

these - L 13

FB8

MINISTRE DE L'AGRICULTURE
— I. N. R. A. —
STATION DE SCIENCE DU SOL
Domaine Saint-Paul
84140 MONTFAVET

ETUDE DES MECANISMES
DE LA
DESTRUCTION DES AGREGATS DE TERRE
AU CONTACT
DE SOLUTIONS AQUEUSES

per

J. CONCARET

Ingénieur Agronome

Doyen : Professeur J.H. VIVIEN

Doyens Honoraires : A. DANJON, A. KIRRMANN, P. LACROUTE, H.J. MARESQUELLE.

Professeurs Honoraires : P. de BEAUCHAMP, L. BOISSELET, H. CARTAN, G. CERF, C. CHABAUTY,
A. CHRISTIEN, A. DANJON, J. DENY, Ch. EHRESMANN, M. FRECHET,
H. GAULT, A. HEE, R. HOCART, A. KIRRMANN, G. LEMEE,
P. L'HERITIER, A. LICHNEROWICZ, L. NEEL, H. OLLIVIER,
Ch. SADRON, E. TERROINE, R. THIRY, H. VILLAT, H. WEISS,
Et. WOLFF, J. YVON

Maître de Conférence Honoraire : R. WEILL.

Professeurs :

H.J. MARESQUELLET.	Biologie végétale
A. ROUSSELT.	Calcul différentiel et intégral et théorie des fonctions
H. FORESTIERT.	Chimie générale
J. ROTHET.	Physique du Globe
P. LACROUTET.	Astronomie
J.H. VIVIENT.	Zoologie et Embryologie expérimentale
A. MAILLARDT.	Physicochimie du Pétrole
S. GORODETZKYT.	Physique générale et Physique nucléaire
L. SACKMANNT.	Mécanique des Fluides
J. BYET.	Chimie physique
R. LOMBARDT.	Chimie organique
Mle PEREY M.T.	Chimie nucléaire
S. GOLDSZTAUBT.	Minéralogie et Pétrographie
P. JOLYT.	Biologie générale
H. BENOITT.	Physicochimie macromoléculaire
P. CUERT.	Physique générale et Physique corpusculaire
G. MILLOTT.	Géologie et Paléontologie
R. LECOLAZETT.T.P.	Physique du Globe
H. SAUCIERT.T.P.	Minéralogie
R. ROHMERT.	Chimie minérale
Mle GAGNIEU A.T.T.P.	Botanique
S. NIKITINET.	Physique générale
F. STUTINSKYT.	Physiologie générale
B. WURTZT.T.P.	Chimie biologique
J. BRENETT.	Electrochimie
G. OURISSONT.T.P.	Chimie
Cl. LEVIT.T.P.	Biologie générale
A. COCHET.T.P.	Physique nucléaire
R. CERFT.	Physique générale
J. FRENKELT.T.P.	Mathématiques
P. TAGLANGT.	Physique
J.P. LONCHAMPT.T.P.	Physique
J. BOSCHERP.S.C.	Mécanique des Fluides
A. DELUZARCHET.T.P.	Chimie
J.B. DONNETT.T.P.	Chimie Physique
R. ARMBRUSTERT.T.P.	Physique
A. ROCHET.T.P.	Physique du Globe
L. HIRTHT.	Microbiologie
J. YOCCOZT.	Physique théorique
A. SIGOTP.S.C.	Zoologie
J. COGNET.T.P.	Géologie
A. FUCHST.	Mécanique rationnelle
A. GALLMANNT.T.P.	Physique
P. FIALHET.T.P.	Physiologie animale

J.P. EBELT. Chimie biologique
 J. PARRODT.T.P. Chimie
 R. WEYT.T.P. Chimie
 Mme MAGNAC D.....T.T.P. Physique
 M. DAUNEP.S.C. Physique
 J.P. ADLOFFT.T.P. Chimie nucléaire
 D. BERNARDT.T.P. Méthodes Mathématiques de la Physique
 G. LAPRAZP.S.C. Botanique
 M. ZISMANT.T.P. Mathématiques
 E. DANIELP.S.C. Physique
 P. CHEVALLIERP.S.C. Physique
 J. GREMILLARDT.T.P. Mathématiques
 P. CARTIERT. Mathématiques M.P.C.
 G. REEBT. Topologie
 F. NORQUETT. Analyse supérieure
 R. CHAUVINT. Psychophysiologie
 J. WUCHLERP.S.C. Physique
 Mme BRINI M.....P.S.C. Chimie
 G. PERNYP.S.C. Physique
 R. BAROP.S.C. Physique
 H. DURANTONP.S.C. Botanique
 R. WEISSP.S.C. Chimie
 P. FEDERLINT.T.P. Chimie
 J. LERAYP.S.C. Physique
 J.P. SCHWINGP.S.C. Chimie
 M. SIESKINDP.S.C. Physique
 G. MONSONEGOP.S.C. Physique mathématique
 P. GABRIELP.S.C. Mathématiques
 C. WIPPLERT. Physicochimie des Hauts Polymères industriels
 P.A. MEYERT.T.P. Mathématiques

