d'ailleurs que la surface externe des agrégats mis dans la cellule du porosimètre, est 4 à 5 fois supérieure à celle des mottes. Aussi, l'accessibilité du mercure dans un pore - d'un diamètre de constriction donné - peut être rendue plus facile du fait de cette deuxième cause probable de l'introduction plus précoce du mercure dans les agrégats. Cette observation est en accord avec les résultats théoriques de RENAULT (1988), qui montrent une augmentation du diamètre des pores au seuil d'intrusion, lorsque le milieu à une profondeur de réseau qui diminue ou, inversement, une largeur qui augmente.

En ce qui concerne les massifs d'agrégats, la simularité des courbes porosimétriques concernant les pâtes et les agrégats compactés à pF 1 est cohérente avec les organisations de l'espace poral observées sur lames minces.

Les diamètres moyens des pores (200-500 μm) correspondant aux espaces inter-agrégats des agrégats compactés à pF 2 sont largement supérieurs aux diamètres de constriction enregistrés au maximum d'intrusion ($D_{e,q} = 55 \mu\text{m}$). Cela peut être expliqué par la grande différence qui existe entre la valeur du diamètre de la cavité résultant de l'assemblage des agrégats et le diamètre des pores donnant accès à ces cavités (VACHIER et al., 1979).

Le même constat peut être fait pour les massifs d'agrégats compactés à une succion initiale de pF 3. On remarque, une nouvelle fois, la conformité avec les résultats obtenus en porosimétrie à mercure : l'augmentation du réseau poral inter-agrégats (à pF 3 de succion) explique l'augmentation de volume de mercure intrudé aux diamètres de constriction élevés.

En définitive, l'analyse micromorphologique confirme donc totalement les hypothèses que nous formulions lors de la description des résultats obtenus en porosimétrie au mercure.

2.4 - CONCLUSION

La caractérisation de l'espace poral des matériaux compactés à l'oedomètre, réalisée à l'aide de la porosimétrie au mercure et l'observation de lames minces, nous a permis de relier les changements d'organisations des espaces poraux aux conditions expérimentales de compactage, c'est-à-dire aux potentiels matriciels et aux intensités de pression oedométrique. En outre, cette étude permet de comparer l'organisation de l'espace poral de matériaux compactés au champ et en laboratoire.

En ce qui concerne les conditions de compactage, la succion est déterminante sur les caractéristiques de l'espace poral des massifs d'agrégats compactés. A faible succion ($pF 1$), les échantillons acquièrent une organisation analogue à celle des pâtes. Elle semble le résultat d'un compactage en condition saturée et par conséquent d'une consolidation. Au contraire, à des succions plus élevées, le compactage modifie essentiellement les valeurs de porosité inter-agrégats, la porosité lacunaire intra-agrégat demeurant relativement constante.

Cette analyse nous permet également, dans une seconde phase, de disposer d'un moyen d'approche de la connaissance des conditions de compactage au champ. En effet, du fait que l'organisation porale de matériaux compactés au champ est différente de celle des pâtes ou de massifs d'agrégats compactés à une succion égale à $pF 1$, nous pouvons faire l'hypothèse que les succions existant lors des compactages par les engins agricoles étaient plus élevées que cette valeur. En définitive, le compactage au champ ne permettrait pas l'homogénéisation de la distribution dimensionnelle des vides lacunaires, du fait de teneurs en eau insuffisamment élevées. En dehors de conditions proches de la saturation, le compactage conduit simplement à une réduction du volume poral lacunaire par rapprochement des grains du squelette et une diminution du volume des vides structuraux. C'est d'ailleurs ce qui fut observé lors de la comparaison des porosités des mottes entre roues et des mottes sous roues (2ème partie ; chapitre 2.2).

CONCLUSIONS

Le but essentiel de cette troisième partie était d'examiner le comportement au compactage des matériaux sableux provenant des situations qui avaient fait l'objet, pour la plupart, d'une analyse préalable des évolutions des profils porosimétriques en relation avec les travaux culturaux.

Pour réaliser cette étude, nous avons utilisé une technique de compactage qui permet la mesure des volumes apparents de massifs d'agrégats

compactés dans des conditions de potentiel hydrique et de pression mécanique connues. Complémentairement, une analyse qualitative de l'espace poral des échantillons compactés fut réalisée de manière à connaître à quel niveau de l'espace poral se situaient les modifications dues au compactage. En outre, cette démarche nous a permis de comparer l'organisation du système poral de matériaux compactés en laboratoire et au champ.

Les principaux résultats concernant les évolutions des volumes apparents sous une charge statique sont les suivants :

- les matériaux étudiés sont particulièrement sensibles au tassement provoqué par la presse oedométrique. En d'autres termes, une teneur en eau et une pression oedométrique très faibles sont suffisantes pour produire une réduction importante du volume poral des massifs d'agrégats. Ainsi, la diminution des volumes massiques est maximale pour des suctions comprises entre pF 6 et pF 3.
- Cette fragilité des matériaux se manifeste également par l'absence de domaine solide. Quelle que soit la pression appliquée, comprise entre 0.5 et 6 kg/cm², il y a un tassement important du massif d'agrégats, y compris à l'état sec, avec rupture des éléments structuraux.
- A l'exception de deux matériaux, nous n'avons pu observer qu'un seul domaine de comportement au compactage, c'est-à-dire celui qualifié de visqueux. Les deux matériaux où un deuxième domaine de comportement (dit fragile) fut observé, sont les plus riches en argile. Leurs propriétés mécaniques semblent se rapprocher de celles concernant des matériaux à constitution plus argileuse. Précisons toutefois, qu'une analyse des données granulométriques nous a permis de considérer qu'il n'y a pas absence du domaine fragile pour les échantillons sableux, mais que ce dernier se situe simplement à des teneurs en eau inférieures au point de mesure à pF 4.2, nous rendant ainsi son observation difficile.
- L'ensemble des caractéristiques mécaniques concernant les massifs d'agrégats sont à relier aux caractéristiques propres des agrégats et à celles résultant de l'assemblage des éléments structuraux. Il est à noter, en particulier, que la fragilité de ces matériaux peut être corrélée aux très faibles valeurs de résistance en traction texturale, mesurées pour des matériaux à taux d'argile voisins (GUERIF, 1988c).
- l'expression des volumes apparents en fonction des potentiels hydriques, nous permet de comparer les variations de compacité de matériaux qui diffèrent par leur constitution granulométrique. Ainsi, nous avons montré qu'à l'état sec (pF 6), les massifs d'agrégats des situations les plus argileuses ont un volume poral plus important que ceux correspondant aux situations sableuses. A l'inverse, aux faibles suctions, les compacités sont maximales avec les premiers matériaux.
- les résultats oedométriques nous conduisent également à discuter de la notion de **sensibilité au compactage**. Nous avons vu en particulier que dans l'hypothèse où ce terme est défini par rapport à l'expression de la compacité, nous devons obligatoirement le relier à la valeur de succion existant

lors du compactage. En effet, comme nous venons de l'exprimer dans le précédent paragraphe, la compacité est liée à la nature du matériau et surtout à la teneur en eau au moment du compactage. En outre, l'expression du degré de compacité prend en compte non seulement les propriétés mécaniques, mais également les caractéristiques géométriques des particules qui constituent le matériau. Nous pouvons donc nous demander s'il est judicieux de prendre la valeur du volume poral final, ou la variation de volume poral entre tel et tel potentiel hydrique, comme définition de la valeur de sensibilité.

- En définitive, l'utilisation du terme de sensibilité impose de le définir au préalable, de manière à ce que l'on sache à quel paramètre la notion fait référence. Ainsi, elle peut être définie de manière stricte, par exemple par rapport à une variable mécanique telle que la résistance à l'écrasement ou traction texturale pour une valeur de potentiel donnée ou, d'une manière plus générale (GUERIF, 1988a), par exemple en termes de conséquences probables du compactage, tels que les transferts hydriques, gazeux et thermiques.

L'analyse qualitative de l'espace poral des échantillons compactés nous a permis de constater les points suivants :

- l'état hydrique du matériau lors du compactage est déterminant sur la morphologie et la taille des pores. Au dessous d'une valeur de succion proche de l'état de saturation, les massifs d'agrégats compactés ont une organisation de leur système poral similaire à celle des pâtes. En revanche, à de faibles teneurs en eau et malgré de fortes contraintes mécaniques, il n'y a qu'une faible modification de l'espace poral lacunaire intra-agrégat, l'essentiel de la réduction du volume poral provenant d'une diminution du volume du compartiment inter-agrégats.
- l'espace poral des matériaux compactés au champ ou en laboratoire peut être comparé. Cette comparaison nous amène à faire des hypothèses sur les conditions de teneur en eau existant lors des compactages par les engins agricoles. L'organisation très hétérogène de la porosité lacunaire des mottes, et la présence de pores structuraux, est à rapprocher de l'organisation des porosités de massifs d'agrégats compactés à pF 2 ou pF 3. Ainsi, pouvons nous faire l'hypothèse que les conditions de compactage sont différentes de l'état saturé ou d'une succion proche de pF 1, qui implique une organisation des systèmes poraux similaires à celles des pâtes, c'est-à-dire la présence d'une porosité lacunaire homogène et l'absence de pores grossiers (supérieurs à 150 μm).

IVème PARTIE
SYNTHESE GENERALE - CONCLUSION

INTRODUCTION

Au stade final de l'étude, il paraît nécessaire de préciser les points importants qui en ressortent, concernant à la fois les aspects méthodologiques et les résultats proprement dits.

En ce qui concerne la méthodologie, nous montrerons l'intérêt que comportent à la fois l'analyse fine des modifications de l'espace poral des sols - liées au compactage par les engins agricoles - et l'étude conjointe du comportement mécanique à l'aide du test de compactage oedométrique qui assure la maîtrise des principaux paramètres.

En ce qui concerne les résultats, il convient non seulement de voir comment les sols étudiés ici se situent au sein du vaste ensemble des sols sableux, mais aussi de souligner ce qui originalise le comportement de cet ensemble par rapport à d'autres ensembles texturaux. Nous pourrons, à cette occasion, discuter d'un certain nombre de concepts parmi lesquels la partition de l'espace poral en deux compartiments : structural et textural, et la notion de sensibilité au compactage.

Enfin, nous serons amenés à débattre des possibilités d'application de ce type d'étude en termes de pratique culturale.

Cette quatrième partie comporte donc trois chapitres :

- le premier concerne les aspects relatifs aux méthodologies utilisées,
- dans un second, nous ferons une synthèse des principaux résultats concernant l'analyse des conséquences du tassement et du comportement au compactage,
- enfin dans un troisième chapitre, nous discuterons des possibilités d'application des résultats à la conduite des travaux culturaux.

I - ASPECTS METHODOLOGIQUES

Ce chapitre fait une analyse critique des méthodologies utilisées. Plus précisément, il souligne les apports et les limites de chacune des méthodes utilisées.

Rappelons que nos travaux se situent à deux niveaux d'investigation :

- 1 - un premier niveau ayant pour objectif de préciser les conséquences du tassement des sols sableux sur leur espace poral ;
- 2 - un second concernant la mise en évidence des caractéristiques mécaniques des matériaux.

1.1 - ANALYSE DES CONSEQUENCES DU TASSEMENT DES SOLS

Vouloir étudier les conséquences du tassement des sols nécessite un diagnostic précis de leurs propriétés physiques, et en particulier une analyse fine de leur espace poral. Quatre méthodes ont été utilisées :

- 1) L'établissement des profils de volumes apparents.
- 2) Une analyse des composantes de la porosité.
- 3) Une analyse des distributions des tailles des pores.
- 4) Une étude des transferts hydriques.

1.11 - *Les profils de volumes apparents*

Les mesures de volumes apparents, à trois dates des itinéraires culturaux et en différentes situations structurales (en entre-roues - sous passages de roues), nous ont permis d'apprécier les variations relatives de porosité dans chacune des situations granulométriques intra-parcellaires. Elles permettent de souligner les effets des travaux culturaux, des pluies naturelles et des passages de tracteur, sur les valeurs de volume apparent, entre 0 et 50 cm de profondeur. Toutefois, ces mesures sont inopérantes pour l'estimation des réductions de volume poral dues aux seuls agents externes, puisqu'elles intègrent à la fois les caractéristiques intrinsèques et extrinsèques des milieux. C'est pourquoi, comme le souligne STENGEL (1979), il est indispensable de distinguer les espaces poraux d'origine structurale et texturale.

1.12 - *Analyse des composantes de la porosité*

La porosité texturale est mesurée sur matériau remanié de la taille d'une motte (10 à 15 cm³), préparé selon un protocole standard. Elle représente, comme le souligne CHRETIEN (1986), une référence constante et reproductible dépendante des assemblages élémentaires et d'une contrainte hydrique préalablement définie, mais elle n'a pas de réalité physique.

La porosité structurale, obtenue par différence entre la porosité totale et texturale, a été subdivisée en deux sous-compartiments :

- un sous-compartiment interpédique : il correspond à la porosité grossière se situant entre l'échelle de la motte et de l'horizon,
- un sous-compartiment intrapédique : il concrétise la porosité intra-mottière, c'est-à-dire la porosité mottière non texturale.

Cette partition, qui fut définie par CHRETIEN (1986), permet de décrire précisément à quel niveau d'organisation du système poral le travail du sol et le compactage ont des effets. A titre d'exemple, l'action d'un outil à dent peut très bien se manifester par une augmentation du volume poral interpédique, sans modification du volume poral intrapédique.

En définitive, l'analyse des composantes de la porosité s'est

révélée très adaptée à l'estimation des effets anthropiques et climatiques sur les volumes poreux structuraux et leur distribution spatiale.

En revanche, cette analyse quantitative ne rend pas compte précisément de la nature des modifications de l'espace poral et en particulier des variations de taille et de forme des pores. Or, c'est précisément cet aspect qui détermine les caractéristiques de transfert des milieux.

1.13 - *Analyse des distributions des tailles des pores*

Deux techniques nous ont permis de décrire les évolutions morphologiques du système poral des sols. Il s'agit de la porosimétrie au mercure et de l'analyse micromorphologique.

La porosimétrie au mercure, qui, rappelons le, caractérise le système poral par les diamètres équivalents (D_{eq}) correspondant en fait aux dimensions de constriction des pores, donne une image largement différente de la répartition des dimensions réelles des pores (RENAULT, 1988). Elle s'est avérée cependant particulièrement adaptée dans la prédiction des caractéristiques de transfert hydrique. Ainsi, une très bonne relation est apparue entre les résultats acquis en porosimétrie et ceux résultant des mesures des propriétés de rétention des mottes à différents états de dessiccation.

En outre, cette technique permet de décrire à la fois les effets de texture (distributions granulométriques) et du tassement sur les distributions des volumes des pores. Enfin, elle souligne les différences d'arrangement qu'un échantillon peut acquérir à volume poral identique.

L'analyse micromorphologique permet au contraire d'accéder à la taille réelle des pores dans un plan. Elle constitue un moyen très efficace de validation et de compréhension des données acquises en porosimétrie au mercure et lors des mesures de volume apparent. Toutefois, il est regrettable que nous ayons dû nous limiter à une approche descriptive, c'est-à-dire sans essai de quantification, de l'espace poral visualisé.

1.14 - *Etude des transferts hydriques*

Les mesures de conductivité hydraulique en régime saturé nous ont apporté un complément de connaissance sur les conséquences du compactage et des modifications associées de l'espace poral, sur les capacités de transfert.

1.2 - ANALYSE DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES MATERIAUX

L'analyse des caractéristiques mécaniques des matériaux sableux a fait l'objet de la mise en oeuvre d'une technique de compactage uniaxial en laboratoire, à savoir : le test oedométrique.

Cette technique permet la maîtrise des pressions appliquées, des conditions initiales, c'est-à-dire des potentiels en eau et de l'état structural des échantillons avant compactage.

Elle permet de mettre en évidence le comportement mécanique intrinsèque des matériaux, c'est-à-dire dépendant des caractéristiques analytiques (teneur en argile, taux en matière organique).

Cette analyse constitue un moyen de compréhension des caractéristiques physiques des sols observées *in situ*, et en particulier de celles concernant le volume poral structural. Ainsi, dans des conditions de teneurs en eau semblables à celles existant au moment des travaux culturaux, le test de compactage nous indique la potentialité des matériaux à se tasser. De même, le suivi continu de la déformation permet d'observer la rapidité d'évolution du volume poral.

1.3 - CONCLUSION

L'analyse des conséquences du compactage doit être considérée comme un diagnostic. Les résultats obtenus intègrent l'hétérogénéité des milieux (variations de constitution granulométrique et du taux de matière organique), leurs discontinuités, et leur anisotropie. Les caractéristiques observées sont donc propres à chaque milieu et ne permettent pas de prédire le comportement dans une autre situation. La limitation au simple constat des propriétés provient également du fait que les caractéristiques mesurées sont liées à des agents externes dont la quantification des effets demeure imprécise (évaluation des contraintes appliquées...).

En revanche, l'étude expérimentale en laboratoire permet la maîtrise de l'ensemble des paramètres déterminant les déformations observées. Elle constitue un moyen d'appréciation des caractéristiques mécaniques intrinsèques. Toutefois, elle ne permet pas, à elle seule, de prédire directement le comportement au compactage des couches de sol en place, puisqu'elle n'intègre pas les facteurs d'hétérogénéité et d'anisotropie existant dans les conditions naturelles.

En définitive, c'est de cette confrontation entre données acquises en laboratoire et *in situ*, que la prédiction des comportements - et plus modestement, le choix des conditions de travail ou des techniques culturales - peuvent être faites.

II - APPORT DES CONNAISSANCES SUR LES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES SOLS SABLEUX

Ce chapitre fait la synthèse des résultats essentiels qui ressortent de cette étude, mais également fait état des connaissances sur les caractéristiques et les comportements des sols sableux. Il nous conduira également à une réflexion sur les possibilités de généralisation de ces résultats à d'autres types de sols sableux.

2.1 - SYNTHÈSE DES RESULTATS

2.11 - Conditions générales lors des travaux cultureux

Le suivi des itinéraires cultureux des deux parcelles expérimentales - Bou et Saint-Benoit - nous montre que les préparations des parcelles au semis ou à la plantation engendrent un taux élevé de recouvrement des surfaces par les roues de tracteur, du fait notamment de la non homogénéité des largeurs d'outils utilisés. Les pressions de gonflage des pneumatiques sont relativement élevées ($\approx 1.8 \text{ kg/cm}^2$) ; et l'on peut supposer, malgré l'absence de donnée concernant le poids des engins utilisés, que les pressions appliquées au sol sont supérieures à cette valeur (COHRON, 1975 ; VITLOX, 1985).

Les succions lors des travaux au printemps sont proches de 10 kPa (pF 2), quelle que soit la situation intra-parcellaire. Il est intéressant de noter ces valeurs et de voir, dans ces conditions, comment évoluent les matériaux lors de l'application d'une charge en condition contrôlée de laboratoire.

2.12 - Analyse des modifications des propriétés physiques des sols dues aux compactage par les engins agricoles

Les méthodes d'analyse utilisées permettent d'observer à la fois les variations en volume et les modifications morphologiques de l'espace poral, provoquées par les passages de roues de tracteur et les travaux du sol.

- L'analyse des profils porosimétriques montre que, quelle que soit la situation intra-parcellaire, il existe un horizon dense sous la couche cultivée où les porosités mesurées sont proches ou équivalentes aux porosités dues à l'assemblage des particules élémentaires. Précisons toutefois que, sur une parcelle (Saint-Benoit), l'analyse des composantes de la porosité révèle l'existence d'une porosité structurale interpédique dans ce même horizon, due à l'action d'un outil de sous-solage.

- Il apparaît également que la restructuration de la couche cultivée, consécutive au travail du sol, peut être très brève si un passage d'engin a lieu en surface. En effet, un seul passage de tracteur dans des conditions de teneur en eau proche de la capacité au champ, suffit à porter les matériaux à leur valeur minimale de volume poral.

- Les valeurs de porosité texturale, déterminées sur matériaux remaniés, sont minimales pour les matériaux à distribution granulométrique étalée, c'est-à-dire dans les situations sablo-argileuses.

- Le tassement mécanique affecte l'organisation de l'espace poral intra-motte. Il conduit à une réduction du volume des pores lacunaires (générés par l'assemblage des grains du squelette) et structuraux existant dans les mottes et, par conséquent, à un réarrangement du compartiment textural. Cette propriété nous amènera à rediscuter du compartimentage structural-textural.

- La composition granulométrique (dimensions du squelette) définit la forme du spectre poral des mottes : les matériaux à granulométrie équilibrée ont un système poral à distribution étalée. Au contraire, les matériaux à classe granulométrique dominante, ont un système poral caractérisé par une famille de pores dominante.

