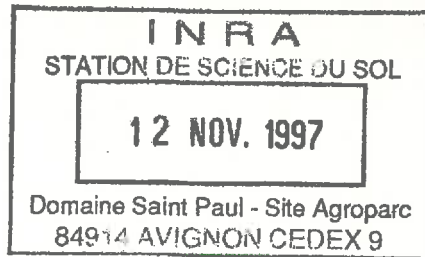


N° d'ordre :



Année 1971

THÈSE

TH-GB 3

présentée

A LA FACULTE DES SCIENCES

DE L'UNIVERSITE PAUL SABATIER DE TOULOUSE

en vue de l'obtention

DU GRADE DE DOCTEUR DE SPECIALITE (3e Cycle)

Spécialité : Biologie Végétale Appliquée

Option : Phytotechnique

par

ABDERRAHMAN ES-SIFAOU

ETUDE EXPERIMENTALE DE L'EVOLUTION

DE LA STRUCTURE DES SOLS AU COURS DE LEUR DESSICCATION

Soutenue le

devant la Commission d'examen :

MM. DIEHL Président

CALMON

BLANCHET

MONNIER

}

Examineurs

UNIVERSITE PAUL SABATIER TOULOUSE

DIRECTION DE L'UNIVERSITE

M. LAPING	Président
M. MATHIS	1er Vice-Président
M. MARTIN	2ème Vice-Président
M. HOUNIQ	3ème Vice-Président

HONORARIAT

M. BLAIZOT	Doyen honoraire
M. CAPDECOMME	Doyen honoraire, Recteur honoraire
M. DELTEIL	Doyen honoraire, Recteur honoraire, Professeur honoraire
M. DUPOUY	Membre de l'Institut, Doyen honoraire, Directeur Général honoraire du C.N.R.S., Professeur honoraire
M. DURAND	Doyen honoraire
M. FOUCHE	Professeur honoraire
M. GAUSSENS	Professeur honoraire, Correspondant de l'Institut
M. JACQUES	Professeur honoraire
M. MIGNONAC	Professeur honoraire
M. MORQUER	Professeur honoraire, Correspondant de l'Institut
M. SECHDAT	Professeur honoraire
M. TEISSIE-SOLIER	Professeur honoraire
M. VANDEL	Professeur honoraire, Membre de l'Institut

PROFESSEURS

M. ESCANDE	Mécanique des Fluides, Membre de l'Institut
M. CASTERAS	Géologie, Correspondant de l'Institut
M. BEDOS	Chimie
M. CAPDECOMME	Minéralogie
M. DUPIN	Radioélectricité
M. NOUVEL	Biologie Générale
M. GALLAIS	Chimie, Correspondant de l'Institut
M. DURAND	Physique
M. FERT	Physique
M. DIEHL	Agronomie
M. LESBE	Chimie Organique
M. BRUNEL	Physiologie Végétale
M. HURON	Mathématiques Appliquées
M. MARGULIS	Pédologie
M. TRICHE	Chimie Analytique et Spectrographie
M. LEDOUX	Zoologie Appliquée
M. RIVALS	Agriculture
M. PERRIER	Physique
M. MATHIS	Chimie

M. ORLIAS	Géochimie et Minéralogie
M. LAFCOURCADE	Physique
M. ANGELIER	Zoologie
Mlle DE FERRE	Botanique
M. FARRAN	Minéralogie et Géotechnique
M. LAUDET	Physique Théorique et Calcul Numérique
M. SERFATY	Biologie Animale
M. HOUGARO	Hydraulique Générale et Appliquées
M. LAGASSE	Electrotechnique
M. GARDY	Génie Chimique
M. BLANC	Physique Nucléaire
M. BIEBENT	Electronique Appliquée
M. VOIGT	Chimie Minérale
M. LEYEDDE	Botanique
M. LELUBRE	Géologie
M. TROCHAIN	Botanique
M. MASDUPUY	Chimie
M. LALAGUE	Mathématiques Générales
M. DESSENS	Physique du Globe, Correspondant de l'Institut
M. BOUIGUE	Astronomie
M. COUCRET	Physique
M. LEJEUNE	Chimie
M. LASCOMBES	Botanique
M. ACSELINBAU	Chimie Biologique
M. MAURET	Chimie systématique
M. AGED	Physiologie
M. MONTANT	Cryptogamie
M. GAUTIER	Physique
M. CRUIEYROLLE	Mathématiques
M. GOURINARD	Géologie
M. FULOU	Minéralogie
M. CAMBOU	Physique Spatiale
M. MIQUEL	Chimie
M. LACOSTE	Electrotechnique
M. THIBAUT	Mécanique Rationnelle et Appliquées
M. MONTEL	Chimie Physique et Electrochimie
M. MASCART	Mathématiques
M. MEDIONI	Psychophysiologie
M. THERRIOT	Hydrodynamique E.N.S.E.I.H.T.
M. BRENON	Géologie
M. LAFON	Calcul Différentiel Et Intégral
M. RAYHAUD P.	Physiologie Animale
M. ZALTA	Chimie Biologique
M. SEVELY	Electrotechnique
M. POMMEZ	Mathématiques
M. REY	Biologie Végétale
M. COULOMB	Physique
M. TRINQUIER	Physique
M. KARONI	Chimie
M. BEETSCHEN	Biologie Générale
M. GRUAT	Mécanique des Fluides (Hydraulique)
M. DERACHE	Physiologie Animale

PROFESSEURS ASSOCIES

M. MANSOUR	
M. SAKUHA	

PROFESSEURS SANS CHAIRE

M. SAMAIT	Botanique
Mme BRUNEL	Physiologie Végétale
Mlle BERDUCOU	Physiologie Végétale
M. PICCA	Physique
M. IERIC	Mathématiques Appliquées
Mme LEGAL	Zoologie
M. BUGAREL	Génie Chimique
M. LIROUSE	Géologie
M. PILOD	Physique
M. LARROQUE	Physique
M. BARRANS	Chimie
Mme LAFON	Mathématiques
Mlle LAPEYRE	Mathématiques (Informatique)
M. DAT	Mécanique des Fluides
M. JEANNIN	Chimie Minérale
M. BERTRAND	Chimie
M. SATGE	Chimie Organique
M. DESQ	Mathématiques
M. MAHENC	Chimie
M. LATTES	Chimie
M. ROCARD	Electronique
M. DEGEILH	Physique
M. FALLOT	Biologie Végétale (Viticulture et Arboriculture)
M. POILBLANC	Chimie
M. TOUZE	Physiologie Végétale
M. FRASHAY	Mathématiques
M. CASSAGNAU	Zoologie
M. GUERIN	Mathématiques

MAITRES DE CONFERENCES

M. BLANCHARD	Mathématiques
M. HOFFMANN	Electronique
M. BITSCH	Zoologie
M. FONTAN	Physique Nucléaire
M. PESCIA	Physique
M. SICARD	Biologie Génétique
M. CAUSSINUS	Mathématiques Appliquées
M. DE LOTI	Chimie Physique
M. MARTY	Physique Industrielle
M. BAUDRAS	Chimie Biologique
M. DURAND Ph.	Physique
M. LEFEUVRE	Electronique E.N.S.E.I.H.T.
M. SOUQUET	Géologie
M. SAPORTE	Physique
M. ATTELA	Mathématiques
M. ENJALBERT	Chimie
M. HIBERT	Psychophysiologie

M. SCHNEIDER Biologie Cellulaire
M. ANGELINO Génie Chimique
M. DABOSI E.N.S.C.
M. ETTINGER Mathématiques
M. CALVET Mécanique des Fluides (E.N.S.E.I.H.T.)
M. PAGANI Physique
M. CUPPENS Mathématiques
M. MATHIEU Chimie Analytique
M. TRANHOY Physique (E.N.S.E.I.H.T.)
M. CASTAGNETTO Mathématiques (E.N.S.E.I.H.T.)
M. GILOT Génie Chimique (Institut du
Génie Chimique)
M. CALMON Chimie du Sol

MAITRES DE CONFERENCES ASSOCIES

M. FUN
M. PARKS

CHARGES D'ENSEIGNEMENT

M. BEAUFILS Informatique
M. DARROZES Mécanique
Mlle BARBANCE Mathématiques

Personnel de la Faculté affecté à l'Institut National des
Sciences Appliquées de TOULOUSE -

PROFESSEURS

M. ROQUES Chimie Industrielle
M. GRATELOUP Génie Electrique

PROFESSEURS SANS CHAIRE

M. CASSIGNOL Génie Electrique
M. COLLETTE Physique
M. MASO Génie Civil

MAITRES DE CONFERENCES

M. FAGET Physique
M. TRUCHASSON Mécanique
M. SCHUTTLER Physique
M. RIRA Génie Electrique
M. LETURCQ Génie Electrique
H. SERIEYS Génie Civil
H. DURAND G. Chimie
M. CARRARA Physique

CHARGES D'ENSEIGNEMENT

M. VERDIER Chimie

Personnel affecté à l'Institut Universitaire de Technologie
de TOULOUSE -

MAITRES DE CONFERENCES

M. MARTIN Génie Electrique
M. PEREINOU Informatique
M. THENOZ Minéralogie

CHARGES D'ENSEIGIEMENT

M. REY Génie Electrique

ADMINISTRATION

M. PRINEAU Secrétaire Général

A ma Famille,

A mes amis,

Avec toute mon affection pour tout le dévouement dont ils ont fait preuve au cours de ces années d'études et de recherches.

AVANT - PROPOS

Ce travail a été réalisé au Laboratoire des Sols de l'I.N.R.A. de France. C'est le fruit de ma participation aux recherches d'une équipe dont l'objectif est l'étude des comportements physiques et mécaniques des terres en relation avec leur constitution minérale et organique.

Je voudrais donc, avant d'exposer les résultats de ce travail, exprimer ma profonde reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont encouragé dans sa réalisation.

Je prie Monsieur le Professeur DIEHL, Directeur de l'E.N.S.A.T., de bien vouloir accepter ma respectueuse gratitude pour m'avoir fait l'honneur d'assurer la Présidence du Jury de cette Thèse. Je le remercie aussi d'avoir, malgré ses lourdes tâches, suivi ce travail avec grand intérêt.

Je tiens également à adresser mes vifs remerciements à Monsieur CALMON, Maître de Conférences à l'École Nationale Supérieure Agronomique, qui a accepté de faire partie de mon Jury de Thèse.

Je suis particulièrement heureux d'avoir l'occasion d'exprimer à Monsieur MONNIER, Maître de Recherches au Laboratoire des Sols du C.N.R.A. de Versailles, ma très sincère reconnaissance pour les encouragements, les critiques et les conseils précieux dont il m'a fait profiter. Je ne saurais oublier son dynamisme et la chaleureuse assistance qu'il m'a prodiguée pour résoudre de nombreux problèmes d'ordre personnel. Je le remercie très vivement d'avoir été pour moi un soutien moral très précieux.

Ma reconnaissance s'adresse également à Monsieur BLANCHET, Directeur de la Station d'Agronomie du Centre de Recherches (I.N.R.A.) de Toulouse, ainsi qu'à Monsieur MAERTENS et Monsieur MARTY pour l'intérêt et les moyens de travail qu'ils m'ont accordés lors de mon séjour parmi eux. Je remercie aussi tout le personnel de la Station d'Agronomie de Toulouse pour l'accueil amical qu'il m'a réservé au cours de mon séjour à cette Station.

.../...

Je remercie Monsieur le Professeur HENIN, Membre de l'Académie d'Agriculture, qui m'a accueilli au C.N.R.A. et m'a toujours guidé de sa large expérience scientifique et agronomique.

Je remercie aussi Monsieur BETREMIEUX, Directeur du Laboratoire des Sols, qui m'a permis d'utiliser les moyens du Laboratoire.

Le travail expérimental en plein champ a été entièrement réalisé dans le cadre du Laboratoire d'Agronomie de l'I.N.R.A. Tunisie. Je me fais un devoir d'exprimer ma respectueuse gratitude à Monsieur STA M^r RAD Directeur de l'Institut qui m'a aidé dans la résolution de nombreux problèmes personnels et administratifs.

Mes remerciements vont également à Monsieur HUTTER, Maître de Recherches détaché auprès de l'I.N.R.A. Tunisie, qui a bien voulu m'aider au cours de l'étude expérimentale en plein champ et m'a éclairé de ses conseils et de sa grande expérience.

Je remercie également les Ingénieurs du Service Pédologique de Tunisie et plus particulièrement mon collègue et ami K. BEL KHODJA pour les renseignements précieux qu'ils m'ont fournis lors de l'étude préliminaire.

Je remercie d'autre part, le Gouvernement Tunisien et les Services de Coopération Technique Française qui m'ont accordé leur confiance en me facilitant la tâche sur le plan matériel.

Je remercie aussi le secrétariat du Laboratoire des Sols d'avoir assuré la dactylographie de cette Thèse.

Que toutes les personnes qui ont participé à titres divers, de loin ou de près, à l'élaboration de ce travail, trouvent ici le témoignage de ma profonde gratitude et plus particulièrement le personnel scientifique et technique du Laboratoire des Sols qui m'a témoigné son amitié pendant mon séjour au Centre.

Que ce modeste travail contribue au développement de mon pays, tel est mon vœux le plus cher.

* * *

INTRODUCTION

L'état physique du sol résulte de l'influence propre de plusieurs facteurs et des interactions qui se manifestent entre eux. Certains sont extérieurs au sol, tels que le climat ou des éléments participant à la définition du système de culture. D'autres sont liés au sol. Ce sont essentiellement la texture qui procède de la distribution dimensionnelle des particules élémentaires et la structure déterminée par leur mode d'arrangement.

La texture du sol définie comme étant l'ensemble des propriétés qui résultent directement de la taille et de la nature de ses constituants (HENIN, MOINIER, GRAS, 1969 - DUTHIL 1970), est une caractéristique relativement permanente.

Les particules élémentaires telles qu'on les trouve dans la composition de base du matériau peuvent être simplement juxtaposées. On a alors une structure monoparticulaire. C'est le cas de certains sables.

Ils peuvent au contraire, donner naissance à des éléments complexes résultant de leur agglomération sous l'action de ciments (colloïdes minéraux et organiques du sol).

Ceci donne naissance à deux types de structures :

- Les structures continues
- Les structures fragmentaires

Une structure continue se caractérise par un assemblage cimenté où il n'existe pas de système de fissures.

Une structure fragmentaire comporte un ou plusieurs systèmes de fissures délimitant des éléments de taille et de forme plus ou moins régulières.

Les éléments structuraux se constituent dans le sol, soit sous l'effet de facteurs naturels tel que le climat, soit sous l'action d'agents extérieurs telles que les façons aratoires. La structure d'un sol ne le définit qu'à un moment donné ; elle est susceptible d'évoluer. Ce n'est donc pas une propriété mais un état. Son étude doit porter sur ses deux caractéristiques essentielles : sa morphologie et son évolution.

Tandis que la morphologie caractérise l'état structural, l'aspect dynamique s'intéresse à son évolution dans le temps sous l'effet d'agents extérieurs. Celle-ci peut être une désagrégation - dislocation des associations de particules - sous l'action d'un excès d'eau principalement. Elle peut être aussi un remaniement des assemblages existant. Cette modification peut résulter d'une fissuration ou, au contraire, d'une coalescence des éléments initiaux.

La désagrégation sous l'action de l'eau a fait l'objet de nombreuses études et de diverses publications depuis les travaux de SCHLOESING (1885) de YODER (1936) en passant par ceux de HENIN (1938) et CONCARRET (1965). Ces études ont abouti à la mise au point de test (HENIN et MOINIER, 1956) permettant

d'évaluer la résistance de l'état physique du sol à l'action de l'excès d'eau. Actuellement, ce genre d'évolution est bien connu et théoriquement assez bien contrôlé par des techniques dérivées de l'analyse des facteurs de stabilité (MONNIER 1965, KHEYRABI 1966, SEBILLOTTE 1968, KOHAN 1969).

Cependant, outre l'excès d'eau, le départ de celle-ci peut avoir un effet néfaste sur l'état structural du sol. Dans certains cas, il provoque l'évolution particulière de l'état physique vers la prise en masse à la dessiccation.

Nous possédons peu d'informations sur cette transformation de la structure sans désagrégation.

Le phénomène peut être décrit de la façon suivante :

- à la sortie de l'hiver - Le sol étant humide et présentant un état structural fragmentaire de petites dimensions - quand survient une période de sécheresse, certains sols présentent de nombreuses fentes de retrait qui deviennent de plus en plus larges et de plus en plus profondes au fur et à mesure que la dessiccation se poursuit. Elles délimitent alors des prismes de terre de grande taille (photo 1) et dont l'intérieur présente une structure continue et compacte. Ces mottes massives et fortement cohérentes constituent un obstacle au travail du sol et à l'installation de nouvelles cultures.

* * *

L'objet de ce travail est d'étudier ce phénomène de prise en masse et de préciser les facteurs qui le déterminent. Deux raisons majeures nous ont conduit à nous engager sur cette voie.

En effet, sur le plan fondamental, la prise en masse à la dessiccation constitue un cas particulièrement typique de remaniement structural, ayant de surcroît l'avantage de se manifester à une échelle macroscopique susceptible de faciliter son étude.

Sur le plan pratique, cette évolution de la structure du sol est très fréquente dans plusieurs régions de la Tunisie. Elle pose des problèmes de travail du sol et affecte probablement les rendements des cultures.

* * *



PHOTO n°1

Aspect d'un terrain pris en masse à la dessiccation

La photo montre les fontes de retrait (5 à 7 cm de large) et les prismes de terre qu'elles délimitent (taille : une trentaine de centimètres) (Béja).

Contrairement à la prise en masse à l'humectation les contours et la surface des prismes sont arrondis et non anguleux.

Pour préciser les conditions d'apparition de ce phénomène et rassembler les données nécessaires permettant d'aborder son étude par la voie expérimentale, nous avons procédé à une étude préliminaire. Celle-ci a été réalisée en Tunisie. Elle a pour objectif essentiel de rassembler des renseignements concernant l'influence probable de certains facteurs sur le phénomène de prise en masse à la dessiccation.

Nous avons dès le début, écarté le cas des sols salés (1) où la prise en masse lorsqu'elle intervient, se produit à l'humectation - dispersion de l'argile sodique - (HEBEN, MONIER et HUTTER, 1963).

Une étude assez approfondie nécessiterait la collecte de données et de renseignements concernant toutes les régions de Tunisie où le phénomène est signalé, ainsi que des observations de sol en place. Pour la réaliser en un temps limité, il fallait pouvoir réduire la durée de sa préparation. Ceci nous a été possible grâce aux renseignements recueillis auprès de W. HUTTER - Chercheur à l'I.N.R.A. Tunisie - et des ingénieurs du service pédologique. Nous avons pu, ainsi localiser les régions où la prise en masse à la dessiccation est fréquente. Un échantillon d'exploitations a été retenu dans les régions de Beja, Mateur, Bon Salem et Pont du Fahs (cf. carte de la Tunisie).

Nous nous sommes alors adressés à certains agriculteurs de ces régions, et aux responsables locaux de l'Agriculture. Les renseignements recueillis concernent :

- la localisation des sols où la prise en masse est fréquente,

- la période d'apparition de larges fentes de retraits accompagnées de la formation de gros blocs prismatiques à structure massive et continue,

- la répercussion de la prise en masse à la dessiccation sur le travail du sol, (difficulté de briser les grosses mottes très cohérentes) et sur l'installation de nouvelles cultures (préparation du lit de semence). Dans ce dernier cas, l'interprétation de ces difficultés permet d'apprécier l'intensité du phénomène et de le relier à des propriétés physiques du sol.

Ces renseignements ont été complétés par des observations sur un certain nombre de parcelles où la prise en masse à la dessiccation se manifestait nettement. Une tranchée a été creusée de façon à obtenir un profil cultural intéressant une couche de terrain épaisse de 0,80 mètre environ. Cette dimension permet d'observer par ailleurs l'incidence éventuelle des traces de passage d'outils aratoires.

L'examen du profil a été fait en mettant l'accent sur les éléments en relation probable avec la prise en masse :

- la texture du sol (appréciée au doigt sur le terrain)

(1) Les sols salés ont fait l'objet d'une Thèse d'Ingénieur-Docteur par K. BELKHODJA 1970 - Faculté des Sciences Toulouse

- la structure initiale du terrain (les mottes, leur taille et leur cohésion
- les fentes de retrait, leur largeur, leur profondeur.

Cette étude préliminaire conduit aux conclusions provisoires suivantes :

1°) La prise en masse à la dessiccation se manifeste dans les sols argileux.

2°) Il est probable que l'état structural d'un sol intervient dans son évolution vers la prise en masse à la dessiccation. En effet, le phénomène semble lié à la présence d'un grand taux de terre fine fabriqué lors du labour avant l'hiver, ainsi qu'à un certain compactage du sol en surface (traces de roues de tracteur par exemple).

3°) La prise en masse semble exiger un taux minimum d'humidité en hiver (après l'installation des cultures) suivi d'une évaporation intense. Un hiver ou un printemps très pluvieux suivi d'un été très sec (à fort pouvoir évaporant) accentue le phénomène.

4°) La prise en masse à la dessiccation semble plus marquée et plus fréquente en sol nu qu'en sol cultivé.

*
* *

Tirant partie de cette étude préliminaire, nous avons tenté une analyse des mécanismes qui régissent la prise en masse à la dessiccation. C'est l'objet du travail réalisé au laboratoire.

Parallèlement, un dispositif expérimental a été installé à Béja et à Bou Rebia en Tunisie, en vue de vérifier la concordance des résultats obtenus au laboratoire et aussi d'envisager l'application agronomique de ce travail.

P R E M I E R E P A R T I E

E T U D E S U R M O D E L E S

*

*

POUR METTRE EN EVIDENCE ET PROVOQUER LE PHENOMENE
DE PRISE EN MASSE AU LABORATOIRE, EN CONTROLANT
CERTAINS FACTEURS - TELLES QUE LA TEMPERATURE ET
L'HYGROMETRIE - NOUS AVONS OPERE SUR DES MODELES
EXPERIMENTAUX

*

*

CHAPITRE PREMIER

MATERIEL ET TRAITEMENT

I - LE MATERIEL EXPERIMENTAL -1°) Les pots -

Ce sont des pots en lucoflex de 15 cm de hauteur et 20 cm de diamètre. Chacun est constitué de deux demi-cylindre rassemblés par une attache, ce qui permet de les ouvrir sans difficulté en fin d'expérience (photo 2).

Les observations du sol en place montrent que le phénomène de prise en masse intéresse surtout la couche travaillée du sol, épaisse d'une vingtaine de centimètres environ. De plus, les éléments pris en masse ont des dimensions de l'ordre de 15 à 20 centimètres en moyenne. Ceci a déterminé le choix des dimensions des modèles employés.

Si l'on prend des pots très hauts, les phénomènes de bordure deviennent beaucoup plus importants que les phénomènes de surface, ce qui entraîne un décollement de la terre en litages, causant un gradient de fissuration lié à la dessiccation du haut vers le bas.

En raison des difficultés techniques rencontrées, nous n'avons pu utiliser des pots de diamètre plus important.

2°) Les sols étudiés -a) Nature des sols.

Pour cette étude, quatre sols provenant de régions différentes ont été retenus. Leurs caractéristiques essentielles sont portées sur le tableau I. La nature de leurs argiles est révélée par les diagrammes aux rayons X.

.../...