Professeurs associés

D. PATTERSON Physicochimie macromoléculaire
 S.R. DE GROOT Physique nucléaire
 F. SPITZER Mathématiques
 L. GEMTER Minéralogie

Maîtres de Conférences

H. DANAN Physique
 A. CLAUSS Chimie propédeutique
 Mme WINTER Chr..... Physique
 G. WEILL Physique
 J.P. EBERHART Minéralogie
 R. OMNES Physique théorique
 Mme CAGNIANT D..... Chimie
 E. FOLLENIUS Zoologie
 J. LUCAS Géologie
 X. FERNIQUE Mathématiques
 J. STREITH Chimie
 J. WEIL Chimie biologique
 M. DEMAZURE Mathématiques
 F. GAUTIER Physique propédeutique
 G. SUTTER Physique électronique
 D. FOATA Mathématiques
 J.L. VERDIER Mathématiques

Maîtres de Conférences associés

V. AVANISSIAN Mathématiques
Ch. W. JEFFORD..... Chimie
E.B. CARTER Physique nucléaire

Secrétaire : G. SAINT-PE

- S O M M A I R E -

INTRODUCTION

I^{ère} PARTIE - ENONCE D'UNE THEORIE

Chapitre I - Les principales hypothèses proposées.

Intervention de l'aspect dynamique du phénomène.

Chapitre II - Etude théorique des phénomènes capillaires intervenant au cours de l'humectation des Agrégats - Enoncé d'une théorie

II^{ème} PARTIE - ANALYSE EXPERIMENTALE DU PHENOMENE

Chapitre I - Technique Analytique.- Confirmation du phénomène d'éclatement

Chapitre II - Action de la viscosité

Chapitre III - Intervention de la vitesse d'humectation

Chapitre IV - La cohésion

Chapitre V - Vérification de la théorie

III^{ème} PARTIE - DISCUSSION

Chapitre I - Importance relative des deux paramètres principaux

Chapitre II - La Pression interne

Chapitre III - La cohésion et les conditions d'hydratation

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

I N T R O D U C T I O N

Tous les agronomes ont souligné l'importance de la préparation physique des terres dans la réussite d'une culture et, traditionnellement, les agriculteurs apportent le plus grand soin à cette opération en faisant intervenir une série d'outils dont les passages successifs permettent d'obtenir une division des mottes favorable à l'installation de la culture.

La plante nécessite en effet non seulement un support mécanique dans lequel elle peut solidement se fixer, mais encore une mise à la disposition des racines des éléments qui lui sont indispensables. Le sol doit être à même de jouer à la fois le rôle de support et celui de distributeur d'éléments nutritifs.

Le rôle de support suppose une implantation correcte des racines. Celles-ci ne doivent donc être aucunement gênées dans leur développement par des blocs ou des surfaces impénétrables. Il n'est pas rare d'observer, en place, sur betteraves, des fourches ou des coudes manifestement dus soit à des cailloux, soit à de gros éléments structuraux qui ont fait obstacle à la pénétration verticale du pivot

racinaire. Cette observation est particulièrement importante dans ce cas par suite des sérieuses répercussions économiques qu'elle entraîne, mais il est fréquemment possible de constater sur d'autres plantes des déformations analogues, peut-être moins spectaculaires, mais dont les effets sur le rendement sont certains.

Le rôle de distributeur d'éléments nutritifs est plus complexe. En effet, des travaux récents (BLANCHET 1965) ont montré que l'alimentation des plantes ne peut s'effectuer à partir de la seule solution du sol, mais exige l'absorption directe d'éléments retenus par les particules de terre elles-mêmes. Il importe donc que les racines trouvent à leur disposition des surfaces de contact suffisamment importantes pour assurer la satisfaction de leurs besoins alimentaires. Pour cela, le chevelu racinaire doit pouvoir explorer un volume de sol aussi grand que possible.