- Les caractéristiques mises en évidence en porosimétrie à mercure convergent totalement avec celles obtenues lors de l'analyse des courbes de dessiccation. Les propriétés de rétention en eau des mottes sont modifiées par le compactage ; les mottes tassées ont des capacités de rétention plus faibles que celles des mottes non tassées. De plus, aux faibles succions (pF 1), les mottes tassées sont saturées en eau à la différence des mottes non tassées où subsiste un volume poral libre à l'air. Ces propriétés sont dues à une réduction du volume des macropores (pores de diamètre $>$ à $30 \mu m$), voire des pores plus fins (compris entre 3 et $30 \mu m$).

- Les déformations de l'espace poral des matériaux tassés conduisent à des modifications des conductivités hydrauliques des milieux. La réduction des capacités de transfert en eau est à corrélérer à la diminution du volume poral, mais aussi, certainement, à une réduction de la continuité des pores. Les matériaux tassés peuvent présenter des conductivités hydrauliques extrêmement faibles, dépendantes de la texture des échantillons : elles sont minimales (inférieures à 1 mm.h^{-1}) pour les échantillons riches en fractions fines ($<$ $50 \mu m$).

2.13 - *Confrontation à des caractérisations de transferts en eau au champ*

a) Suivi tensiométrique

- Présentation

Afin de caractériser le fonctionnement hydrique des parcelles, et de percevoir les conséquences des modifications dues au compactage sur les propriétés de transfert in situ, un suivi tensiométrique fut réalisé, complémentaiement, sur chacune des parcelles.

Ce dernier a permis de valider les mesures faites en laboratoire, de conductivité hydraulique en régime saturé.

- Méthodes

Ces mesures concernent chacune des situations intra-parcellaires de Bou. Les tensiomètres sont regroupés en batterie de 4 et enfoncés respectivement à 10, 15, 30 et 50 cm dans le sol. Le principe et les calculs nécessaires pour déterminer les valeurs de succion (pression négative due aux forces de capillarité et d'adsorption) sont présentés en annexe II.6.

- Résultats

Nous ne présenterons que le comportement observé en phase de

réhumectation après un épisode pluvieux de 70 mm entre le 12 et 17 septembre 1986. cette phase est intéressante à analyser, du fait qu'aucune pluie importante lui succéda, et que l'on peut aisément suivre la propagation des fronts d'humectation.

Les profils de charges hydrauliques (fig. 36a, 36b, 36c), établis pendant l'épisode pluvieux et poursuivis jusqu'au 8 octobre, soulignent ce résultat : en surface, il y a saturation rapide de l'horizon cultivé avec pratiquement de l'eau libre à 15 cm ($H \approx Z$) ; à 50 cm de profondeur, les charges hydrauliques augmentent de façon importante entre le 25 septembre et le 1er octobre en Bou.1 et Bou.2, et entre le 1er octobre et le 6 octobre en Bou.2. Une durée supérieure à 7 jours est donc nécessaire pour voir diminuer les suctions en profondeur.

La forme générale des courbes nous indique également, qu'après saturation de l'horizon cultivé, ce dernier se dessèche par évaporation (circulation vers le haut), tandis qu'un écoulement vers le bas au-dessous de l'horizon tassé assure un régime de percolation.

En définitive, le suivi tensiométrique a permis d'observer un ralentissement sensible de la propagation du front d'humectation au-dessous de l'horizon tassé. Ainsi, l'infiltration de l'eau, rapide dans les 20 premiers centimètres, est ensuite brusquement ralentie au contact de l'horizon tassé et entraîne la formation d'un excès d'eau à l'interface.

Il confirme donc les faibles capacités d'infiltration observées lors des mesures de K_{sat} .

b) Mesures des capacités d'infiltration en simulation de pluie

Une étude antérieure (COULON, 1985 ; RAHELIARIOSOA, 1986) a souligné les faibles capacités de transfert que présentent les sols sableux après compactage.

Ainsi, au niveau des traces de roues, l'intensité d'infiltration minimale (F_m), mesurée en régime permanent, atteint des valeurs inférieures à 6 mm.h^{-1} . La hauteur de pluie d'imbibition n'excédant pas 6 mm, il y a donc un développement rapide des excès d'eau, entraînant la formation de flaques, voire d'un ruissellement sur les terrains en pente.

c) Conclusion

L'ensemble des mesures réalisées au laboratoire et au champ aboutissent aux mêmes constats, à savoir que les matériaux sableux après compactage ont des capacités de transfert fortement réduites.

2.14 - Analyse du comportement au compactage des agrégats terreux

La technique utilisée (test de compactage uniaxial) permet de suivre l'évolution du volume apparent d'un massif d'agrégats, dans des

H en cm

-1000 -900 -800 -700 -600 -500 -400 -300 -200 -100

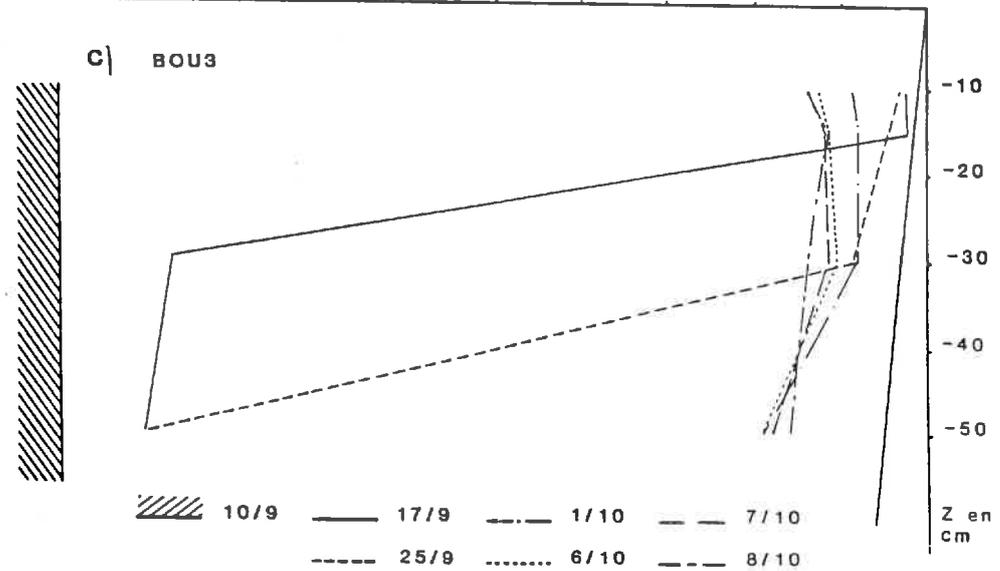
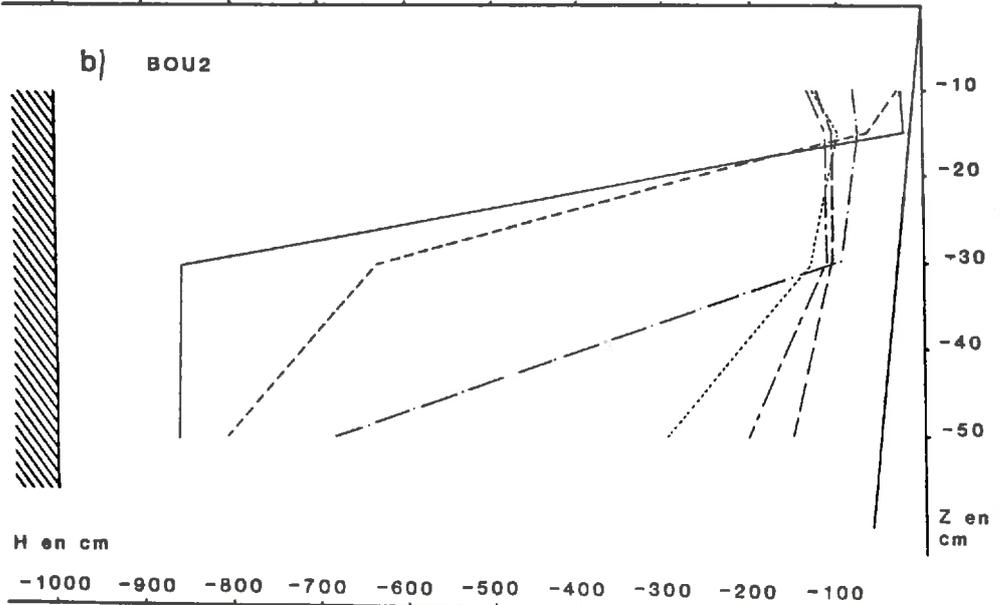
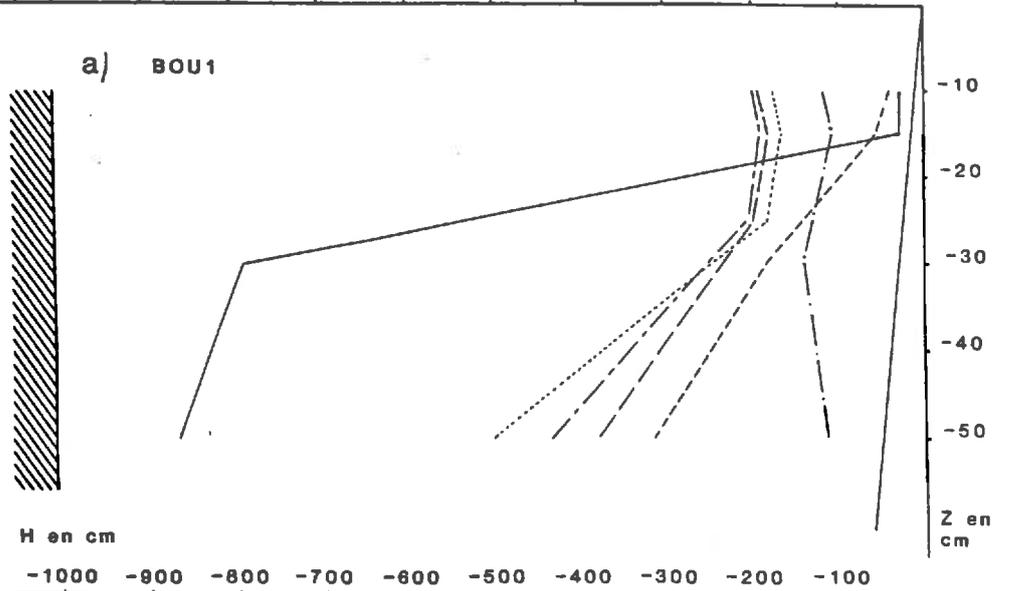


Figure 36 : Evolution des profils de charges hydrauliques à Bou, après une phase pluvieuse : a - Bou.1 ; b - Bou.2 ; b -Bou.3.

conditions maîtrisées de potentiel hydrique et de pression appliquée. En outre, l'analyse qualitative des massifs d'agrégats compactés permet d'observer l'évolution de leur espace poral en fonction des conditions expérimentales.

A l'exception de compactages pratiqués à l'état sec et avec de faibles intensités (pressions inférieures à 1 kg/cm^2), les massifs d'agrégats ont leur porosité réduite de façon importante lors de la mise sous charge. Tous les matériaux présentent un seul domaine de comportement mécanique (dit visqueux), dans les conditions de teneur en eau existant lors des travaux du sol (suction inférieure à $pF 4.2$). Le test oedométrique souligne donc l'extrême fragilité de ces matériaux sous l'action d'une pression mécanique.

Ces caractéristiques mécaniques sont dues aux caractéristiques propres des agrégats et à celles résultant de leur assemblage. Ainsi, le tassement important, mesuré aux faibles pressions et teneurs en eau, est à relier à la faible résistance en traction mesurée sur agrégats pour des matériaux proches (GUERIF, 1988c) et, par conséquent, à une faible cohésion interne des agrégats.

L'expression en termes de potentiel hydrique du contenu en eau, permet de comparer les variations de volume apparent de massifs d'agrégats de différentes constitutions granulométriques. A l'état sec et pour des pressions supérieures ou égales à 1 kg/cm^2 , les volumes poraux mesurés sont plus importants pour les massifs d'agrégats de constitution plus argileuse. A l'inverse, aux faibles succions, les compacités sont plus importantes avec ces mêmes matériaux. L'interprétation donnée est qu'à l'état sec, l'argile, qui a un rôle de ciment, assure des liaisons entre particules du squelette ; elle entraîne une cohésion intra-agrégat d'autant plus importante que son taux est élevé dans le sol. A l'état humide, les fortes compacités sont dues aux caractéristiques mécaniques des massifs et, surtout, aux caractéristiques géométriques des constituants, en particulier lorsque les valeurs de volume apparent sont proches des volumes apparents texturaux. Si l'influence du taux d'argile sur les valeurs de compacité est apparue évidente, nous n'avons néanmoins pas observé d'effet marqué de la matière organique.

La description de l'espace poral des massifs d'agrégats compactés montre qu'aux faibles succions, c'est-à-dire à un état conduisant à une consolidation des milieux, les massifs d'agrégats acquièrent une organisation de leur espace poral identique à celles des pâtes, avec un remaniement total du compartiment lacunaire. En revanche, à des succions plus élevées, la diminution du volume poral n'affecte que le compartiment inter-agrégats, l'espace poral intra-agrégat demeurant très proche de celui des agrégats initiaux.

2.15 - *Confrontation des résultats obtenus par le suivi au champ et l'étude du comportement au compactage*

a) Apports du test de compactage

La réduction importante des volumes poraux des horizons cultivés sous l'effet des passages de roues, est à relier aux faibles résistances au

compactage que présentent intrinsèquement les matériaux sableux des horizons concernés. Dans des conditions de potentiel hydrique identiques à celles existant lors des travaux culturaux ($\approx pF2$), et pour une pression appliquée de 2 kg/cm², nous observons, quelle que soit la nature du massif d'agrégats, un tassement important. Aussi, même si le facteur d'échelle ne permet pas de prédire précisément le comportement in situ, les résultats du test de compactage uniaxial soulignent la faible résistance à l'écrasement de ces matériaux à des teneurs en eau proches de celles existant au moment des travaux. Il y a donc une bonne cohérence entre les résultats obtenus avec le test oedométrique et les observations faites sur les parcelles.

b) Apports des analyses morphologiques des échantillons compactés

L'analyse qualitative des porosités permet de comparer l'espace poral de mottes tassées au champ et de massifs d'agrégats compactés à l'oedomètre. Cette comparaison permet d'établir des hypothèses sur les conditions de teneur en eau existant lors des passages d'engins. Ainsi, les succions lors des compactages sont visiblement supérieures à 1 kPa ($pF 1$), du fait que l'organisation de l'espace poral des mottes compactées au champ est très nettement différente de celle des pâtes ou de massifs d'agrégats compactés à cette même succion.

c) Limites de l'approche expérimentale en laboratoire

L'analyse expérimentale en laboratoire ne nous a pas permis de décrire des différences de comportement au compactage entre des matériaux de granulométrie proche, issus des deux parcelles expérimentales.

En conséquence, les différences de caractéristiques physiques et agronomiques concernant les deux parcelles expérimentales de Bou et Saint-Benoit qui, rappelons le, présentent des horizons travaillés de constitutions minéralogiques et granulométriques semblables, doivent être attribuées à d'autres facteurs que ceux concernant les caractéristiques mécaniques des matériaux.

Ces autres facteurs à considérer sont :

- 1 - les différences de caractéristiques granulométriques au dessous de 35 cm de profondeur entre les deux parcelles ;
- 2 - les différences de topographie ;
- 3 - les différences de techniques culturales et d'antécédents culturaux.

Ainsi, l'observation des profils culturaux et l'établissement des profils porosimétriques à St Benoit, ont mis en évidence l'existence d'une porosité structurale "au travers" de l'horizon 25-35 cm, due à l'action d'une sous-soleuse. Une forte activité biologique fut également observée à l'intérieur des profils sur cette parcelle. Aussi, pouvons nous faire l'hypothèse, malgré l'absence de toute quantification, que ces propriétés, dues à la fois au contexte naturel et à l'action anthropique, confèrent un comportement hydrodynamique différent de celui de Bou. Nous devons noter, à ce propos, que

la plus forte teneur en matière organique à Saint-Benoit assure une meilleure activité biologique dans l'horizon et conduit par conséquent à une amélioration de son état structural. L'absence d'effet de la matière organique sur le comportement mécanique ne signifie pas pour autant qu'elle doit être considérée comme inefficace, et nous devons tenir compte également de ses effets nutritionnels.

Le relief, plus important à Bou, peut conduire à une concentration des eaux superficielles dans les points bas de la parcelle, maintenant les sols de ces zones à des états d'humidité toujours supérieure. Cet aspect peut constituer une des origines des différences de propriétés physiques à Bou et Saint-Benoit.

En définitive, ce travail montre qu'il faut être très prudent lors de l'énoncé des causes des dégradations physiques des parcelles, et qu'en particulier il n'existe pas de relation simple entre la faible résistance au compactage d'un sol et ses potentialités agronomiques. Il souligne, en particulier, la nécessité du diagnostic des caractéristiques physiques in situ, pour une estimation de la potentialité des milieux.

2.2 - REFLEXIONS SUR LE CONCEPT DE COMPARTIMENTAGE STRUCTURAL-TEXTURAL

L'analyse de l'espace poral des mottes a montré que le compactage modifie le comportement lacunaire et donc textural. Ce résultat apparait donc contraire à la définition initiale donnée par STENGEL (1979), FIES et STENGEL (1981), qui considère ce sous espace poral comme étant lié uniquement aux caractéristiques intrinsèques des matériaux.

Toutefois, nous devons rappeler que la référence texturale ne concerne pas le même milieu dans le cas des sables : il s'agit de matériaux remaniés suivant un protocole standard et sur lesquels on applique une énergie donnée, à la différence des matériaux argileux ou limoneux, où la référence texturale correspond à des petits agrégats naturels. En tout état de cause, la définition conceptuelle de l'espace poral textural s'oppose à ces deux méthodes expérimentales (FAURE, 1981) : les porosités déterminées ne correspondent pas nécessairement à l'arrangement le plus serré possible des éléments constitutifs des matériaux et dépendent toujours de "l'histoire" du matériau. Il est très probable, à ce sujet, que les contraintes subies par les matériaux remaniés sont de nature et d'amplitude différentes de celles subies par les échantillons naturels. Cet aspect est d'ailleurs souligné par la différence d'organisation de l'espace poral constatée entre les mottes compactées et les pâtes texturales correspondant au même matériau.

Les deux méthodes expérimentales ne permettent donc pas rigoureusement de déterminer la porosité texturale, mais constituent néanmoins la seule approche possible. A propos des pâtes texturales, leur analyse morphologique a révélé qu'elles possédaient une organisation semblable à celle obtenue avec les massifs d'agrégats compactés jusqu'à la consolidation. Ce résultat constitue un argument pour considérer cet état de référence comme stable et reproductible, et affirmer que le protocole de fabrication conduit à un volume poral proche du volume minimal.

En définitive, la modification de l'espace poral lacunaire intramotte montre, simplement, que le compartiment textural ne peut être défini pour les sables comme indépendant des actions de compactage. Elle ne remet cependant pas en cause l'utilisation de la partition textural-structural pour l'étude des phénomènes de compactage, puisque l'espace poral textural, tel qu'il est défini, peut être considéré comme l'état le plus compact possible. Au demeurant, l'utilisation de la partition structural-textural exige une définition précise de l'état de référence considéré, qui apparaît très différent suivant s'il s'agit de matériaux naturels ou remaniés.

2.3 - GENERALISATION DES RESULTATS AUX AUTRES FORMATIONS SABLEUSES

Toute cette analyse a montré, d'une manière générale, une forte aptitude au tassement dans la gamme de pressions et de teneurs en eau rencontrées lors des travaux culturaux. Malgré des variations de teneurs en argile entre 8 et 14 %, les déformations observées ne sont pas apparues très différentes, les sols acquérant rapidement une porosité équivalente ou proche de la porosité texturale du fait de la fragilité des structures.

En revanche, les caractéristiques physiques des matériaux compactés apparaissent très liées aux textures. Ainsi, des différences significatives de capacités de transferts hydriques sont apparues entre échantillons tassés sablo-argileux.

En conséquence, il paraît probable que les sols sableux développés sur d'autres formations ont des caractéristiques mécaniques semblables, surtout lorsque les formes de particules sont proches de celles concernant les matériaux étudiés. Par contre, ils peuvent présenter, suite au compactage, des caractéristiques physiques très différentes suivant leur nature granulométrique.

Ainsi, parmi les échantillons présentés en première partie (chapitre 2), il est probable que ceux qui présentent une distribution granulométrique étalée (H_q élevé) ou des taux élevés des fractions fines du squelette, ont des volumes texturaux plus réduits que ceux possédant au contraire des fractions très grossières ou des granulométries à fractions dominantes (H_q faible). Ces caractéristiques conduiront, dans les deux cas, à des capacités de transfert hydrique différentes. Rappelons, à ce propos, que ce sont surtout les caractéristiques morphologiques de l'espace poral et en particulier la forme, la taille et le degré de continuité des pores, qui détermineront ces propriétés de transfert. Or, l'étude que nous avons menée montre que ce sont surtout ces aspects qui varient avec la nature des matériaux, plus que les valeurs de volume apparent textural.

En définitive, il ressort une nouvelle fois la nécessité de distinguer l'aptitude au compactage d'un sol et ses potentialités physiques : l'absence de dégradation liée au tassement ne signifie pas pour autant que ce dernier n'existe pas dans le sol concerné.