TABIEAU 1

Caractéristiques essentielles des terres étudiées

	BEJA	BOU PEBIA	LUNEVILLE	HORIZON B DE VERSAILLES
< 2 μ	56,6	46,7	48,8	28,5
2 - 20 μ	23,8	37,7	28,6	24,0
20 - 50 μ	5,2	5,0	4,7	45,0
50 - 200 μ	6,6	4,5	4,8	1,5
200 - 2000 μ	1,9	1,8	6,9	0,5
Totale	2,47	1,37	3,04	0,50
Matière organique % de la terre sèche	93,36	96,46	95,65	97,40
Capacité d'échange en meq pour 100 g	49,6	25,0	30,2	-
Fraction argileuse	65,0	51,0	39,5	48,5
Total	13,2	41,9	6,8	-
< 2 μ	2,7	7,6	traces	-
2 - 20 μ	4,8	26,3	5,9	-
20 - 2000 μ	5,3	7,6	0,6	-
Ph.	8,0	8,3	7,9	-

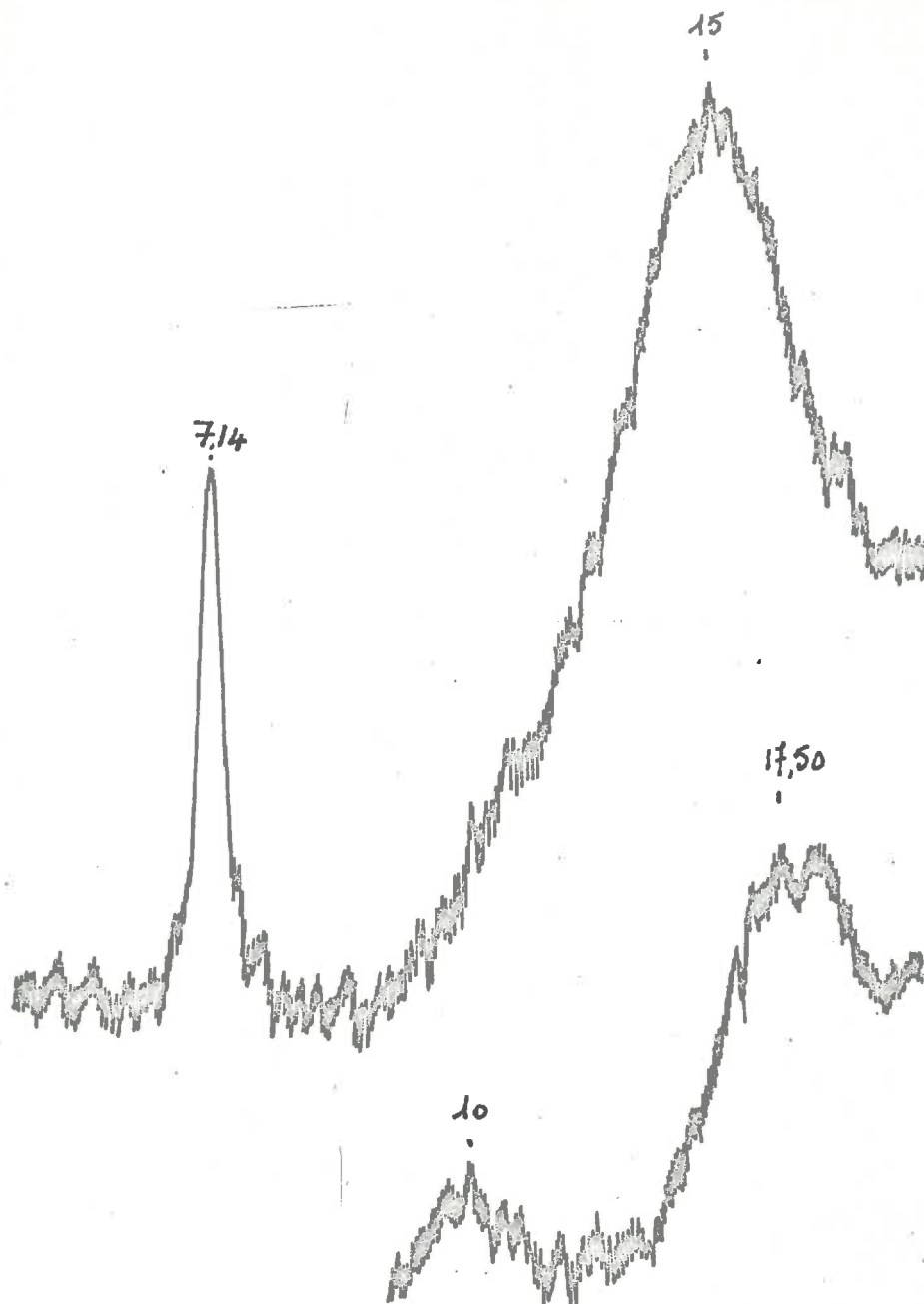


Diagramme aux rayons X - (argile de Béja)

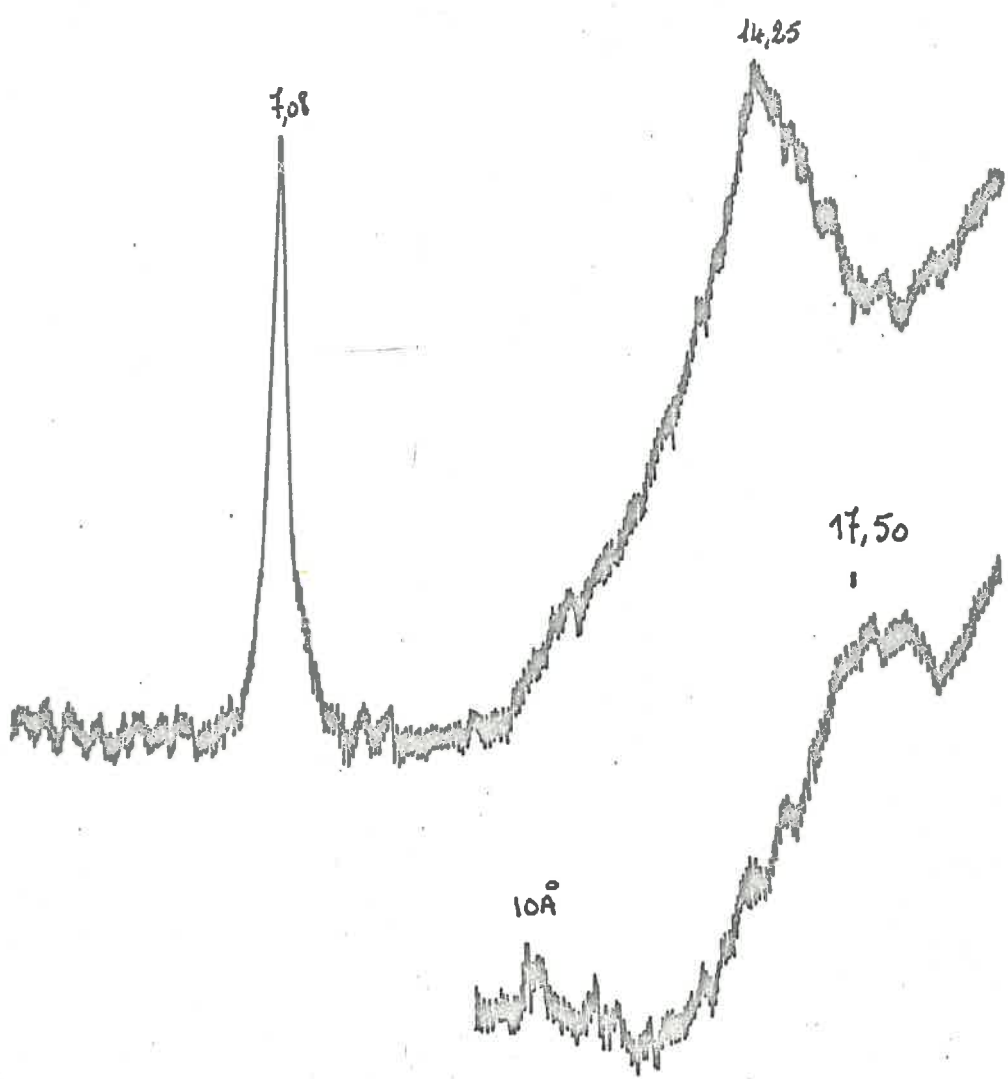


Diagramme aux rayons X - (argile de Bou Rebia)

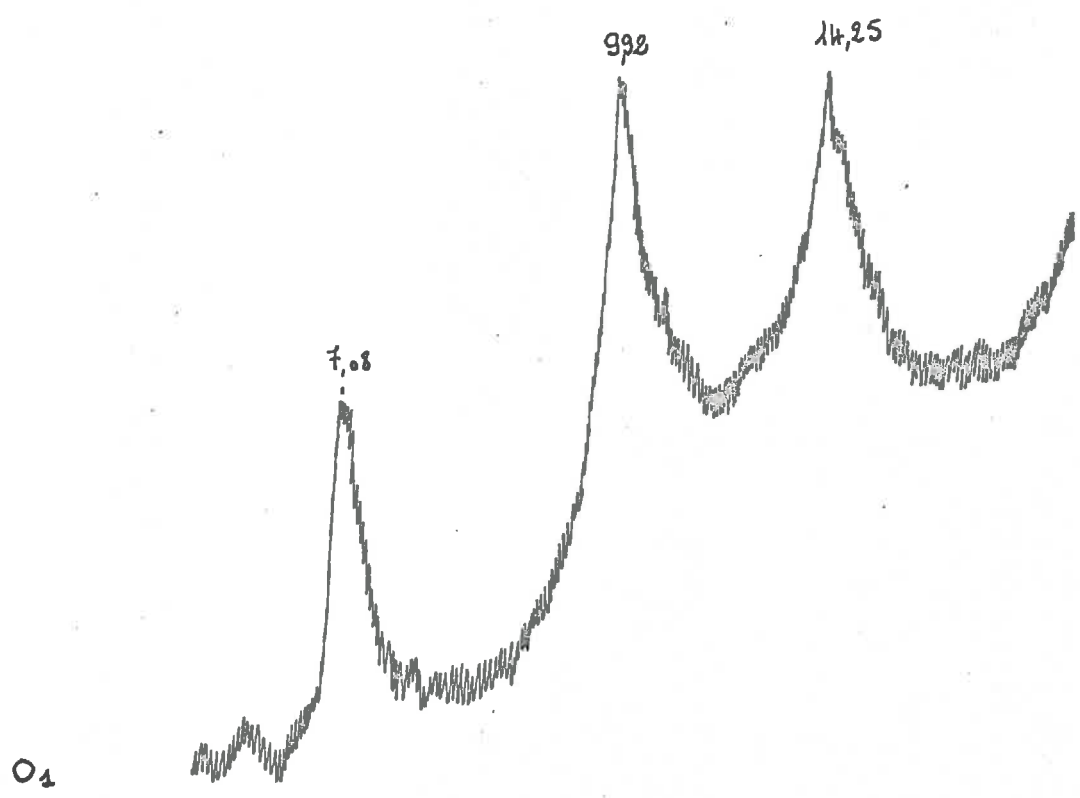


Diagramme aux rayons X - (argile de Lunéville)

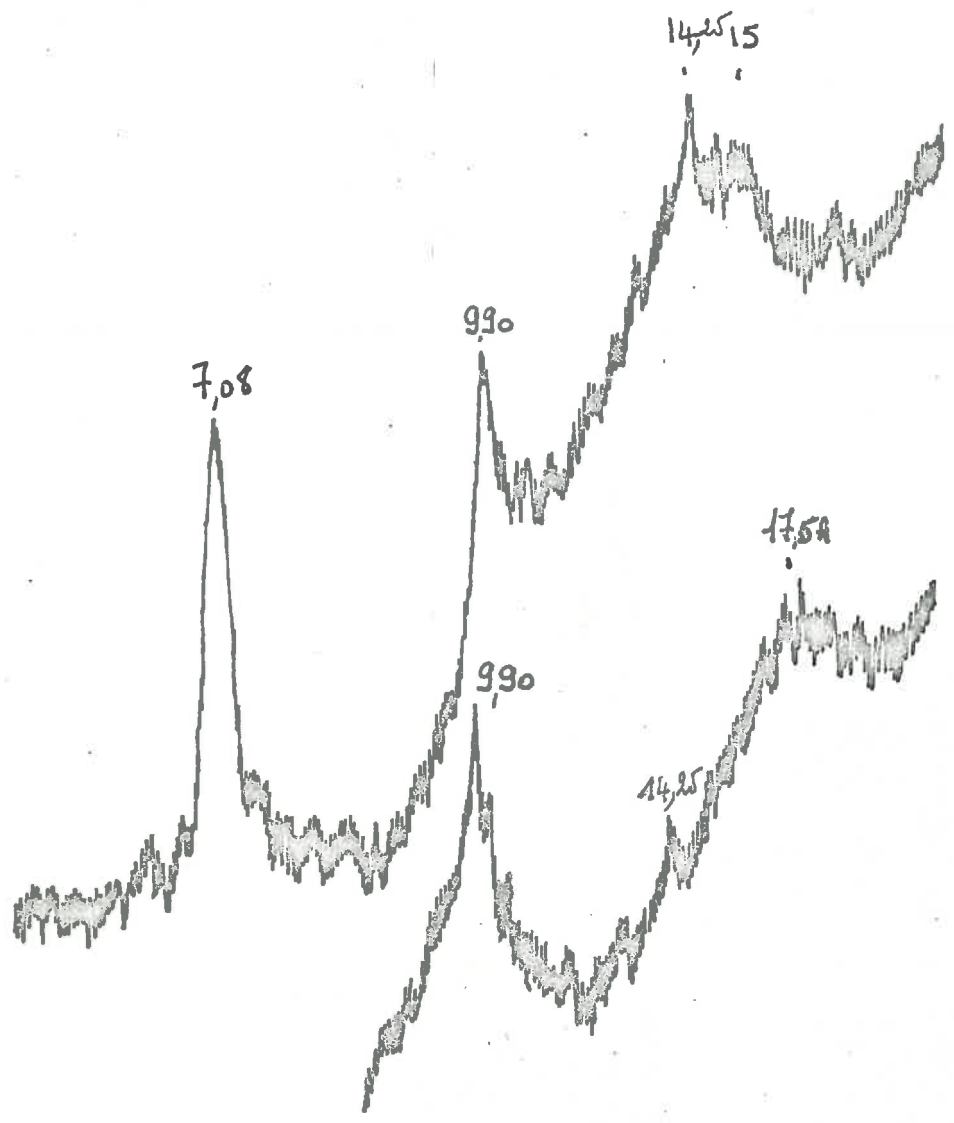
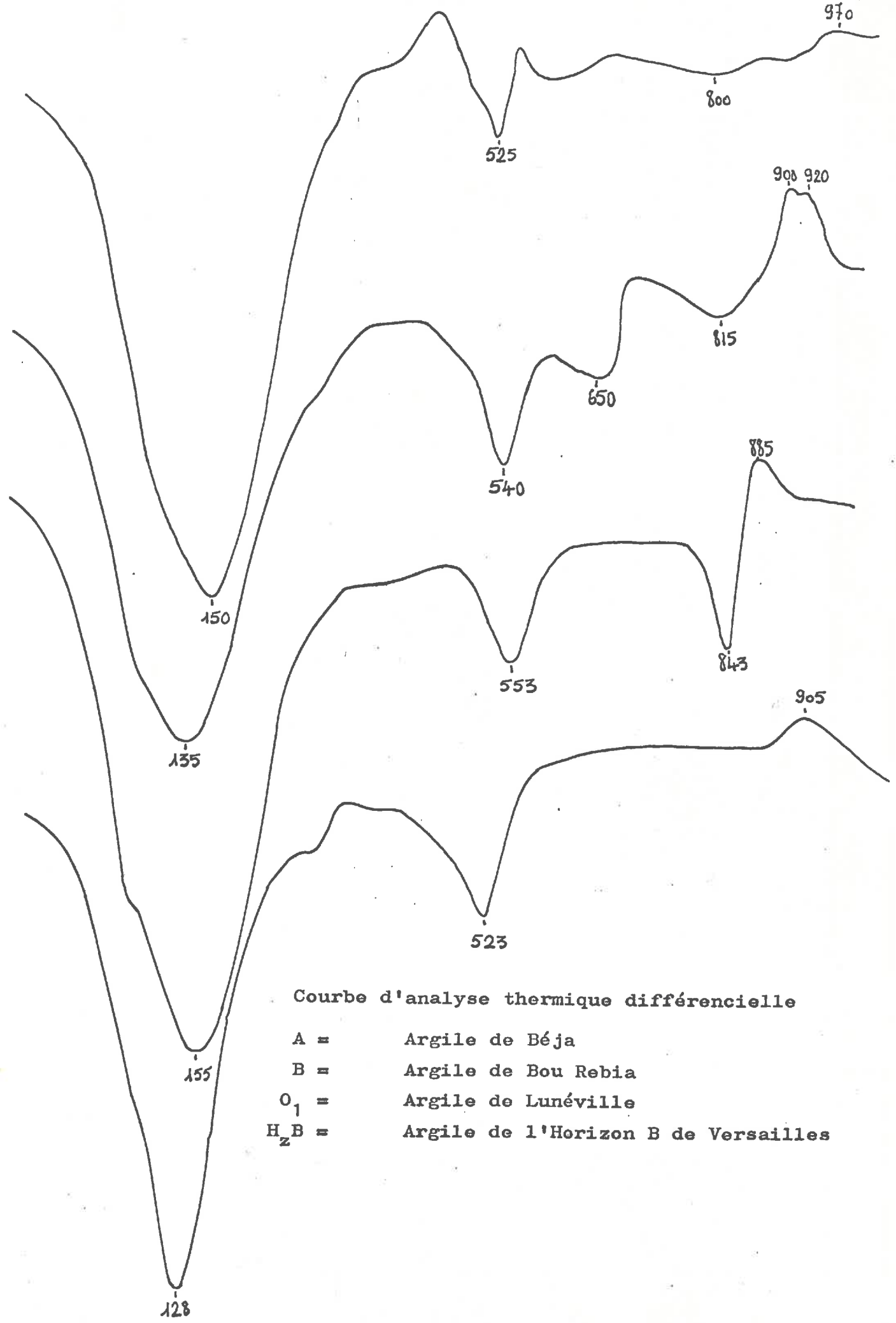


Diagramme aux rayons X - (argile de l'Horizon B de Versailles)



Courbe d'analyse thermique différentielle

- A = Argile de Béja
- B = Argile de Bou Rebia
- O₁ = Argile de Lunéville
- H₂B = Argile de l'Horizon B de Versailles

Deux sols proviennent des parcelles expérimentales de l'I.N.R.A. Tunisie. Nous les appellerons du nom de leur lieu d'origine : Béja et Bou Rebia (voir carte Tunisie). Le choix de ces deux sols découle directement de l'étude préliminaire. En effet, ils se prennent en masse à la sortie de l'hiver, dans le milieu naturel.

D'autre part, cette étude a montré que le phénomène de prise en masse à la dessiccation se manifeste dans le cas des sols argileux à fort pouvoir de retrait. Nous avons donc retenu un autre sol (1) présentant ces caractéristiques. Il provient de la région de Lunéville, à l'Est de la France. De plus, cette région est soumise à un climat continental avec un printemps très humide et un été très sec.

L'étude préliminaire a révélé aussi que la prise en masse affecte des sols résistant à la dégradation par excès d'eau.

Comme témoin, nous avons alors retenu un sol qui ne présente pas, dans le milieu naturel, le phénomène de prise en masse à la dessiccation. Par ailleurs, ce sol est stable, ce qui évite la destruction des agrégats à l'humectation. Ainsi, une éventuelle prise en masse de ce sol au laboratoire pourra être attribuée à la dessiccation et non à l'humectation. C'est l'horizon B des cases lysimétriques de Versailles.

b) Les éléments structuraux.

Diverses observations, dans le milieu naturel montrent que la prise en masse s'accompagne d'une "soudure" des éléments structuraux de départ et d'une forte diminution de porosité interstitielle (2). Aussi, avons-nous travaillé sur deux systèmes de porosité interstitielle :

1) - Un réseau de porosité interstitielle étroit et grossier formé par des éléments calibrés dont les dimensions sont comprises entre 5 et 10 mm.

(1) Nous le devons à l'amabilité de P.L. OSTY, Ingénieur au Service d'Expérimentation et d'Information - IIRA-Versailles.

(2) Nous appellerons porosité interstitielle, l'espace libre laissé entre les agrégats individualisés.

La Tunisie se divise traditionnellement en quatre grandes régions naturelles :

Le Nord, traversé d'Ouest en Est par le prolongement de l'Atlas (Monts de Kroumirie) constitue la zone où la pluviométrie est la plus élevée : 600 à 800 millimètres par an. C'est une région essentiellement agricole dans laquelle la Vallée de la Medjerdah constitue l'une des plaines les plus riches du pays.

Le Sahel, est une zone côtière qui s'étend du Cap Bon au Sud de Sfax : c'est la zone idéale pour la culture de l'olivier, qui constitue avec la pêche et une activité artisanale intense la richesse principale de la région.

Le Centre constitue une zone steppique séparée du Nord du Pays par la dorsale (Djebel Chambi 1.544 m), où l'influence de la mer ne se fait plus sentir. Là la possibilité d'irrigation est relativement limitée et la pluviométrie y est inférieure à 400 millimètres. C'est essentiellement une zone d'élevage.

Le Sud est une zone prédésertique où la pluviométrie est inférieure à 200 millimètres par an, ses principales ressources viennent des oasis qui permettent quelques cultures (marafchages et dattes notamment) et un peu d'élevage.



2) - Un réseau de porosité interstitielle étalé dans plusieurs classes de dimensions (tableau 2) formé par des éléments dont la taille est inférieure à 2 mm.

TABLERAU 2

Eléments < 2 mm répartis par classe de taille
(en % de la prise d'essai)

Taille	% d'éléments
1 à 2 mm	50,04
0,5 à 1 mm	25,00
0,2 à 0,5 mm	13,20
< 0,2 mm	11,76

La porosité interstitielle de chacun des deux systèmes peut être établie de la façon suivante

$$P = \frac{D_r - D_a}{D_r} \times 100$$

Nous prenons comme densité réelle dans chacun des deux systèmes, la densité apparente de chaque agrégat, en admettant qu'elle est la même pour tous les agrégats ; elle est de 1,85 pour les sols argileux étudiés. Cette valeur correspond à la D_a quelle que soit compaction de mélange binaire ayant sensiblement le même taux d'argile que les échantillons étudiés (FIES, FAURE). Les densités apparentes des systèmes (1) et (2) sont respectivement de 1,07 et 1,16.

Les porosités respectives sont alors :

$$(1) \quad \frac{1,85 - 1,07}{1,85} \times 100 = 42,16 \%$$

$$(2) \quad \frac{1,85 - 1,16}{1,85} \times 100 = 37,20 \%$$

La porosité interstitielle rapportée à la surface externe représente le rayon hydraulique moyen.

La surface mouillable peut être calculée par la formule:

$$S = \frac{6 P}{\rho \bar{D}}$$

P = poids des particules solides

\bar{D} = diamètre moyen des particules

ρ = Da des particules

Ce qui donne pour le système (1)

$$S = \frac{6 \times 1}{1,85 \times 0,75} = 4,32 \text{ cm}^2/\text{g de terre}$$

Un calcul analogue, en tenant compte de la distribution par classe des éléments < 2 mm, donne pour le système (2) une surface de 74,12 cm²/g de terre.

Dans 1 g de terre du système (1), le volume non occupé par les particules solides est :

$$\frac{1,07 \times 42,16}{100} = 0,4511 \text{ cm}^3$$

Le rayon hydraulique moyen est alors :

$$\frac{0,4511}{4,32} = 0,1044 \text{ cm, soit } 1044 \mu$$

Dans le système (2) on a :

$$\frac{1,16 \times 37,2}{100} = 0,4315 \text{ cm}^3$$

et le rayon hydraulique moyen est :

$$\frac{0,4315}{74,12} = 58,2 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3 \text{ soit } \approx 58,2 \mu$$

II - LES TRAITEMENTS -

1°) Remplissage des pots -

La terre séchée à l'air, concassée et tamisée aux dimensions voulues est versée sans tassement dans les pots

.../...

tout en prenant soin d'éviter la formation de litages.

Pour maintenir la terre et permettre son humectation en limitant la destruction des éléments structuraux, les pots sont fermés à la base par une toile de nylon dont les mailles carrées ont 0,5 mm (photo 2).

2°) Préhumectation des pots -

Les pots ainsi remplis sont humectés par capillarité à partir d'un sable humide. Le plan d'eau est maintenu au niveau de la surface de contact sable - colonne de terre.

Les pots restent sur ce "milieu poreux" vingt quatre heures après l'apparition du front d'humectation à la surface supérieure de la colonne de terre. Ensuite, ils sont répartis en deux groupes A et B.

Remarque :

Pour humecter des colonnes de terre en limitant les risques de dégradation, on devrait opérer sous vide et à partir d'un milieu à porosité fine.

Cependant nous n'avons pas eu recours à ce moyen pour les raisons suivantes :

1) - Nous avons opéré sur des matériaux stables quant à la dégradation par excès d'eau.

2) - Difficultés techniques : l'humectation sous vide nécessiterait une installation hors de proportion avec le gain attendu.

3°) Régimes hydriques imposés aux pots -

a) Régimes d'humectation.

La prise en masse étant liée au retrait (étude préliminaire), le gonflement de la terre doit donc être réalisé. Aussi avons-nous retenu deux valeurs d'humidité pour le début de nos expériences :

- La valeur correspondant à la capacité de rétention : c'est l'humidité du sol la plus probable à la sortie de l'hiver.

- La "saturation" : nous nous sommes placés dans des conditions de gonflement maximum, cherchant à remplir la macro et la microporosité.

Réalisation de la capacité de rétention

Les pots du groupe (A) sont soumis à un ressuyage en les posant sur le même sol sec ayant la même structure. Nous avons opéré d'après la méthode FEODOROFF.

Le ressuyage est d'abord rapide, puis il se ralentit. La courbe représentative (graphique 1) révèle entre les deux régimes une discontinuité dont la valeur correspond à la capacité de rétention.

En effet, FEODOROFF (1964) a vérifié expérimentalement que la capacité de rétention concorde avec le changement de rythme dans le ressuyage d'un sol précédemment gorgé d'eau.

Nous avons donc opéré dans des conditions analogues à celle de FEODOROFF exceptée la hauteur de la colonne de terre qui est plus grande.

Dans un essai annexe, nous avons été conduit à déterminer la capacité de rétention des sols étudiés. Les résultats obtenus sont portés dans le tableau 3.