Ces deux constatations mettent en évidence la nécessité d'une structure de forme et de dimensions telles que la pénétration des racines et l'alimentation des plantes soient facilitées au maximum. Dans la majorité des cas la structure la plus favorable est constituée par des grumeaux de petite dimension.

Cependant, une fois que les façons culturales ont permis de réaliser la structure jugée optimale, encore faut-il en assurer sa conservation. Les mottes restent en effet soumises à l'action d'agents extérieurs. Elles subissent des contraintes physico-chimiques (humectation, dessiccation, gel....) ou mécaniques (forces de compression) qui peuvent parfois entraîner leur rupture et libérer les particules élémentaires qui la composent.

Parmi ces actions, l'une des plus importantes est bien la destruction des agrégats sous l'action de l'eau. Ce phénomène est particulièrement apparent pour les sols dits "battants". Sur ces sols, ainsi que l'a décrit ELLISON (1954), l'action de la pluie est telle que les agrégats disloqués libèrent les éléments de leur squelette. Ceux-ci forment, en surface, une couche boueuse qui, après dessiccation, se transforme en une croûte dont la présence peut non seulement

entraîner des accidents végétatifs mais encore des modifications profondes dans le régime hydrique des sols. On peut en effet observer de jeunes plantules dont la poussée est insuffisante pour percer ou soulever de telles croûtes et dont le développement se trouve ainsi arrêté. Cette même croûte crée une imperméabilisation superficielle empêchant la pénétration de l'eau en profondeur, provoquant une rupture de capillarité et limitant les mouvements de la solution du sol. On peut par exemple observer en zone méditerranéenne et particulièrement en Afrique du Nord, une accumulation de cristaux de sel immédiatement en dessous de la croûte de battance.

Deux groupes de phénomènes participent à cette destruction de la structure. Les uns sont consécutifs au choc des gouttes de pluie. Celles-ci, parvenant au sol avec une vitesse considérable sont susceptibles de disloquer les agrégats, surtout ceux qui, déjà humectés, ont une cohésion plus faible. Les éléments arrachés sont alors projetés à des distances importantes. L'autre groupe de phénomène est dû au mouillage des agrégats, suffisant pour provoquer un effondrement total ou partiel des mottes dans certains sols.

A l'heure où se développent très largement les techniques d'irrigation, il est évident que ce problème de la destruction structurale par l'eau prend une importance de plus en plus considérable.

Il ne faut cependant pas limiter les phénomènes de dégradation structurale à la seule surface du sol. On peut en effet observer parfois, dans les profils, des zones massives, non structurées. Celles-ci sont, dans la plupart des cas peu perméables. Elles peuvent être le résultat de facteurs naturels tels que l'origine ou l'évolution du sol. Elles peuvent aussi se créer à la suite d'opérations culturales sous l'effet des pièces travaillantes. Ce phénomène apparaît fréquemment au niveau de la semelle de labour mais des instruments plus superficiels le provoquent parfois dans les premiers centimètres du profil. Dans la plupart des cas, soit parce que la force mécanique de pénétration des racines est insuffisante pour percer la zone tassée, soit parce que ce niveau provoque une stagnation de l'eau et des

conditions anaérobies, soit pour ces deux raisons réunies, le chevelu racinaire s'étale au-dessus de cette zone, sans la traverser, et n'exploite donc qu'une partie réduite du sol. Si la couche tassée est proche de la surface non seulement l'alimentation de la plante est déficitaire mais encore son enracinement insuffisant la sensibilise à des actions mécaniques extérieures.

Dans les sols argileux on peut ainsi observer une prise en masse sur une épaisseur parfois importante créant un horizon imperméable à l'air et à l'eau. Il semble qu'interviennent là des phénomènes de compression dus à l'augmentation de volume du sol sous l'influence de l'humectation en période humide. Une telle prise en masse apparaît fréquemment dans les terres lourdes (60 % d'argile) qui s'étendent de la Gironde à la Loire sur le littoral atlantique (Marais de l'Ouest). Ce comportement impose un certain nombre de précautions et interdit en particulier en période trop humide l'emploi d'instruments de traction qui pourraient accentuer le phénomène sous l'influence des forces de compression exercées par les roues et les pièces travaillantes. Il interdit également le pâturage lorsque la terre est trop humide, le pied des animaux exerçant des pressions très importantes sur des surfaces réduites.