Finalement, ces observations amènent une nouvelle fois à discuter

de la notion de sensibilité au compactage. Elles montrent que ce terme ne doit pas être défini par rapport à une valeur de volume poral, voire une variation de volume apparent relative à une gamme de teneur en eau, puisque ces dernières peuvent conduire à une mauvaise estimation des comportements. Il paraît donc nécessaire de définir ce terme par rapport aux conséquences du compactage, tels que les transferts hydriques ou gazeux.

III - APPLICATION PRATIQUE DES RESULTATS

Ce chapitre a pour but de présenter les possibilités d'application pratique de nos résultats à la gestion des travaux culturaux.

Toute proposition de technique de travail du sol visant à limiter leur tassement ne peut être disjointe du système de culture pratiqué et du contexte climatique. Aussi ces systèmes ne donnent ils que rarement la possibilité d'envisager de travailler les parcelles dans des conditions de teneur en eau différentes.

Les propositions qui suivent concernent, successivement, les possibilités de limitation des tassements produits par les travaux des sols et les possibilités de régénération ou d'amélioration des structures.

3.1 - POSSIBILITES DE LIMITATION DES TASSEMENTS

Les résultats acquis lors du suivi au champ, ainsi que l'analyse de comportement au compactage, montrent tous la fragilité de ces matériaux dans les conditions de pression et de teneur en eau existant lors des travaux culturaux. Ces caractéristiques diminuent donc le nombre de possibilités permettant de limiter le tassement de ces sols.

Toutefois, nous pouvons préconiser de limiter au maximum les contraintes appliquées au sol et en particulier le nombre d'interventions. Ainsi, RAGHAVAN et KYES (1978) établissent, sur 100 microparcelles expérimentales, une relation directe entre la valeur de compacité et le nombre de passages. ONI et ADEOTI (1986) font le même constat et insistent également sur la nécessité de diminuer l'intensité des pressions de gonflage des pneumatiques. Nous ne pouvons donc que reprendre les mêmes propos, et préconiser une utilisation plus étendue des pneumatiques gonflés à basse pression. COHRON (1979) précise, lors d'une analyse des distributions des pressions dans les pneumatiques, que les pressions réelles peuvent être jusqu'à 4 fois supérieures aux pressions moyennes de gonflage.

Dans le cas de l'horizon tassé sous la couche travaillée, les passages de roues de tracteur en fond de raie provoquent sans aucun doute un risque supplémentaire de compaction. L'outil tracté (charrue) augmente également la pression exercée au sol par les roues arrières des tracteurs (VANDERBERG et al., 1957). Nous pouvons donc nous demander si un simple travail superficiel de la couche travaillée ne limiterait pas le développement des horizons tassés. Toutefois, au regard des travaux de VANDERBERG et al. (1957), il semble que les seules contraintes superficielles peuvent conduire à un

développement de cet horizon sous labour, puisque les auteurs mesurent une pression de 0.7 bar à 30 cm de profondeur lorsque un pneu exerce une pression de 3.7 bar en surface. Considérant que cet horizon est non travaillé, les déformations engendrées peuvent se cumuler et donner naissance à un horizon compacté.

Ajoutons à ce propos qu'une étude menée par STENGEL et al. (1984) a montré, dans le cas de sols sableux, que la pratique d'un semis direct n'induisait pas, de manière marquée, une amélioration des rendements.

Enfin, signalons que du fait de la rapidité de déformation de ces matériaux observée lors du test oedométrique, il est très probable que la vitesse de déplacement des tracteurs n'influence pas ces évolutions.

Dans le cas de cultures très intensives, l'utilisation d'outils de même largeur peut être également un moyen de limiter le tassement des sols. Ainsi, LAMERS et al. (1986) décrivent une augmentation des rendements lorsque le travail du sol est toujours limité aux mêmes zones, c'est-à-dire quand les passages de roues empruntent toujours les mêmes raies. Les mêmes auteurs insistent également sur l'augmentation de la praticabilité qu'apporte cette technique.

Enfin en ce qui concerne le relief, il est probable que tout travail du sol qui conduit à une réduction des concentrations en eau superficielles, peut constituer une possibilité de limitation des effets du tassement.

3.2 - POSSIBILITES D'AMELIORATION DES STRUCTURES

Afin d'améliorer la structure des sols, l'utilisation d'outils à dents profondes pour rompre l'horizon dense sous la couche cultivée peut être envisagée. Nous avons vu, à ce sujet, que les sous-solages sur la parcelle expérimentale de Saint-Benoit ont permis d'assurer le maintien d'une porosité structurale et, en définitive, d'une bonne capacité de transfert. Toutefois, il convient de rappeler que l'horizon tassé sous labour est de texture sablo-argileuse et que, par conséquent, l'efficacité du sous-solage peut être plus importante qu'en milieu très sableux.

Ainsi, KOOISTRA (1987) montre que les effets d'un décompactage sur la structure de sols sableux sont provisoires et parfois même néfastes vis à vis des capacités de transfert hydrique des milieux. De même, SOANE (1986) décrit des effets défavorables d'un sous-solage suivi d'un labour. Tous ces résultats montrent donc l'extrême difficulté pour restructurer des sols de cette nature. Ils soulignent également la nécessité de faire ces travaux dans d'excellentes conditions de teneur en eau.

Ajoutons enfin, que POLLARD et WEBSTER (1978) ont montré, dans le cas d'un sol sablo-argileux, que plus de 6 années de culture améliorante étaient nécessaires pour que disparaisse un horizon compacté.

Enfin, il est probable que l'apport d'amendement organique peut constituer une source d'amélioration des structures. Ainsi, nous avons eu

l'occasion sur une des parcelles expérimentales d'observer une meilleure activité biologique liée à ces apports organiques. Cette activité peut participer au maintien d'une porosité structurale. Ainsi, même si la matière organique n'a pas d'effet marqué sur le comportement mécanique, elle peut indirectement constituer une source d'amélioration de la structure des sols cultivés, grâce à l'activité biologique qu'elle implique.

IV - PERSPECTIVES

Les résultats obtenus répondent aux objectifs que nous nous étions fixé à l'origine de ce travail. Ils mettent en évidence les conditions de travail du sol et les répercussions du compactage sur leur espace poral, à la fois d'un point de vue quantitatif et morphologique. Ils soulignent également les conséquences du tassement sur les propriétés de rétention en eau et les capacités de transfert hydrique. Enfin, les tests de compactage en conditions contrôlées de laboratoire ont permis de rendre compte des caractéristiques mécaniques spécifiques des matériaux sableux.

Cette étude est cependant limitée à des matériaux de constitution relativement proche et de mode de mise en place (fluviale) identique. La même analyse pourrait être étendue à des matériaux situés dans d'autres contextes géographiques, d'histoires pédologiques et géologiques différentes.

Des réponses aux questions suivantes pourraient, par exemple, être envisagées :

- Quel est le comportement physique de matériaux sableux présentant des distributions granulométriques de leur squelette différentes de celles du Val ?
- Comment se comportent des matériaux sableux sensiblement plus riches en argile ?

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AUDIGUIER-MARCEL M., DELAGE P. (1987) - Etude microscopique et porosimétrique de sols fins naturels dans une perspective géotechnique. Micromorphologie des sols. p 493-500
- AZZAOUI M. (1988) - Comportement et organisation des matériaux argileux soumis à des contraintes hydriques et mécaniques. Rôle des différents types de forces d'hydratation. Thèse Université Paris VI. 240 p
- BAKKEN L.R., BORRESEN T., NJOS A. (1987) - Effect of soil compaction by tractor traffic on soil structure, denitrification and yield of wheat. Journal of Soil Science, 38, p. 541-552.
- BEGON J.C., BERLAND M., HOREMANS P., ROUX M. (1982) - Carte départementale des terres agricoles : La Ferté St Aubin 1/50.000 Loiret.
- BETREMIEUX R. (1975) - Réflexions à propos de la capacité au champ et de sa mesure. Actualisation et réhabilitation de cette notion. GEPPA 22ème réunion.
- BETREMIEUX R., DARTHOUT R., GOBILLOT T. (1962) - Etude pédologique préalable à l'irrigation en Val de Loire (Commune de Jargeau, Darvoy, Férolles et Sandillon). Rapport DDA.
- BLACKWELL P.S. et SOANE B.D. (1981) - A method of predicting bulk density changes in field soils resulting from compaction by agricultural traffic. Journal of Soil Science, 32, p. 51-65.
- BODDAERT D. (1976) - Etude du comportement mécanique d'un sol travaillé soumis au roulage des engins agricoles. Mémoire fin d'étude. Dijon-Quetigny. 25 p.
- BONNET M. (1984) - Mémento d'hydraulique souterraine. Présentation des principales équations de transfert de milieu poreux. BRGM. 70 p.
- BOUCAULT S. (1985) - Application agronomique de l'essai au Bleu de Méthylène. Rapport Chambre d'Agriculture du Loiret, 25 p.
- BOUMA J. et KOOISTRA M. J. (1987) - Soil morphology and soil water movement. Soil micromorphology. p 507-511
- BRAUNACK M.V. et DEXTER A.R. (1978) - Compaction aggregate beds, p. 119-126, in Emerson Bond. Dexter (Editors). Modification of soil structure, J. Wiley, Chichester. 438 p.
- BRUAND A., PROST A. (1987) - Effect of water content on the fabric of a soil material. An experimental approach. J. Soil Sci., 38, 461-472.

- BRUAND A., PROST A. (1988) - Analyse minéralogique quantitative d'un échantillon de sol : utilisation des données concernant la composition chimique de l'échantillon. *Agronomie*, 8(1), p. 15-22.
- BULLOCK P., NEWMAN A.C.D., THOMASSON A.J. (1985) - Porosity aspects of the regeneration of soil structure after compaction. *Soil and Tillage Research*, 5, p. 325-341.
- BULLOCK P. et THOMASSON A.J. (1979) - Rothamsted studies of soil structure II. Measurement and characterization of macroporosity by image analysis and comparison with data from water retention measurements. *Journal of Soil Science*, 30, p. 391-413.
- BURKE W., GABRIELS D., BOUMA J. (1986) - Soil structure Assessment. Balkema Netherlands, 92 p.
- CAILLERE S., HENIN S., RAUTUREAU M (1982) - Minéralogie des argiles. I Structure et propriétés physico-chimiques. MASSON, Paris, 184 p.
- CAILLEUX A. et TRICART J. (1963) - Initiation à l'étude des sables et des galets. Centre de Documentation Universitaire 5, place de la Sorbonne Paris. 365 p.
- CAMPBELL D.J., DICKSON J.W., BALL B.C., HUNTER R. (1986) - Controlled seedbed traffic after ploughing or direct drilling under winter barley in Scotland. *Soil and Tillage Research*, 8, p. 3-28.
- CHERIERE D. (1983) - La culture du pois précoce en Val de Loire. Mémoire de fin d'étude E.N.S.H., 125 p.
- CHERIERE D., LEMAIRE J., FOURY C (1984) - Climats, rendements et qualité du petit pois de conserve précoce en Val de Loire. *Bull. Agrométéorologie et productions légumières. Séminaire Avignon 20 février-1er mars*, p.91-108.
- CHRETIEN J. (1971) - Essai de caractérisation des sables en tant que squelette minéral du sol. *Ann. Agron.* 22(6).p. 615-654.
- CHRETIEN J. (1982) - L'espace poral du sol : ses composantes, exemple d'une méthode d'étude. In "Comportement physique et mécanique des sols". Séminaire du Département Science du Sol. INRA. p. 9-24.
- CHRETIEN J. (1986) - Rôle du squelette dans l'organisation des sols. Thèse Université de Dijon, 367 p.
- CHRETIEN J. (1987) - Analyse et quantification de l'espace poral de trois sols sur granite et micashistes. Comparaisons méthodologiques. *Soil micromorphology*. p. 529-535.

- CHRETIEN J. et PEDRO G. (1987) - Granulométrie, porosité et spectre poral de sols développés sur formations détritiques. Cas des terrasses alluviales de la Saône. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., Vol XXIII, n° 1, p. 43-54.
- CHRETIEN J. et TESSIER D. (1988) - Comportement physique des sols en relation avec leur granulométrie. Sciences du Sol. A paraître.
- COHRON G.T. (1979) - Forces causing soil compaction. Compaction of Agricultural Soils ASAE monograph. 1., p. 107-122.
- COOPER A.W. et NICHOLS M.L. (1959) - Same observations on Soil compaction tests. Agricultural Engineering, may. p. 264-267.
- CORDIER Y. (1983) - Etude de l'influence des travaux culturaux sur les propriétés mécaniques et physiques d'un sol limoneux. Dissertation originale présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en Sciences Agronomique. Université de Gembloux, Belgique, 249 p.
- COULON E. (1985) - Contribution à l'étude de l'état structural et du comportement hydrique de sols sableux en contexte légumier du Val de Loire. D.E.A. Matières premières minérales et énergétiques. Université Orléans, 77 p.
- COULON E. et BRUAND A. (1989) - Effects of compaction on pore space geometry in sandy soil materials. Soil and Tillage Research, à paraître.
- CURMI P. (1987) - Comportement physique intrinsèque de mottes à macroporosité différente. In soil compaction and regeneration, A.A. Balkema, Rotterdam, Boston 1987, p. 53-58.
- DESTAIN M.F. et LEJEUNE J.L. (1985) - Présentation d'une méthode permettant d'analyser l'action des machines de travail du sol. Colloque international sur le travail du sol. GEMBLOUX - 29 novembre 1985. 6 p.
- FAURE A. (1971) - Contribution à l'étude du mécanisme du compactage des sols. Notion de potentiel de lubrification. Ann. Agron., 22(5), p. 487-513.
- FAURE A. (1974) - Des caractéristiques mécaniques de la fraction argileuse dans le mécanisme de tassement des sols. CR. Acad. Sc. Paris, t. 278, 25 février 1974, p. 1175-1178.
- FAURE A. (1978) - Comportement des sols au compactage : rôle de l'argile et conséquences sur l'arrangement des grains. Thèse Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 137 p.
- FAURE A. (1981) - Réflexions sur le concept d'espace poral. Sciences du Sol, 2, p 161-167.
- FAURE A. et FIES J.C. (1972) - Etude expérimentale de la sensibilité au compactage des matériaux meubles en fonction de leur composition granulométrique. Ann. Agron., 23(3), p. 317-322.
- FELT E.J. (1965) - Compactibility in Methods of Soil Analysis, p. 400-412. American Society of Agronomy.

- FIES J.C. (1978) - Porosité du sol : étude de son origine texturale. Thèse Université Louis Pasteur. Strasbourg. 138 p.
- FIES J.C. (1982) - Etude des écoulements en milieux saturés en relation avec l'espace poral du sol. Note interne, INRA Sol, Avignon.
- FIES J.C. (1984) - Analyse de la répartition du volume des pores dans les assemblages argile-squelettes : comparaison entre un modèle d'espace poral textural et les données fournies par la porosimétrie au mercure. Agronomie. 4(9), 891-899.
- FIES J.C. (1987) - Communication personnelle.
- FIES J.C., HENIN S., MONNIER G. (1972) - Etude de quelques lois régissant la porosité des matériaux meubles. Ann. Agro., 23(6), p. 621-653.
- FIES J.C., STENGEL P. (1981) - Densité texturale de sols naturels. I Méthode de mesure. II Eléments d'interprétation. Agronomie 1(8), p. 651-666.
- FIES J.C., STENGEL P. (1984) - Relations entre la constitution granulométrique et minéralogique et les caractéristiques de l'espace poral des sols. Livre jubilaire du cinquantenaire AFES. p. 235-249.
- FIES J.C. et ZIMMER D. (1982) - Etude expérimentale de modifications de l'assemblage textural d'un matériau sablo-argileux sous l'effet des pressions. Bull. GFHN (12), p. 39-54.
- FIZPATRICK E.A. (1970) - A technique for the preparation of large thin sections of soils and unconsolidated materials, in = Micromorphological technics and applications. Soils Survey Techn. Monograph n° 2, Harpenden : 3-14.
- GIGOUT M. (1969) - Notices des cartes géologiques à 1/50 000 de la Ferté Saint-Aubin et Chateauneuf-sur-Loire.
- GRABA L. (1986) - Sensibilité au tassement de sols sableux du Val de Loire. Etude au laboratoire (Test Proctor) et en plein champ. 71 p.
- GRAS R. (1969) - Considérations sur la porosité et l'étude des milieux poreux. Science du Sol, 2, p. 79-91
- GRIMALDI M. (1981) - Contribution à l'étude du tassement des sols : Evolution de la structure d'un matériau limoneux soumis à des contraintes mécaniques et hydriques. Thèse ENSA Rennes, 220 p.
- GRIMALDI M. (1986) - Modifications structurales d'un matériau limoneux soumis à un compactage dynamique. Science du Sol, vol 24, p. 269-284.
- GUERIF J. (1979) - Rôle de la matière organique sur le comportement d'un sol au compactage. II Matières organiques libres et liées. Ann. Agron., 30(6), p469-480
- GUERIF J. (1982) - Compactage d'un massif d'agrégats : effet de la teneur en eau et de la pression appliquée. Agronomie, 2(3), p. 287-294.

- GUERIF J. (1987) - Proceedings workshop soil compaction (CCE) Avignon, 17-18 septembre 1985, MONNIER, GOSS, éditeurs, A.A. Balkema, Rotterdam. p. 1-13.
- GUERIF J. (1988a) - Mécanismes du compactage. C.R. Acad. Agric. France. 74, n° 1, p. 9-28.
- GUERIF J. (1988b) - Détermination de la résistance en traction des agrégats terreux : revue bibliographique et mise au point technique. Agronomie, 8(4), p.281-288.
- GUERIF J. (1988c) - Résistance en traction des agrégats terreux : influence de la texture, de la matière organique et de la teneur en eau. Agronomie, 8(5), 379-386.
- GUERIF J. et FAURE A. (1979) - Rôle de la matière organique sur le comportement des sols au compactage. Etude statistique. Ann. Agron., 30(5), p.387-399.
- GUILLORE P. (1980) - Méthode de fabrication mécanique et en série des lames minces. Document, INA-PG. 22 p.
- HADAS A. (1987) - Soil compaction under quasi-static and impact stress loading. Soil Tillage Res., 9, p. 181-186.
- HARRIS W.L. (1971) - The soil compaction process. Chapter 2 in compaction of agricultural soils. ASAE Monograph 1, p. 9-44.
- HILLEL D. (1974) - L'eau et le sol. Principes et processus physiques. Version traduite de l'Anglais par DE BACKER. Edition Vauder. 288 p.
- HILLEL D. (1982) - Introduction to soils physics. Academic Press. 364 p
- HOREMANS P. (1961) - Contribution à l'étude pédologique des terrasses alluviales de la Loire moyenne. Thèse Université Paris, 164 p.
- HUBERT J (1983) - Climatologie du Loiret. Station Météorologique d'Orléans-Bricy, 59 p.
- KHEYRABI D., MONNIER G. (1968) - Etude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité texturale. Ann. Agron. 19(2), 129-152.
- KOOISTRA M.J. (1987) - The effects of compaction and deep tillage on soil structure in a dutch sandy loam soil. Soil Micromorphology, p. 445-450.
- KOOISTRA M.J., BOUMA J., BOERSMA O.H., JAGER A. (1984) - Physical and morphological characterization of undisturbed and disturbed ploughpan in a sandy loam soil. Soil Tillage Res., 4,p. 405-417.
- LALUQUE G. (1978) - Exploitation agrométéorologique des données climatiques de la station de Bricy-Orléans. Mémoire fin d'étude de l'Ecole Supérieure d'Agriculture d'Angers, 95 p.

- LAMERS J.G., PERDOCK U.D., LUMKES L.M., KLOOSTER J.J. (1986) - Controlled traffic farming systems in the Netherlands. Soil and Tillage Research, 8, p. 65-76.
- LARNEY F.J. et FORTUNE M.A. (1986) - Recompaction effects of mouldboard ploughing and seedbed cultivations on four deep loosened soils. Soil and Tillage Research, 8, p. 77-87.
- LARRAY J. (1981) - Recherche d'une méthode de dosage quantitatif des kaolinites et des illites par diffraction X. Thèse Université Paris VI, 111 p.
- LAUTRIN D. (1987) - Une procédure rapide d'identification des argiles. Bull. liaison labo. P. et Ch., 152, nov-déc, p. 75-84.
- LAWRENCE G.P. (1977) - Measurement of pore sizes in fine-textured soils : A review of existing techniques. J. Soil Sci., 28, 527-540.
- LAWRENCE G.P. (1978) - Stability of soil pores during mercury intrusion porosimetry. Journal of Soil Science, 29, p. 299-304.
- LESSARD L. (1981) - Caractérisation hydrodynamique in situ d'un sol non saturé et évolution structurale. Science du sol, n° 1, p. 55-72.
- MAERTENS C. (1965) - Deux méthodes de détermination de la densité du sol en place. Leur possibilité d'utilisation. Bull. AFES, 8, p. 283-293.
- MANICHON H. (1988) - Compactage, décompactage du sol et systèmes de cultures. C. R. Acad. Agric. Fr. , 1988, 74, n°1, p43-54.
- MIEUSSENS C., MAGNAN J.P., SOYEZ B. (1985) - Essais de compressibilité à l'oedomètre - Procédures recommandées par les laboratoires des Ponts et Chaussées. Bull. liaison labo. P. et Ch., 139, p. 5-18.
- MONNIER G. et GUERIF J. (1988) - Conséquences physiques et agronomiques du tassement des sols. CR. Acad. Agric. Fr. 74, n° 1, p. 29-42.
- MONNIER G., STENGEL P., FIES J.C. (1973) - Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. Ann. agron. 24(5), p. 533- 545.
- MURRAY R.S., COUGHLAN K.J., QUIRK J.P. (1985) - Nitrogen Sorption Isotherms and the Microstructure of Vertisols. Aust. J. Soil Res., 23, 137-149.
- NICHOLS M.L. et REAVES C.A. (1955) - Soil structure and consistency in tillage implement design. Agricultural Engineering, 36(8), p. 517-520.
- ONI K.C. et ADEOTI J.S. (1986) - Tillage effects on differently compacted soil and cotton yield in Nigeria. Soil and Tillage Research, 8, p. 89-100.