Courbe de dessuyage à une terre argileuse

(Terre de Lunéville) éléments < 2 mm

Graphique 1

H₂O en % de terre sèche

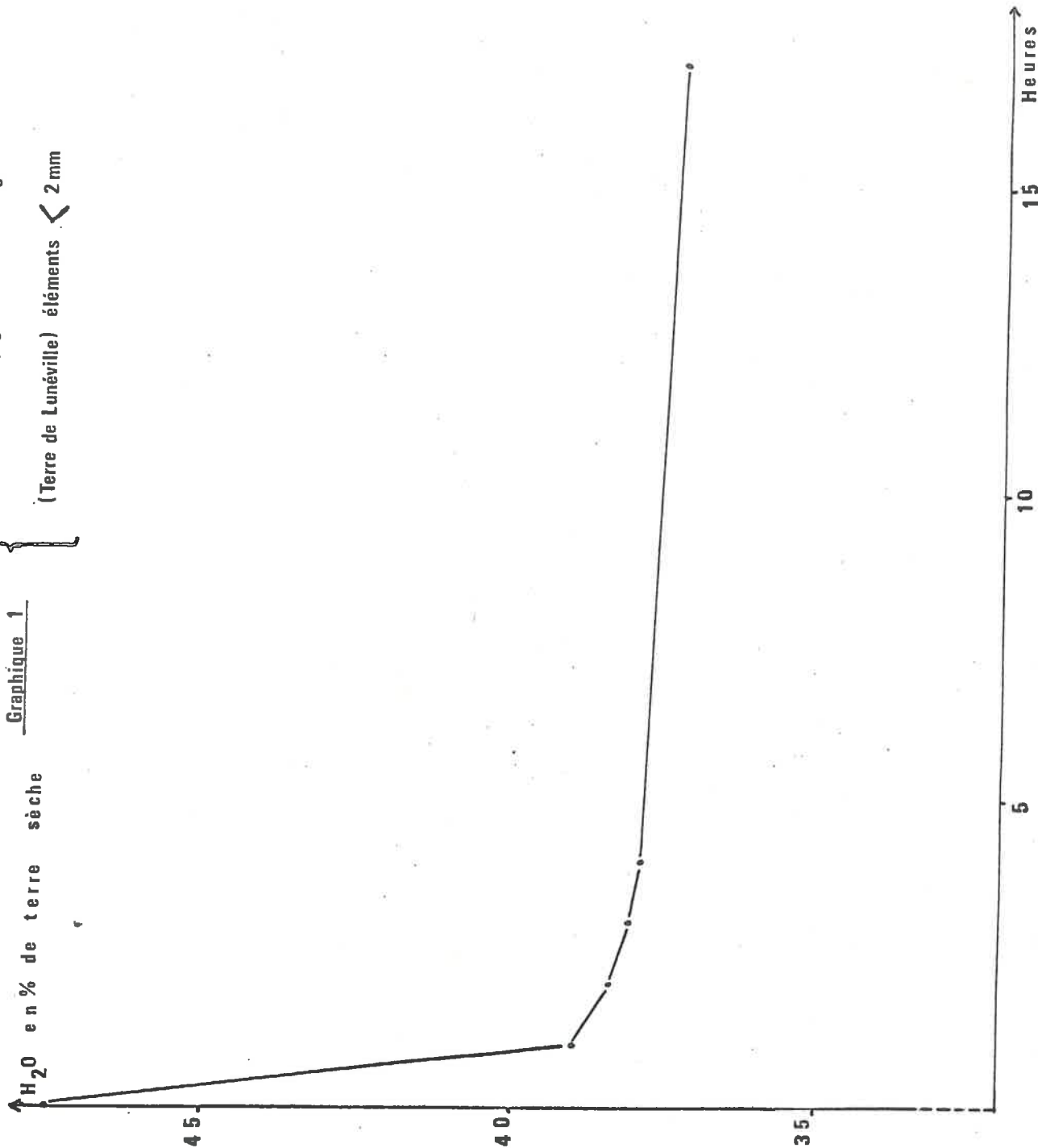


TABLEAU 3

Humidités correspondantes à la capacité de rétention en fonction de la taille des éléments structuraux (terre de Lunéville)

Taille des éléments structuraux (mm)	Humidité correspondante à la capacité de rétention exprimée en % du poids de terre sèche
< 1	43,1
1 - 2	35,4
2 - 3	34,4
3 - 5	33,4
5 - 10	32,0

L'examen du tableau 3 et du graphique 2 montre que la capacité de rétention d'un sol est fonction non seulement de sa texture, mais aussi de sa structure.

Humectation à "saturation"

Les pots du groupe (B) sont plongés progressivement dans l'eau jusqu'au niveau supérieur de la colonne de terre.

Dans un essai préliminaire, nous avons vérifié que les agrégats humectés d'abord de façon ménagée (par capillarité), ensuite immergés progressivement, ne se désagrègent pas quand les deux opérations se succèdent rapidement.

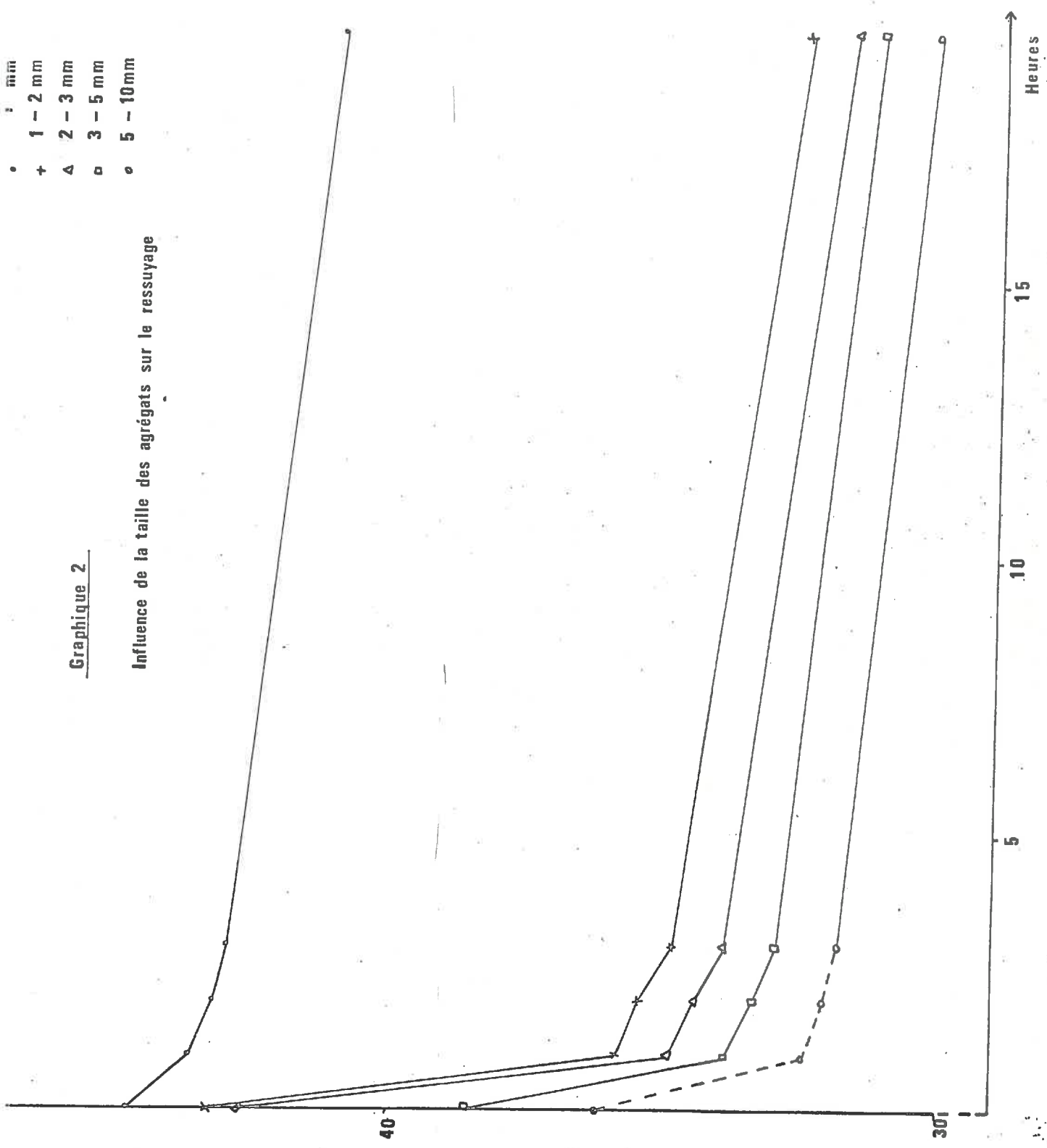
b) Régimes d'évaporation.

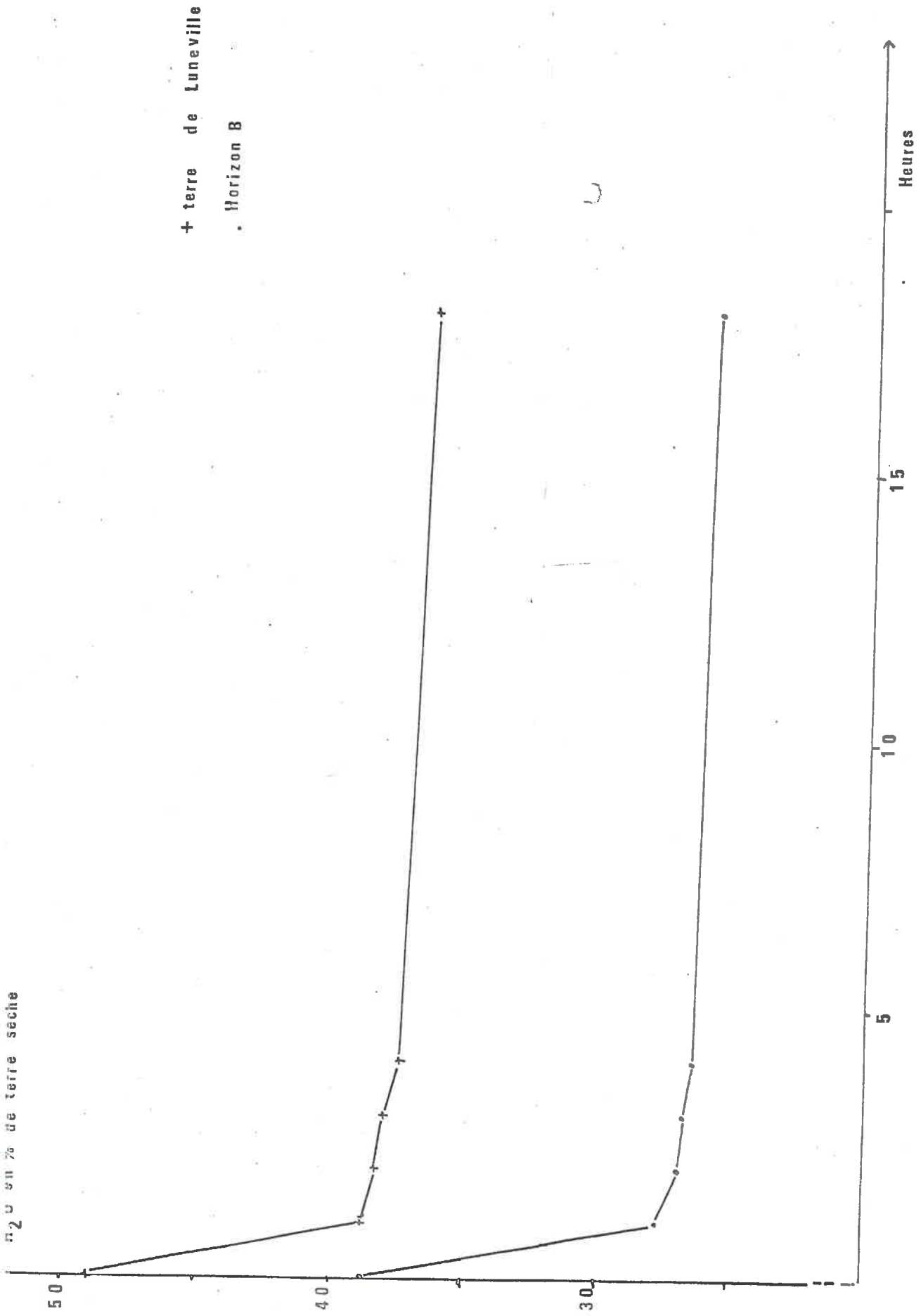
Il ressort de l'étude préliminaire que la prise en masse est plus importante en sol nu, qu'en sol cultivé.

.../...

Graphique 2

Influence de la taille des agrégats sur le ressuyage





+ terre de Luneville
o Horizon B

Graphique 2 bis : Influence de la texture sur le ressuyage

p20 en % de terre seche

L'évaporation est plus localisée ; elle se fait alors par la surface et par les fissures seulement (au moins au départ). De plus, le phénomène semble lié à l'intensité de la "demande" climatique. Ceci nous a amené à fixer deux vitesses d'évaporation (tableau 4).

Les pots du groupe (A) (humectation à la capacité de rétention) et ceux du groupe (B) (humectation à "saturation") sont donc répartis en deux sous-groupes I et II.

Dans le sous-groupe I, les pots A_I et B_I sont soumis à une évaporation intense sous des lampes à infra-rouge de 250 W suspendues à 0,30 mètre de la surface supérieure de la colonne de terre (photo 3).

Dans le sous-groupe II, les pots A_{II} et B_{II} sont soumis à une évaporation plus lente sous l'atmosphère ambiante d'une serre maintenue à 20°C.

TABLEAU 4

Evaporation en millimètres d'eau par 24 heures
le 1er jour de l'expérience (pots humectés à
"saturation")

Mode d'évaporation	Taille des éléments structuraux	Quantité d'eau évaporée (mm/24 h)
évaporation sous serre	< 2 mm	2,09
	5 - 10 mm	1,99
évaporation sous lampe	< 2 mm	17,23
	5 - 10 mm	14,84

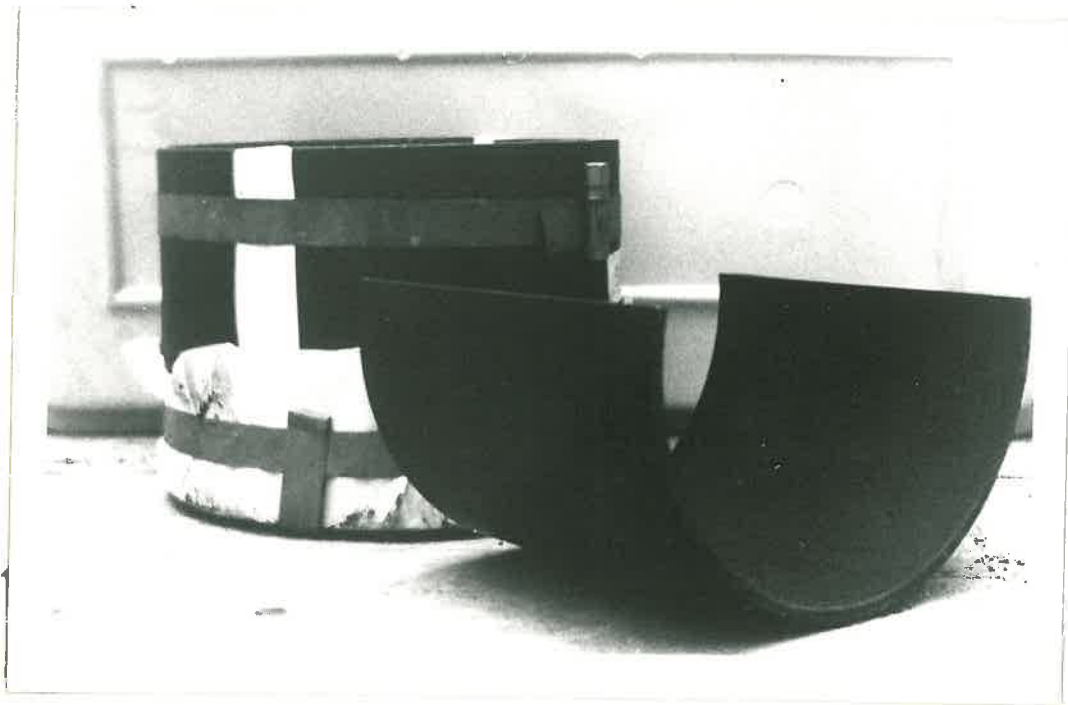


PHOTO n°2 : Exemple de pot utilisé



PHOTO n°3 : Dispositif d'évaporation sous lampe

Les lampes sont entourées de 4 faces réfléchissantes (plaques en acier inoxydable) permettant de réfléchir le maximum de rayonnement vers les colonnes de terre.

.../...

TABLEAU 5

Tableau récapitulatif des différents traitements
appliqués aux modèles

Humectation Evaporation	à la capacité de rétention Groupe (A)	à "saturation" Groupe (B)
sous lampe sous-groupe I	Pots (A _I)	Pots (B _I)
Sous l'atmosphère de la serre à 20° sous-groupe II	Pots (A _{II})	Pots (B _{II})

CHAPITRE DEUXIEME

RESULTATS ISSUS DU TRAVAIL SUR MODELES
ET LEUR DISCUSSION

I - EXAMEN MORPHOLOGIQUE -

A - Technique d'examen -

Les pots ont été ouverts quand l'humidité globale a atteint à 2 ou 3 % près, l'humidité de la terre séchée à l'air.

- Examen de la surface

Nous avons cherché la localisation et l'intensité d'un éventuel réseau de fissures ainsi que la formation éventuelle d'une croûte superficielle.

- Examen de la coupe longitudinale

Cette coupe suivant un plan vertical passant par l'axe de la colonne de terre est réalisée au moyen d'un couteau fort, pour briser la terre en lissant aussi peu que possible les faces séparées par le passage du couteau. Ensuite, on restitue aux deux faces leur aspect à l'aide d'une pointe. Nous avons cherché à apprécier la cohésion et la compacité à chaque niveau, et à juger l'éventuelle disparition du système de fissures interstitielles.

- Examen de la base du pot

Dans la zone basale de la colonne de terre, épaisse de 2 centimètres environ, les éléments structuraux de départ ont été détruit par la mise en contact brutale de la terre sèche avec l'eau d'humectation. Aussi, dans chaque cas, cette zone est-elle étudiée à part, car dans sa prise en masse éventuelle intervient la désagrégation par excès d'eau (photo 4).

.../...



PHOTO n°4 : Aspect de la base de la colonne de terre désagrégé au cours de l'humectation. Par ailleurs, la photo montre l'indépendance, au delà de la zone basale, des éléments structuraux 5 - 10 mm en fin de cycle.



PHOTO n°5 : Retrait annulaire sur colonne de terre constituée par des agrégats 5 - 10 mm en fin de cycle.

B - Examen proprement dit -1°) Influence de l'état structural -

En aucun cas, quelque soit la nature du sol utilisé ou le traitement appliqué, nous n'avons jamais observé de phénomène de prise en masse avec des éléments structuraux dont la taille est comprise entre 5 et 10 millimètres.

Il n'y a jamais eu de croûte superficielle ni de fissures à la surface de la colonne de terre. Cependant, la force de retrait s'est manifestée par l'apparition au contact terre-pot, d'une fissure annulaire (photo 5). La variation de volume entre l'état sec et l'état humide a été appréciée par la mesure du niveau de la surface supérieure par rapport à la base du pot ainsi que par l'évaluation du diamètre initial et du diamètre final de la colonne de terre. Elle est de l'ordre de 18 à 20 % du volume sec.

Cependant, il y a indépendance totale de tous les éléments structuraux, sauf à la base de la colonne de terre (photo 4) où la soudure est liée à une désagrégation au cours de l'humectation.

Il ne suffit donc pas qu'il y ait retrait pour qu'il y ait prise en masse.

Nous retiendrons donc les éléments structuraux dont la taille est inférieure à 2 mm pour voir l'importance de la nature du sol et apprécier l'intensité de la prise en masse. Nous reviendrons sur l'influence de l'état structural au cours de la discussion sur les mécanismes qui régissent le phénomène.

2°) Influence de la nature du sol -a) Cas de l'Horizon B de Versailles.

- Examen de la surface

Quelles que soient l'humidité de départ et l'intensité de l'évaporation, il n'y a pas de fissure centrale. Seule apparaît la fissure annulaire.

.../...



PHOTO n°6 : Morphologie de la coupe longitudinale d'une colonne de terre de l'horizon B de Versailles en fin de cycle.

Il n'y a pas de croûte superficielle, tout au plus une légère consolidation des éléments structuraux. Une couche de 1 cm d'épaisseur environ se détache du reste des colonnes de terre soumises à évaporation intense.

- Examen de la coupe

D'une façon générale la prise en masse n'est pas nettement observée. Toutefois, on constate la présence, à partir d'une certaine profondeur, de petits "rognons" dont les dimensions et la forme rappellent celles d'une amande (photo 6). Ces "rognons" sont plus cohérents que le reste, mais ils s'effritent sous la simple pression des doigts. On pourrait penser à une amorce de prise en masse. Ces "rognons" ne sont en aucun cas visibles près de la surface ni près des parois. Les éléments structuraux de départ restent individualisés partout ailleurs.

b) Cas des terres argileuses.

- Examen de la surface

Quelque soit le traitement appliqué aux colonnes de terre, on constate la présence d'une fissure annulaire. Excepté le cas des pots humectés à "saturation" et soumis à évaporation lente (photo 7), on observe la formation d'une croûte superficielle et la présence d'un réseau de fissures secondaires (photo 8). Cette croûte est fragile et s'effrite sous la simple pression des doigts.

- Examen de la zone périphérique

Dans la zone située contre la paroi, les agrégats restent individualisés et peuvent être facilement détachés de la colonne de terre.

- Examen de la coupe longitudinale

Les fissures secondaires, quand elles existent, sont peu profondes et ne dépassent pas les trois premiers centimètres.



PHOTO n°7 : Surface d'une colonne de terre argileuse après humectation à "saturation" et dessiccation à l'atmosphère ambiante de la serre (Terre de Lunéville)



PHOTO n°8 : Surface d'une colonne de terre argileuse après humectation à la capacité de rétention et dessiccation sous lampe. Présence de nombreuses fissures secondaires.

.../...

Aux deux rythmes d'évaporation correspondent deux aspects de la coupe longitudinale.

L'évaporation rapide provoque l'apparition d'un litage oblique séparant des couches d'épaisseurs différentes orientées comme l'indique la photo 9. Dans les pots soumis à évaporation lente, ce litage n'apparaît pas.

Les précautions prises lors de la mise dans les pots, de la terre séchée à l'air et tamisée ne permettent pas d'attribuer la formation de ce litage au remplissage.

Un tel phénomène pourrait se produire au cours du gonflement. Nous avons alors rempli un pot de terre séchée à l'air, tamisée à 2 mm et nous y avons disposé trois lits de kaolinite (broyée à 2 - 20 μ) - en la saupoudrant à l'aide d'un pinceau - à 3 cm les uns des autres. Nous avons humecté ce pot à "saturation" (voir p. 1), puis nous l'avons ouvert et pratiqué une coupe longitudinale (voir p. 26) à l'état humide. Nous avons pu ainsi vérifier que ce litage ne se produit pas au cours du gonflement (photo 10).

L'explication pourrait être la suivante : au début de l'expérience, l'évaporation se fait uniquement par la surface ; et, dès l'apparition de la fissure annulaire, elle se fait aussi par la zone de la colonne de terre décollée de la paroi du pot. Les deux types d'évaporation se conjuguant, le profil hydrique aurait l'aspect porté sur le schéma (1). La mobilité de l'eau étant faible dans les sols argileux (PUECH (1)), le retrait intervenant, la courbure du sommet - aplatie au début - deviendrait en définitive l'aspect porté sur le schéma (2).

Quel que soit le traitement appliqué aux colonnes de terre, on distingue quatre zones morphologiquement différentes par leur état structural (voir schéma 3).

L'aspect des zones 1 et 2 est hétérogène. Les éléments structuraux de taille relativement importante (0,5 à 2 mm environ)

(1) Communication personnelle orale



PHOTO n°9 : Coupe longitudinale d'une colonne de terre de Lunéville montrant un litage formé sous l'effet de l'évaporation sous lampe.



PHOTO n°10 : Coupe d'une colonne de terre analogue à la précédente (photo 9) à l'état humide. Les lits de kaolinite (repères) restent horizontaux en fin d'humectation.

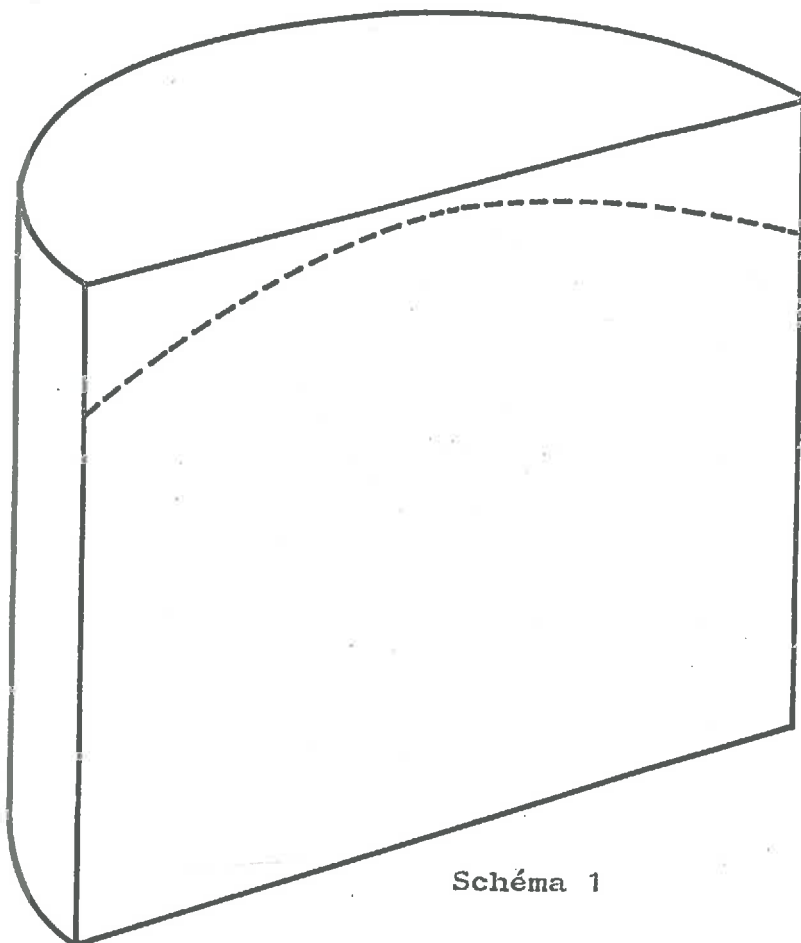


Schéma 1

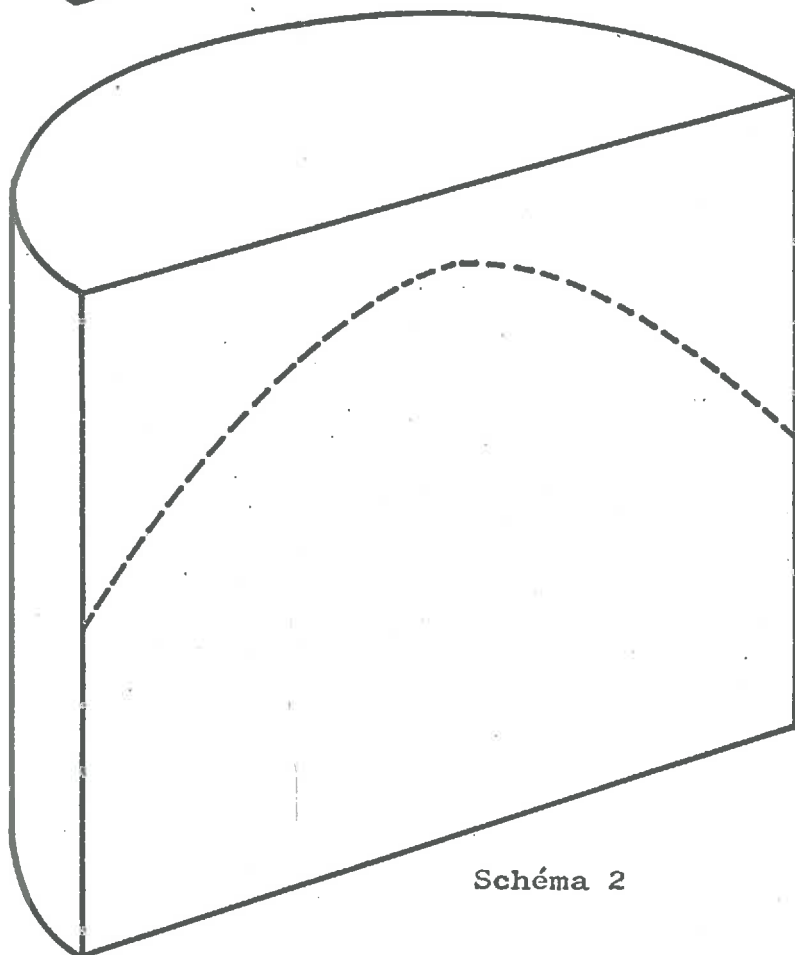


Schéma 2

Schémas du profil hydrique en début (1) et en fin (2) d'évaporation

restent individualisés. Les mottes prélevées dans ces zones s'effritent plus ou moins facilement sous la simple pression des doigts. L'individualisation des éléments structuraux de départ disparaît quand on s'approche des zones 3 et 4.