HUTTER (1965) a pu reproduire expérimentalement certains de ces phénomènes et mettre en particulier en évidence la formation de mottes compactes à partir de l'assemblage de petits agrégats initiaux soumis à des compressions parfaitement compatibles avec celles observées réellement dans le milieu naturel.

Ces considérations montrent l'importance qui doit être attribuée au problème de la stabilité structurale. C'est pourquoi il a préoccupé de nombreux auteurs qui se sont attachés à en déterminer les mécanismes.

Il s'agit évidemment de processus fort complexes, mettant en jeu de nombreux facteurs. Leur étude dans le milieu naturel est pratiquement impossible. C'est pourquoi, la plupart de ces auteurs ont opéré sur modèles simples en étudiant le phénomène sur des

particules de petite dimension.

Ces travaux ont mis en évidence l'action d'un certain nombre de facteurs (mouillabilité, cohésion, affinité sol-eau) et conduit à l'élaboration de tests susceptibles de rendre compte du comportement des sols en place.

Cependant, les mécanismes mis en cause ne peuvent expliquer totalement le phénomène de destruction de la structure dans le cas le plus général.

Suivant en cela ces auteurs, nous avons étudié ces mécanismes en faisant appel à la méthode des modèles et travaillé sur des agrégats de taille comprise entre 1 et 2 mm. Ces conditions permettent, en simplifiant les processus, d'aborder leur étude scientifique.

lère P A R T I E

ÉNONCÉ D'UNE THÉORIE

C H A P I T R E I

LES PRINCIPALES HYPOTHESES PROPOSEES - INTERVENTION DE
L'ASPECT DYNAMIQUE DU PHENOMENE

LES THEORIES ANTERIEURES.-

Les recherches concernant les mécanismes de destruction ont conduit à deux thèses principales :

L'une (SCHLOESING 1885) fait appel aux phénomènes de dispersion des colloïdes constituant les ciments de liaison entre les particules élémentaires de sol, cette dispersion ayant pour effet de libérer les constituants de la motte. Il est incontestable que certains sols, en particulier ceux dont le complexe argilo-humique est très chargé en sodium, subissent une dispersion au contact de l'eau. Toutefois cette explication n'est pas applicable dans le cas le plus général et des tests de dispersion ne rendent pas compte totalement du comportement des sols en place.

BARY (1931) pour les gels de silice, YODER (1936) et HENIN (thèse 1938) pour les sols ont établi un schéma basé sur l'éclatement provoqué par la compression de l'atmosphère interne de l'agrégat sous l'influence des forces développées par la pénétration capillaire de l'eau à l'intérieur des pores du sol. Ce schéma, sans négliger les processus secondaires pouvant intervenir dans des cas particuliers, met en cause la cohésion des agglomérats terreux et leurs conditions d'hydratation sous forme de l'affinité sol-eau. HENIN a pu mettre en évidence le phénomène d'éclatement grâce à une série de manipulations effectuées parallèlement sur des agrégats non modifiés et sur d'autres appartenant aux mêmes échantillons mais préalablement vidés de l'air qu'ils pouvaient contenir.

Cet auteur a explicité les conditions de stabilité (s) en écrivant :

$$(1) \quad s = C - \frac{2 T_2 \cos \alpha}{R}$$

où

C est la cohésion de la terre humide

T_2 la tension superficielle de l'eau

R le rayon des plus gros capillaires

et α l'angle de raccordement sol-eau

Le terme $\frac{2 T_2 \cos \alpha}{R}$ représente la pression résultant de la pénétration de l'eau dans un capillaire du sol et l'expression

$s = C - \frac{2 T_2 \cos \alpha}{R}$ signifie que les agrégats restent stables dans la

mesure où les forces développées par la pénétration capillaire dans les plus gros pores demeurent inférieures aux forces de cohésion liant les particules élémentaires constituant l'agglomérat terreux.

Si : T_1 est la tension superficielle du sol

et T_{1-2} , la tension interfaciale sol-eau

on peut écrire : (triangle de Neuman) :

$$T_1 = T_{1-2} + T_2 \cos \alpha$$

$$\cos \alpha = \frac{T_1 - T_{1-2}}{T_2}$$

L'équation (1) devient :

$$(2) \quad s = C - \frac{2 (T_1 - T_{1-2})}{R}$$

et en introduisant l'affinité sol-eau A (formule de Dupré :

$$A = T_1 + T_2 - T_{1-2})$$

$$(3) \quad s = \frac{R C - 2 A + 2 T_2}{R}$$

Les conditions d'éclatement peuvent aisément se déduire de ces formules.