- PELLERIN F.M. (1980) - La porosimétrie au mercure appliquée à l'étude géotechnique des sols et des roches. Bull. Liais. Lab. des Ponts et Chaussées, 106, p. 105-116.
- PELTIER R. (1959) - Manuel du laboratoire routier Dunod, Paris.
- POLLARD F., WEBSTER R. (1978) - The persistence of the effects of simulated tractor wheeling on Sandy loam subsoil. J. Agric. Engng. Res, 23, p. 217-220.
- RAGHAVAN G.S., KYES E.Mc. (1978) - Effect of vehicular traffic on soil moisture content in corn (maize) plots. J. Agric. Engng. Res., 23, p. 429-439.
- RAHELIARISOA M.A. (1986) - Influence des techniques culturales sur le comportement hydrodynamique et sur la susceptibilité à l'érosion de sols limoneux et sableux. Thèse 3ème cycle. Université Orléans, 197 p.
- RENAULT P. (1988) - Theoretical studies of mercury intrusion in some networks : testing the applicability of mercury intrusion in the size characterization of the lacunar pore space of samples. Transport in Porous Media (NLD).
- RICHARDS L. A. (1941) - A pressure membrane extraction apparatus for soil solution. Soil Sci., 51,377-386.
- RICHARDS L.A. (1947) - Pressure membrane apparatus. Construction and use. Agric.Eng., 28, p. 451-454.
- RIVIERE A. (1977) - Méthodes granulométriques - Techniques et interprétations. MASSON, Paris, 170 p.
- SATTLER P. (1984) - Carte départementale des terres agricoles. Coupe de Chateaufort-sur-Loire 1/50.000. Organisation et environnement.
- SELVANATHAN G. (1976) - Contribution à l'étude expérimentale des relations entre les caractéristiques hydriques et la porosimétrie du sol. Thèse docteur ingénieur. Université d'Orsay. 156 p.
- SMITH D.L.O. (1985) - Compaction by wheels : a numerical model for agricultural soils. Journal of Soil Science, 36, p. 621-632.
- SOANE G.C., GODWIN M.J., SPOOR G. (1986) - Influence of deep loosening techniques and subsequent wheel traffic on soil structure. Soil Tillage Research, 8, p. 231-237.
- SOEHNE W. (1958) - Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. Agricultural engineering. May, p. 276-290.
- SOLAU J.L. (1980) - Etude sédimentologique et pédologique des sables de Sissonne (Aisne). Mémoire C.N.A.M. Paris, 238 p.

- STENGEL P. (1979) - Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état du sol in situ. Ann. Agron. 30(1). p. 27- 51.
- STENGEL P., GABILLY Y., BETUZZI P., GAUDU J.C., BRIFAUT A. (1986) - La double sonde gamma LPC-INRA. Définition, expérimentation et utilisation en agronomie. Bull. liaison Labo. P. et Ch. -141-janv. févr. Réf. 3045, p.109-119.
- STENGEL P., DOUGLAS J.T., GUERIF J., GOSS M.J., MONNIER G. CANNEL R.Q. (1984) - Factors influencing the variation of some properties of soils to their suitability for direct drilling. Soil and Tillage Research, 4, p 35-53.
- TERZAGHI et PECK (1961) - Mécanique des sols appliquée aux travaux publics et aux bâtiments. Dunod, Paris.
- TESSIER D. (1984) - Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Thèse Université Paris VII. 360 p.
- TOURET A. (1983) - Tassement textural. Etude expérimentale sur un matériau limoneux des modifications de l'espace poral consécutives à l'application d'une pression et à la réalisation de cycles d'humectation-dessiccation. Ecole Agronomique de Rennes. Oct. 83. 40 p.
- VACHIER P., CAMBIER P., PROST R. (1979) - Structure d'un milieu poreux : la craie. Ann. Agron. 30(3) : 247- 263.
- VANDERBERG G.E., COOPER A.W., ERICKSON A.E., CARLETON W.M. (1957) - Soil pressure distribution under tractor and implement traffic. Agricultural Engineering 38, p. 854-855, 859.
- VAN OORT F. (1984) - Géométrie de l'espace poral, comportement hydrique et pédogénèse. Application à des sols sous prairie des Alpes du Nord (BEAUFORTAIN). Thèse Doct. Ing. Géologie appliquée. INA PARIS-GRIGNON. 275 p.
- VAN VLIET-LANOE B. (1985) - Apport de la microscopie en épifluorescence à l'étude de la porosité et la fissuration des roches. Bulletin du Centre de Géomorphologie du CNRS, Caen, 30, 67-75.
- VERBEQUE B. (1986) - Recherche des facteurs de dégradations physiques du sol dans les différents types d'exploitations légumières du Val de Loire. Rapport Chambre Départementale d'Agriculture du Loiret, 38 p.
- VITLOX O. (1985) - Compaction des sols. Colloque international sur le travail du sol, 29 nov. Université Gembloux, Belgique, 8 p.

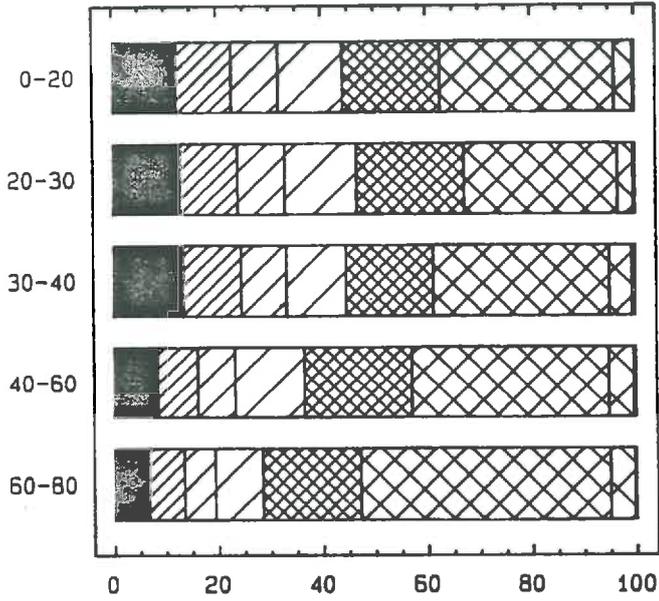
VOORHES W.B., LINDSTROM M.J. (1984) - Long term effects of tillage method on soil tilth independent of wheel traffic compaction. Soil Sci. Soc. Am. J., 48,p. 152-156.

ZIMMER D. (1981) - Etude expérimentale des modifications de certaines caractéristiques de l'espace poral d'un matériau sablo-argileux sous l'effet de contraintes. DEA de Pédologie. Université Paris VII. 43 p.

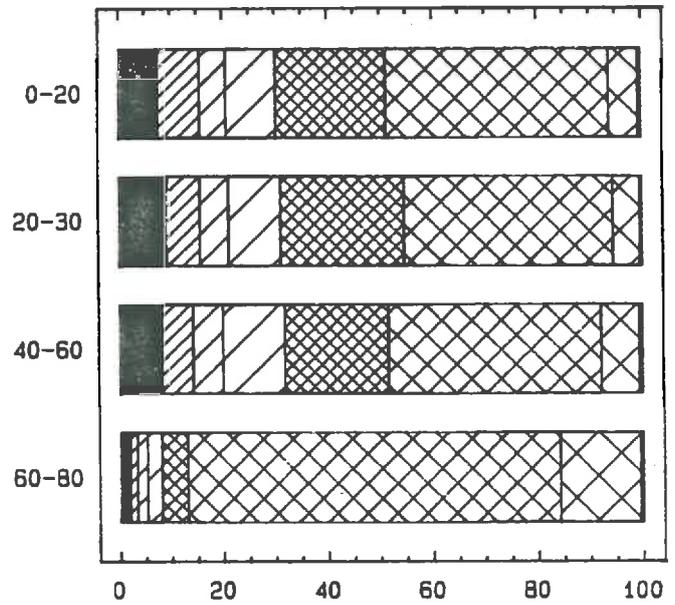
ANNEXES

ANNEXE I

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET DESCRIPTIONS DES METHODES ANALYTIQUES



Bou 2



Bou 3

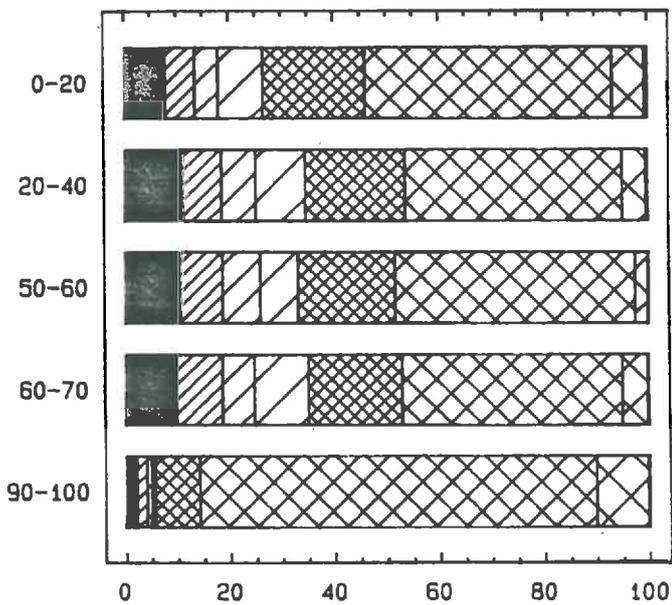
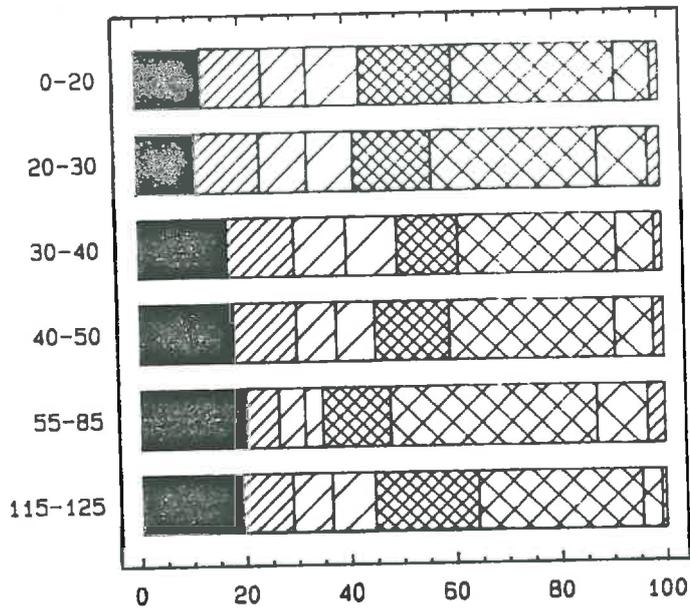
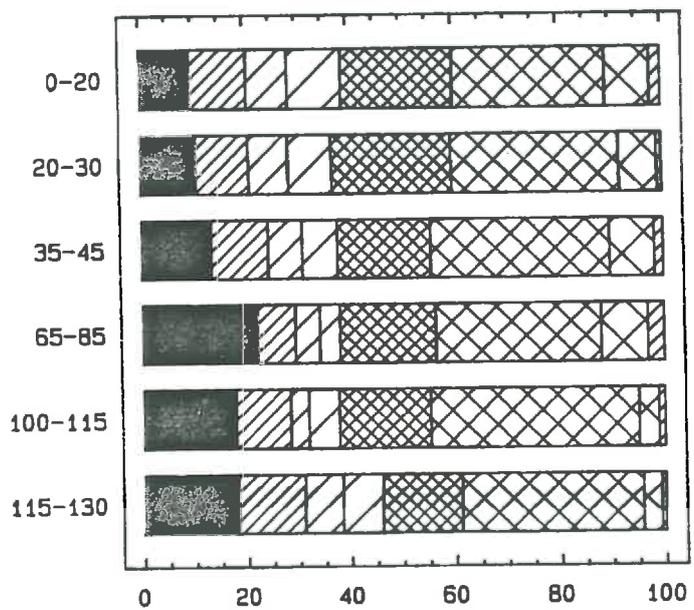


Figure I.1 : Granulométries en fonction des profondeurs à Bou.



St benoit 2



St benoit 3

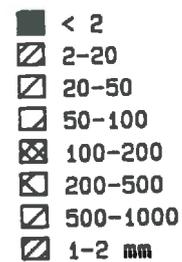
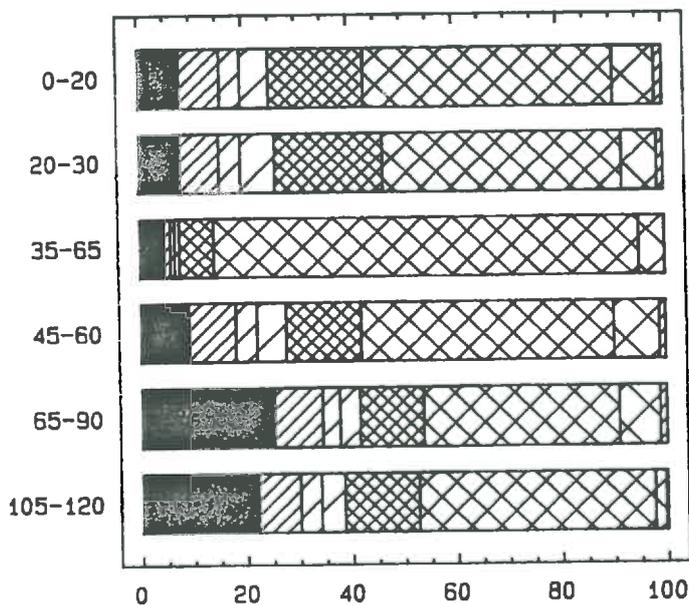


Figure I.2 : Granulométries en fonction des profondeurs à Saint-Benoit.

I.2 - DEFINITION DE L'INDICE D'HETEROMETRIE

L'indice d'hétérométrie, utilisé par SOLAU (1980), exprime le degré de classement d'un matériau. Il est égal à la moitié de la différence des diamètres de particules - exprimés en logarithme décimal - correspondant aux 1^{er} et 3^{ème} quartiles. Il se différencie de l'indice de Krumbein (RIVIERE, 1977) par l'expression des diamètres en unité logarithmique décimale et non de base e.

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

Q_1 = 1er quartile (abscisse correspondant à $y = 25 \%$)

Q_3 = 3ème quartile (abscisse correspondant à $y = 75 \%$).

Un indice d'hétérométrie faible correspond à un matériau bien classé ($Hq = 0.1$).

I.3 - ANALYSES MINERALOGIQUES

1.31 - DOSAGE DU QUARTZ :

La méthode d'étalon interne en diffractométrie X (LARRAY, 1981) est utilisée pour le dosage du quartz. La mesure, du rapport entre la hauteur de pic à 1.82 Å du quartz et la hauteur de pic à 1.91 Å de l'oxyde de Zn (étalon interne) d'un mélange (80 % matériau - 20 % ZnO), permet de connaître la proportion de quartz, après report de la mesure sur une droite d'étalonnage exprimant la relation entre les rapports des hauteurs de pics et les rapports des masses respectives.

1.32 - ANALYSE THERMOPONDERALE :

Elle permet de quantifier les minéraux phylliteux (CAILLERE et al., 1982 ; BRUAND et PROST, 1988). On considère la perte de masse entre 400 et 1000°C, due au départ des hydroxydes de constitution des minéraux 2/1 et de la kaolinite.

Cette perte de masse est rapportée aux masses initiales de matériau déshydraté. En prenant des valeurs standard de perte de masse - 4.5 % pour les minéraux 2/1 et 14 % pour la kaolinite - et en considérant que ces deux phases constituent 96 % de la fraction < 2 µm, on déduit les taux en kaolinite et minéraux 2/1 (fig. I.3).

Les calculs sont les suivants :

M = masse du matériau initial.

P₁ = masse perdue entre 400 et 1000°C.

P₂ = masse perdue à la déshydratation.

T₁ = rapport, masse P₁ sur la masse de l'échantillon déshydraté.

$$T_1 = \frac{P_1}{M - P_2}$$

Q₁ = % de minéraux 2/1.

Q₂ = % de kaolinite.

$$T_1 = 0.045 Q_1 + 0.14 Q_2$$

$$1 = Q_1 + Q_2$$

$$\text{d'où } T_1 = 0.045 Q_1 + 0.14 - 0.14 Q_1$$

$$Q_1 = \frac{T_1 - 0.14}{-0.095}$$

$$Q_2 = 1 - Q_1$$

1.33 - TEST AU BLEU DE METHYLENE

Ce test au bleu de méthylène en milieu dispersé (BOUCAULT, 1985 ; LAUTRIN, 1987) permet de déterminer la surface spécifique d'un échantillon. Considérant une surface spécifique standard de 300 m²/g pour les minéraux gonflants (surface d'une montmorillonite saturée en sodium), on peut en déduire une valeur approchée du taux en argile 2/1 gonflante, les autres argiles ayant des surfaces spécifiques beaucoup plus réduites.