Dans la zone 3, la structure est continue. C'est là où le phénomène de prise en masse semble se manifester. Cette zone a la forme d'un cône dont la pointe dirigée vers le haut se trouve à 1 ou 2 cm de la surface supérieure de la colonne de terre (voir schéma et photo 11).

Les mottes prélevées dans cette zone (3) sont très compactes et ne sont détruites que sous l'action d'outils .

La zone (4) présente une structure relativement spongieuse, mais très cohérente.

Conclusions

Donc, quel que soit le traitement appliqué, on constate dans le cas des terres argileuses une consolidation de la partie centrale de la colonne de terre sans modification des couches superficielles et périphériques.

*
* *

L'apparition du phénomène de prise en masse à la dessiccation semble liée d'une part à la nature du sol (amorce dans le cas de l'Horizon B de Versailles), et d'autre part à la finesse de la structure de départ.

*
* *

D'après les descriptions précédentes, la prise en masse s'est manifestée avec une intensité variable ; les forces liant les particules entre elles variant, il existe donc, à un moment donné dans le sol, toute une gamme d'assemblages de cohésion variable. Il faut donc les mettre en évidence et les chiffrer

.../...

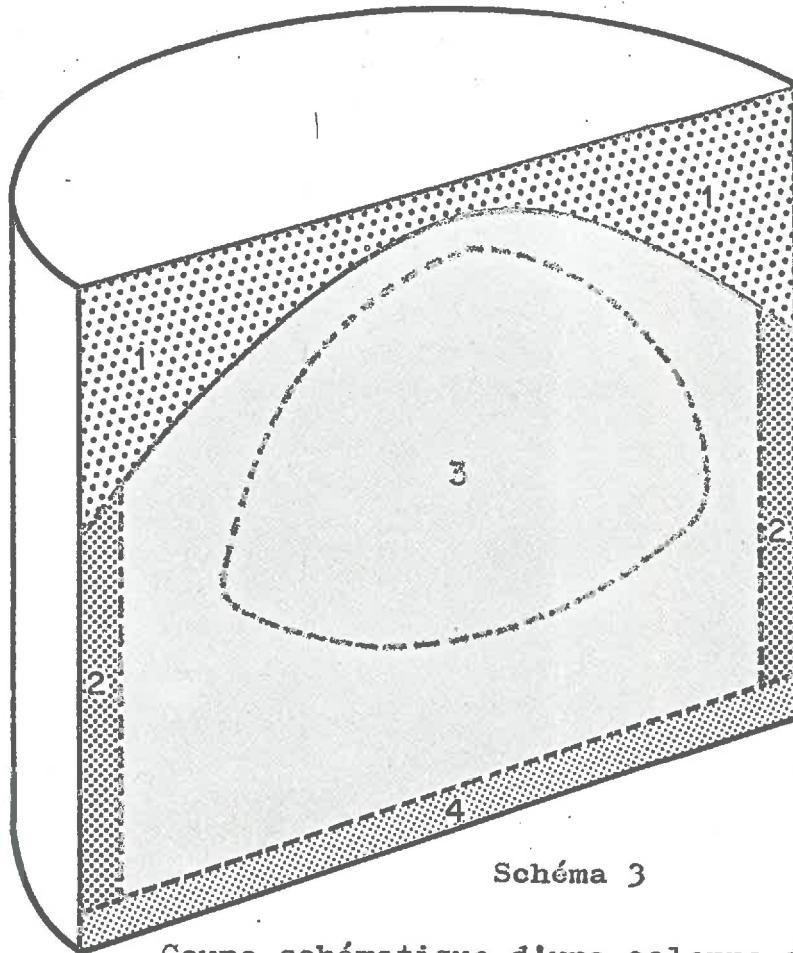


Schéma 3

Coupe schématique d'une colonne de terre argileuse prise en masse à la dessiccation (terre de Lunéville)

Zones 1 : superficielle - 2 : périphérique - 3 : basale - 4 : centrale



PHOTO n°11 : Coupe longitudinale d'une colonne de terre prise en masse à la dessiccation (terre de Lunéville)

par une méthode appropriée et à un niveau de résistance donné.

Nous nous proposons donc d'appeler, en accord avec BUI HUU TRI, éléments structuraux, les différents groupes ou ensembles de particules séparées les uns des autres par des faces de moindre résistance et existant à un moment donné dans le sol. Cette définition admet que les éléments structuraux puissent présenter des cohésions très variables et évoluer avec le temps.

II - APPRECIATION DE L'INTENSITE DU PHENOMENE DE PRISE EN MASSE -

A - Test à l'alcool ou au mélange alcool-benzène -

1°) Choix du traitement.

Le test recherché a pour but de quantifier la taille des éléments structuraux cohérents à un certain seuil de cohésion.

Quand des éléments structuraux se trouvent en contact direct avec l'eau, ils se désagrègent plus ou moins rapidement. MENIN (1938) a montré que ce phénomène est dû à la fois, à la dispersion de l'argile (SCHLOESING, 1885) et à l'augmentation de la pression interne de l'élément structural (YODER, 1936) causée par la pénétration de l'eau dans les pores. Donc l'eau ne peut être utilisée pour séparer des éléments structuraux au niveau des faces de moindre résistance : elle s'attaque aux liaisons mêmes qui constituent l'agglomérat.

Le tamisage direct des échantillons prélevés (PUCHNER, 1911; KEEN, 1933 - HEKRASSOV, 1934) ne donne pas de résultat dans le cas de la prise en masse.

Certains auteurs travaillant sur les structures sous prairies ont préconisé le tamisage dans des liquides organiques. D'après RUSSEL (1938), TIULIN (1928) utilisa le benzène.

D'autre part, CONCARET (1965) a montré que c'est à cause du gonflement que la cohésion d'une terre humidifiée diminue.

.../...

Or, il a remarqué qu'en traitant les agglomérats par des mélanges alcool-eau, il limite la diminution de cohésion liée à l'humectation, de telle façon que les variations de la pression interne ont des effets négligeables. Les agglomérats se trouvent ainsi plus stables.

Il faudrait donc trouver un traitement qui limiterait le gonflement de l'argile et qui éliminerait la pression interne des agglomérats.

BUI HUU TRI (1969) a remarqué que si l'argile est rendue hydrophobe par une substance telle que le chlorure de cetylpyridinium ($C_{12} H_{38} Cl N, H_2O$) (LAW Jr. et KUNZE, 1966) et que les conditions d'évacuation de l'air sont assurées, en opérant sous vide, l'eau peut remplacer l'alcool éthylique et donne des résultats tout à fait comparables (tableau 6). C'est là une preuve indirecte que l'alcool éthylique élimine pratiquement les effets de gonflement et de compression, effets qui rendent le tamisage direct dans l'eau inutilisable.

Il est probable donc, que l'action de l'alcool éthylique sera plus sélective que celle de l'eau permettant ainsi de séparer des éléments structuraux suivant les faces de moindre résistance.

BUI HUU TRI (1969) travaillant sur la granulation des terres sous prairie utilise l'alcool éthylique comme liquide de traitement et de tamisage pour déceler la présence d'éléments structuraux et en évaluer le taux par classe de taille.

Nous avons donc cherché à utiliser ce liquide et nous avons trouvé les résultats rapportés au tableau 7).

CABLEAU 6

Effet de divers traitements sur le comportement des éléments structuraux provenant de l'Horizon B de Versailles ayant des histoires culturales différentes (d'après BUI HUU TRI 1969)

Taille des éléments structuraux (mm)	T R A I T E M E N T S					
	Humectation et tamisage dans l'eau		Humectation et tamisage dans 95 % d'alcool		Prétraitement au chlorure de cétalpyridinium	
	en Jachère	sous fétuque élevée	en Jachère	sous fétuque élevée	en Jachère	sous fétuque élevée
> 3	0,7	2,0	60,5	94,5	58,6	95,0
3 - 2	0,3	0,4	5,0	3,3	4,8	3,0
2 - 0,5	2,8	7,7	21,0	1,7	20,0	1,0
0,5 - 0,2	12,8	19,3	5,4	0,1	6,4	0,5
< 0,2	83,3	70,5	8,0	0,3	9,0	0,4

TABLEAU 7

Distribution des agrégats issus du test à l'alcool éthylique
par classe de taille
(terre de Lunéville)

origine de l'échantillon taille des éléments structuraux (mm)	en % de la prise d'essai		
	Témoin	Zone morphologi- quement prise en masse	Zone morphologi- quement non prise en masse
< 0,2	17,27	9,45	7,55
0,2 - 0,5	9,17	8,74	8,49
0,5 - 1	13,50	11,86	13,44
1 - 2	50,06	65,59	66,15
> 2	0	3,35	4,37

L'examen du tableau 7 permet de constater que, contrairement aux résultats de BUI HUU TRI (1969), nous n'avons pu obtenir une différence nette dans la distribution des éléments structuraux issus, par la méthode du test à l'alcool, de zones morphologiquement prises en masse et de zones non prise en masse. Dans le cas des terres étudiées, le test à l'alcool s'avère donc inutilisable. Les sols sur lesquels nous avons travaillé sont d'ailleurs nettement plus argileux que ceux utilisés par BUI HUU TRI.

Or, KHEYRABI (1966) a rapporté que la simple humectation par l'alcool éthylique de terres argileuses met en évidence une auto-fissuration des éléments structuraux.

En effet, l'examen à la loupe binoculaire des éléments de départ (Témoin) et de ceux obtenus en fin de cycle après traitement et tamisage dans l'alcool éthylique révèle une

.../...

différence morphologique. Les premiers sont arrondis tandis que les seconds sont anguleux. Ces derniers résultent probablement d'un phénomène d'auto-fissuration. Ceci est en accord avec ce que trouve KHEYRABI, et les résultats portés dans le tableau 8 en donne une confirmation.

TABLEAU 8

Traitement et tamisage dans l'alcool éthylique d'une fraction d'éléments structuraux dont la taille est comprise entre 1 et 2 mm (terre de Lunéville)

Eléments issus du tamisage à l'alcool	
Taille des éléments en mm	% d'éléments
< 0,2	6,40
0,2 - 0,5	2,60
0,5 - 1	4,80
1 - 2	86,20

La terre de Lunéville avec 50 % d'argile et 30 % de limons fins se comporterait donc comme le mélange binaire de KHEYRABI composé de 60 % d'argile et 40 % de limons fins. Or, c'est là, précisément que se situe, d'après cet auteur, le maximum d'auto-fissuration.

L'alcool ne peut donc être utilisé comme liquide sélectif pour différencier les parties prises en masse, du reste de la colonne de terre.

Nous nous sommes alors orientés vers un liquide non polaire qui ne provoquerait pas de fissuration parasite. Nous avons essayé le benzène.

Des échantillons prélevés dans les zones morphologiquement prises en masse et dans les parties de la colonne de terre non prises en masse ont été immergés dans du benzène pendant une heure, puis tamisés à 3 millimètres. A la fin de l'opération, les "mottes" constituant l'échantillon sont restées intactes, quelle que soit leur fragilité. Même les "mottes" qui s'effriteraient sous la simple pression des doigts sont inchangées. Le benzène est donc incapable de séparer les éléments structuraux suivant les faces, de moindre résistance à un niveau compatible avec le phénomène étudié. Aussi, ne peut-il être utilisé dans un traitement permettant d'apprécier l'intensité du phénomène de prise en masse.

L'alcool éthylique provoque une dissociation des éléments structuraux, mais dans le cas des sols étudiés, il entraîne une fissuration parasite. Le benzène, par contre ne s'attaque même pas aux liaisons les plus faibles entre agrégats. Un mélange alcool-benzène se comporte probablement d'une façon intermédiaire - action plus ménagée que l'alcool éthylique et plus énergique que le benzène - Nous l'avons alors essayé. Les résultats issus de ce traitement sont portés sur le tableau 9. On constate qu'avec 5 % d'alcool et 95 % de benzène, il y a une légère dissociation des éléments structuraux mais, sans distinction entre ce qui est pris en masse et ce qui ne l'est pas. Avec 10 % d'alcool, la discrimination apparaît, mais elle ne devient nette qu'avec 15 % d'alcool et 85 % de benzène. De plus, avec ce mélange la partie de l'échantillon pris en masse supérieure à 3 mm reste en général en un seul morceau, alors que celle issue de la zone non prise en masse se fragmente. Nous avons alors adopté ce mélange.

Le tamis de 3 mm de maille a été retenu, car cette dimension est largement supérieure à la taille des éléments structuraux de départ. Le test ayant pour but d'apprécier l'intensité de la prise en masse, nous n'avons pas jugé nécessaire de prendre une batterie de tamis supérieure à 3 mm.

TABLEAU 9

Effet de diverses proportions d'alcool et de benzène sur des échantillons issus de zones morphologiquement prises en masse (I) et de zones morphologiquement non prises en masse (II) (terre de Lunéville)

Composition du mélange en %	A = alcool éthylique - B = Benzène éléments > 3 mm après traitement et tamisage en % de la prise d'essai	
	I	II
A = 0 B = 100	100	100
A = 5 B = 95	97,44	97,15
A = 10 B = 90	95,28	90,61
A = 15 B = 85	89,60	25,89
A = 20 B = 80	57,87	22,75
A = 25 B = 75	48,57	5,13
A = 100 B = 0	0 à 2	0

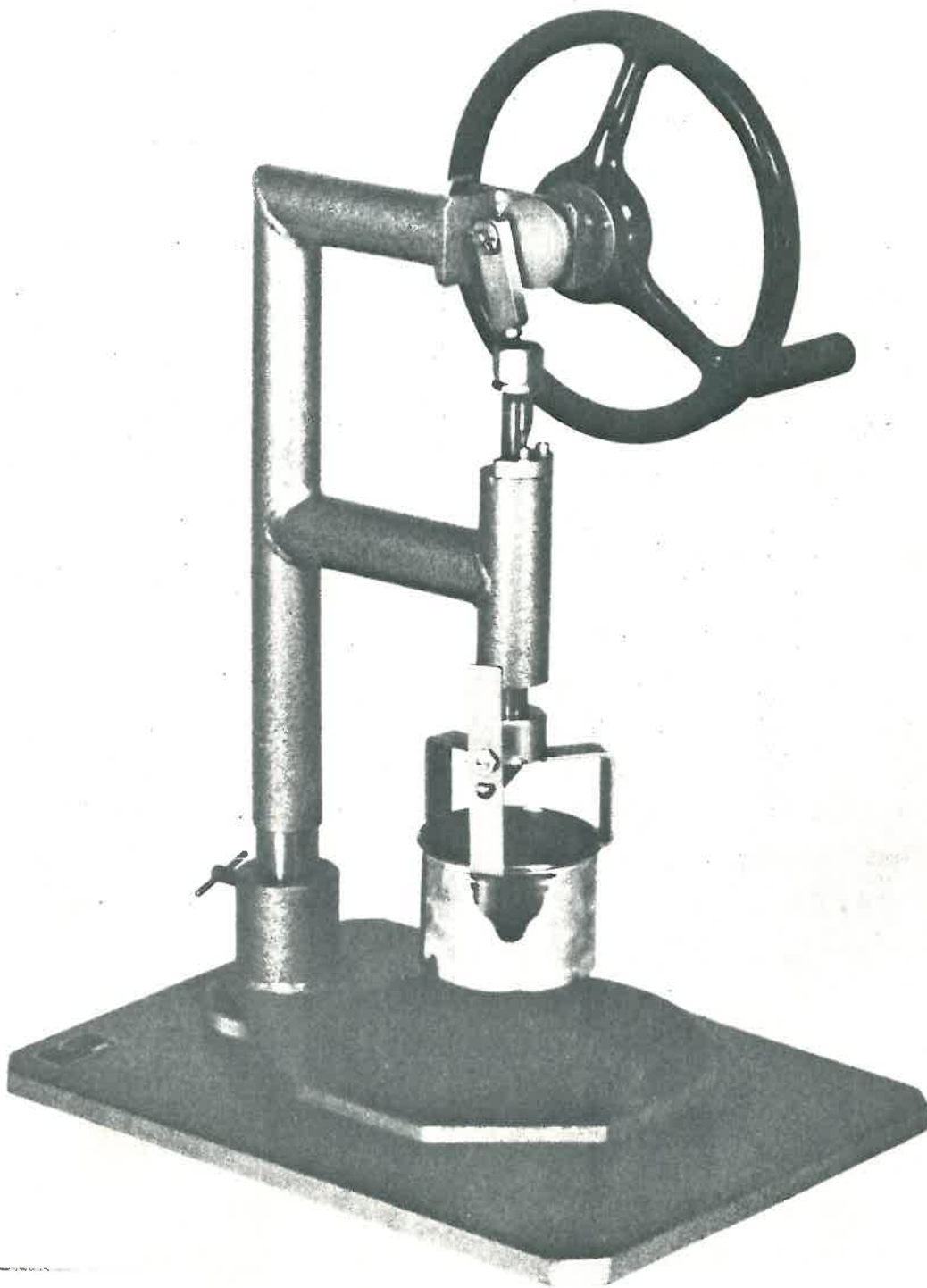
2°) Mode opératoire.

Les prélèvements sont faits à différentes profondeurs dans la zone axiale du pot qui morphologiquement apparaît comme prise en masse et dans la zone périphérique où le phénomène ne se manifeste pas.

L'échantillon de la taille d'une grosse noix est mis dans un bécher de 250 ml de forme haute. Il est recouvert de liquide (alcool éthylique - benzène) pendant 30 mn.

La terre est ensuite versée avec précaution sur un tamis à mailles carrées de 3 mm d'ouverture. Le tamis est fixé à l'appareil à tamiser de FEODOROFF (1960) (voir photo 12) et plongé dans un cristalliseur contenant le mélange alcool-benzène. Le niveau du liquide au point mort haut dépasse de quelques millimètres la surface supérieure de l'échantillon. Le tamisage est assuré par l'appareil qui déplace le tamis de haut en bas et vice versa par un mouvement hélicoïdal dans le liquide. Il comporte 30 va et vient en 30 secondes. Le tamis est ensuite détaché de l'appareil. Les agglomérats restés sur le tamis sont placés dans des capsules en porcelaine, séchés à l'étuve à 105°C et pesés.

Le résultat est exprimé en pour cent de la prise d'essai. Ce test chiffre d'une façon relative l'intensité du phénomène de prise en masse à la dessiccation et non de façon absolue. Il permet de distinguer des mottes prises en masse de celles où il n'y a eu qu'une autoagrégation. Il se révèle discriminant pour tous les échantillons suffisamment argileux. Nous avons adopté le mélange composé de 15 % d'alcool et 85 % de benzène pour les sols argileux qui manifestent une adaptation à l'autofissuration. Mais, nous avons utilisé l'alcool éthylique dans le cas de l'Horizon B de Versailles (faible tendance à l'autofissuration). Le but étant de mettre en évidence des lignes de moindre résistance tout en évitant une fissuration parasite, le test, quel que soit le liquide employé, reste ainsi comparatif à l'intérieur d'un même matériau.



TYPE D'APPAREIL A TAMISER UTILISE POUR LE TEST (Feodoroff)

Photo 12

3°) Résultats obtenus et discussion.

a) Horizon B de Versailles

L'examen du tableau 10 permet de constater que, quel que soit le régime hydrique imposé aux pots, il n'y a pas de différence sensible entre les divers parties des colonnes de terre.

En effet, si l'on compare le pourcentage d'éléments structuraux supérieurs à 3 mm issus d'un "horizon" - tel que (4 - 7 cm) par exemple - on ne trouve pas de différence non seulement entre la zone centrale et la zone périphérique pour une colonne de terre ayant subi un régime hydrique donné - humectation à "saturation" puis évaporation sous serre par exemple - mais encore entre les colonnes de terre soumises à des régimes hydriques différents (tableau 10).

Toutes les zones se comportent de la même façon vis à vis du test à l'alcool éthylique. Il y a autoagrégation aussi bien dans les zones périphériques que dans la zone axiale. Un tel phénomène a été mis en évidence par BUI HUU TRI (1969). Le maximum d'autoagrégation se situe dans la partie de colonne de terre située entre 4 et 11 cm à partir de la surface supérieure. On remarque que dans la partie basale, le phénomène n'a pas été accentué par la destruction des éléments structuraux initiaux au cours de l'humectation.

b) Les terres argileuses : Terre de Lunéville

Le traitement et tamisage dans le mélange (alcool 15 %, benzène 85 %) révèle (tableau 11) une différence très nette entre les zones périphériques et superficielle où il y a simplement une autoagrégation et la zone centrale où la prise en masse est visible morphologiquement.

En effet, l'examen du tableau 11 montre que la partie centrale de la colonne de terre (zone axiale - 4 à 11 cm) est plus cohérente : le taux d'agrégats supérieurs à 3 mm issus du

TABEAU 10

Éléments structuraux supérieurs à 3 mm recueillis après traitement et tamisage dans l'alcool. (Horizon B de Versailles) (en % de la prise d'essai)

Régime d'humectation	"Saturation"			Capacité de rétention		
	sous lampe	sous serre	sous serre	sous lampe	sous serre	sous serre
Régime d'évaporation						
"Horizons"	A	P	A	A	P	P
cm						
0 - 1	10,01	9,85	9,97	10,24	9,08	11,98
1 - 4	26,23	28,40	27,30	26,75	30,22	29,08
4 - 7	42,19	45,30	44,50	43,19	45,20	44,38
7 - 11	39,00	30,14	39,13	40,20	33,07	39,20
Partie basale de la colonne de terre	19,81	20,13	20,00	20,18	21,70	19,36

A = zone axiale de la colonne de terre

P = zone périphérique de la colonne de terre

TABLEAU 11

Éléments structuraux supérieurs à 3 mm recueillis après traitement et tamisage dans le mélange (85 % benzène, 15 % alcool éthylique) (Terre de Lunéville) (en % de la prise d'essai)

Régime d'humectation	"Saturation"			Capacité de rétention		
	sous lampe	sous serre	sous serre	sous lampe	sous serre	sous serre
Régime d'évaporation						
Horizons	A	P	P	A	P	P
en cm						
Croûte superficielle (ou 0-1)	24,90	16,70		18,25	20,32	
1 - 4	69,65	53,40	17,40	46,23	23,12	18,53
4 - 7	73,46	82,02	43,52	79,36	50,25	34,23
7 - 11	73,15	71,92	-	73,29	36,43	25,38
Partie basale de la colonne de terre	90,03	92,60	92,00	84,35	86,20	89,82

A = Zone axiale de la colonne de terre

P = Zone périphérique de la colonne de terre

test au mélange alcool-benzène varie de 73 à 82 %. Alors que dans les parties superficielles et périphériques il ne dépasse pas 50 %.

On ne remarque pas de différence sensible de comportement vis à vis de ce test entre les colonnes de terre soumises à des régimes hydriques différents.

La zone basale de la colonne de terre se présente comme fortement cohérente. Mais dans cette zone, c'est la désagrégation du sol à l'état humide qui est responsable de cette forte cohésion. D'ailleurs, morphologiquement, cette zone est différente de la partie centrale. Donc ce test ne permet pas de différencier les parties de la colonne de terre prises en masse à la dessiccation de celles prises en masse à la suite d'une destruction des éléments structuraux initiaux au cours de l'humectation. Il faut donc trouver un autre moyen qui permettrait de différencier ces deux types d'évolution de la structure. L'aspect relativement spongieux de la base de la colonne de terre conduit à penser à l'étude de la porosité.

B - Etude de la Porosité -

1°) Remarques préliminaires.

La porosité d'un sol est le volume des espaces lacunaires remplis d'air ou d'eau exprimés en pour cent du volume total de la terre. Elle est calculée à partir des densités réelle et apparente.

$$\text{Porosité (en \% du volume apparent)} = \frac{D_r - D_a}{D_r} \times 100$$

D_r = densité réelle

D_a = densité apparente

La densité réelle d'un sol est le poids de l'unité de volume occupé uniquement par les particules solides dont il est composé. Elle dépend de sa constitution physique et minéralogique. C'est donc une propriété intrinsèque pour un sol donné. Elle est déterminée d'après la mesure, au pycnomètre, du volume réel des particules solides.