Surface spécifique des argiles : S

$$S = \frac{\begin{array}{l} \text{quantité de bleu nécessaire} \\ \text{pour recouvrir 1 g de sol (en ml)} \end{array} \times \begin{array}{l} \text{surface de 1 g de bleu} \\ = 19.85 \end{array}}{\begin{array}{l} \text{quantité d'argile dans 1 g de sol} \\ = 1 \text{ g (mesure sur fraction } < 2 \mu\text{m)} \end{array}}$$

S

taux en argile gonflante = $\frac{S}{800}$

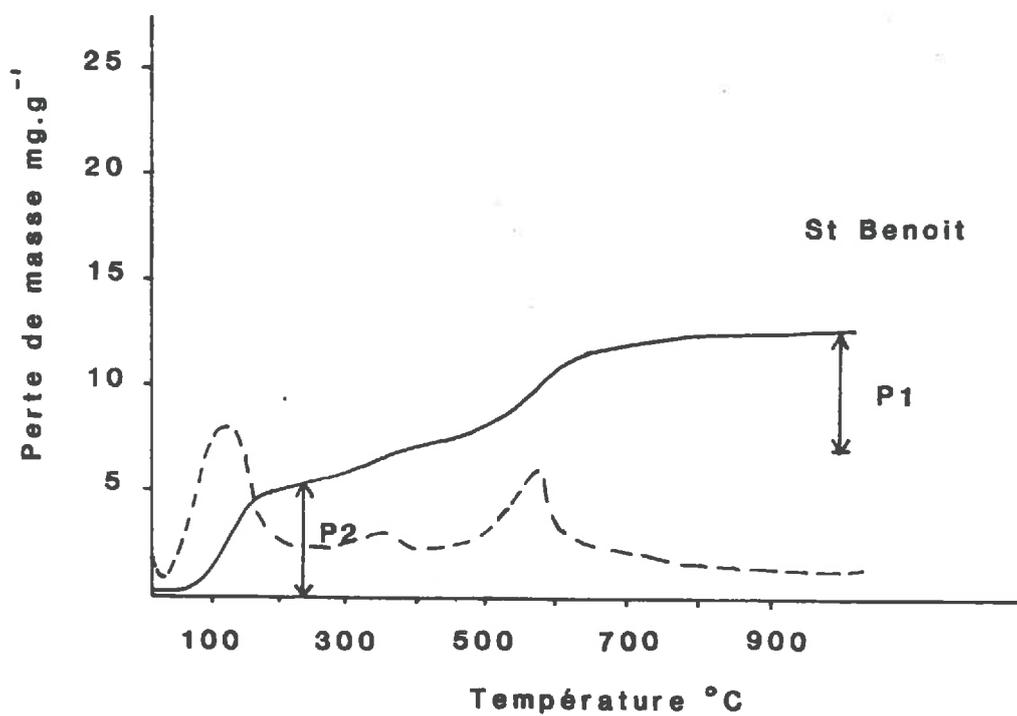
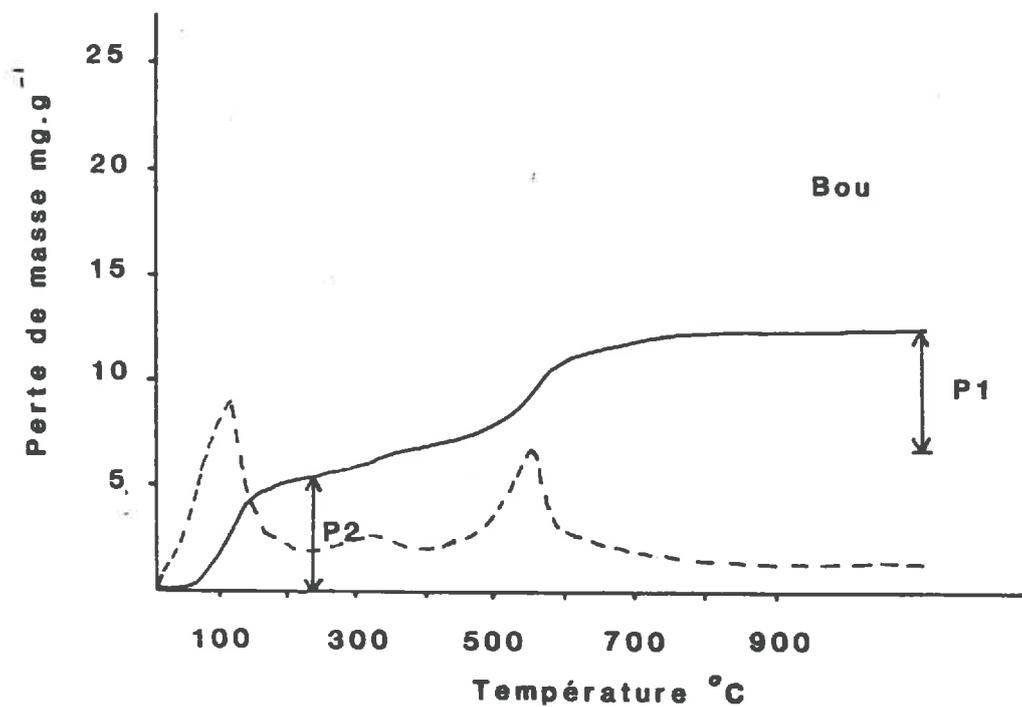


Figure I.3 : Courbes de la perte de masse de la fraction inférieure à 2 μm en fonction de la température. (— Courbes cumulées ; ---- courbes dérivées)

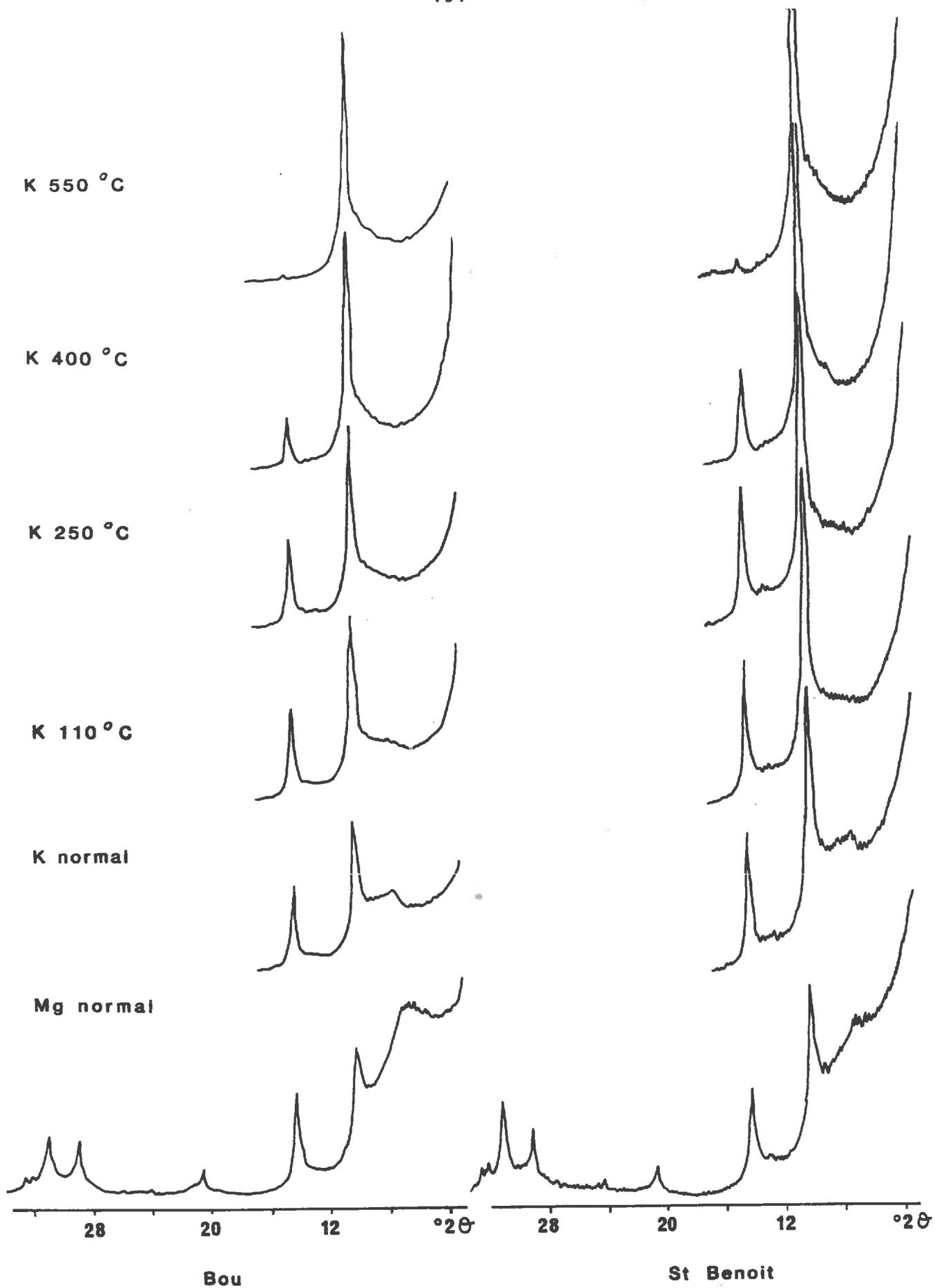


Figure I.4 : Diffractogrammes RX obtenus avec la fraction inférieure à 2 μm sous forme de dépôts orientés, en fonction des différents traitements.

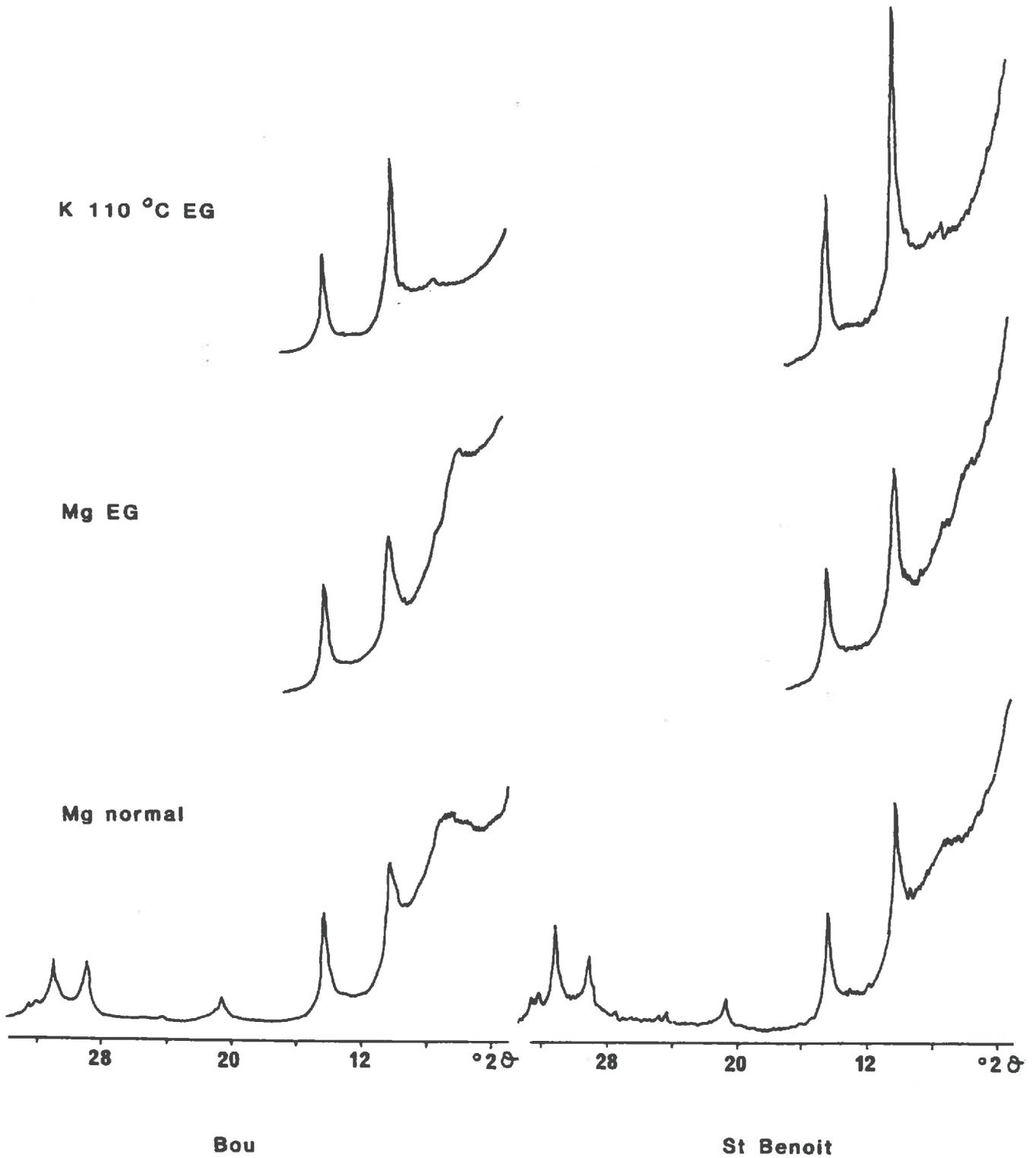


Figure I.5 : Diffractogrammes RX obtenus avec la fraction inférieure à 2 μm sous forme de dépôts orientés, en fonction des différents traitements.

ANNEXE II

METHODES UTILISEES D'ANALYSE DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES MATERIAUX

II.1 - MESURES DES POROSITES

2.11 - DENSITE SOLIDE :

La densité solide est déterminée sur des échantillons séchés à l'étuve, à l'aide d'un pycnomètre à gaz (Micromeritics pycnometer 1305).

On mesure la densité solide des échantillons prélevés dans les couches 0-20 cm et 20-30 cm dans chacune des situations des deux parcelles. Sept répétitions sont réalisées pour une valeur de densité. Dans ces conditions, on obtient des écarts types moyens des densités de $\pm 0,008$.

2.12 - VOLUME APPARENT :

2.121 - Volume apparent gammamétrique :

La double sonde gammamétrique LPC INRA est utilisée pour mesurer les densités apparentes humides des sols (ou les volumes apparents correspondants), entre 0 et 50 cm de profondeur. Le principe de mesure et les caractéristiques techniques de l'appareil sont décrits par STENGEL et al (1986).

Le dispositif de mesure (fig. II.1) est constitué de deux tubes rigides entretoisés à leur partie supérieure. Le premier contient la source radioactive (^{137}Cs) et le second le détecteur (compteur à scintillation + circuits électroniques). Une plaque d'acier disposée sur le sol assure la stabilité de l'ensemble, le guidage des tubes d'accès, et constitue le repère de côté. L'ensemble des tubes rigides est déplacé conjointement dans les tubes d'accès installés préalablement après perçage de trous.

Un ensemble portatif électronique sert à l'alimentation des circuits et l'exploitation des mesures.

Nous avons sélectionné, pour nos mesures, une distance source-détecteur égale à 30 cm et des temps de comptage de 30 secondes. Au total, chaque mesure représente la moyenne de trois comptages. Préalablement, les deux trous sont forés avec une tarière de diamètre compatible à celui des tubes, et des échantillons sont extraits tous les 10 cm pour des mesures de teneur en eau pondérale (méthode gravimétrique). On vérifie l'écartement des tubes à l'aide de tiges métalliques enfoncées dans les tubes d'accès.

Les comptages sont effectués à des profondeurs équidistantes de 2 cm. Deux à trois profils sont établis pour chacune des situations à caractériser. Les profils représentés correspondent aux courbes obtenues après calcul des valeurs moyennes des volumes apparents, pour des horizons de 5 cm d'épaisseur.

Calibration :

Comme le soulignent STENGEL et al (1986), le parallélisme des tubes est rarement assuré sur le terrain. Aussi avons nous utilisé l'équation de calibration suivante :

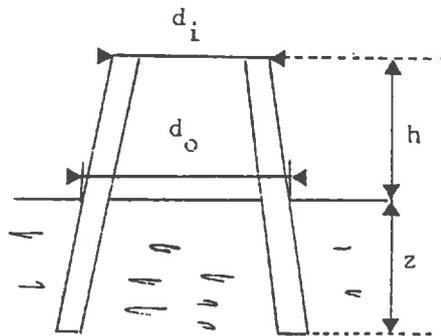
$$x \frac{\mu'}{\mu_0'} = A' \ln CR^2 + B'$$

- R : distance source-compteur
 x : distance entre tubes
 μ' : coefficient d'absorption massique du matériau
 μ_0' : coefficient d'absorption de référence (calcaire)
 C : comptage du nombre de photons traversant par unité de temps le milieu.

La distance x réelle, à une profondeur donnée, est calculée par application du théorème de Thalès.

$$x = d_0 - 2(e + \phi) + \frac{d_0 - d_i}{h} z$$

- d_0 : distance entre tubes à la base
 d_i : distance entre tubes à une hauteur h
 e : épaisseur des tubes d'accès
 ϕ : diamètre des tubes



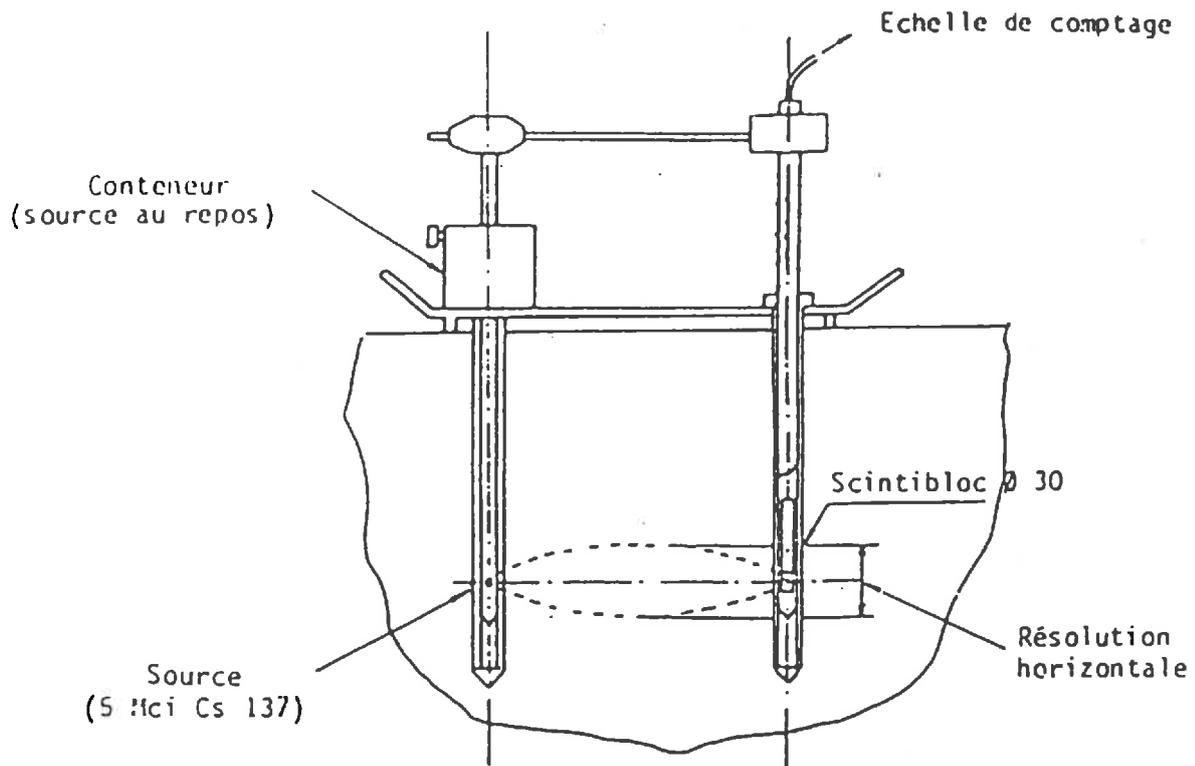


Figure II.1 : La double sonde gammamétrique.

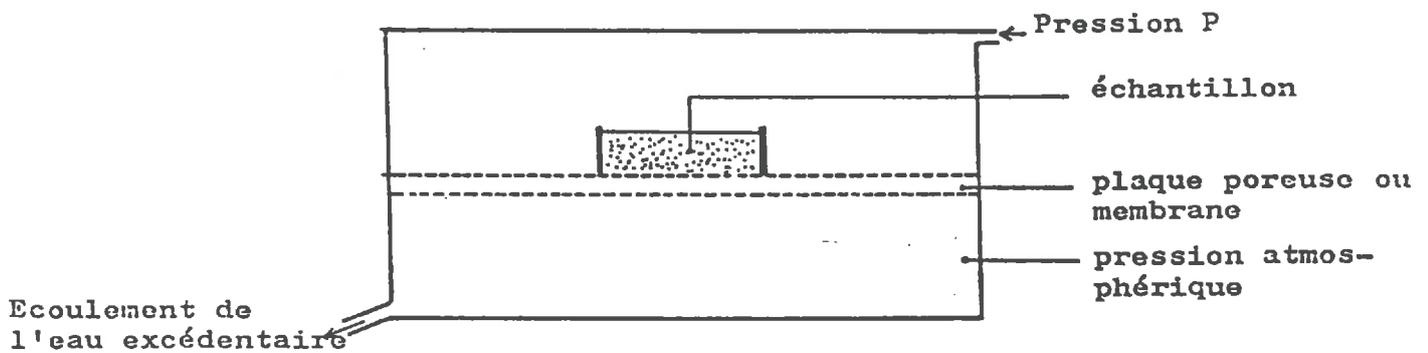


Figure II.2 : Dispositif de Richards.

On effectue l'étalonnage sur 2 blocs de matériaux homogènes et stables. Il s'agit du technyl ($\gamma = 1,144$) et du béton ($\gamma = 2,49$).

On établit la régression suivante :

$$\gamma \times \frac{\mu'}{\mu_o'} = 310,444 - 18,899 \ln CR^2$$

$r = 0,9992$	μ_o' (calcaire) =	0,0776 cm ² g ⁻¹
$n = 6$	μ' (technyl) =	0,0846 cm ² g ⁻¹
	μ' (béton) =	0,0773 cm ² g ⁻¹

Calcul :

La masse volumique humide vraie est donnée par la relation :

$$\gamma_v = \gamma_x \frac{100 + W}{100 + \frac{\mu_w'}{\mu_o'} W}$$

μ_w' : coefficient d'absorption de l'eau

On prend : $\frac{\mu_w'}{\mu_o'} = 1,1$

La masse volumique sèche γ_d vaut :

$$\gamma_d = \gamma_v \times \frac{100}{100 + W}$$

soit $\gamma_d = \gamma \times \frac{100}{100 + 1,1 W}$ avec $V_{app} = 1/\gamma_d$

Ecart aléatoire c :

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

t : temps de comptage.

Performances :

La résolution verticale est de ± 2 cm pour des matériaux de masses volumiques comprises entre $1,20 \text{ g/cm}^3$ et $2,70 \text{ g/cm}^3$.

Le volume de mesure de la double sonde, pour une distance source-détecteur de 30 cm, est de l'ordre de 400 cm^3 .

Précision des mesures :

La précision des mesures est dépendante de l'exactitude la méthode, de la sensibilité et la fiabilité de l'appareil, mais aussi des conditions de mesure in situ (épaisseur auscultée, teneur en eau, coefficient d'absorption massique).

STENGEL et al (1986) rapportent les erreurs suivantes :

- incertitude sur l'épaisseur $x \pm 1 \text{ mm}$
- incertitude sur la teneur en eau $\pm 0,02 \text{ g/g}$
- incertitude sur le coefficient d'absorption massique du sol $\mu_s \pm 1,10^{-4}$.

Ce sont principalement les variations des taux de comptage et les incertitudes sur les relations de calibration qui déterminent la précision des mesures. Au total, on peut admettre 3 % à 4 % comme ordre de grandeur du coefficient de variation de l'estimation d'une densité sèche.