.../...

Bien qu'on puisse observer des variations dans les densités réelles des sols, la plupart des valeurs signalées se situent entre 2,60 et 2,75. Ceci est dû au fait que le quartz, le calcaire et les silicates qui forment la majeure partie des sols ont des densités situées entre ces limites. Cependant quand un sol est riche en minéraux lourds tels que la magnetite, le grenat..., sa densité réelle peut dépasser 2,75. Par contre, comme la matière organique a un poids spécifique inférieur à celui de particules minérales, une forte quantité de ce constituant peut influencer sur la densité réelle d'un sol. Ainsi, la densité réelle de certains sols superficiels très riches en matières organiques peut prendre des valeurs de l'ordre de 2,40.

Néanmoins, malgré ces variations pour les évaluations générales, la densité réelle d'un sol arable moyen, cultivé, peut être considérée comme étant de 2,65 (H. BUCKMAN et H. BRADY, 1965). C'est cette valeur que nous avons systématiquement retenue.

La densité apparente est le poids sec de l'unité de volume apparent de sol. Ce volume comprend aussi bien la matière solide que les pores. C'est une conséquence de la structure, de l'humidité et du gonflement. Elle dépend de la porosité propre des ciments colloïdaux, de celle laissée à l'intérieur des agrégats par la juxtaposition des éléments constitutifs du sol ainsi que de la porosité interstitielle existant entre les agrégats individualisés.

Aussi, une porosité globale n'a-t-elle de signification que lorsque la structure est homogène. Dès qu'apparaît une hétérogénéité dans le milieu (structure massive avec des mottes compactes séparées par des "vides" très importants par exemple), on s'intéressera à un type de porosité donné.

Donc, nous considérerons la porosité globale de la colonne de terre en début d'expérience (à la fin du remplissage ou à la fin de l'humectation).

Cependant, dès qu'intervient la dessiccation, nous nous intéresserons aux porosités locales des différentes parties de la colonne de terre et à la porosité interstitielle telle qu'elle est définie plus haut.

Dans le cadre de l'étude de la prise en masse à la dessiccation, nous n'avons pas pu suivre son évolution systématiquement dans tous les pots, mais nous l'avons déterminée en début et en fin d'expérience. Certains pots ont été ouverts avant dessiccation totale pour déterminer la densité apparente à des états hydriques différents.

La détermination du volume apparent des mottes prélevées dans les colonnes de terre a été réalisée par la méthode au vernis décrite par MAERTENS (1964).

Comme la densité apparente peut varier avec la taille de l'échantillon, nous avons opéré sur des "mottes" sensiblement de même taille (taille d'une grosse noix).

2°) Résultats obtenus -a) Horizon B de Versailles.

Pour des prélèvements effectués à une profondeur donnée, nous n'avons pas constaté de différence sensible quant à la valeur de la densité apparente, entre la zone périphérique et la zone axiale de la colonne de terre (tableau 12). Ce tableau montre aussi que la densité apparente évolue sensiblement de la même façon à tous les niveaux de la colonne de terre.

Par ailleurs, si on examine l'effet des régimes d'humectation et de dessiccation appliqués aux modèles, sur l'évolution de la densité apparente, on constate qu'il est négligeable. L'autoagrégation de l'horizon B de Versailles se fait donc indifféremment dans toutes les parties de la colonne de terre et indépendamment du régime hydrique choisi.

b) Terres argilouses.

Contrairement à l'Horizon B de Versailles, nous constatons dans le cas des terres argileuses (de Lunéville et de Béja) que, pour des colonnes de terre soumises à un régime hydrique donné, la densité apparente évolue différemment suivant les niveaux et les zones considérées (tableau 13). En effet, alors que la densité apparente passe de 1,16 à l'état initial à 1,4 ou 1,5 à l'état final, dans les parties superficielle et périphérique (exceptée la partie basale sur laquelle nous reviendrons), il n'en est pas de même pour la partie centrale (4 à 11 cm - zone axiale) où elle atteint en fin de cycle des valeurs de 1,7 à 1,83.

Les divers régimes hydriques imposés aux modèles n'ont pas modifié le phénomène. Si la partie basale se comporte d'une façon analogue à la partie centrale, vis à vis du test au mélange alcool-benzène, elle s'en différencie par l'évolution de la porosité. En effet, la densité apparente, dans cette zone reste toujours inférieure à celles rencontrées dans le centre de la colonne de terre.

TABEAU 12

Densités apparentes des échantillons prélevés dans des colonnes de terre de l'horizon B de Versailles ayant subi des régimes hydriques différents (Da au début de l'expérience - état sec au remplissage - = 1,16)

Régime d'humectation	"Saturation"			Capacité de rétention		
	sous lampe	sous serre	sous serre	sous lampe	sous serre	sous serre
Régime d'évaporation						
localisation du prélèvement (cm)	A	A	P	A	A	P
0 à 1	-	-	-	1,27	1,29	1,29
1 à 4	1,35	1,34	1,32	1,36	1,35	1,33
4 à 7	1,37	1,32	1,33	1,40	1,39	1,40
7 à 11	1,37	1,38	1,43	1,37	1,40	1,38
Partie basale de la colonne de terre	1,41	1,44	1,37	1,40	1,37	1,39

A = Zone axiale de la colonne de terre

P = Zone périphérique de la colonne de terre

TABLEAU 12

Densités apparentes des échantillons prélevés dans des colonnes de terre de Lunéville ayant subi des régimes hydriques différents - (Da au début de l'expérience - état sec au remplissage = 1,15)

Régime d'humectation	"Saturation"			Capacité de rétention		
	sous lampe	sous serre	sous serre	sous lampe	sous serre	sous serre
Régime d'évaporation						
Localisation du prélèvement (cm)	A	A	P	A	P	P
crête superficielle (ou 0-1)	1,43	1,41	1,41	1,38	1,40	1,40
1 à 4	1,67	1,60	1,40	1,61	1,43	1,43
4 à 7	1,74	1,75	1,42	1,75	1,45	1,50
7 à 11	1,69	1,83	-	1,81	1,50	1,54
Partie basale de la colonne de terre	1,59	1,58	1,64	1,56	1,64	1,68

A = zone axiale de la colonne de terre

P = zone périphérique de la colonne de terre

3°) Discussion

Les tableaux (10 et 12 - 11 et 13) montrent qu'il y a un accord entre l'examen morphologique, les résultats issus du test à l'alcool ou au mélange alcool-benzène et l'évolution de la porosité. On constate une augmentation par rapport à l'état initial, aussi bien du taux des éléments structuraux supérieurs à 3 mm issus du test qui passe de 0 à au moins 30 %, que de la densité apparente qui passe de 1,16 à au moins 1,4 dans le cas des terres argileuses et 1,3 dans le cas de l'horizon B de Versailles.

A ce double point de vue, ce dernier paraît se comporter comme la zone périphérique des colonnes de terre argileuse.

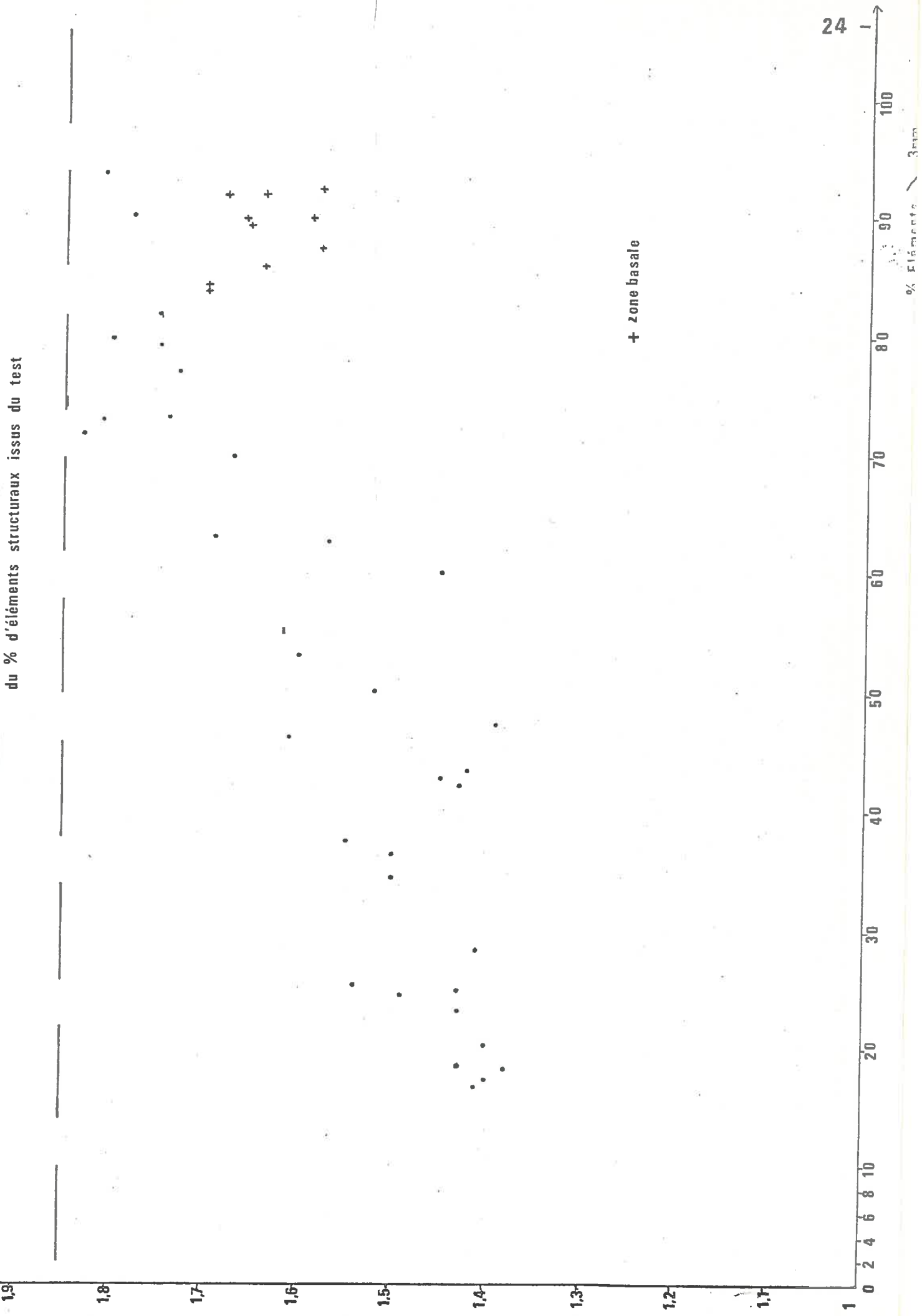
Dans le cas des terres argileuses, on constate dans la zone centrale-prise en masse- une augmentation de la densité apparente qui atteint des valeurs de 1,75 à 1,80 et du taux d'agrégats issus du test qui dépassent 80 %.

Si l'on porte sur un graphique, les taux d'agrégats supérieurs à 3 mm issus du test ^{en abscisse} et les valeurs de densités apparentes en ordonnée (graphique N°3) on remarque que ce graphique comprend 3 zones. Tant que le taux d'agrégats ne dépasse pas 50% la densité apparente ne dépasse pas 1,5. Ensuite quand ce dernier atteint des valeurs comprises entre 50 et 80 %, la densité apparente se situe dans l'intervalle (1,5 - 1,83). Cette valeur 1,83 semble correspondre à une valeur limite pour des terres argileuses telle que celle de Lunéville ou Béja. En effet, dans la 3ème zone du graphique, même si le taux d'agrégats issus du test dépasse 80 % et atteint 95 % la densité ne varie plus. En accord avec les résultats obtenus par FIES et FAURE (1) ce seuil semble correspondre à la compacité maximale pour un mélange artificiel ayant sensiblement la même teneur en argile et en limons fins que la terre de Lunéville ou de Béja.

Il existe un lien entre le test à l'alcool ou au mélange alcool-benzène et la porosité. En effet, si le test

(1) Communication personnelle orale

du % d'éléments structuraux issus du test



quantifie la taille des éléments structuraux, la porosité détermine des conséquences de la prise en masse à la dessiccation.

La prise en masse semble donc avoir deux conséquences importantes :

- Une diminution de la porosité,
- Une "soudure" des agglomérats.

L'examen approfondie de ces deux phénomènes nous conduit à l'étude du mécanisme qui régit ce mode de remaniement structural.

CHAPITRE TROISIEME

ETUDE DES CONSEQUENCES DE LA PRISE EN MASSE ET DU MECANISME QUI LA REGIT

Les résultats que nous venons de présenter montrent que la prise en masse à la dessiccation est caractérisée par la manifestation simultanée de deux phénomènes ; une diminution de la porosité totale et une coalescence des agglomérats initiaux dans la zone intéressée. Nous nous proposons d'examiner successivement le mécanisme à l'origine de ces deux évolutions et les facteurs qui les commandent.

Pour ce faire, nous nous limiterons aux terres qui manifestent nettement cette prise en masse et, compte tenu de la grande analogie de comportement entre les terres de Béja et de Lunéville, nous prendrons cette dernière comme exemple.

I - DISCUSSION SUR LES VARIATIONS DE POROSITE -

Nous examinerons successivement l'évolution de la porosité au cours des différentes phases de l'expérience : humectation et ressuyage puis dessiccation.

1°) Humectation et ressuyage -

Après humectation et ressuyage la densité apparente mesurée à l'état humide c'est à dire le poids de terre sèche contenu dans l'unité de volume à l'état humide est de 1,04. Cette diminution de densité apparaît évidemment liée au gonflement de la masse de terre au cours de l'humectation.

Par ailleurs, si nous apprécions par la méthode décrite page , la variation de volume apparaissant en l'absence de

toute contrainte et qui fournit donc un coefficient de gonflement potentiel (G), nous constatons que dans le cas du sol de Lunéville, elle est de 27 %.

A partir de ce coefficient et de la densité apparente sèche (Da_s) initiale, on peut calculer la valeur que devrait prendre, si le gonflement était libre, la densité apparente mesurée à l'état humide (Da_h) après humectation.

En effet :

$$G = \frac{Da_s - Da_h}{Da_s} = 0,27$$

On peut en tirer

$$Da_h = (1 - 0,27) Da_s = 0,85$$

Il apparaît donc qu'au cours de l'humectation dans les pots telle que nous l'avons pratiquée, le gonflement global de la terre a été limité. On peut imaginer qu'il s'agit là d'un phénomène classique, l'expansion de la masse de terre étant limitée latéralement par les parois du pot et verticalement, au moins à partir d'une certaine profondeur, par le poids de la colonne de terre située au-dessus.

Pour vérifier cette interprétation, nous avons rempli un pot dans des conditions susceptibles d'amener un gonflement aussi libre que possible des particules terreuses au cours de leur humectation. Pour cela, le pot vide a été placé sur le sable humide qui nous a servi de source d'eau (voir page 18) et la terre tamisée à 2 mm a été introduite dans le pot par couches horizontales successives de faible épaisseur (2 à 3 mm). Chaque nouvelle ^{est} couche n'a été introduite qu'après que la précédente soit parfaitement humectée. De ce fait, le gonflement a pu se développer librement. A la fin du remplissage et donc de l'humectation et après ressuyage, nous avons déterminé la densité apparente à l'état humide, comme précédemment à partir de volume total occupé par la colonne de terre. Dans ces conditions, cette densité mesurée varie de 0,83 à 0,87 correspondant

.../...

donc aux erreurs de mesure près à celle résultant de l'application du coefficient de gonflement potentiel.

Etant donné que l'humidité pondérale enregistrée après ressuyage est peu différente d'un mode de remplissage à l'autre : 40 % dans le cas de l'humectation simultanée contre 37 % dans le cas du remplissage classique, il semble qu'on ne puisse raisonnablement expliquer la différence de gonflement par une limitation au niveau de l'assemblage élémentaire à l'intérieur des agglomérats. Tout au plus, si cette limitation existe, elle est incapable d'expliquer plus qu'une toute petite partie d'un phénomène qui se traduit par un coefficient de gonflement apparent limité à une valeur voisine de 10 % au lieu de 27 % de gonflement potentiel.

Le résultat obtenu ne peut donc s'interpréter qu'en admettant que le gonflement potentiel est en grande partie réalisé et cela au dépens de la porosité interstitielle initiale.

Le calcul de l'évolution de cette dernière au cours de l'humectation apporte une confirmation de cette hypothèse.

Si l'on considère en effet, un système constitué par des agglomérats dont la densité apparente intrinsèque est en moyenne de ρ_a la porosité interstitielle peut être évaluée par la relation :

$$P_i = \frac{\rho_a - D_a}{\rho_a}$$

où D_a représente la densité apparente totale du système. Le calcul d'une porosité interstitielle repose donc, D_a étant connu, sur une évaluation de la densité apparente ρ_a propre aux agglomérats.

Compte tenu de la difficulté d'une mesure de volume apparent sur des agglomérats de petite taille, nous avons admis que la densité apparente ρ_a était égale à celle d'un gâteau constitué par malaxage dans l'eau du matériau considéré, ressuyage sur Buchner puis séchage à l'air. Un tel état structural

.../...

ne présente en effet qu'une porosité interstitielle négligeable et définit ce que l'on peut appeler la porosité texturale du matériau. Dans le cas présent, cette valeur de $(\rho a)_s$ est égale à 1,85.

Sur ces bases la porosité interstitielle initiale $(Pi)_s$, c'est à dire évaluée à sec après remplissage du pot est égale à :

$$(Pi)_s = \frac{1,85 - 1,16}{1,85} \times 100 = 37 \%$$

Si nous introduisons l'hypothèse d'un gonflement potentiel effectivement réalisé au niveau des agglomérats, la valeur $(\rho a)_h$ de la densité apparente propre aux assemblages après gonflement complet (la terre à la fin de l'humectation est proche de la saturation) peut être déduite de $(\rho a)_s$ par la relation :

$$(\rho a)_h = \frac{(\rho a)_s}{1 - G} \quad \text{avec } G = 0,27$$

Ce qui donne

$$(\rho a)_h = 1,34$$

Il est alors possible d'évaluer la porosité interstitielle après humectation et ressuyage :

$$(Pi)_h = \frac{1,34 - 1,04}{1,34} \times 100 = 22,4 \%$$

On constate donc que la porosité interstitielle moyenne est passée de 37 % à 22,4 % diminuant d'une valeur du même ordre de grandeur que celle de la part du gonflement potentiel non apparent (15 % contre 18 %).

En définitive, si nous considérons l'ensemble de la colonne de terre, il résulte des considérations précédentes, en dépit du caractère approximatif de certaines données utilisées que l'humectation se traduit par un gonflement à peu près complet des agglomérats initiaux, ce gonflement ayant deux conséquences :

.../...

- d'une part un allongement de la colonne de terre
 - d'autre part un réarrangement et une déformation des agglomérats initiaux qui de par leur humidité se trouvent à l'état plastique, se traduisant par une diminution très importante de la porosité interstitielle et vraisemblablement un accroissement de la surface de contact entre agglomérats.

Enfin, l'étude de cette première phase appelle deux remarques :

- Il n'y a pas de raison de penser que les phénomènes mis en évidence pour l'ensemble de la colonne de terre soient très différents en intensité d'un point à un autre, exceptées la base du pot désagrégée au cours de l'humectation, et la partie superficielle où le gonflement a pu s'effectuer sans contraintes notables.

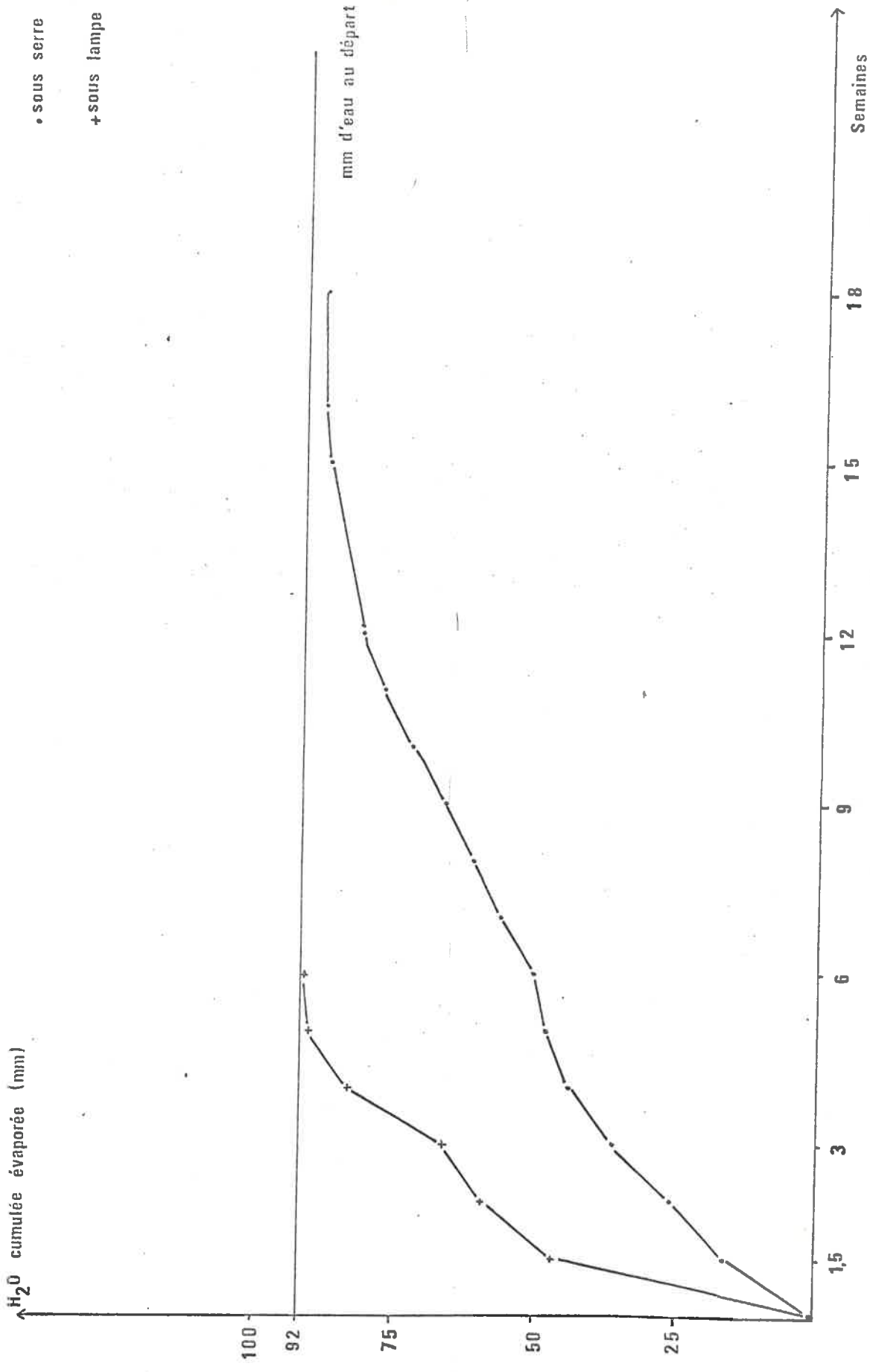
- En second lieu, la limitation latérale du gonflement provoquée ici par la paroi des pots ne peut être considérée comme un artefact lié au modèle utilisé. En effet, dans un milieu naturel considéré comme infini, l'expansion latérale est limitée par le matériau lui-même.

2°) Dessiccation -

Considérée globalement la perte d'eau déterminée par posée des pots à intervalles réguliers est représentée sur le graphiques n°4 et 5.

On constate que les quantités d'eau évaporées au début de l'expérience, ainsi que le temps nécessaire pour dessécher la colonne de terre jusqu'à une humidité pondérale moyenne voisine de celle de la terre initiale séchée à l'air varient considérablement d'un traitement à l'autre. En particulier, l'évaporation sous lampe est 2 à 3 fois plus intense que l'évaporation sous serre au cours de la première semaine ; la durée totale de dessiccation est également 2 à 3 fois plus courte dans le premier cas ; l'évaporation à partir d'une humidité à "saturation" est environ une fois et demie plus forte que celle enregistrée à partir d'une terre à la capacité de rétention.

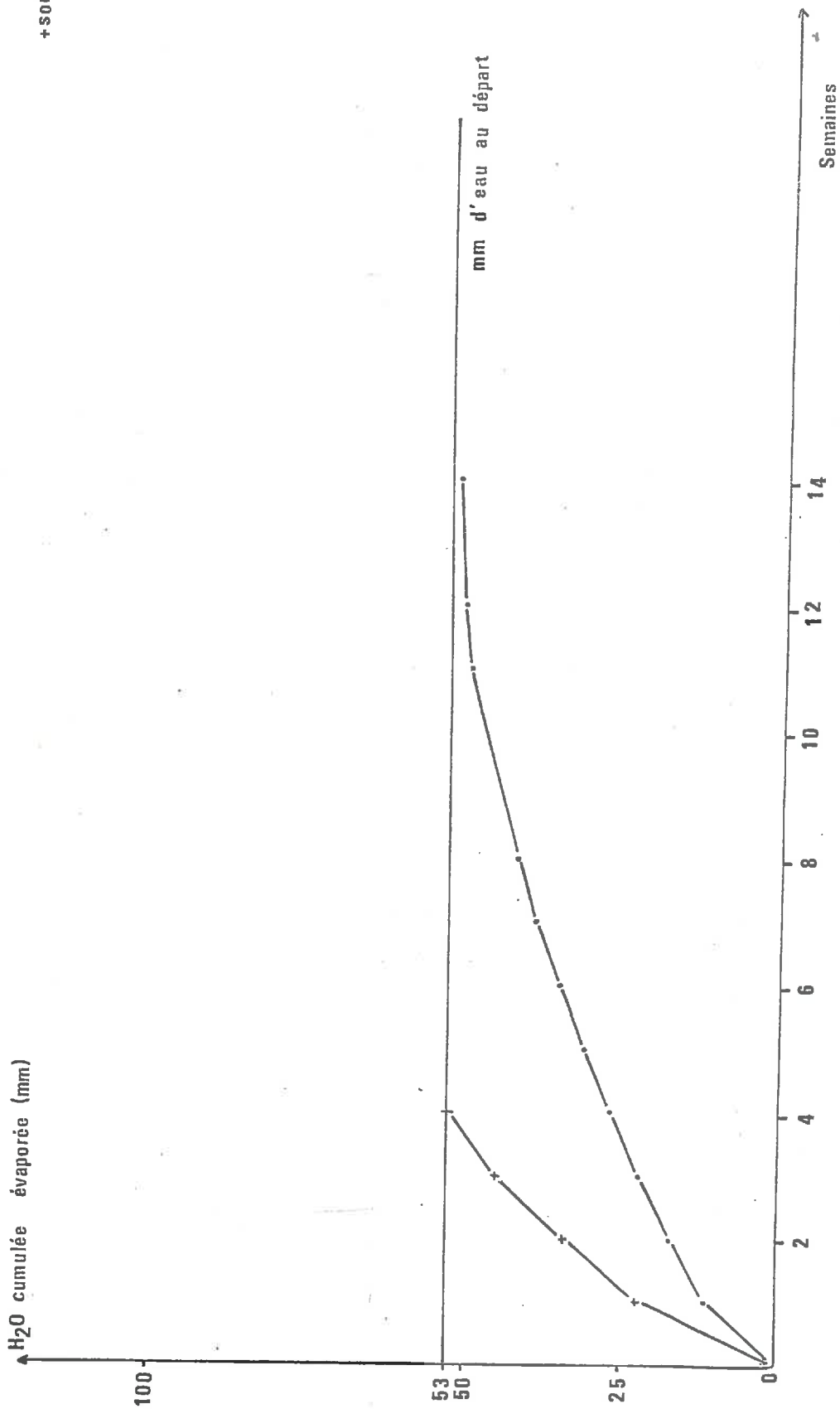
.../...



Graphique 4
Régime d'évaporation des colonnes de terre (Lunéville)
(Humidité initiale : saturation)

+ sous serre

+ sous lampe



Graphique 5

Régime d'évaporation des colonnes de terre (Lunéville)

(Humidité initiale : capacité de rétention)

Or, au cours de la présentation des résultats un seul traitement (terre initiale saturée + évaporation sous serre) fait apparaître quelque particularité morphologique à la fin de l'expérience. Et encore ne s'agit-il que de l'absence d'une croûte superficielle et d'un réseau de fissures secondaires présents dans les autres traitements, c'est à dire concernant un phénomène annexe.

Par contre, il ne semble, dans les conditions où nous avons opéré, y avoir aucun lien entre la vitesse de dessiccation et le phénomène de prise en masse proprement dit. Ceci ne signifie pas nécessairement que ce paramètre n'intervient pas ; tout au plus peut-on affirmer qu'il est peu actif dans la gamme de variation que nous lui avons imposée.

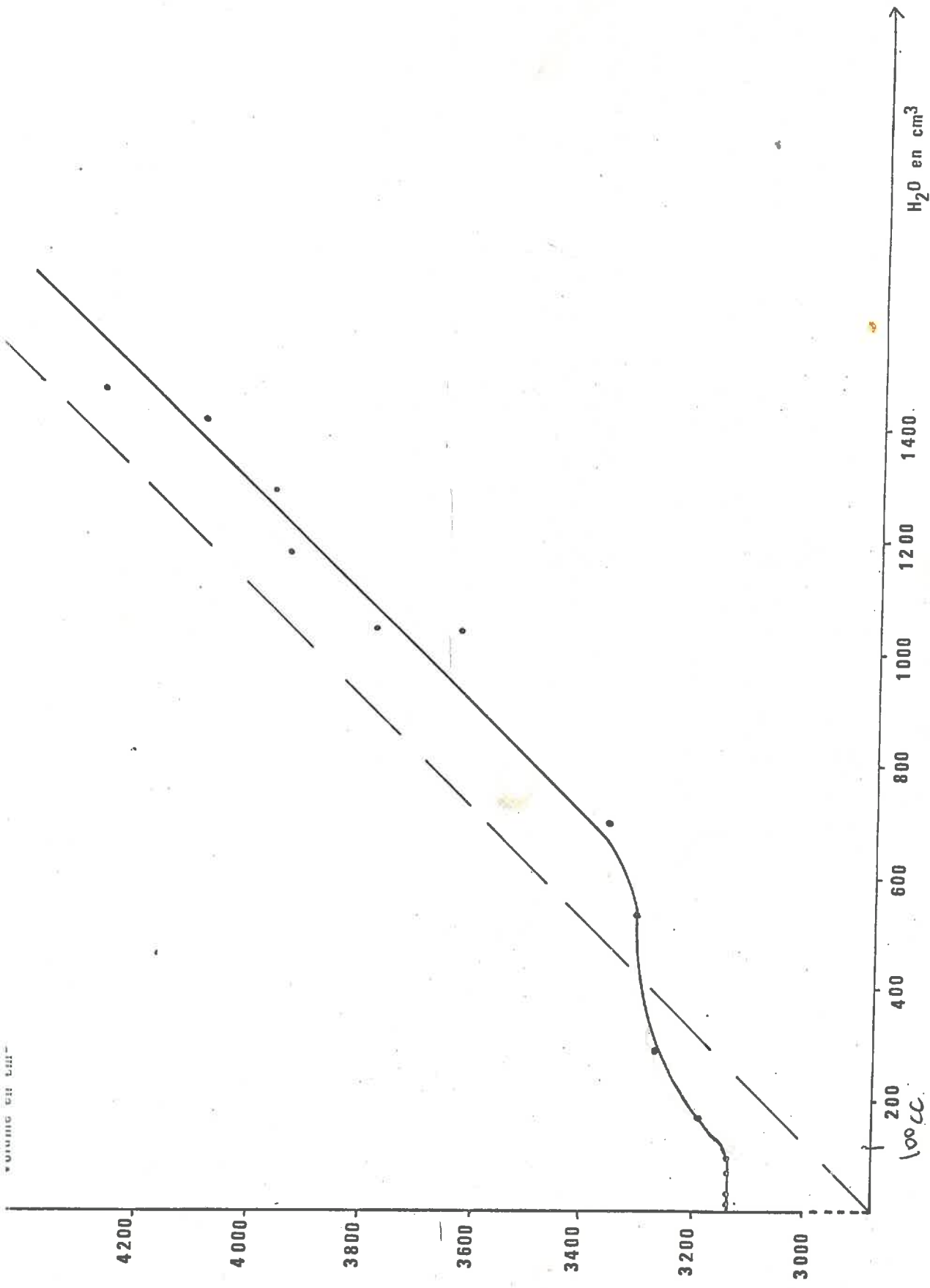
* * *

Un autre aspect de l'évolution de la colonne de terre qu'il est possible d'aborder de façon globale est la variation de son volume apparent.

Sur le graphique n° 6 , nous avons porté les valeurs de ce volume au cours de la dessiccation en fonction de l'humidité présente. Ces résultats concernent le traitement (capacité de rétention + dessiccation sous lampe) pris à titre d'exemple.

On constate que jusqu'à une humidité voisine de 15 % la diminution de volume est sensiblement égale à la perte d'eau exprimée en volume. En deçà de cette teneur, le retrait est moins que proportionnel à la perte d'eau. On se trouve donc en présence d'une courbe de retrait classique, si l'on admet les incertitudes inévitables liées à la technique d'évaluation du volume de la colonne de terre aux différentes humidités.

De cette courbe on peut tirer graphiquement une évaluation du retrait total enregistré ainsi que de l'humidité caractéristique de la limite de retrait. Cette dernière est voisine de 10 %. Elle est confirmée par les mesures effectuées selon la technique PELTIER qui conduisent à une limite de retrait variant entre 10 et 11 %. Quant au retrait total, il peut être exprimé sous la forme $\frac{V_h - V_s}{V_s}$ qui prend ici la valeur R' = 36 % du volume final sec. .../...



Graphique 6 Variation volumique de la colonne de terre (Lunéville) en fonction de la teneur en eau volumique

On constate que cette valeur est sensiblement plus élevée que celle qui résulterait du soul retrait potentiel, défini par analogie avec le gonflement potentiel, comme résultant du retrait de chaque agglomérat sans contrainte susceptible d'entraîner un réarrangement du système. Appliquée à la relation

$$R = \frac{D_{a_s} - D_{a_h}}{D_{a_s}}$$

elle fournit une densité apparente à l'état sec moyenne pour l'ensemble de la colonne de terre égale à 1,62.

Il s'agit là de la densité apparente qui traduirait l'état structural de la colonne de terre, si cette dernière avait subi au cours de son humectation et de sa dessiccation une évolution identique dans toutes ses parties.

Or, nous avons vu (cf tableau 13), qu'on pouvait distinguer, en prenant comme critère la densité apparente mesurée sur motte, trois zones principales dans la colonne de terre à la fin de l'expérience.

a) Une partie comprenant la croûte superficielle et approximativement la moitié supérieure de la zone périphérique. Dans cette partie, les densités apparentes sèches mesurées varient entre 1,38 et 1,50 avec des valeurs fréquemment voisines de 1,40 à 1,43. On peut penser qu'il s'agit d'une partie de la colonne de terre qui a perdu son eau rapidement au début de l'expérience (surface du pot et surface de la fissure annulaire) et dans laquelle par conséquent le retrait enregistré extériorise le retrait tel qu'il a été défini plus haut de chacun des agglomérats. Si cette hypothèse est vérifiée, il doit être possible d'évaluer la densité apparente sèche de la zone à partir de la densité apparente humide de départ (1,04) et du coefficient de gonflement (ou de retrait) potentiel ($G = R = 0,27$). Le calcul effectué conduit à une valeur $D_{a_s} = 1,42$ précisément. L'accord entre les valeurs observées et cette valeur calculée est suffisamment satisfaisant pour que l'hypothèse à l'origine du calcul puisse être retenue.

b) Dans la zone centrale, les densités apparentes enregistrées sont beaucoup plus élevées, toujours supérieures à 1,70. Elles atteignent 1,83 dans une zone où la prise en masse appréciée morphologiquement et par le test à l'alcool-benzène était particulièrement caractéristique.

Si nous rappelons que dans le cas du matériau utilisé ici nous avons admis que 1,85 représentait une limite supérieure à la densité apparente correspondant à la disparition de toute porosité interstitielle, les valeurs enregistrées, dont le graphique n° 3 montre qu'elles tendent asymptotiquement vers 1,85 suggèrent que cette partie de la colonne de terre a été soumise à des contraintes autres que celles ayant pour origine le propre retrait. La morphologie générale de la zone prise en masse et en particulier la forme en cône et sa position par rapport aux surfaces d'évaporation horizontale et annulaire, nous conduisent à penser que ces contraintes pourraient trouver leur origine dans la pression exercée par les parties superficielle et périphérique de la colonne au cours du retrait lié à leur dessiccation en début d'expérience.

c) En ce qui concerne la base du pot, la prise en masse qui apparaît et à l'observation et au test à l'alcool-benzène, se traduit également par un accroissement de la densité apparente et donc une diminution de la porosité. Les valeurs enregistrées varient de 1,58 à 1,68 avec une moyenne de l'ordre de 1,63. Bien qu'il s'agisse là d'une prise en masse à l'humectation, possible malgré la stabilité structurale du matériau étudié en raison de la brutalité de l'humectation de la base du pot, il est intéressant de comparer la structure résultant de ce type de dégradation à celle qui a pris naissance dans la partie axiale de la colonne de terre au cours de la dessiccation. On constate alors que la désagrégation par l'eau conduit à des porosités certes plus faibles que celle qui existait dans le matériau initial, mais qui sont sensiblement plus élevées que dans le cas de la prise en masse à la dessiccation. En effet, la porosité totale initialement (à sec, après remplissage du pot) de 56 % diminue à 38,5 % en moyenne dans la zone prise en masse à l'humectation et à des valeurs inférieures à 34 % dans la zone prise en masse à la dessiccation.

.../...

En conclusion, de cette étude de la porosité dans les différentes parties de la colonne de terre, si nous nous attachons plus particulièrement à la zone axiale où le phénomène qui nous intéresse se manifeste, il ressort qu'au cours des phases successives (humectation - ressuyage - dessiccation) la structure a subi une évolution qui peut être exprimée de façon particulièrement explicite par l'évolution de la porosité interstitielle. Celle-ci passe, rappelons-le, de 37 % au départ à 13,4 % après ressuyage et des valeurs voisines de 3 à 5 % après dessiccation dans la partie prise en masse. L'accroissement notable de compacité qui affecte l'ensemble du modèle avant toute dessiccation et plus encore la partie axiale à la fin de l'expérience est certainement l'un des éléments caractéristiques de ce type d'évolution.

Il nous reste maintenant à examiner dans quelle mesure cette diminution de porosité entraîne non seulement un meilleur contact entre les éléments initiaux, mais une véritable coalescence de l'ensemble du système.

II - ETUDE DU MECANISME DE COALESCENCE -

Telle que nous l'avons définie, la prise en masse se traduit à l'observation macroscopique ou à un grossissement adapté par une disparition du contour des éléments structuraux initialement présents dans la colonne de terre. Pour obtenir une évaluation chiffrée de l'ampleur du phénomène nous avons eu recours au traitement et au tamisage du matériau en fin d'expérience dans un mélange d'alcool et de benzène en proportions convenables. Si nous nous reportons au graphique n°3, nous constatons qu'il existe une relation assez étroite entre le taux d'éléments pris en masse et la densité apparente correspondante. Le problème qu'on peut alors se poser, est de savoir si un accroissement de densité apparente dont nous avons étudié le mécanisme est une condition nécessaire et suffisante pour assurer la soudure entre deux éléments structuraux contigus ou bien s'il ne s'agit là que d'une condition nécessaire.

En d'autres termes le fait de rapprocher fortement les éléments structuraux à l'état plastique est-il suffisant pour assurer entre eux une liaison assez résistante pour supporter le traitement que nous avons choisi pour discriminer les zones prises en masse des autres.

Compte tenu des difficultés considérables que présentait pour nous, tant d'un point de vue technique, que d'un point de vue fondamental l'étude directe de la nature et des facteurs d'apparition de cette liaison entre agglomérats, nous avons choisi d'aborder le problème en étudiant les répercussions sur le phénomène d'une modification des propriétés physico-chimiques des surfaces en contact. Pour cela, nous avons procédé à deux expériences annexes, l'une consistant à interposer du talc entre les agglomérats, l'autre en remplaçant l'eau d'humectation par une solution d'un électrolyte susceptible de modifier le gonflement des colloïdes argileux en particulier à la périphérie des agglomérats.

1°) Humectation à l'aide d'une solution d'électrolyte -

Nous avons choisi une solution N/5 de chlorure d'aluminium. Le fait que le cation de ce sel soit trivalent, nous a permis d'obtenir une activité suffisante à une concentration faible évitant ainsi la cristallisation d'une trop importante quantité de sel au cours de la dessiccation avec toutes les conséquences (HUYTER, 1963) que cela implique.

L'expérience a été conduite de la même façon que dans le cas d'une humectation par l'eau, mais pour des raisons pratiques dans des pots de plus petites dimensions. Le traitement retenu pour cet essai, effectué sur la terre de Lunéville a correspondu à l'évaporation sous lampe à partir d'une humidité à la capacité de rétention.

A l'issue de la préhumectation, l'humidité de la colonne s'est avérée la même qu'en l'absence d'électrolyte. Par contre, l'humidité après ressuyage n'a pas dépassé 32,5 % contre près de 39 % dans le cas d'une humectation par une eau pure.

Apprécié globalement (variation de la cote de la surface), le gonflement de la colonne a été le même en présence et en l'absence d'électrolyte. Au cours de la dessiccation, les rythmes d'évaporation ont été très voisins compte tenu de la légère différence de l'humidité de départ. Nous pouvons donc considérer que les conditions générales de fonctionnement global des deux systèmes sont comparables.

L'examen morphologique après dessiccation complète ne permet pas de distinguer l'évolution structurale de la partie centrale des deux colonnes comparées. Toutefois, dans le cas de l'humectation à l'aide de la solution de chlorure d'aluminium, le matériau constituant le cône de "prise en masse" apparente s'effrite entre les doigts, contrairement à ce qui se passe dans le cas du témoin.

La comparaison des taux d'agrégats supérieurs à 3 mm issus du tamisage dans le mélange alcool-benzène fait apparaître une différence considérable de comportement entre les deux colonnes : dans le cas de l'humectation au chlorure d'aluminium, ce taux est insignifiant (1 %) ce qui indique qu'il n'y a pratiquement pas eu de soudure entre éléments structuraux initiaux, alors même que la densité apparente a augmenté dans des proportions qui conduiraient, en se référant au graphique n° 3 à un taux supérieur à 40 %, ce qui est d'ailleurs le cas pour la zone prise en masse de la colonne témoin (humectée à l'eau) où ce taux est de 50 % (1).

Cette expérience suggère que le mécanisme de soudure des éléments structuraux, au cours de la prise en masse pourrait être le suivant :

- En présence d'eau, il est très vraisemblable qu'il existe à la périphérie des agglomérats humides un gel de colloïdes argileux gonflé au maximum dans la porosité interstitielle.

(1) - La moindre intensité du phénomène de prise en masse enregistrée dans le témoin par rapport aux autres expériences (cf tableau) est liée à la dimension plus petite des pots dont l'axe se trouve de ce fait sensiblement plus près de la zone périphérique.

Au cours de la dessiccation, les contraintes mécaniques exercées sur la zone centrale par la partie superficielle et la partie périphérique plus sèches entraînent comme nous l'avons vu, une diminution de la porosité interstitielle, la distance moyenne passant d'environ 20 μ , lorsque la terre est à la capacité de rétention à moins de 5 μ en fin de dessiccation. On peut alors raisonnablement admettre qu'au moment de la consolidation des gels périphériques, ces derniers sont suffisamment continus pour assurer la cimentation de l'ensemble.

Dans le cas où l'on introduit un électrolyte dans le milieu, le volume occupé par ces gels se trouve réduit ainsi qu'on peut en avoir une confirmation indirecte par la diminution de la teneur en eau à la capacité de rétention. De ce fait, l'interpénétration de gels argileux de deux agglomérats contigus est au moins limitée, ce qui entraîne une absence de cimentation au cours de la consolidation occasionnée par la dessiccation.

2°) Enrobage des éléments structuraux initiaux par du talc pulvérulent -

Pour vérifier le bien fondé de l'hypothèse précédente suggérée, rappelons-le, par le comportement comparé de la colonne en présence et en l'absence d'un électrolyte susceptible de modifier le contact entre agglomérats, nous avons mis en place une deuxième expérience où cette modification devait être assurée par l'interposition entre les éléments structuraux d'une substance, ici du talc pulvérulent, susceptible de par ses propriétés de contrarier, au cours de la dessiccation, la formation d'une liaison continue et cohérente de ciment argileux entre les agglomérats.

Nous avons choisi le talc qui, neutre électriquement et hydrophobe, paraissait capable de remplir ce rôle.

Pratiquement, nous avons rempli un pot de petites dimensions avec des éléments structuraux de la terre de Lunéville inférieur à 2 mm et préalablement enrobés, par mélange à sec, par du talc présent en proportion de 5 %.

Compte tenu de la surface spécifique de la poudre de talc utilisé voisine de 20.000 cm²/g et donc de sa surface projetée au moins égale à 5000 cm²/g, nous avons estimé qu'une telle dose était suffisante pour assurer sur la surface des éléments structuraux (74 cm²/g) un enrobage d'au moins deux couches de particules de talc.

Au cours de l'humectation, le caractère hydrophobe du talc s'est manifesté par un retard sensible pendant l'ascension capillaire. En effet, le front d'humectation a mis 24 minutes pour avancer de 5 cm dans le cas du témoin, alors qu'il a mis 50 minutes dans le cas de la terre traitée.

Par contre, l'humidité pondérale après préhumectation s'est avérée la même (témoin = 51 % ; terre + talc = 50,37 %) et l'humidité après ressuyage rapportée à la quantité de terre (95 % dans le cas du talc) est la même également (témoin = 38,92 % ; terre + talc = 39,12 %).

Quant au gonflement global de même que dans le cas de l'électrolyte, il a été analogue dans la terre traitée et dans le témoin.

Après dessiccation, la comparaison entre le traitement talc et le témoin conduit aux mêmes constatations que dans le cas du traitement électrolyte : la morphologie générale et en particulier l'apparition du cône de "prise en masse" apparente sont analogues dans les deux cas. Mais en présence du talc la cohésion est très faible, la terre compacte apparemment prise en masse s'effrite sous la simple pression des doigts.

Cette fragilité est confirmée par le test alcool-benzène qui fournit pour la terre talquée un taux d'agrégats supérieurs à 3 mm insignifiant (0,66 %).

Conclusion

Les deux aspects principaux du phénomène de prise en masse à la dessiccation que nous venons d'étudier successivement, à savoir d'une part une diminution de la porosité située essentiellement au niveau de la porosité interstitielle, et d'autre part la soudure des agglomérats initiaux les uns aux autres, mettent en cause un certain nombre de propriétés du matériau qui semblent nécessaires à la manifestation de ce phénomène.

- En premier lieu, l'importance des phénomènes de gonflement et de retrait est manifeste ; le fait que l'horizon B ne subisse qu'une prise en masse très limitée, alors que ce matériau a un coefficient de gonflement non négligeable (14 %) conduit à penser que ^{seules} les terres à fort pouvoir gonflant sont sensibles à ce type d'évolution.

- Ensuite, pour que la soudure se produise, il apparaît nécessaire qu'existe à la périphérie des agglomérats un gel de colloïdes argileux suffisamment épais pour occuper, à l'état humide, la porosité interstitielle.

- Enfin, les conditions de dessiccation et de circulation d'eau dans la colonne doivent conduire à un gradient d'humidité suffisant entre les zones périphériques et le centre de la colonne de terre, de telle sorte que ce dernier soit encore à l'état plastique, alors que les premières ont déjà subi un retrait important.

- Plusieurs conditions semblent devoir être réunies pour satisfaire simultanément ces trois catégories d'exigences :

1°) La texture doit être suffisamment argileuse c'est à dire que la composition granulométrique doit comporter un taux suffisant de particules inférieures à 2 microns, et que ces particules doivent avoir une nature minéralogique leur conférant des propriétés "argileuses" marquées (montmorillonite plutôt que kaolinite : cf diagrammes aux rayons X p.9 à 13).

Une telle texture commande en effet le gonflement et le retrait, la plasticité du matériau dans une gamme d'humidité suffisamment large, ainsi qu'une mobilité de l'eau assez faible (MOREZET, 1967, PUECH, 1969) pour que l'apparition d'un gradient soit probable au cours de la dessiccation.

2°) La structure initiale doit être suffisamment fine pour que rapportée à la surface maximale possible de contact entre éléments structuraux, la porosité interstitielle existant à l'état humide après gonflement et réarrangement des agglomérats, conduise à des distances moyennes entre ces derniers les plus faibles possibles.

Nous avons toutefois vu que cette condition n'était pas suffisante et qu'intervenait de façon discriminante dans le phénomène de coalescence, l'épaisseur supposée du gel argileux périphérique et donc les conditions hydriques et physico-chimiques générales du milieu tout au long de la dessiccation.

3°) Enfin, bien que les expériences que nous avons effectivement pu réaliser ne l'aient pas mis en évidence, la cohérence de l'ensemble du mécanisme proposé implique l'intervention du régime d'évaporation (rapidité de la dessiccation et localisation des surfaces d'évaporation).

CHAPITRE QUATRIEME

INFLUENCE DU NOMBRE DE CYCLES D' HUMECTATION ET DE
DESSICCATION SUR LE PHENOMENE DE PRISE EN MASSE

Dans le milieu naturel, le sol subit au cours d'une année, plusieurs cycles d'humectation et de dessiccation. Aussi, avons-nous recherché si le nombre de telles alternances (humectation - dessiccation) influe sur le phénomène étudié.

A cet effet, 3 pots renfermant de la terre de Lunéville concassée et tamisée à 2 mm ont été soumis à 3 cycles d'humectation et de dessiccation. Ils ont été préhumectés, puis ressués pour ramener la terre à la capacité de rétention d'après la méthode décrite page 19. L'évaporation a été réalisée sous lampes (cf p.23) Les humidités pondérales des colonnes de terre sont reportées sur le tableau 14.

TABLEAU 14

Taux d'humidité, en début et en fin d'ex-
périence correspondant à chacun des cycles
(en % de la terre séchée à l'air)

Numéros des cycles	Humidité en fin de préhumectation	Humidité corres- pondant à la capa- cité de rétention	Humidité en fin de cycle
1	54,85	39,45	0
2	48,30	35,20	0
3	48,95	35,70	0

Nous constatons que les taux d'humidité (en fin de pré-humectation et après ressuyage) analogues pour le 2ème et le 3ème cycle sont toujours inférieurs à ceux enregistrés au 1er cycle.

D'après le tableau 14, la colonne de terre, une fois prise en masse, dans les conditions de l'expérience, absorberait moins d'eau qu'au cours de la 1ère humectation. A la fin du 1er cycle, le centre de la colonne de terre présente une porosité de l'ordre de 34 % (cf p. 68). Cette faible porosité expliquerait la moindre quantité d'eau retenue par la terre au cours des réhumectations suivantes (2è et 3è cycles).