Les écarts types moyens obtenus pour chaque horizon, et exprimés en volume apparent, valent $0.02 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$. Les écarts les plus importants correspondent aux mesures dans les horizons cultivés non compactés ($EC = \pm 0.06 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) et les plus faibles, au contraire, dans les milieux tassés ($EC = \pm 0.01 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$).

2.122 - Volume apparent sur cylindres :

La méthode consiste à prélever des échantillons non perturbés à l'intérieur de cylindre de volume connu (BURKE et al, 1986). Les cylindres sont prélevés délicatement à l'aide d'un dispositif de poussée, de manière à assurer un parfait contact entre la matériau et la paroi du cylindre. Cette opération s'avère toutefois délicate en milieu meuble, un léger tassement de l'échantillon pouvant se produire au moment de l'enfoncement du cylindre. Le volume correspondant est de 1000 cm^3 , la hauteur de l'anneau étant de 7 cm. Après nettoyage des faces, les cylindres sont pesés. La densité sèche et le volume apparent correspondant sont déduits après calcul des teneurs en eau pondérales sur des aliquotes prélevés au même moment.

Deux prélèvements sont en général effectués pour disposer d'une valeur de volume apparent. L'écart moyen par rapport à la moyenne est d'environ $\pm 0.05 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$.

2.123 - Volume apparent sur mottes, sur pâtes et massifs d'agrégats compactés à l'oedomètre

Les mesures de volume apparent sont effectuées sur mottes prélevées au champ, sur les "gâteaux" ou pâtes fabriqués par remaniement des matériaux naturels dans le but de déterminer la porosité texturale, et sur les massifs d'agrégats compactés à l'oedomètre.

La méthode de mesure, basée sur le principe de la poussée d'Archimède, est celle mise au point par MONNIER et al (1973). Le liquide d'immersion, c'est à dire le pétrole, a l'avantage d'être peu volatil et faiblement actif d'un point de vue physico-chimique. Après saturation des échantillons dans le pétrole pendant 6 à 12 heures, on retire l'échantillon du pétrole pour essuyer l'excès de pétrole en surface. Il est ensuite déposé sur une nacelle dans un bécher rempli de pétrole et placé sur la plateau d'une balance. Le volume apparent peut être ainsi mesuré.

On déduit la densité apparente ou le volume apparent, après détermination de la masse de l'échantillon séché 24 heures à 105° C. Dans le cas de mottes humides, elles sont stockées dans des boites plastique étanches après prélèvement, de manière à éviter toute évaporation.

Du fait de la nature sableuse des échantillons, les mesures sont réalisées sur des volumes relativement importants, c'est à dire 10 à 15 cm³, pour éviter une surévaluation des densités (FIES et STENGEL, 1981). Ainsi, la confrontation des densités ainsi obtenues à celles déterminées par la technique de MAERTENS (1965) ne nous a pas révélé d'écart de mesure.

Au total, pour chacun des échantillons, huit mesures sont réalisées :

Les écarts types moyens exprimés en volume apparent sont :

- 0.005 cm³/g pour les pâtes
- 0.012 cm³/g pour les mottes.
- 0.012 cm³/g pour les massifs d'agrégats compactés.

II.2 - PROTOCOLE DE PREPARATION DES ECHANTILLONS POUR LA DETERMINATION DU VOLUME APPARENT TEXTURAL

Le protocole de fabrication de pâte à porosité texturale est celui mis au point par KHEYRABI et MONNIER (1968).

Les constituants sont malaxés en présence d'une quantité d'eau, calculée en multipliant par 1.9 l'humidité équivalente donnée par la formule de GRAS. La durée de malaxage est de 15 mn. A la différence de la méthode établie par KHEYRABI et MONNIER (1968), l'excès d'eau est déplacé en soumettant les échantillons à une pression pneumatique de 10 kPa (pF 2) durant trois jours.

II.3 - DESCRIPTION DE LA GEOMETRIE DE L'ESPACE PORAL

3.21 - POROSIMETRIE AU MERCURE

Dans le cas d'un liquide non mouillant comme le mercure, la force qui s'oppose à sa pénétration dans un capillaire de rayon r est égale à :

$$2 \pi r \tau \cos \alpha$$

où τ est la tension superficielle du mercure et α l'angle de raccordement du ménisque à l'interface mercure solide.

Si on applique une pression P à la surface du mercure de manière à ce qu'il pénètre, on a :

$$\pi r^2 P = 2 \pi r \tau \cos \alpha$$

d'où

$$P = \frac{2 \tau \cos \alpha}{r}$$

Cette relation (loi de JURIN) permet de relier la pression à appliquer au liquide pour qu'il pénètre dans un capillaire de rayon r . La méthode consiste donc à déterminer la pression nécessaire pour que le liquide pénètre dans les pores et à relier chaque pression au volume intrudé de mercure (LAWRENCE, 1977, 1978).

En fait, dans le cas de matériaux naturels, nous sommes conduits à définir un système de pores cylindriques équivalents, de rayon r_{eq} (VACHIER et al., 1979). Les rayons mesurés représentent donc les rayons de constriction des pores accessibles au mercure.

Les valeurs adoptées pour τ et α sont égales respectivement à 484 dynes/cm et 130° (PELLERIN, 1980 ; FIES, 1984).

Le dispositif de mesure est un porosimètre Micromeritics 9310. Il permet de décrire la distribution des volumes de pores pour des diamètres équivalents compris entre $250 \mu\text{m}$ et $6.5 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}$.

Les cellules dans lesquelles sont placés les échantillons ont des volumes de 3 et 5 cm^3 , avec des capillaires respectifs de 1.19 et 1.131 cm^3 . La précision des mesures est d'environ $\pm 0.01 \text{ cm}^3$ selon la constructeur.

Précisons enfin que l'ensemble des mesures sont réalisées sur des échantillons séchés à l'air et mis à l'étuve pendant 24 heures préalablement au passage au porosimètre.

- Résultats

Trois répétitions sont réalisées pour chacun des échantillons. Dans le cas des mottes, des pâtes ou des massifs d'agrégats compactés, les volumes de mesure sont compris entre 2 et 3 cm³. Dans le cas des agrégats 2-3 mm, une centaine est disposée dans la cellule de mesure du porosimètre.

Deux formes de représentation graphique sont utilisées :

- la courbe exprimant le volume cumulé de mercure introduit dans l'échantillon, en fonction du logarithme du diamètre équivalent des pores. La valeur totale correspond au volume de vide occupé par le mercure en fin de mesure.
- la courbe dérivée qui exprime la distribution du volume des pores en fonction du logarithme du diamètre équivalent, ou spectre de porosité (CHRETIEN, 1986). On a alors en ordonnée :

$$\frac{\Delta v}{\Delta \log D_{e q}}$$

3.22 - ANALYSE DES LAMES MINCES

La fabrication des lames minces est réalisée suivant le protocole mis au point par GUILLORE (1980). Elles sont confectionnées à partir d'échantillons orientés de taille décimétrique. Les échantillons sont séchés à l'air, puis imprégnés avec une résine polyester (Raigipol EM10) diluée avec 30 % de monostyrène, sous une dépression de 5 kPa. Au préalable, il est porté au mélange un additif fluorescent (1g/l de résine d'UVITEX DB). Les lames minces peuvent être ainsi observées sous lumière à ultra-violet (VAN VLIET-LANOE, 1985 ; FIZPATRICK, 1970). Le temps de polymérisation est d'environ quatre semaines. Les lames minces ont les dimensions suivantes : 160 x 68 mm ou 60 x 45 mm. Une première observation a lieu sous binoculaire en lumière naturelle (G = 5 à 50). Une seconde observation est faite sous microscope en lumière UV (G = 140). Dans ce dernier cas, la prise de photographie en noir et blanc s'avère très efficace pour améliorer les contrastes entre les particules solides et les vides.

3.23 - MESURE DU POTENTIEL MATRICIEL

- Principe

La rétention de l'eau dans le sol est dépendante des potentiels gravitaires, osmotiques et matriciels. A l'échelle de nos échantillons (centimétriques), les potentiels gravitaires et osmotiques sont négligeables. L'état énergétique de l'eau dans l'échantillon dépend essentiellement du potentiel matriciel.

Si l'on considère tout capillaire comme un cylindre, l'eau retenue dans un pore par une force $F = 2 \pi r \tau \cos \alpha$, n'est chassée que si la pression pneumatique $P \pi r^2$ est supérieure :

$$P \geq \frac{2 \tau \cos \alpha}{r}$$

τ : tension superficielle de l'eau
 α : angle de contact entre la phase liquide et solide
 r : rayon équivalent.

Tous les pores de taille supérieure ou équivalente, seront vidés si la pression exercée est égale à P .

Nous pouvons donc, à partir de ces considérations, disposer de données sur l'organisation de la porosité des matériaux.

- Dispositif

Nous avons utilisé des presses à membrane (fig. II.2) construites suivant le modèle mis au point par RICHARDS (1941, 1947). Ces presses à membrane sont employées pour une gamme de pressions comprises entre 1 kPa (pF 1) et $16 \cdot 10^2$ kPa (pF 4.2) et ne sont adaptées qu'à des mesures de désorption d'eau. Les échantillons ne sont pas déposés directement sur les membranes cellulosiques, mais sur de la pâte de kaolin qui assure la continuité du film d'eau. Une série de manomètres et de détendeurs permet la sélection des pressions et la régulation de l'alimentation en air comprimé et en azote (cas des hautes pressions $P > 300$ kPa).

- Mesures

Les résultats concernent des mesures réalisées sur des mottes de 10 à 15 cm³. Des déterminations antérieures des teneurs en eau pondérales au cours des dessiccations, pour des volumes de matériau beaucoup plus importants (250 cm³), nous ont permis de constater que les temps de mise en équilibre à un potentiel donné devaient être au moins de trois semaines. Nous avons donc décidé de prendre des volumes plus petits pour diminuer ces temps de mesure.

Au total, chaque valeur de teneur en eau ou de volume apparent correspond à la moyenne de 7 mesures. Les temps d'équilibre pour une pression donnée sont d'environ une semaine.

Dans ces conditions, les écarts types moyens sont les suivants :

- teneur en eau ± 0.008 cm³/g
- volume massique ± 0.012 cm³/g

D'une façon générale, les écarts types diminuent aux pressions élevées.

Les pressions sont exprimées en pF, c'est-à-dire le logarithme décimal de la pression appliquée (exprimée en cm d'eau).

II.4 - MESURES DES CONDUCTIVITES HYDRAULIQUES EN REGIME SATURE

Les mesures de conductivités hydrauliques sont réalisées en condition saturée. La méthode consiste à maintenir une charge constante (a) d'eau préalablement dégazée sur un système constitué par un matériau 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.

D'après la loi de DARCY (1856), dans le cas de l'écoulement de l'eau vers le bas d'une colonne de sol saturé, on a la relation (HILLEL, 1974).

$$Q = K \cdot \frac{S(a+1)}{l}$$

K étant la "conductivité hydraulique" (cm/sec)
Q = débit (cm³/sec)

la conductivité K est dépendante des caractéristiques du sol, mais également des caractéristiques du fluide.

$$K = \frac{k \tau g}{\Theta}$$

Θ : viscosité en poises (dyne sec/cm²)
τ : densité du fluide (g/cm³)
g : accélération de la pesanteur (cm/sec²)
k : perméabilité intrinsèque du sol (cm/sec)

Pour un fluide ordinaire comme l'eau, la densité est à peu près constante et les variations de la fluidité sont dues principalement aux variations de conductivité (HILLEL, 1974).

Les valeurs de K Darcy sont donc définies à une température constante de 20°C. 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 :

$$K_{20} = K_t \times \frac{\Theta_t}{\Theta_{20}}$$

où K₂₀ et K_t sont les perméabilités à 20°C et à température de l'expérience.

Θ₂₀ et Θ_t sont les viscosités de l'eau à 20°C et à température de l'expérience.

Les températures sont prises régulièrement dans l'eau des cylindres de mesure.

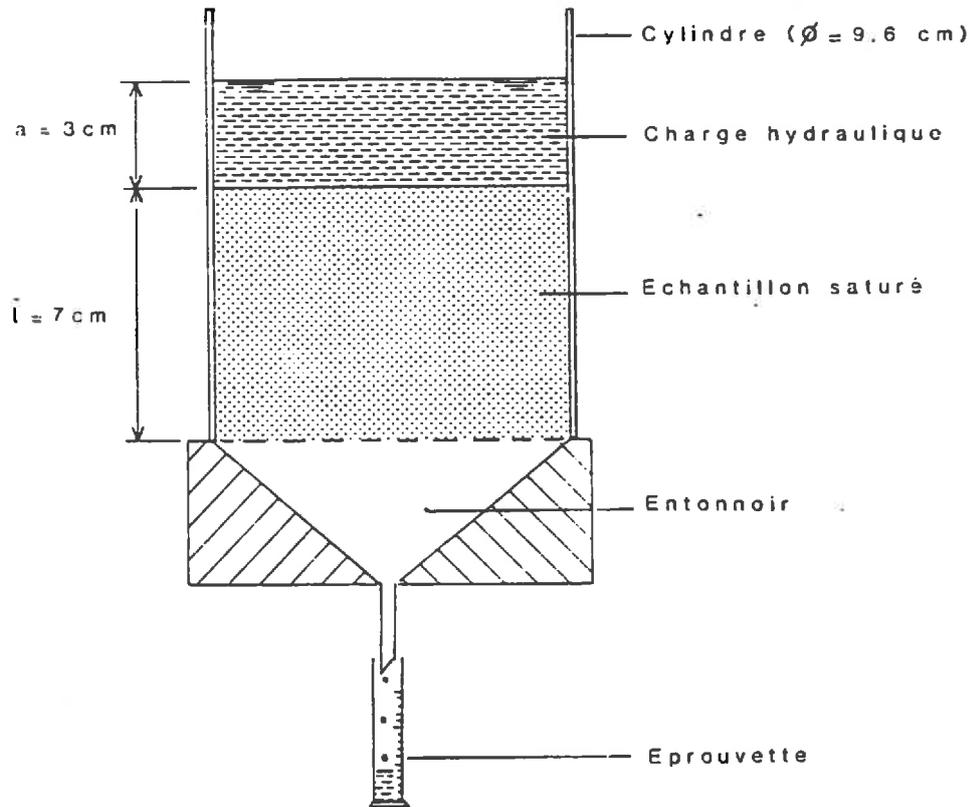


Figure II.3 : Dispositif de mesure de la conductivité hydraulique en régime saturé

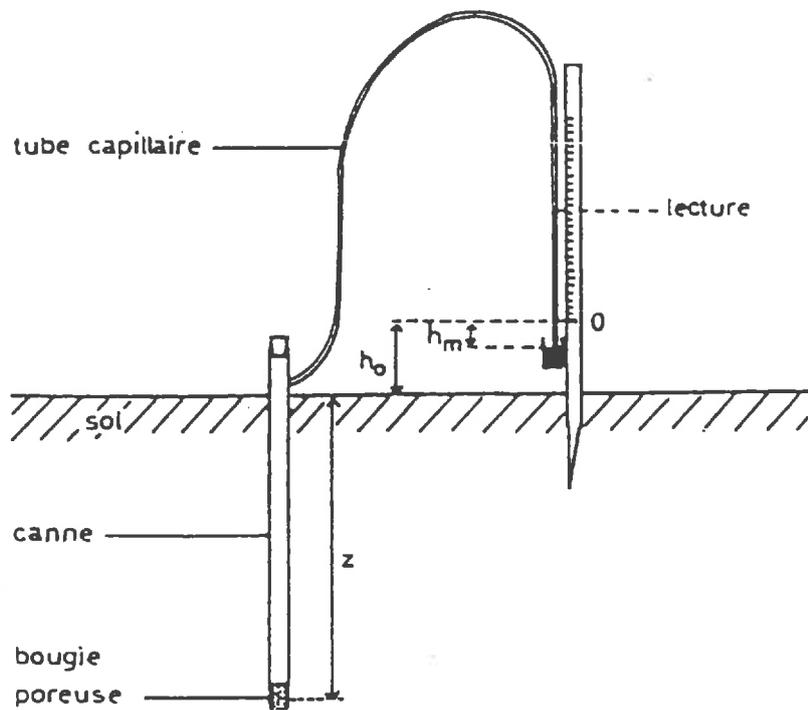


Figure II.4 : Dispositif de mesure des succions in situ.

Les facteurs de correction θ_t/θ_{20} sont données dans le tableau suivant (BONNET, 1984).

T°C	θ_t/θ_{20}
18	1.050
19	1.025
20	1
21	0.976
22	0.953
23	0.931
24	0.910
25	0.889

- Méthode d'étude.

Les échantillons traités sont les cylindres de 1000 cm³ prélevés pour les mesures de porosité totale. Ils sont saturés sous vide, après avoir protégé leur base par une toile à maille fine.

La figure II.3 représente le dispositif expérimental. La lame d'eau maintenue au-dessus des échantillons est de 3 cm. Après une mise à l'équilibre d'une heure, les quantités d'eau à l'exutoire sont déterminées toutes les 15 mn pendant deux heures. La conductivité hydraulique calculée est donc la moyenne des conductivités mesurées toutes les 15 mn.

II.5 - MESURES TENSIOMETRIQUES

- Principe

Les potentiels hydriques du sol sont mesurés au cours des suivis au champ, à l'aide de tensiomètres disposés à différentes profondeurs. Les mesures permettent d'observer l'état énergétique de l'eau dans différents horizons du sol en relation avec le climat, et pour chacune des situations intra-parcellaires.

Le principe de mesure repose sur la dépression créée par le transfert de l'eau du sol au travers d'une bougie poreuse - étanche à l'air - installée à une profondeur donnée. Cette bougie saturée d'eau est surmontée d'une canne réservoir d'eau reliée à un manomètre à mercure ; l'ensemble est totalement rempli d'eau et étanche à l'air (fig. II.4). La longueur de la bougie est de 5 cm et le diamètre de 2 cm. Lorsque le sol est saturé d'eau, il n'y a aucun échange entre l'intérieur de la bougie et le sol. La montée du mercure est nulle. En revanche, si le sol est sec, il y a transfert d'eau par diffusion de l'intérieur de la bougie vers le milieu environnant. En conséquence, il se produit une dépression à l'intérieur du système qui se traduit par une montée du mercure.

- Interprétation des mesures

Soit la surface d'un sol prise comme niveau de référence, soit Γ la succion à la profondeur Z (Z orienté positivement vers le bas), h_0 la cote du zéro de l'échelle manométrique et h_m la cote du niveau de mercure dans le réservoir par rapport au zéro de l'échelle manométrique. La lecture (L) effectuée sur une échelle graduée en millibars correspond à :

$$L = \Gamma + \frac{Z + h_0 + 12.6 h_m}{1.02}$$

avec h_0 , h_m et Z en cm.

Le potentiel total H (négatif), qui est la somme du potentiel matriciel et gravitaire vaut :

$$H = -\Gamma - Z \quad \text{avec } H \text{ et } \Gamma \text{ en cm d'eau}$$

- Précision des mesures

Selon le constructeur du dispositif, les mesures tensiométriques sont entachées d'une erreur de ± 7 cm. LESSARD (1981) estime l'erreur plus faible : ± 5 cm.

- Domaine de mesure

Les tensiomètres ne permettent pas d'apprécier des potentiels totaux supérieurs à 900 mbar. Au delà, il existe des risques de "décrochage".

II.6 - ANALYSE DU COMPORTEMENT AU COMPACTAGE : METHODE OEDOMETRIQUE

Le dispositif utilisé est un oedomètre équipé d'une alimentation hydraulique (figure II.5). Les caractéristiques de la cellule de compression sont identiques à celle utilisée par GUERIF (1982). Rappelons qu'elle est constituée d'un piston et d'un cylindre de 7 cm de diamètre, la hauteur initiale des échantillons avant compactage étant de 2.4 cm (soit un volume initial fixé à 92.363 cm³). La contrainte est uniaxiale et de nature statique, ce qui assure un meilleur contrôle des temps d'application et des pressions appliquées. L'alimentation par une centrale hydraulique ne permet pas d'atteindre de manière instantanée les pressions sélectionnées, contrairement au dispositif pneumatique. En général, 10 à 20 secondes sont nécessaires pour atteindre l'équilibre. Un suivi continu des pressions et des déplacements est réalisé grâce à une saisie automatique par microordinateur. Ce dernier est relié aux capteurs de déplacement (comparateur) et de pression par l'intermédiaire d'interfaces et permet, avec le logiciel que nous avons mis au point, un asservissement précis et un traitement rapide des données.

Précisons cependant que le dispositif utilisé n'est adapté qu'à des pressions supérieures à 1.0 bar. Pour des pressions inférieures (0.5 kg/cm^2), la charge est exercée par une série de masses disposées sur la partie haute du piston. Le capteur de déplacement reste solidaire du piston de façon à nous fournir la valeur du déplacement.

Précision des mesures

Elle concerne les valeurs mesurées de pression et de déplacement. Le capteur de pression a une étendue de mesure de 0 à 1000 daN (26.5 kg/cm^2) et une précision de $\pm 0.91 \text{ daN}$, soit $\pm 0.02 \text{ kg/cm}^2$. Le capteur de déplacement - d'une étendue de mesure égale à $\pm 15 \text{ mm}$ - est étalonné à l'aide d'une série de calles calibrées. L'écart moyen obtenu est de $\pm 0.37 \text{ mm}$, soit si on le rapporte à la surface de l'échantillon : $\pm 1.423 \text{ cm}^3$. Pour une masse sèche constante de 81 g, l'écart obtenu en volume apparent est de : $0.018 \text{ cm}^3/\text{g}$.

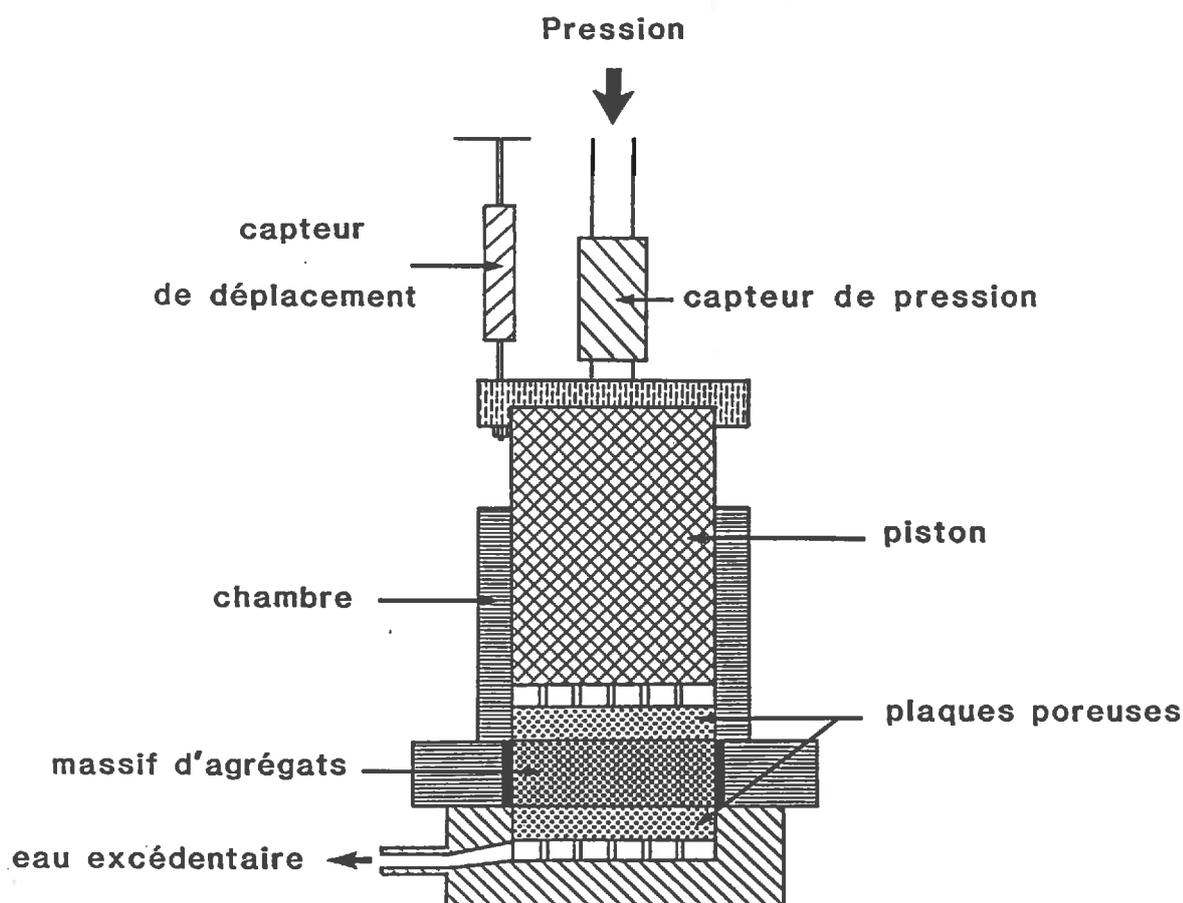


Figure II.5 : Dispositif oedométrique.

ANNEXE III

T A B L E A U X

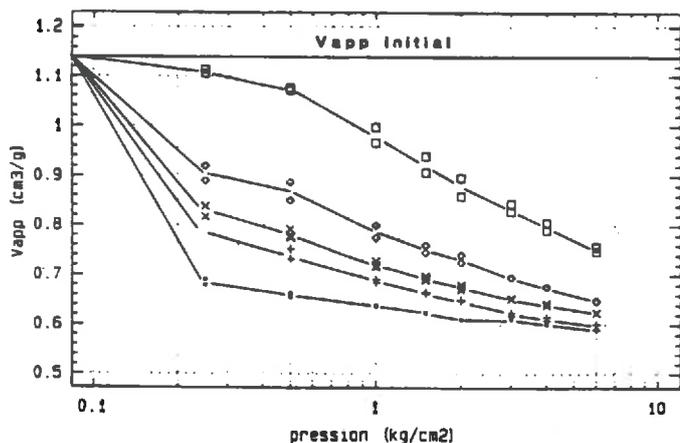
Tableau A1 - Calendrier des mesures gammamétriques et des prélèvements d'échantillons.

Nature des prélèvements ou mesures	parcelle de Bou			parcelle de St benoit		
	état initial	après semis	après récolte	état initial	après planta.	après récolte
mesures gammamétriques	23/4 au 25/4	22/5 au 30/5	9/10 au 10/10	13/5 au 15/5	16/6 au 24/6	23/7
mottes pour V_{app} 0-10 ini et 25-35 ini	23/4 au 25/4	-	-	13/5 au 15/5	-	-
mottes pour V_{app} 0-10 er et 0-10 sr	-	22/5 au 30/5	-	-	16/6 au 24/6	-
cylindres pour V_{app} et K_{sat} 0-10 ini et 25-35 ini	23/4 au 25/4	-	-	13/5 au 15/5	-	-
cylindres pour V_{app} et K_{sat} 0-10 er et sr	-	22/5 au 30/5	-	-	16/6 au 24/6	-
mottes porosimétrie au Hg 0-10 er et sr	-	22/5 au 30/5	-	-	-	-
mottes porosimétrie au Hg 25-35	-	-	9/10 au 10/10	-	-	23/7
lames minces 0-10 er et sr	-	22/5 au 30/5	-	-	-	-
lames minces 25-35	-	-	9/10 au 10/10	-	-	-
échantillons pour l'oedométrie	-	-	9/10 au 10/10	-	-	9/10 au 10/10

Tableau A2 - Volumes apparents déterminés pour différentes échelles de mesure dans chacune des situations intra-parcellaires de Bou et St Benoit

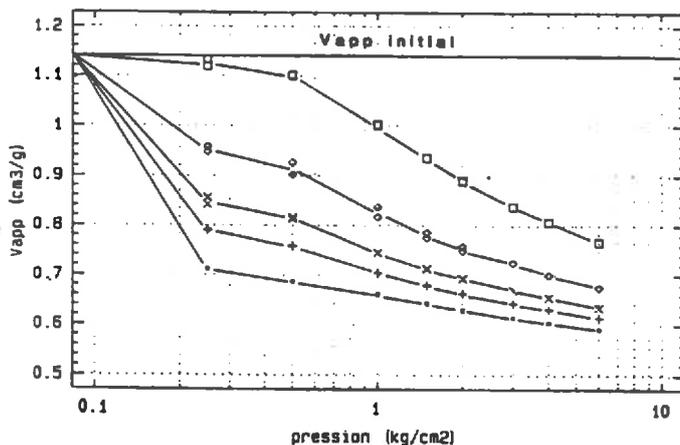
SITUATIONS	Volumes apparents (cm ³ .g ⁻¹)			
	gamma- métrie $\sigma=\pm 0.01$ à 0.06	cylindre $\sigma=\pm 0.06$	motte $\sigma=\pm 0.012$	pâte texturale $\sigma=\pm 0.005$
Bou.1 ini 0-10	0.640	0.656	0.608	0.548
ini 25-35	0.584	0.587	0.550	0.544
er 0-10	0.647	0.618	0.610	0.548
sr 0-10	0.579	0.560	0.563	0.548
Bou.2 ini 0-10	0.749	0.634	0.578	0.569
ini 25-35	0.594	0.597	0.571	0.565
er 0-10	0.739	0.673	0.620	0.569
sr 0-10	0.612	0.598	0.575	0.569
Bou.3 ini 0-10	0.761	0.705	0.576	0.579
ini 25-35	0.597	0.586	0.567	0.557
er 0-10	0.739	0.666	0.630	0.579
sr 0-10	0.617	0.586	0.580	0.579
STB.1 ini 0-10	0.706	0.654	0.561	0.544
ini 25-35	0.602	0.553	0.532	0.541
er 0-10	0.741	0.765	0.588	0.544
sr 0-10	0.586	0.578	0.543	0.544
STB.2 ini 0-10	0.690	0.670	0.577	0.560
ini 25-35	0.613	0.620	0.538	0.547
er 0-10	0.766	0.788	0.656	0.560
sr 0-10	0.608	0.592	0.568	0.560
STB.3 ini 0-10	0.656	0.640	0.600	0.584
ini 25-35	0.639	0.630	0.596	0.573
er 0-10	0.804	0.806	0.646	0.584
sr 0-10	0.615	0.607	0.586	0.584

ANNEXE IV
FIGURES

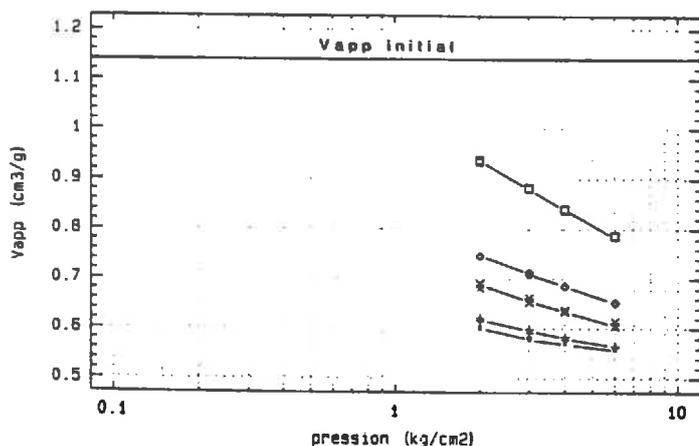


BOU 2

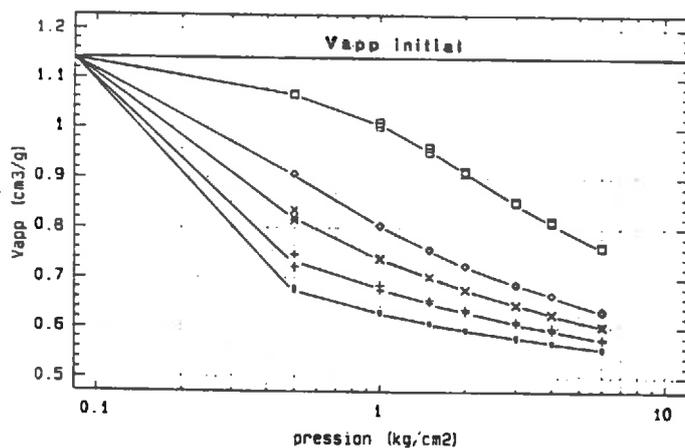
ST BENOIT 3



ST BENOIT 1(1)



ST BENOIT 2



- pF1
- + pF2
- × pF3
- ◊ pF4.2
- ◻ pF6

Figure IV.1 : Variations des volumes apparents en fonction des pressions appliquées (échelle logarithmique) : effet de la succion.

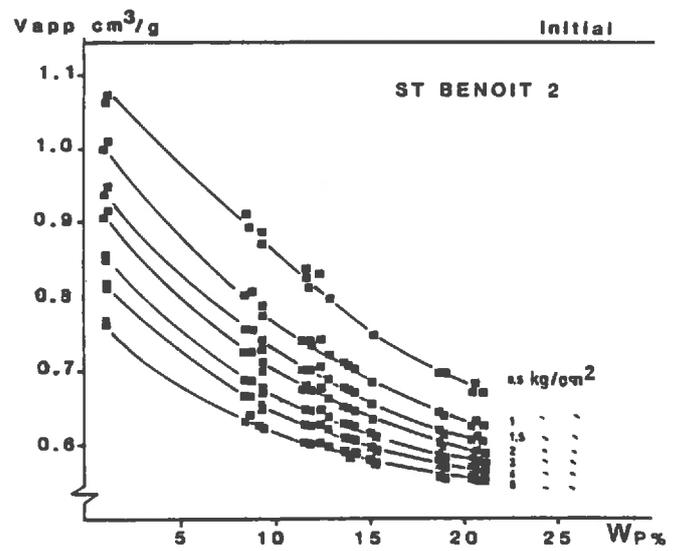
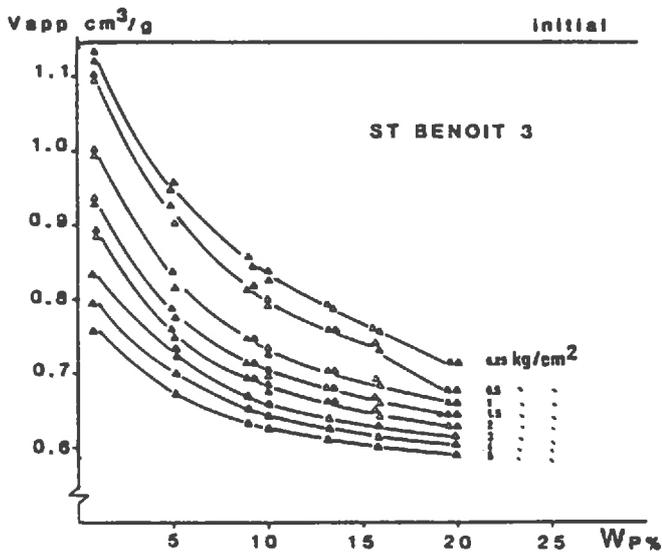
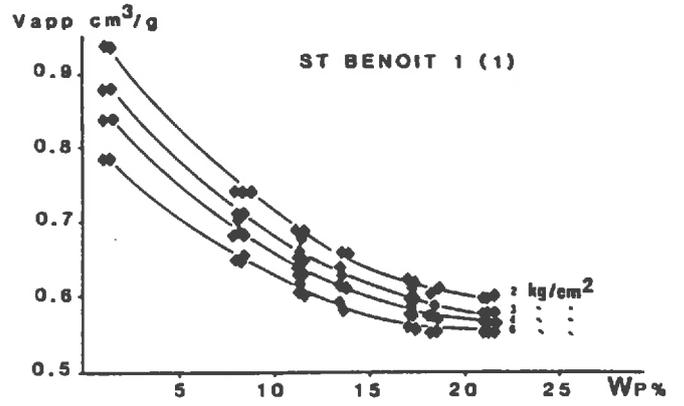
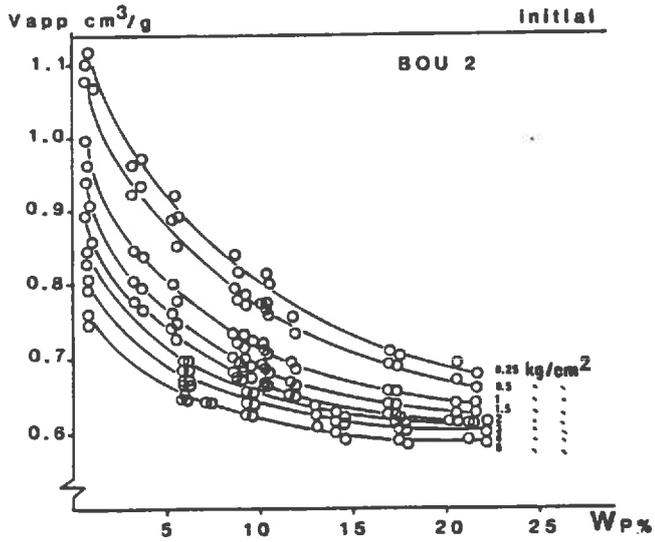


Figure IV.2 : Variations des volumes apparents en fonction des teneurs en eau. Effet de l'intensité de pression.

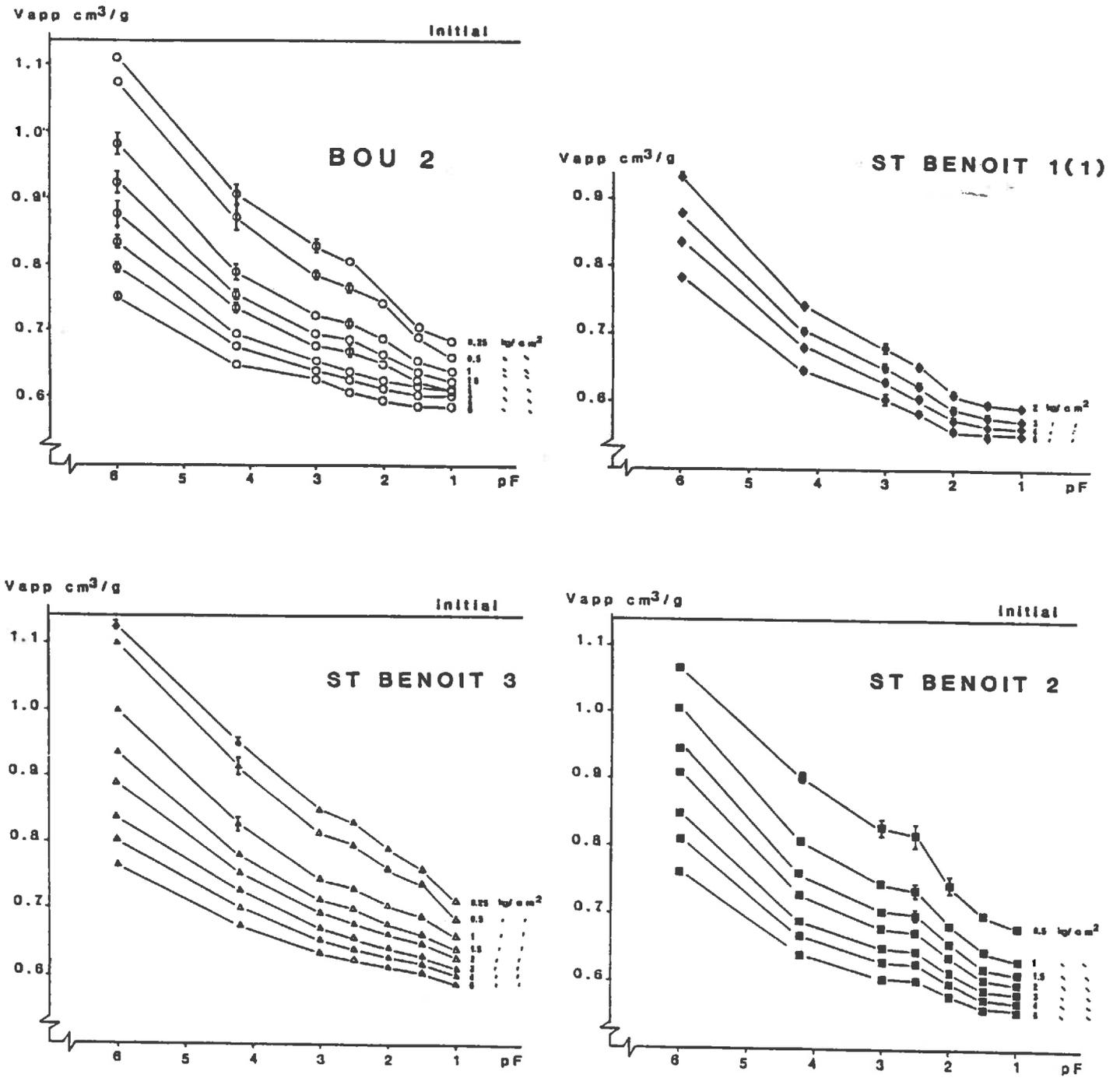


Figure IV.3 : Variations des volumes apparents en fonction des suctions en eau. Effet de l'intensité de pression.