RESULTATS OBTENUS

I - VARIATION VOLUMIQUE -

Mesurée globalement, la variation volumique

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{V_{cr} - V_s}{V_s} \quad \text{entre le volume occupé à l'état humide}$$

et celui occupé par la colonne à l'état sec, comparable au cours du 2è et du 3è cycle est légèrement inférieur à celle enregistrée au cours du 1er cycle (tableau 15). Le volume sec en fin de chaque cycle reprend sensiblement la même valeur, tandis que le volume humide après réhumectation et ressuyage (2è et 3è cycles) prend systématiquement une valeur légèrement inférieure à celle enregistrée à la fin du 1er cycle.

TABLEAU 15

Variation volumique au cours de différents cycles d'humectation et de dessiccation (exprimée en % du volume sec à l'état final)

N° des cycles	ΔV
1er cycle	28,20 (*)
2ème cycle	25,78
3ème cycle	25,43

(*) La différence de ΔV enregistrée au 1er cycle par rapport aux valeurs observées dans l'expérience principale peut être attribuée à la différence de taille .../... des pots utilisés.

Morphologiquement, il n'apparaît ^{pas} de différence entre le traitement correspondant à 3 cycles et celui à 1 cycle.

III - APPRECIATION DE L'INTENSITE DE LA PRISE EN MASSE -

1°) Comportement vis à vis du test à l'alcool-benzène -

A la fin du troisième cycle, nous avons pratiqué un tamisage dans le mélange alcool-benzène. Les résultats sont portés sur le tableau 16. L'examen de ce tableau montre que les taux d'éléments structuraux supérieurs à 3 mm issus du test sont comparables à ceux obtenus avec un seul cycle (tableau 11), aussi bien dans la zone centrale que dans les zones basale et périphérique des colonnes de terre.

TABLEAU 16

Eléments structuraux > 3 mm recueillis après traitement et tamisage dans le mélange alcool-benzène, d'échantillons prélevés en divers points de colonnes de terre ayant subi 3 cycles d'humectation et de dessiccation, exprimés en % de la prise d'essai (Terre de Lunéville)

"Horizons" cm →	1 - 3	3 - 7	7 - 11	Base de la colonne
Zone axiale	42,73	82,45	83,80	89,30
Zone périphérique	22,17	50,20	42,31	84,36

Le test à l'alcool-benzène ne révèle donc pas de différence notable entre les échantillons, prélevés en des points analogues, dans des colonnes de terre ayant subi un seul cycle d'humectation - dessiccation et dans des colonnes ayant subi trois cycles.

2°) Examen de la porosité -

De même que les taux d'agrégats issus du test à l'alcool-benzène, la porosité, exprimée par le biais de la densité apparente mesurée à la fin du 3ème cycle en divers points des colonnes de terre (tableau 17) conduit à des résultats analogues à ceux obtenus avec des modèles ayant subi un seul cycle d'humectation-dessiccation (cf. tableau 13).

TABLERAU 17

Densités apparentes des échantillons prélevés en différents points des colonnes de terre ayant subi 3 cycles d'humectation-dessiccation (Terre de Lunéville).

Horizons cm →	1 - 3	3 - 7	7 - 11	Base de la colonne
Zone axiale	1,49	1,78	1,81	1,67
Zone périphérique	1,43	1,52	1,57	1,68

Cet essai effectué avec trois cycles d'humectation - dessiccation permet de tirer trois conclusions essentielles :

a) L'analogie des résultats obtenus avec les colonnes soumises à un seul cycle d'humectation et de dessiccation d'une part et les colonnes ayant subi trois cycles d'autre part, montre que le phénomène de prise en masse à la dessiccation est réalisé totalement dès le premier cycle.

b) Cette même analogie indique que ni la cohésion (révélée par le test à l'alcool-benzène), ni la densité apparente ne sont affectées par le nombre de cycles. Ce qui signifie que le phénomène de prise en masse n'a pas été accentué dans les

colonnes de terre ayant subi trois cycles par rapport à celui observé à l'issue d'un seul cycle.

c) Le phénomène de prise en masse, tel qu'il a été réalisé dans les conditions expérimentales est stable. Or, une opinion très répandue veut que dans le milieu naturel, les alternances humectation - dessiccation, tout comme les alternances gel-dégel provoquent en général une dislocation des mottes de terre ramenées à la surface par le labour. Contrairement à cette opinion, dans les conditions où nous avons opéré, le phénomène de prise en masse semble être irréversible, puisqu'il persiste intégralement au bout de trois alternances d'humectation - dessiccation.

*
* *
*

D E U X I E M E P A R T I E

E T U D E E N P L E I N C H A M P

POUR ABORDER LE PROBLEME DE L'EVOLUTION DE LA STRUCTURE DU SOL EN PLACE VERS LA PRISE EN MASSE, NOUS AVONS INSTALLE UN DISPOSITIF EXPERIMENTAL EN PLEIN CHAMP. CE TRAVAIL NOUS PERMET DE VOIR DANS QUELLE MESURE LES RESULTATS ISSUS DE L'ETUDE DE CE PHENOMENE SUR MODELES, AU LABORATOIRE, CONCORDENT AVEC CEUX ISSUS D'UNE ETUDE DANS LE MILIEU NATUREL

CHAPITRE PREMIER

CONDITIONS EXPERIMENTALES

I - DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX -

L'étude préliminaire réalisée en Tunisie nous a conduit à retenir deux parcelles dont le sol est sensible à la prise en masse à la dessiccation. Rappelons que l'une est située sur le domaine expérimental du Centre Régional de Recherches Agronomiques de Béja (I.N.R.A. Tunisie), l'autre sur la ferme expérimentale du P.E.D.E.P. (Projet - FAO) à Bou Rebia. (cf carte de la Tunisie p.15).

Ces deux régions sont caractérisées respectivement par une pluviométrie moyenne annuelle de 670 mm et 400 mm. Le tableau 18 mentionne les conditions climatiques de l'année de l'expérimentation. Ces deux régions sont différentes surtout du point de vue de la pluviométrie (tableau 19).

Chaque dispositif (celui de Bou Rebia, comme celui de Béja) est composé de deux parcelles de 20 mètres carrés entourées chacune par une allée de 5 mètres de large. L'une des parcelles est placée sous un abri en tôle non ondulée, disposé en plan incliné à 50 cm de la surface du sol, d'un côté et à 40 cm de l'autre. L'inclinaison est réalisée en sens inverse de celui des vents dominants (photo 13). L'autre parcelle est laissée sans abri.

La moitié de chacune de ces parcelles est couverte de plastique perforé. Les perforations de un centimètre de diamètre sont réalisées à 10 centimètres les unes des autres.

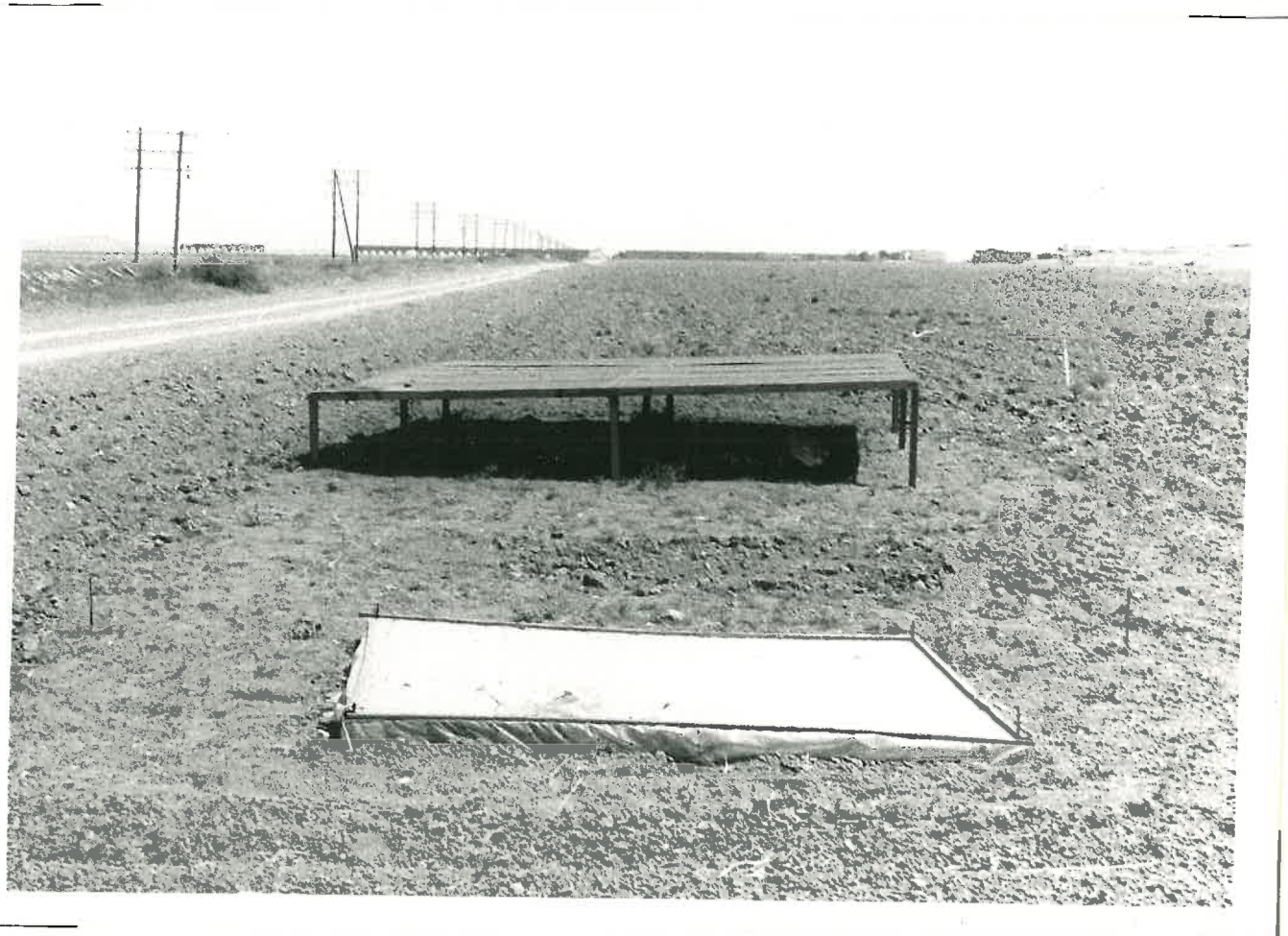


PHOTO n°13 : Dispositif expérimental en plein champ.
(Parcelles expérimentales de Bou Rebia)
La photo montre la parcelle sous abri ainsi
que la parcelle sous plastique perforé.

TABLEAU 18

Conditions climatiques de l'année
de l'expérimentation

Mois	décades	BEJA		BOU REBIA
		Pluies mm	E T P mesurée mm	Pluies mm
Février 1971	1	1,7	26,4	2,0
	2	15,1	35,2	4,0
	3	55,1	42,0	13,0
Mars	1	19,4	27,6	5,0
	2	17,2	40,0	25,5
	3	4,6	54,7	4,0
Avril	1	23,3	44,2	14,0
	2	0,3	66,2	23,5
	3	7,7	58,0	5,5
Mai	1	11,2	46,2	1,0
	2	19,1	73,6	7,0
	3	19,2	77,8	8,0
Juin	1	4,0	98,0	0
	2	0	139,6	0
	3	0	121,8	0
Juillet	1	0	128,6	0
	2	0	119,4	0
	3	0	166,8	0
Août	1	0	163,0	0
	2	0	132,6	0
	3	0	112,0	0

TABLEAU 19Quelques moyennes climatiques
annuelles

	<u>B E J A</u>	<u>B O U R E B I A</u>
Pluviométrie	670 mm	400 mm
Température moyenne	17,8 C	17,3 C
Température minima (Janvier)	5,2 C	4,0 C
Température maxima (Juillet)	35,1 C	36,9 C
Amplitude moyenne	17,9 C	17,2 C
Nombre de jours de Sirocco (*)	36	40

NB : La différence du climat entre Béja et Bou Rebia se fait sentir au niveau de la pluviométrie annuelle, aussi bien en intensité qu'en répartition.

(*) vent desséchant

Pour permettre les échanges gazeux entre la surface du sol et l'atmosphère, le plastique est posé sur un cadre en bois à 10 centimètres de la surface du sol.

Pour éviter toute déformation du plastique sous l'effet des intempéries, ce dernier est placé sur un grillage tendu. En effet, des déformations éventuelles risqueraient de causer une répartition irrégulière des eaux de pluie ou d'arrosage.

II - REGIMES HYDRIQUES IMPOSES AUX PARCELLES -

Au cours d'une année, ce phénomène dépendant des variations de l'humidité climatique, nous avons appliqué aux parcelles (comme dans le cas des modèles) des régimes différents d'apport et de départ d'eau.

1°) Régimes d'apport d'eau -

La variation du régime d'apport d'eau a consisté soit à supprimer la pluviométrie (parcelle sous abri) soit au contraire, à la compléter par une irrigation.

La parcelle sans abri (avec ou sans plastique) a reçu un arrosage par mois ramenant l'horizon arable du sol (0-40 cm) à une humidité correspondant à la capacité de rétention. Le complément d'eau apporté a été évalué par la formule suivante :

$$H_2O = S e Da \frac{CR - x}{100}$$

avec

- S = surface de la parcelle (ici 20 m²)
- e = épaisseur de la couche de terre à ramener à la capacité de rétention (ici à 0,40 m)
- CR = humidité correspondant à la capacité de rétention du sol pour l'eau exprimée en % du poids de terre sèche
- x = taux d'humidité pondérale 48 heures avant l'arrosage exprimé en % de terre sèche
- Da = densité apparente au sol correspondant à l'humidité x.

La quantité d'eau apportée par arrosage est donc :

- Pour Béja (CR = 39 %)

$$H_2O = 8 \text{ Da } \frac{(39 - x)}{100}$$

Soit Y_1 m³

- Pour Bou Rebia (CR = 28 %)

$$H_2O = 8 \text{ Da } \frac{(28 - x)}{100}$$

Soit Y_2 m³

2°) Régimes d'évaporation -

Deux régimes d'évaporation ont été choisis pour observer le rôle joué par ce facteur dans le phénomène de prise en masse.

- Une évaporation limitée, conditionnée par la couverture du sol à l'aide d'une toile de plastique perforé (cf chapitre 1, paragraphe 1, et photo 13).

- Une évaporation normale sous l'action des effets climatiques (parcelle sans plastique).

*
* *

Nous avons cherché à suivre l'évolution de l'état structural en fonction des divers traitements appliqués, et ce, à travers l'examen morphologique, le test à l'alcool-benzène - dans les mêmes proportions que dans le cas des modèles - et l'évolution de la densité apparente du sol en place.

CHAPITRE DEUXIEME

RESULTATS ISSUS DU TRAVAIL EN PLEIN CHAMP ET LEUR DISCUSSION

I - EXAMEN MORPHOLOGIQUE -

A trois périodes de l'année, correspondant à trois états hydriques différents, nous avons examiné l'état structural de la couche (0 - 80 cm) des sols de Béja et de Bou Rebia. Nous nous sommes attachés principalement à étudier :

- la forme et la dimension des agglomérats
- la forme, la compacité, la cohésion, l'importance des mottes
- l'importance, la forme et la dimension des "vides" constituant la macroporosité.

L'examen a porté d'abord sur la morphologie de la surface, ensuite sur le profil présenté par une coupe de terrain. Les fosses ont été creusées toujours parallèlement et avaient 1 mètre de long sur 0,80 mètre de profondeur.

a) B E J A

Parcelles	A B R I		S A N S A B R I	
	Feuille plastique	Sans plastique	Feuille plastique	Sans plastique
Février 1970 (Point de départ de l'essai)	Surface homogène : résultat d'un passage de disques à très faible profondeur pour perturber aussi peu que possible la structure préexistante au début de l'expérience et d'un passage de rateau manuel pour éviter de tasser davantage le sol par un deuxième passage de tracteur			
Mai 1970	Pas de fentes de retrait, tout au plus quelques fissures ne dépassant jamais le centimètre. Ceci est dû probablement aux conditions exceptionnelles de pluviométrie			
Août 1970	Larges fentes de retrait (2 à 3 cm)		Très larges fentes de retrait (3 à 5 cm) ; fissures peu larges de l'ordre de 1 cm	
	délimitant des surfaces de forme polygonales ; Affaissement des bords des polygones donnant un relief bosselé			

b) B O U R E B I A

Parcelles	A B R I		S A N S A B R I	
	Feuille plastique	Sans plastique	Feuille plastique	Sans plastique
Février 1970	Surface présentant un aspect homogène, résultant du passage de disque suivi de celui du rateau manuel (cf. Béja)			
Mai 1970	Pas de fentes ni fissure, la surface du sol présente sensiblement le même aspect qu'en Février			
Août 1970	Pas de fentes de retrait, tout au plus des fissures dont la largeur n'excède pas le centimètre - fissures très fréquentes et localisées de façon anarchique			

2) Examen du profila) B E J A

Parcelles	A B R I		SANS	
	Feuille plastique	Sans plastique	Feuille plastique	Sans plastique
Février 1970	<ul style="list-style-type: none"> - Absence d'horizons différenciés - humidité apparamment la même sur toute la surface présentée par le profil - macrostructure en plaquettes gauchies présentant des faces luisantes - structure polyédriques : les éléments polyédriques se détachent facilement les uns des autres leur taille est variable (de 2 ou 3 mm à une vingtaine de millimètres) 			
Mai 1970	Tous les profils présentent les mêmes caractéristiques qu'en février			
Août 1970	<ul style="list-style-type: none"> - Horizon relativement sec de 0 à 55 cm. Très peu humide au-delà de 55 cm. - grosses mottes de forme prismatique (20-30 cm) présentant une structure compacte continue (photo 14) 	<ul style="list-style-type: none"> - Horizon tellement sec :- fentes de retrait relativement larges (5cm environ) profondes (50-60 cm) - gros blocs prismatiques (20-30 cm) à structure continue compacte 	<ul style="list-style-type: none"> - Humidité faible - fentes peu larges (1cm) mais nombreuses et profondes - structures présentant des mottes prismatiques de 10 à 15 cm de taille dont l'intérieur à un aspect continu et compact 	



PHOTO n°14 : Bloc résultant de la prise en masse du sol en place (parcelle expérimentale de Béja)

b) B O U R E B I A

Parcelles Dates	A B R I		S A N S A B R I	
	Feuille plastique	Sans plastique	Feuille plastique	Sans plastique
Février 1970	<ul style="list-style-type: none"> - absence d'horizons différenciés par autre chose que l'humidité qui croît vers la profondeur - structure émiettée, dans la couche superficielle (10 cm d'épaisseur) résultant du passage de disques - structure prismatique moyenne à partir de 10 cm de la surface, vers la profondeur 			
Mai 1970	Tous les profils présentent les mêmes caractéristiques qu'en février (exceptée l'humidité qui est plus faible)			
Août 1970	<p>L'horizon superficiel présente sensiblement le même faciès qu'en février et mai - Seule apparaît une fissuration peu profonde qui ne dépasse pas les 30 centimètres. Les fissures sont peu larges (0,5 à 1 cm). Ces fissures sont souvent verticales, cependant on note la présence de certaines fissures horizontales à 20 - 30 cm les unes des autres.</p> <p>Le profil est presque totalement sec. La structure grossière est prismatique ; les prismes ont 10 à 15 cm environ. Ces mottes paraissent continues et compactes. Leur cohésion appréciée sur le terrain paraît moyenne. Ces mottes s'effritent plus ou moins facilement sous la pression des doigts.</p>			

D'après l'examen morphologique, dans les parcelles de Bou Rebia, la structure du sol semble s'être peu modifiée dans l'intervalle de temps séparant la première et la dernière observation (Février - Août), alors que dans celles de Béja, elle a subi des transformations notables. En effet, dans ce dernier cas on note l'apparition de fentes de retrait et la formation de blocs prismatiques, résultat d'une évolution de l'état physique du sol vers une prise en masse.

Les quelques différences signalées à l'occasion de l'examen de la surface du sol de Béja conduisent à penser que le régime d'apport d'eau intervienne dans le déterminisme de la taille des prismes à structure continue et compacte, ainsi que probablement dans la répartition et le nombre des fentes de retrait : la taille de tels prismes est plus grande dans les parcelles sous abri, le nombre des fentes de retrait étant moins important. Cependant, la compacité et la cohésion de ces éléments appréciées sur le terrain paraissent semblables dans toutes les parcelles.

Comparaison avec les modèles -

L'examen morphologique révèle une bonne concordance entre l'étude sur modèles et celle sur le sol en place. En effet, dans les parcelles où la prise en masse se manifeste (Béja) on constate que :

- Tout comme dans le cas des modèles, la couche superficielle (2 à 3 cm) n'est pas prise en masse. Les éléments structuraux y sont individualisés et présentent une taille moyenne de quelques millimètres.

- La structure colonnaire apparaît et, le sommet du "cône" de prise en masse se trouve à environ 3 centimètres de la surface du sol.

La zone centrale du prisme de prise en masse est plus compacte que les zones qui la délimitent. Les fentes de retrait se comporteraient donc comme la fissure annulaire formée au contact terre - paroi du pot en luciflex.

L'examen morphologique révèle d'une part une différence de comportement, entre les sols de Béja et de Bou Rebia, ainsi qu'entre les parcelles de Béja soumises à des régimes d'apport d'eau différents, d'autre part une analogie entre les prismes de prise en masse formés dans les parcelles de Béja et les colonnes de terre qui ont servi de modèles d'étude au laboratoire. Il reste donc à apprécier quantitativement ces différences et ces analogies par le biais du test à l'alcool - benzène (mis au point lors de l'étude sur modèles) et la densité apparente du sol en place déterminée sur des mottes prélevées lors des différents examens morphologiques.

II - APPRECIATION QUANTITATIVE DES CONSEQUENCES DE L'EVOLUTION DE LA STRUCTURE DU SOL EN PLACE -

1) Test au mélange alcool-benzène -

Pour quantifier la taille des agglomérats formés dans le sol des différentes parcelles, nous avons appliqué le traitement et le tamisage dans le mélange composé de 15 % d'alcool et 85 % de benzène. Les résultats sont reportés par les tableaux 20 (Béja) et 21 (Bou Rebia).

a) B E J A

Le tableau (20) montre que le taux des éléments structuraux issus du test à l'alcool - benzène passe de 39 - 44 % en février à 45 - 55 % en mai pour atteindre 77 à 93 % au mois d'août. Ce dernier taux correspond à la zone centrale du prisme de prise en masse. Les humidités pondérales de l'horizon superficiel du sol sont respectivement en février 39 %, en mai 32 à 35 % et en août 8 à 12 %.

b) B O U R E B I A

Entre février et mai, il ne semble pas y avoir de changement de l'état structural. Au mois d'août, par contre, il semble se produire une légère consolidation du sol sans qu'il y ait toutefois évolution jusqu'à la prise en masse à la dessiccation

(tableau 21). Les humidités pondérales du sol au cours des trois dates sont respectivement de 12 %, 10 à 12 % et 7 à 8 %.

* *

L'examen des tableaux 20 et 21 montre une bonne convergence entre l'étude morphologique et les résultats issus du test à l'alcool-benzène quant à la différence de comportement structural entre Béja et Bou Rebia. Ceci montre le caractère conventionnel du mélange choisi.

Nous avons vu dans l'étude sur modèles que l'une des conséquences essentielles de la prise en masse des sols à la dessiccation est la diminution de la porosité. Aussi, avons nous examiné cette propriété dans le cas des sols en place.

2) Etude de la porosité -

Aux différentes périodes (février, mai, août), dans chaque profil de sol étudié morphologiquement sont prélevés quatre mottes (2 dans l'horizon superficiel 0 - 20 cm et 2 dans l'horizon 20 - 40 cm) pour la détermination de la densité apparente. La mesure du volume apparent a été effectuée par la méthode au vernis (MAERTENS, 1964) sur des échantillons dont les dimensions sont de l'ordre du décimètre.

a) B E J A (tableau 22)

Ce tableau montre que dans toutes les parcelles quel que soit le traitement hydrique appliqué, la densité apparente passe de 1,30 - 1,32 (février et mai) à 1,68 - 1,73 (août). Cette dernière valeur correspond à une mesure effectuée dans la zone centrale du prisme de prise en masse.

b) B O U R E B I A (tableau 23)

Les valeurs de densités apparentes observées dans ce cas apportent une confirmation à l'examen morphologique. En effet, comme l'observation du sol en place, l'étude de la densité appa-

.../...

TABEAU 20

Taux d'éléments supérieurs à 3 mm issus du test au mélange alcool-benzène. Echantillons prélevés dans des parcelles soumises à des régimes hydriques différents (parcelles expérimentales de Beja)

Parcelles	Sous abri			Sans abri		
	Sous plastique	Sans plastique	Sous plastique	Sans plastique	Sous plastique	Sans plastique
Horizons	A	B	B	A	B	A
Dates						
Février	39,28	43,37	43,37	39,28	43,37	39,28
Mai	48,20	55,10	54,26	45,74	48,35	-
Août	90,37	87,20	88,70	85,66	84,41	80,45
						76,95

A = horizon 0 - 20 cm

B = horizon 20 - 40 cm

TABLERAU 21

Taux d'éléments supérieurs à 3 mm issus du test au mélange alcool-benzène. Echantillons prélevés dans des parcelles soumises à des régimes hydriques différents (parcelles expérimentales de Bou Rebia.)