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS	5
SOMMAIRE	7
INTRODUCTION GENERALE	11
Ière PARTIE : LE MILIEU D'ETUDE	19
INTRODUCTION	21
I - CADRE GENERAL DE L'ETUDE	23
1.1 - SITUATION GEOGRAPHIQUE	23
- <i>régionale</i>	23
- <i>des parcelles</i>	23
1.2 - LE CLIMAT	23
1.21 - <i>Climat général</i>	23
1.22 - <i>Climat pendant l'année d'étude</i>	24
1.3 - GEOLOGIE	24
1.4 - PEDOLOGIE	25
II - DESCRIPTIONS CARTOGRAPHIQUES ET ANALYTIQUES DES PARCELLES EXPERIMENTALES	25
2.1 - CARTOGRAPHIE	25
2.2 - DONNEES ANALYTIQUES	26
2.21 - <i>Bou</i>	26
2.22 - <i>Saint-Benoit</i>	30
2.23 - <i>Conclusions</i>	32
- les principaux résultats	32
- comparaison des données analytiques aux caractéristiques de sols développés sur d'autres formations sableuses	32

III - LES PRATIQUES CULTURALES	34
3.1 - GENERALITES SUR LES PARCELLES ET LES EXPLOITATIONS	34
3.11 - <i>Bou</i>	34
3.12 - <i>Saint-Benoit</i>	34
3.2 - ITINERAIRES CULTURAUX PENDANT LE SUIVI AU CHAMP	37
3.3 - CONCLUSION	37
CONCLUSIONS	39
IIème PARTIE : EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES SOLS EN FONCTION DES TRAVAUX CULTURAUX	41
INTRODUCTION	43
I - ANALYSE QUANTITATIVE DES POROSITES	44
1.1 - PROFILS POROSIMETRIQUES	44
1.11 - <i>Evolution des volumes apparents totaux avec les profondeurs</i>	45
a) Expression des résultats	45
b) Résultats et interprétations	45
. <i>volumes apparents des deux situations S et SA,</i>	45
. <i>cas des autres situations intra-parcellaires.</i>	47
1.12 - <i>Evolution correspondante des eaux de saturation</i>	51
a) Expression des résultats	51
b) Résultats et interprétations	53
. <i>taux de saturation des deux situations S et SA,</i>	53
. <i>cas des autres situations intra-parcellaires.</i>	56
1.13 - <i>Conclusion</i>	56
1.2 - ANALYSE DES COMPOSANTES DE LA POROSITE	57
1.21 - <i>Introduction</i>	57
1.22 - <i>Protocole expérimental</i>	58
1.23 - <i>Résultats et interprétations</i>	59
a) <i>Cas des situations S et SA de Bou.</i>	59
b) <i>Cas des autres situations intra-parcellaires.</i>	61
1.24 - <i>Analyse des variations des volumes massiques texturaux</i>	62
1.3 - CONCLUSION	63

II - CARACTERISATION DE L'ESPACE PORAL	65
2.1 - UTILISATION DE LA POROSIMETRIE AU MERCURE	65
2.11 - <i>Introduction</i>	65
2.12 - <i>Matériels</i>	65
2.13 - <i>Résultats</i>	67
a) Caractéristiques des échantillons SA et S	67
b) Cas des autres échantillons	71
2.14 - <i>interprétation - conclusion</i>	72
a) Les pâtes	72
b) Les mottes	74
2.2 - ANALYSE MICROMORPHOLOGIQUE	75
2.21 - <i>Introduction</i>	75
2.22 - <i>Matériels et méthodes</i>	76
a) Matériels.	76
b) Méthodes	76
2.23 - <i>Résultats</i>	76
2.24 - <i>Discussion - Conclusion</i>	79
2.3 - CONCLUSION	82
III - ANALYSE DU COMPORTEMENT DES MOTTES EN DESSICCATION	82
3.1 - INTRODUCTION	82
3.2 - MATERIELS ET METHODES	83
3.3 - RESULTATS	84
3.31 - <i>Evolution des volumes apparents en dessiccation</i>	84
3.32 - <i>Evolution des teneurs en eau en dessiccation</i>	86
a) Cas des échantillons SA et S.	86
b) Comportements des autres échantillons	86
3.33 - <i>Taux de saturation entre pF 1 et pF 3</i>	89
3.4 - INTERPRETATION	91
a) Volumes apparents	91
b) Application des résultats à l'analyse de l'espace poral	91
. <i>cas des échantillons sablo-argileux (BOU.1, STB.1 et STB.2),</i>	92
. <i>cas des échantillons sableux (BOU.2, BOU. 3 et STB.3).</i>	92
3.5 - APPLICATION DES RESULTATS A L'ANALYSE DES CONTRAINTES HYDRIQUES LORS DES TRAVAUX CULTURAUX	94
3.6 - CONCLUSION	95

IV - CARACTERISATION DES TRANSFERTS EN EAU, AU TRAVERS D'UNE COLONNE DE SOL	96
4.1 - INTRODUCTION	96
4.2 - GENERALITES	96
4.3 - METHODE D'ANALYSE	97
4.4 - RESULTATS ET INTERPRETATIONS	98
4.5 - CONCLUSION	101
V - SYNTHESE - CONCLUSION	102
IIIème PARTIE : ANALYSE DU COMPORTEMENT AU COMPACTAGE DES MATERIAUX SABLEUX : EFFET DU POTENTIEL HYDRIQUE ET DE LA PRESSION APPLIQUEE SUR LES CARACTERISTIQUES DE L'ESPACE PORAL	105
INTRODUCTION	107
I - COMPACTAGE DES MASSIFS D'AGREGATS : EFFET DE LA PRESSION APPLIQUEE ET DU CONTENU EN EAU, SUR LA POROSITE TOTALE	108
1.1 - INTRODUCTION	108
1.2 - MATERIELS ET METHODE	108
1.21 - <i>Matériels</i>	108
1.22 - <i>Méthode</i>	110
1.23 - <i>Expression des résultats</i>	111
1.3 - RESULTATS	111
1.31 - <i>Relation volume apparent - pression appliquée</i>	111
1.32 - <i>Relation volume apparent - teneur en eau pondérale</i>	113
1.33 - <i>Relation volume apparent - succion en eau</i>	117
1.34 - <i>Etat hydrique des échantillons compactés</i>	117

1.4 - INTERPRETATION - DISCUSSION	121
1.41 - Analyse des courbes V_{app} - Log P	121
1.42 - Analyse des courbes V_{app} - W_p	125
a) Définition des domaines de comportement	125
b) Interprétations des comportements mécaniques	127
c) Explication du degré de compacité	129
1.43 - Analyse des courbes pF - V_{app}	129
1.44 - Analyse des variations de taux de saturation	130
1.45 - Rôle de la matière organique	130
1.46 - Discussion de la notion de sensibilité au compactage	131
II - CARACTERISATION DE L'ESPACE PORAL DES MATERIAUX COMPACTES A L'OEDOMETRE	132
2.1 - INTRODUCTION	132
2.2 - UTILISATION DE LA POROSIMETRIE AU MERCURE	133
2.21 - Matériels et méthodes	133
2.22 - Résultats	
a) Données de la porosimétrie au mercure	133
. <u>Les mottes</u>	133
. <u>Les agrégats</u>	137
. <u>Les pâtes</u>	137
. <u>Les massifs d'agrégats compactés</u>	141
b) Confrontation des mesures de volume poral	143
. <u>Les mottes</u>	143
. <u>Les agrégats initiaux</u>	143
. <u>Les pâtes</u>	143
. <u>Les massifs d'agrégats</u>	143
2.23 - Discussion - Conclusion	144
a) Les pâtes	144
b) Les mottes et les agrégats	144
c) Les massifs d'agrégats	145
d) Conclusion	146
2.3 - OBSERVATIONS MICROMORPHOLOGIQUES	146
2.31 - Matériel et méthode	146
2.32 - Résultats	147
a) Les matériaux originels : Mottes et agrégats	147
b) les pâtes	147
c) les massifs d'agrégats compactés	147
2.33 - Interprétations - Conclusion	147
2.4 - CONCLUSION	152
CONCLUSIONS	152

IVème PARTIE : SYNTHÈSE GÉNÉRALE - CONCLUSION	157
INTRODUCTION	159
I - ASPECTS MÉTHODOLOGIQUES	159
1.1 - ANALYSE DES CONSÉQUENCES DU TASSEMENT DES SOLS	160
1.11 - <i>Les profils de volumes apparents</i>	160
1.12 - <i>Analyse des composantes de la porosité</i>	160
1.13 - <i>Analyse des distributions des tailles des pores</i>	161
1.14 - <i>Étude des transferts hydriques</i>	161
1.2 - ANALYSE DES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX	161
1.3 - CONCLUSION	162
II - APPORT DES CONNAISSANCES SUR LES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES SOLS SABLEUX	162
2.1 - SYNTHÈSE DE RÉSULTATS	163
2.11 - <i>Conditions générales lors des travaux culturaux</i>	163
2.12 - <i>Analyse des modifications des propriétés physiques des sols dues au compactage par les engins agricoles</i>	163
2.13 - <i>Confrontation à des caractérisations de transferts en eau au champ</i>	164
a) Suivi tensiométrique	164
- <u>Présentation</u>	164
- <u>Méthodes</u>	164
- <u>Résultats</u>	164
b) Mesures des capacités d'infiltration en simulation de pluie	165
c) Conclusion	165
2.14 - <i>Analyse du comportement au compactage des agrégats terreux</i>	165
2.15 - <i>Confrontation des résultats obtenus par le suivi au champ et l'étude du comportement au compactage</i>	167
a) Apports du test de compactage	167
b) Apports des analyses morphologiques des échantillons compactés	168
c) Limites de l'approche expérimentale en laboratoire	168
2.2 - REFLEXIONS SUR LE CONCEPT DE COMPARTIMENTAGE STRUCTURAL-TEXTURAL	169
2.3 - GÉNÉRALISATION DES RÉSULTATS AUX AUTRES FORMATIONS SABLEUSES	170

III - APPLICATION PRATIQUE DES RESULTATS	171
3.1 - POSSIBILITES DE LIMITATION DES TASSEMENTS	171
3.2 - POSSIBILITES D'AMELIORATION DES STRUCTURES	172
IV - PERSPECTIVES	173
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	175

PLAN DES ANNEXES

ANNEXE I - CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET DESCRIPTIONS DES METHODES ANALYTIQUES	187
I.1 - GRANULOMETRIE A BOU ET SAINT-BENOIT	189
I.2 - DEFINITION DE L'INDICE D'HETEROMETRIE	191
I.3 - ANALYSES MINERALOGIQUES	191
1.31 - DOSAGE DU QUARTZ	191
1.32 - ANALYSE THERMOPONDERALE	191
1.33 - TEST AU BLEU DE METHYLENE	192
1.34 - FIGURES	193
* * * *	
ANNEXE II - METHODES UTILISEES D'ANALYSE DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES MATERIAUX	197
II.1 - MESURES DES POROSITES	199
2.11 - DENSITE SOLIDE	199
2.12 - VOLUME MASSIQUE APPARENT	199
2.121 - Volume apparent gammamétrique	199
2.122 - Volume apparent sur cylindres	203
2.123 - Volume apparent sur mottes, sur pâtes et massifs d'agrégats com- pactés à l'oedomètre	204
II.2 - PROTOCOLE DE PREPARATION DES ECHANTILLONS POUR DETERMINATION DU VOLUME APPARENT TEXTURAL	204

LISTE DES PLANCHES PHOTOGRAPHIQUES

Planche 1 : Morphologie des échantillons naturels tassés, non tassés et remaniés.	77
Planche 2 : Morphologie des assemblages des échantillons sablo-argileux et sableux, non tassés et tassés.	78
Planche 3 : Morphologie des assemblages des échantillons remaniés et naturels.	80
Planche 4 : Morphologie des matériaux naturels compactés à l'oedomètre. Comparaison au matériau remanié.	148
Planche 5 : Morphologie des assemblages des matériaux naturels et remaniés.	149
Planche 6 : Effet de la succion initiale sur la morphologie des massifs d'agrégats compactés.	150

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Moyenne pentadaire des températures sous abri (1961/1980).	22
Figure 2 : Moyenne pentadaire des précipitations (1961/1980).	22
Figure 3 : Distribution des volumes pédologiques à Bou et St Benoit.	27
Figure 4 : Représentation des passages de roues de tracteur entre les labours et les semis ou plantation.	36
Figure 5 : Profils de teneurs en eau à Bou et St Benoit.	38
Figure 6 : Evolution des volumes apparents totaux avec les profondeurs en situation sablo-argileuse et sableuse.	46
Figure 7 : Evolution des volumes apparents totaux avec les profondeurs en Bou.3.	48
Figure 8 : Evolution des volumes apparents totaux avec les profondeurs à Saint- Benoit.	49
Figure 9 : Evolution des taux de saturation avec les profondeurs en situation sablo-argileuse et sableuse.	52
Figure 10 : Evolution des taux de saturation avec les profondeurs en Bou.3.	54
Figure 11 : Evolution des taux de saturation avec les profondeurs à St Benoit.	55
Figure 12 : Courbes de porosité au mercure des échantillons sablo-argileux (Bou.1; 0-10 cm) et sableux (Bou.2; 0-10 cm) ; a : courbes cumulatives d'entrée de mercure b : courbes correspondantes des distributions des volumes des pores.	66
Figure 13 : Courbes cumulatives d'entrée de mercure des échantillons prélevés dans chacune des situations intra-parcellaires.	69
Figure 14 : Courbes des distributions des volumes des pores ou spectres de porosité des échantillons prélevés dans chacune des situations intra-parcellaires.	70
Figure 15 : Evolution des volumes apparents mesurés sur mottes au cours de la dessiccation.	84
Figure 16 : Evolution des volumes d'eau au cours de la dessiccation des échantillons sablo-argileux (a) et sableux (b).	85

Figure 17 : Evolution des volumes d'eau rapportés aux taux d'argile au cours de la dessiccation des échantillons sablo-argileux (a) et sableux (b).	85
Figure 18 : Evolution des volumes d'eau au cours de la dessiccation des échantillons prélevés à Bou et St Benoit.	87
Figure 19 : Evolution des volumes d'eau rapportés aux taux d'argile au cours de la dessiccation des échantillons prélevés à Bou et St Benoit	88
Figure 20 : Intensité d'infiltration d'un sol initialement sec ou humide (HILLEL, 1974).	97
Figure 21 : Relation entre les conductivités hydrauliques en saturé (K_{sat}) et les volumes apparents totaux.	99
Figure 22 : Ajustement entre la conductivité hydraulique en saturé et la porosité structurale par la formule de Kozeny.	99
Figure 23 : Evolution des pressions et des déplacements au cours du temps, lors d'essais oedométriques à 2 et 6 kg/cm ² .	110
Figure 24 : Variations des volumes apparents en fonction des pressions appliquées (échelle logarithmique) : effet de la succion.	112
Figure 25 : Variations des volumes apparents en fonction des teneurs en eau. Effet de l'intensité de pression.	115
Figure 26 : Comparaison des variations des volumes apparents en fonction des teneurs en eau des différents échantillons compactés à 0.5, 2 et 6 kg/cm ² .	116
Figure 27 : Variations des volumes apparents en fonction des succions en eau. Effet de l'intensité de pression.	118
Figure 28 : Comparaison des variations des volumes apparents en fonction des succions en eau des différents échantillons compactés à 0.5, 2 et 6 kg/cm ² .	119
Figure 29 : Variations des indices des vides en fonction des teneurs en eau pour un matériau limono-argileux (GUERIF, 1987).	124
Figure 30 : Relation entre le rapport W_p/Ar et la densité mesurée lors d'un essai Proctor (GRABA, 1986).	124
Figure 31 : Courbes cumulatives d'entrée de mercure des échantillons naturels et remaniés prélevés dans les horizons tassés sous (25-40 cm) labour.	134

Figure 32 : Courbes des distributions des volumes des pores ou spectres de porosité des échantillons naturels et remaniés prélevés dans les horizons tassés (25-40 cm) sous labour.	135
Figure 33 : Courbes cumulatives d'entrée de mercure des massifs d'agrégats compactés à l'oedomètre sous une pression de 6 kg/cm ² . Effet de la succion initiale des agrégats.	138
Figure 34 : Courbes des distributions des volumes des pores ou spectres de porosité des massifs d'agrégats compactés à l'oedomètre une pression de 6 kg/cm ² . Effet de la succion initiale des agrégats.	139
Figure 35 : Courbes de porosité au mercure correspondant aux massifs d'agrégats de Bou.1 et St Benoit 3 compactés sous une pression de 2 kg/cm ² . Effet de la succion initiale des agrégats. a : courbes cumulatives d'entrée de mercure b : courbes correspondantes des distributions des volumes des pores.	140
Figure 36 : Evolution des profils de charges hydrauliques à Bou, après une phase pluvieuse : a - Bou.1 ; b - Bou.2 ; b -Bou.3.	166

FIGURES EN ANNEXE

Figure I.1 : Granulométries en fonction des profondeurs à Bou.	189
Figure I.2 : Granulométries en fonction des profondeurs à Saint-Benoit.	190
Figure I.3 : Courbes de la perte de masse de la fraction inférieure à 2 µm en fonction de la température.	193
Figure I.4 : Diffractogrammes RX obtenus avec la fraction inférieure à 2 µm sous forme de dépôts orientés, en fonction des différents traitements.	194
Figure I.5 : Diffractogrammes RX obtenus avec la fraction inférieure à 2 µm sous forme de dépôts orientés, en fonction des différents traitements.	195
Figure II.1 : La double sonde gammamétrique.	201
Figure II.2 : Dispositif de Richards.	201
Figure II.3 : Dispositif de mesure de la conductivité hydraulique en régime saturé	209

Figure II.4 : Dispositif de mesure des suctions in situ.	209
Figure II.5 : Dispositif oedométrique.	212
Figure IV.1 : Variations des volumes apparents en fonction des pressions appliquées (échelle logarithmique) : effet de la succion.	223
Figure IV.2 : Variations des volumes apparents en fonction des teneurs en eau. Effet de l'intensité de pression.	224
Figure IV.3 : Variations des volumes apparents en fonction des suctions en eau. Effet de l'intensité de pression.	225

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	: Données climatiques à Bricy. Moyennes des pluviosités et des évapotranspirations potentielles (formule de Brochet-Gerbier). Période 1961/1980.	23
Tableau 2	: Données climatiques pendant l'année d'étude. Pluviosités et évapotranspirations potentielles de décembre 1985 à novembre 1986.	24
Tableau 3	: Caractéristiques analytiques à Bou.	29
Tableau 4	: Caractéristiques analytiques à Saint-Benoit.	31
Tableau 5	: Indices granulométriques de matériaux sableux issus d'autres formations.	33
Tableau 6	: Itinéraires cultureux et caractéristiques techniques des outils utilisés.	35
Tableau 7	: Bilans des volumes apparents des pores (V_v) des situations sablo-argileuses et sableuses.	60
Tableau 8	: Bilans des volumes apparents des pores des situations intra-parcellaires de Bou et Saint-Benoit.	60
Tableau 9	: Relation entre les volumes apparents texturaux et les caractéristiques analytiques des matériaux.	62
Tableau 10	: Données obtenues en porosimétrie au mercure concernant les échantillons sablo-argileux et sableux.	68
Tableau 11	: Données obtenues en porosimétrie au mercure concernant l'ensemble des échantillons de Bou et Saint-Benoit.	68
Tableau 12	: Comparaison des volumes apparents (V_{tm}) déterminés en porosimétrie au mercure avec les volumes apparents totaux mesurés dans le pétrole.	73
Tableau 13	: Taux de saturation en eau (θ_s) de la porosité des mottes pour des succions comprises entre pF 1 et pF 3.	90
Tableau 14	: Relation entre l'état énergétique de l'eau dans le sol, la pression externe exercée et la taille maximale des pores correspondants.	91

Tableau 15 : Succions lors des travaux culturaux exprimées en kPa.	93
Tableau 16 : Exemple d'évolution des conductivités hydrauliques (K_{sat} , $mm.h^{-1}$) en régime saturé en fonction du temps (après une heure de mise à l'équilibre).	98
Tableau 17 : Données analytiques des matériaux compactés à l'oedomètre.	109
Tableau 18 : Analyse statistique des résultats oedométriques : corrélation de la forme : $V_{app} = A \log_{10} P + B$, entre les pressions appliquées (supérieures à 0.5 kg/cm^2) et les volumes apparents mesurés.	114
Tableau 19 : Comparaison des volumes apparents des massifs d'agrégats compactés à 2 et 6 kg/cm^2 et pF 1, aux volumes apparents texturaux.	114
Tableau 20 : Bilan volumique : volumes d'eau et taux de saturation (θ_s) lors du test oedométrique.	120
Tableau 21 : Contraintes critiques (σ_c) des matériaux compactés à l'état sec (pF 6).	123
Tableau 22 : Seuil du domaine visqueux (W_2) calculé à l'aide de l'ajustement statistique proposé par GUERIF et FAURE (1979) (test Proctor ; 0.6 kg J/dm^3).	126
Tableau 23 : Rapport W_p/A_r des échantillons compactés à pF 4.2.	127
Tableau 24 : Données obtenues en porosimétrie au mercure concernant les mottes, les agrégats et les pâtes.	136
Tableau 25 : Données obtenues en porosimétrie au mercure. Cas des massifs d'agrégats compactés.	136
Tableau 26 : Bilans de volume des échantillons initiaux et compactés.	142

TABLEAUX EN ANNEXE

Tableau A1 : Calendrier des mesures gammamétriques et des prélèvements d'échantillons.	217
Tableau A2 : Volumes apparents déterminés pour différentes échelles de mesure, dans chacune des situations intra-parcellaires de Bou et Saint-Benoit.	218

INRA Publications, Rte de St Cyr, 78026 Versailles Cedex
Dépôt légal : 3^{ème} trimestre 1989
ISBN : 2-7380-0173-4