Parcelles	Sous abri		Sans abri	
	Sous plastique	sans plastique	sous plastique	sans plastique
Horizons	A	B	A	B
Dates				
Février	42,13	47,28	42,13	47,28
Mai	38,12	41,13	43,78	48,20
Août	56,13	62,10	58,00	50,26

A = Horizon 0 - 20 cm

B = Horizon 20 - 40 cm

TABLERU 22

Densités apparentes des échantillons prélevés dans les parcelles soumisees à des régimes hydriques différents (Parcelles expérimentales de Béja)

Parcelles	Sous abr.			Sans abr.		
	Sous plastique	Sans plastique	Sans plastique	Sous plastique	Sans plastique	Sans plastique
Horizons	A	B	A	B	A	B
Dates						
Février	1,30	1,32	1,30	1,32	1,30	1,32
Mai	1,31	1,29	1,30	1,27	1,29	1,36
Août	1,71	1,70	1,68	1,70	1,73	1,72

A = horizon 0 - 20 cm

B = horizon 20 - 40 cm

TABEAU 23

Densités apparentes des échantillons prélevés dans des parcelles soumisees à des régimes hydriques différents (Parcelles expérimentales de Bou Rebia)

Parcelles	Sous abri				Sans abri			
	Sous plastique	Sans plastique	Sous plastique	Sans plastique	Sous plastique	Sans plastique	Sous plastique	Sans plastique
Horizons	A	B	A	B	A	B	A	B
Dates								
Février	1,40	1,42	1,40	1,42	1,40	1,42	1,40	1,42
Mai	1,56	1,49	1,58	1,52	1,53	1,52	1,48	1,47
Août	1,52	1,48	1,60	1,53	1,50	1,49	1,52	1,50

A = horizon 0 - 20 cm

B = horizon 20 - 40 cm

rente semble prouver que la structure du sol, dans ces parcelles, quel que soit le régime hydrique appliqué, n'a pas évolué au cours de la durée qui sépare la première de la dernière observation (février - août).

*
* *

CONCLUSION -

Dans les dispositifs expérimentaux installés en plein champ, les zones prises en masse (parcelles de Béja) fournissent des résultats analogues à ceux obtenus par l'étude sur modèles. Cette concordance est révélée à tous les niveaux de l'étude. En effet, rappelons qu'à l'examen morphologique on retrouve ici, comme dans les modèles, le "cône" de prise en masse. Le test à l'alcool-benzène appliqué à la zone centrale des prismes de prise en masse donne un taux d'éléments structuraux (supérieurs à 3 mm) du même ordre de grandeur que celui obtenu pour les échantillons prélevés dans le centre des colonnes de terre. La densité apparente, même si elle n'atteint pas des valeurs telles que 1,81 ou 1,83, augmente beaucoup (1,70 à 1,73 en août) par rapport aux valeurs observées lors du premier examen morphologique (février = 1,30 à 1,32).

.../...

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Au cours de la présentation des différentes étapes de ce travail, nous avons proposé les conclusions particulières propres à chacune d'entre elles. Il nous reste maintenant à examiner leur compatibilité et à tirer de cette confrontation, les principaux enseignements relatifs au mécanisme du phénomène étudié d'une part, d'autre part aux conséquences que peut avoir ce travail dans le domaine agronomique, pédologique, et enfin, du point de vue de la méthode générale utilisée.

Le phénomène de prise en masse à la dessiccation peut être considéré sous deux aspects différents bien que complémentaires.

1) Tout d'abord, il se manifeste par une diminution considérable de la porosité qui, de 56 % à l'état sec initial atteint 34 % à l'état sec final dans les zones prises en masse, ceci se traduisant par la disparition quasi totale de la porosité interstitielle, les seules lacunes présentes à la fin de l'évolution étant celles qui correspondent à la porosité dite texturale, c'est à dire celle qui résulte de la disposition des constituants granulométriques au sein de l'assemblage élémentaire. L'évolution qui conduit à un tel état s'effectue en deux phases principales :

- Au cours de l'humectation, une première diminution de la porosité interstitielle est la conséquence du gonflement des agglomérats dans un espace limité. Dans le cas des terres étudiées celle-ci passe de 37 % à 13 %.

- Pendant la dessiccation, l'apparition d'un gradient d'humidité et la présence de surfaces privilégiées d'évaporation conduisent à un remaniement de la partie centrale des volumes délimités par le réseau principal de fentes de retrait sous l'influence de contraintes mécaniques liées à ce dernier.

2) La diminution de porosité enregistrée s'accompagne de la coalescence des éléments structuraux de départ. Si une faible porosité interstitielle apparaît comme une condition logiquement nécessaire à cette soudure en favorisant un contact étroit d'agglomérat à agglomérat, elle ne semble pas être une condition suffisante. Les propriétés physico-chimiques du milieu susceptibles d'influencer l'état du gel argileux présent à la périphérie des agglomérats interviennent en effet bien que le mécanisme de leur action n'ait pu être directement démontré.

Les facteurs mis en cause dans le mécanisme général proposé peuvent être regroupés en deux catégories principales :

- Une première série peut être rattachée à des caractéristiques relativement permanentes du terrain et en premier lieu à la constitution physique et chimique de la couche superficielle (20 à 40 premiers centimètres) du sol. Cette conclusion déjà pressentie au cours de l'étude préliminaire a été explicitée à l'issue de l'étude sur modèles et confirmée à l'occasion de l'expérimentation sur le terrain. Rappelons qu'une texture suffisamment argileuse est nécessaire pour que la prise en masse intervienne pour des raisons relevant du pouvoir gonflant du matériau, de ses propriétés mécaniques et de la mobilité de l'eau. Par ailleurs, il n'a pas été possible vraisemblablement en raison d'un étalement insuffisant des conditions expérimentales d'évaporation de confirmer et à fortiori d'expliquer l'influence suggérée au départ du régime d'évaporation (humidité initiale et pouvoir évaporant de l'air). Il reste qu'une évaporation intense favorise vraisemblablement la prise en masse ne serait-ce qu'en accentuant les gradients d'humidité nécessaires comme nous l'avons montré.

Si de la connaissance de cette première série de facteurs il apparaît difficile de tirer des règles d'action susceptibles de freiner une évolution structurale dont les conséquences agronomiques sont généralement défavorables, par contre, leur connaissance devrait favoriser un pronostic concernant les risques d'apparition du phénomène.

D'autres facteurs plus contingents semblent essentiellement liés à l'état structural à la fin de l'hiver, c'est à dire

.../...

avant le début de la phase de dessiccation. La finesse des éléments structuraux commande en effet tout le mécanisme de coalescence. Dans ce domaine, la convergence est très satisfaisante entre les suggestions de l'étude préliminaire, les résultats de l'étude sur modèles et sur le terrain. Ce dernier souligne de plus en plus l'importance éventuelle d'une structure continue au départ qui se comporte alors comme le terme extrême de la diminution de porosité interstitielle. Les conséquences agronomiques sont dès lors évidentes :

- danger de fabrication de terre fine lors des labours ou de la présence de zones tassées à faible profondeur à la suite par exemple d'une intervention culturale précoce au printemps alors que le terrain est encore humide.

- d'autre part, ce risque d'affinement des éléments structuraux est accru dans tous les cas où les conditions climatiques de l'hiver (gel-dégel dans les régions telles que l'Est de la France, alternance d'humectation et de dessiccation hivernales en climat méditerranéen) sont susceptibles de provoquer surtout en terre argileuse des fissurations intenses de la couche superficielle du terrain.

- Par ailleurs, il est plausible qu'une telle évolution de la structure puisse être au moins limitée par l'adjonction au sol d'un sel (carbonate de calcium ou plâtre) susceptible de limiter la coalescence.

- En outre, bien que pour des raisons techniques, l'expérimentation au champ conduite en Tunisie ne nous ait pas fourni d'éléments de réponse, le mécanisme général mis en cause conduit à penser que l'introduction de l'irrigation ou de techniques limitant l'évaporation diminueraient notablement cette évolution structurale.

- Enfin, la comparaison de nos résultats avec ceux obtenus par BUI HUU TRI à l'occasion de son étude sur la granulation des sols sous prairie met en évidence le caractère déterminant de la présence d'une végétation qui apparaît nettement

capable d'inverser totalement l'évolution, les conséquences de cette constatation se manifestent au niveau de l'assolement : la présence dans la rotation de culture implantée tardivement au printemps augmentant les risques de prise en masse.

Une deuxième série de conclusions porte sur l'intérêt pédologique des résultats obtenus. La morphologie de la structure (forme et taille des éléments structuraux) est utilisée couramment comme un critère important de classification des sols intervenant jusqu'à un niveau très élevé de la taxonomie. Il apparaît donc particulièrement important qu'un tel critère ne se limite pas à un rôle d'identification, mais puisse être considéré comme l'extériorisation d'un ensemble de conditions et de processus aussi bien connus que possible. Dans le cas présent, il apparaît que la structure colonnaire caractéristique dans certains sols argileux représente la conséquence morphologique normale du processus de prise en masse, tel que nous l'avons décrit. Il est dès lors possible de relier les différents profils regroupés en raison de la présence d'un tel type de structure par l'ensemble des conditions intrinsèques et extrinsèques nécessaires à la réalisation de l'évolution considérée.

En dernier lieu, nous présenterons quelques réflexions sur la méthode générale utilisée.

Il nous semble que l'intérêt d'une démarche en trois étapes :

- première analyse du problème tel qu'il se pose dans le milieu naturel,

- élaboration et étude de modèles de laboratoire à partir d'hypothèses suggérées par la première étape,

- confrontation des résultats des modèles avec des observations précises faites en milieu naturel et par là recherche de la validité et de la généralité de conclusions obtenues dans des conditions qui correspondent à une schématisation de la réalité,

s'est trouvé confirmé.

A ce propos, l'utilisation de dispositifs extrêmement simples peut rester fructueuse dans la mesure où ils permettent de prendre en compte de façon suffisamment analytique les principales hypothèses formulées au départ.

Enfin, à de nombreuses reprises au cours de ce travail qu'il s'agisse de régler des problèmes d'ordre technique ou de rechercher une interprétation générale des résultats, nous avons eu à nous référer, et dans la pratique de façon quasi quotidienne à des recherches effectuées simultanément dans des domaines complémentaires tels que ceux qui recouvrent la texture et la mécanique des sols ou l'étude de certains comportements structuraux autres que celui qui nous préoccupait. Le bénéfice tiré de cette collaboration n'a pu être assuré que parce que la recherche dont nous venons de présenter les principaux résultats a été conduite dans le cadre d'une équipe regroupée autour d'un même thème général.

*
* *

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AMIE P. 1945 - Dosage rapide du carbone organique des sols
Ann. Agr. p.161-172
- AUBERT G., BOULAIN J. 1967 - La pédologie - collec. "Que sais-je"
- BAVER L.D. 1956 - Soil physics - Wiley and sons - New York
- BETREMIEUX R. 1960 - Genèse et classification des sols - Ed.
"Techniques Agricoles"
- BLANCHET R., BOSCH M., MAERTENS C., GELFI N., CABELGUENNE M. 1967 -
Quelques caractères physico-chimiques de sols types de la
région toulousaine - Conséquences agronomiques - Note à
diffusion restreinte - Station d'Agronomie de Toulouse
- BLANCHET R., MAERTENS C., MARTY J.R., GELFI N. 1966 - Influence des
constituants minéraux de quelques types de sols sur leurs
propriétés physiques et leur possibilités culturales -
Bull. A.F.E.S. n°9
- BOUCHET, ROBELIN 1969 - Evapotranspiration potentielle et réelle -
B.T.I. n°238
- BUKMAN M.O., BRADY N.C. 1960 - Le sol - Intercontinental éditions
New-York
- BUI HUU TRI, 1968 - Dynamique de la granulation du sol sous prairie -
Ann. Agr. 19 (4), p.415-439 et Thèse Fa. des Sciences Paris
- CANARACHE A., 1965 - Les facteurs de la résistance mécanique des
sols et les méthodes utilisées pour les étudier -
Sciences du sol n°2, p.39-107
- CAILLERE S., HENIN S. 1963 - Minéralogie des argiles - Ed. Masson
- CHAUSSIDON J. 1965 - Quelques propriétés importantes des argiles -
Cahier des Ing. Agro.
- CONCRET J., 1966 - Etude des mécanismes de la destruction des
agrégats de terre au contact des solutions aqueuses -
Thèse Fac. Sciences - Strasbourg
- CAURAU M., 1969 - Etude expérimentale de la circulation de l'eau
non saturante - Ann. Agr.
- DAMAGNEZ, 1959 - Rôle du mulch naturel ou artificiel sur la dynamique
et l'économie de l'eau - C.R. Ac. Agri.
- DECAU J., PIORAMONTI S., MALTERRE H. 1962 - Teneur des sols de la
Haute-Garonne en matière organique - Ann. Agr. 13 (4)
p.347-362
- DE LEENHEER, 1957 - Le problème de la structure du sol et ses aspects
pratiques - Bull. inst. Agro. et St. de recherches -
Gembloux

.../...

- DEICLON A., 1952 - Dynamique du sol - Principes d'Agronomie -
T. 1 520 p. Ed. Dunod - Paris
- DIEHL R., 1957 - Agriculture générale - 2 tomes - Ed. Baillière
- DUCHAUFOUR Ph., 1960 - Précis de pédologie, vol.438 p. Ed. Masson
- DUCHAUFOUR Ph. - L'évolution des sols - Ed. Masson
- DUTHIL J., 1971 - Eléments d'écologie et d'agronomie - Ed. Baillièrre
- FEODOROFF A., 1960 - Evaluation de la stabilité structurale d'un sol
(Indice S) nouvelles normes d'emploi de l'appareil à
tamiser - Ann. Agr. 6, 651-659
- FEODOROFF A., 1961 - Influence des propriétés structurales sur la
pénétration de l'eau dans un sol sec - C.R. Ac. Agri.
4, p.164-168
- FEODOROFF A., 1962 - Ressuyage du sol et capacité de rétention pour
l'eau - Ann. Agr. 13 (6) p.523-547
- FEODOROFF A., RAFI M. 1963 - Evaporation de l'eau à partir d'un sol
nu - Ann. Agr.
- FEODOROFF A. 1966 - Etude expérimentale de l'infiltration de l'eau
non saturante - Thèse - Paris
- FOX W.E., 1964 - Echantillonnage pour des mesures d'humidité du sol -
Experimental Agriculture and animal Husbandry n°13 -
p.191-192
- GAUCHER G., 1968 - Traité de Pédologie Agricole - Le sol - Ed.Dunod
- GERARD C.J., COWLEU W.R., KUNZE G.W., 1966 - Influence des conditions
de dessèchement sur la porosité non capillaire - Soil
Science - 102 n°1 - p.59-63
- GRAS R., 1969 - La porosité du sol - Sc. du sol n°2
- HALLAIRE M., 1960 - Eau et sol - Ed. "Techniques Agricoles"
- HALLAIRE M., 1963 - Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en
régime de dessèchement - Ann. Agr. 14 (4) p.393-428
- HEMIN S., 1938 - Etude physico-chimique de la stabilité structurale
des terres - Thèse - Paris
- HEMIN S., MONNIER G., 1956 - Evaluation de la stabilité de la
structure du sol - 6 th. int. Soil Sc. Cong. Proc. vol.B
49-52
- HEMIN S., MONNIER G., GRAS R., 1969 - Le profil cultural - Ed.Masson
- HEMIN S., BOSQUET, 1964 - Relation entre le comportement des sols
et leur texture - C.R. Ac. Agr. T.2 - p.842-846

- HENIN S., MOHNER G., HUTTER W., 1963 - Etude de la mise en valeur des marais de l'Ouest - S.A.Z.V. Etude n°7
- HUTTER W., 1966 - Action des compressions sur la structure du sol
Ann. Agr. 17 (1) p.37-52
- KHEYRABI D., 1966 - Influence de la composition granulométrique des sols sur leur stabilité structurale - Thèse - Paris
- LOW J.P. Jr. et KUNZE G.W., 1966 - Reactions of surfactants with montmorillonite adsorption mechanisms - Soil Sc. Soc. Am. Proc. 30, 3, 321-327
- MAERTENS C., 1964 - La résistance mécanique à la pénétration : ses facteurs et son influence sur l'enracinement - Ann. Agr. 15 (5), p.539-554
- MAERTENS C., 1964 - Influence des propriétés physiques des sols sur le développement racinaire et conséquences sur l'alimentation hydrique et azotée des cultures - Sciences du Sol n°2
- MAERTENS C., MORIZET J., STUBER R., 1965 - Modalités d'utilisation en Agronomie d'un humidimètre à ralentissement de neutrons
Ann. Agr. 16 (1), p.5-23
- MAERTENS C., 1965 - Deux méthodes de détermination de la densité du sol en place, leurs possibilités d'utilisation - Bull. A.F.E.S. Août, p.283-290
- MAERTENS C., 1969 - Influence de quelques facteurs sur la fissuration des sols - Sciences du Sol n°1, p.77-83
- MARTY J.R., MAERTENS C., 1966 - Répercussion du tassement excessif d'un sol mal structuré sur la croissance et la production d'une culture irriguée de maïs - C.R. Ac. Agr. n°17, p.1348-1356
- MARTY J.R., 1969 - Les boubènes : caractères et propriétés physiques
Conséquences agronomiques - Thèse - Paris
- MARTY J.R., 1969 - Composition de croûtes de battance, comparée à celle de la terre sous-jacente - C.R. Ac. Sciences - 268 - p.645-648
- MARTY J.R., HILLAIRE A., CABELGUENNE M., VIARD R., 1969 - Conséquences de la profondeur du sol et des techniques d'irrigation sur la production d'une culture de maïs - Bull. A.F.E.S. n°1 - p.43-47
- MARTY J.R., MAERTENS C., 1969 - Comportement à l'effritement et à la fissuration de quelques sols types du Sud-Ouest de la France - Bull. A.F.E.S. n°1, p.5-8
- MARTY J.R., BOSC M., 1969 - Capacité d'échange et caractéristiques minéralogiques de différentes fractions inférieures à 2 μ dans des terres du type boubène - C.R. Ac. Sciences 268 - p.262-265

- MONNIER G., 1963 - La structure du sol et les moyens de l'améliorer
C.R. Journées sur la Fertilisation 11-12 Juin - Tours
- MONNIER G., 1965 - Action des matières organiques sur la stabilité
structurale des sols - Thèse Fac. Sciences - Paris
- MONNIER G., 1966 - Le concept sol et son évolution - Sciences du sol
n°1, p.89-111
- MONNIER G., KONAN L., 1968 - Influence des conditions de séchage des
terres sur leur stabilité structurale - Ann. Agr.
- MORIZET J., 1967 - Etude de la circulation de l'eau non saturante
dans différentes terres en régime du dessèchement - Ann.Agr.
- PELNIER R., 1955 - Manuel des laboratoires routiers - Ed. Dunod-Paris
- PERIGAUD S., 1964 - Travail du sol et limites d'Atterberg - C.R. Ac.
Agri. n°1 - p.57-68
- PERIGAUD S., 1965 - Effet de la résistance mécanique et du déficit
en oxygène sur le développement racinaire - C.R. Ac.Agr.
n°18, p.1209-1220
- PLAISANCE G. et CAILLEUX A., 1958 - Dictionnaire des sols - vol.604p.
Ed. Maison rustique - Paris
- "Plante - Sol - Climat et Irrigation" - Etude réalisée en 1965,
1966, 1967, par la Station d'Agronomie de Toulouse -
Publication à diffusion restreinte - 1 vol. 180 p.
- PUECH J., 1969 - Etude expérimentale de la circulation de l'eau non
saturante dans différents sols - Ann. Agr.
- RUSSEL E.W., 1958 - Soil conditions and plant growth - Ed. Longmans
- SEBILLOTTE H., 1964 - Action de la structure sur une culture de
luzerne - C.R. Ac. Agri. - Mai 1964
- SEBILLOTTE H., 1968 - Stabilité structurale et bilan hydrique du sol-
Influence du climat et de la culture - Ann. Agr. 19 (4)
p.403-414
- SCHLOESING, 1885 - Chimie Agricole - Encyclopédie Frémy-Dunod- Paris
- TAYLOR H.M., ROBERSON G.M., PARKER J.J., 1966 - Relation entre la
pénétration des racines et la compacité du sol dans des
terres de structure moyenne à grossière - Soil Sciences
Vol. 102 - n°1, p.18-22
- WITTSSEL L.E., 1964 - Effet du compactage du sol sur le développement
des plantes - Dissertation Abstracts. Vol 25, n°6
- YODER, 1936 - Cité par S. EBHLEN et al dans le Profil Cultural

* * *

BERNOT J., 1961 - Contribution à l'étude des sols lessivés des
terrasses de la Garonne - Thèse Fac. des Sciences Toulouse

.../...

- DALLEBINNE E., 1967 - Les façons culturales dans les parcelles irriguées du C R U E S I - rapport de la première mission en Tunisie (23-27 octobre 1967)
- DALLEBINNE E., 1968 - Préparation des sols en parcelles irriguées à l'eau salée - rapport de la deuxième mission en Tunisie (10-16 juin 1968)
- FAURE A., 1968 - Contribution à l'étude expérimentale de l'action d'un versoir sur le sol - Thèse - Grenoble
- FIES J.C., 1970 - Recherches de paramètres facilitant l'interprétation de l'analyse granulométrique en physique du sol : Influence de la surface spécifique des éléments du squelette sur la stabilité structurale - Sciences du sol n°2
- HENIN S., MONNIER G., 1961 - Mécanisme de l'action d'une couverture sur le bilan de l'eau du sol - C.R. Ac. Sc.
- JAMAGNE M., BLIET L., REMY J.C., 1970 - Contribution à l'étude pédologique et agronomique des sols argileux du bassin parisien - La Haute Brie - Ann. Agr. 21 (2) 119-157
- JEANSON C., 1966 - Essai de pédozoologie expérimentale : Morphologie d'un sol artificiel structuré par les lombricides - Thèse - Paris
- LA TOISON M., 1964 - Infrarouge et applications thermiques - Ed. Centrex - Eindhoven
- METTAUER H., 1968 - Contribution à la connaissance agro-pédologiques des sols lourds de Lorraine - Ann. Agr. 19 (4) 441-455
- MONNIER G., TURC L., 1964 - Une méthode de fractionnement physique des matières organiques du sol - Exemples d'application - 8è Congrès intern. de la Science du sol - Bucarest
- MAERTENS C., 1970 - Influence des conditions du milieu sur l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par les systèmes radiculaires de quelques graminées cultivées - Thèse Toulouse
- PUECH J., 1967 - Appréciation de l'évaporation potentielle dans une région soumise à l'effet du vent - Bull. A F E S
- SCHON J., 1968 - Contribution à la détermination de la pression naturelle des terres sans cohésion - Bergbautechnik n°11 Nov. 1968, p.558-560
- SOLS DE TUNISIE - Bulletin du Service Pédologique de Tunisie n°1 1969
- TURC L., 1961 - Evaluation des besoins en eau d'irrigation, Evapotranspiration potentielle - Ann. Agr. 12 (1), 13-49
- TURC L., 1964 - Evapotranspiration potentielle mensuelle ou décadaire - Colloque franco-polonais de l'aménagement et de l'économie de l'eau - Varsovie 1964

T ABLE DES MATIERES

*

— VAIT PROPOS

I NTRODUCTION 1

PREMIERE PARTIE : ETUDE SUR MODELES

Chapitre premier -

MATERIEL ET TRAITEMENT

I - Le matériel expérimental 7

- 1°) Les pots
- 2°) Les sols étudiés
 - a) Nature des sols
 - b) Les éléments structuraux

II - Les traitements 17

- 1°) Remplissage des pots
- 2°) Préhumectation des pots
- 3°) Régimes hydriques imposés aux pots
 - a) Régimes d'humectation
 - b) Régimes d'évaporation

Chapitre deuxième -

RESULTATS ISSUS DU TRAVAIL SUR MODELES ET LEUR DISCUSSION

I - Examen morphologique 26

A - Technique d'examen

B - Examen proprement dit

- 1°) Influence de l'état structural
- 2°) Influence de la nature du sol
 - a) Cas de l'horizon B de Versailles
 - b) Cas des terres argileuses

CONCLUSIONS 35

II - Appréciation de l'intensité du phénomène de prise en masse 37

A - Test à l'alcool ou à l'alcool-benzène 37

.../...

1°)	Choix du traitement	
2°)	Mode opératoire	
3°)	Résultats obtenus et discussions	
	a)	Horizon B de Versailles
	b)	Les terres argileuses
B	- Etude de la porosité	50
	1°)	Remarques préliminaires
	2°)	Résultats obtenus
	a)	Horizon B de Versailles
	b)	Terres argileuses
	3°)	Discussion

Chapitre troisième -

ETUDE DES CONSEQUENCES DE LA PRISE EN MASSE ET DU MECANISME QUI LA REGIT

I	- Discussion sur les variations de porosité	59
	1°)	Humectation et ressuyage
	2°)	Dessiccation
II	- Etude du mécanisme de coalescence	69
	1°)	Humectation à l'aide d'électrolyte
	2°)	Enrobage des éléments structuraux initiaux par du talc pulvérulent
CONCLUSION		74

Chapitre quatrième -

INFLUENCE DU NOMBRE DE CYCLES D'HUMECTATION ET DE DESSICCATION SUR LE PHENOMENE DE PRISE EN MASSE

	Résultats obtenus	77
I	- Variation volumique	77
II	- Appréciation de l'intensité du phénomène	78
	1°)	Comportement vis à vis du test à l'alcool-benzène
	2°)	Examen de la porosité

DEUXIEME PARTIE : ETUDE EN PLEIN CHAMP

Chapitre premier -

CONDITIONS EXPERIMENTALES

I - Dispositifs expérimentaux	82
II - Régimes hydriques imposés aux parcelles	86
1°) Régime d'apport d'eau	
2°) Régimes d'évaporation	

Chapitre deuxième -

RESULTATS ISSUS DU TRAVAIL EN PLEIN CHAMP ET LEUR DISCUSSION

I - Examen morphologique	88
1°) Examen de la surface	
a) Béja	
b) Bou Rebia	
2°) Examen des profils	
a) Béja	
b) Bou Rebia	
II - Appréciation quantitative des conséquences de l'évolution de la structure du sol en place	94
1°) Test au mélange alcool-benzène	
a) Béja	
b) Bou Rebia	
2°) Etude de la porosité	
a) Béja	
b) Bou Rebia	
CONCLUSION	100
CONCLUSIONS GENERALES	101
BIBLIOGRAPHIE	106