Cette interprétation du phénomène permet de superposer les effets des conditions d'hydratation c'est-à-dire du gonflement (équation 3) et de l'éclatement (équation 1).

Cependant, si elle rend compte d'un certain nombre de propriétés, elle ne répond pas aux questions que l'on peut se poser concernant le fonctionnement de ces mécanismes.

On peut en particulier se demander comment l'air est enfermé dans les agrégats au moment où ceux-ci sont plongés dans l'eau.

Le phénomène d'éclatement est, en effet, sous la dépendance du volume d'air inclus à l'intérieur de l'agrégat au moment de la rupture, c'est-à-dire de la manière dont l'atmosphère interne de l'agrégat est comprimée.

Il est malheureusement impossible de déterminer à priori les caractéristiques essentielles de la particule, telles que sa mouillabilité ou sa cohésion. De même, il est difficile d'imaginer les conditions exactes du captage de l'air dans l'agrégat sans une étude expérimentale préalable.

Toutefois, les travaux antérieurs ont établi :

- L'influence de la mouillabilité en comparant le comportement d'agrégats naturels avec celui de particules ayant fixé une petite quantité de substances hydrophobes (HENIN 1938). Depuis, MONNIER (thèse 1965), a pu montrer que le taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène varie en raison inverse de la mouillabilité du sol.

- L'influence de la cohésion par la mise en évidence des augmentations de stabilité à mesure qu'augmente la teneur en argile. Cet effet a été prouvé en établissant un parallélisme entre la stabilité et la cohésion des agrégats mesurés à sec. Il est évident qu'une telle comparaison n'est valable que si le classement des agrégats quant à leur cohésion est semblable à sec et après humectation. Ce parallélisme ne tient plus dès que les ciments ne sont pas constitués

par de l'argile au sens minéralogique du terme ou si l'on modifie la nature des cations échangeables.

Il était donc nécessaire de reprendre ces comparaisons sur la terre humide telle qu'elle se présente au moment de la rupture des agrégats.

- Enfin, on a tenté de mettre en évidence le rôle de l'affinité sol-eau. Ces essais ont été conduits en modifiant l'énergie libre de l'eau par l'introduction de différents solutés. Ils ont effectivement montré que l'utilisation de solutions au lieu d'eau pure permet d'accroître la résistance des agrégats à la destruction (V. tableau I).

TABLEAU I

VARIATION DE L'ACTIVITE PROTECTRICE DE SOLUTIONS SALINES EN FONCTION

DE LEUR ENERGIE LIBRE

(S. HENIN)

Nature du soluté	Température d'ébullition de la solution (° C)	% d'agrégats stables 0,2 mm		
		Hor. A	Hor. B	Hor. C
NO ³ NH ⁴	112	40	26	10
	105	29	20	7,5
	102	26,5	18	6
	100	24,5	10	4
Cl ² Mg	118	43	32	10
	103	26,5	12	6
	100	24	9	4
Cl ² Ca	111	32	20	9
	102	25	15	6
	100	24	9	4

En fait, dans ces expériences, s'il est bien exact que l'énergie libre est modifiée, l'introduction de solutés modifie également toute une série de propriétés du solvant et, en particulier, la tension superficielle et la viscosité. D'autre part, le soluté est susceptible d'avoir une action sur le matériel d'expérience en changeant, par exemple, la distribution des cations échangeables.

Cependant, le fait que l'utilisation de solutés différents peut permettre de faire varier séparément ou simultanément plusieurs propriétés du solvant doit permettre une analyse du phénomène. En effet le système terre-liquide reste dans les mêmes conditions, les seules variables étant celles provoquées par l'introduction du soluté.

Nous avons effectué des analyses d'agrégats sur une série de terres de composition granulométrique variée (tableau N° II) et dans des solutions salines à diverses concentrations en utilisant une technique voisine de celle de HENIN. Les graphiques de la figure 1 rendent compte des résultats de ces essais. En ordonnée sont portés les pourcentages d'agrégats stables, en abscisse figurent les variations d'énergie libre entraînées par l'introduction des solutés en prenant pour unité l'énergie libre de l'eau pure.

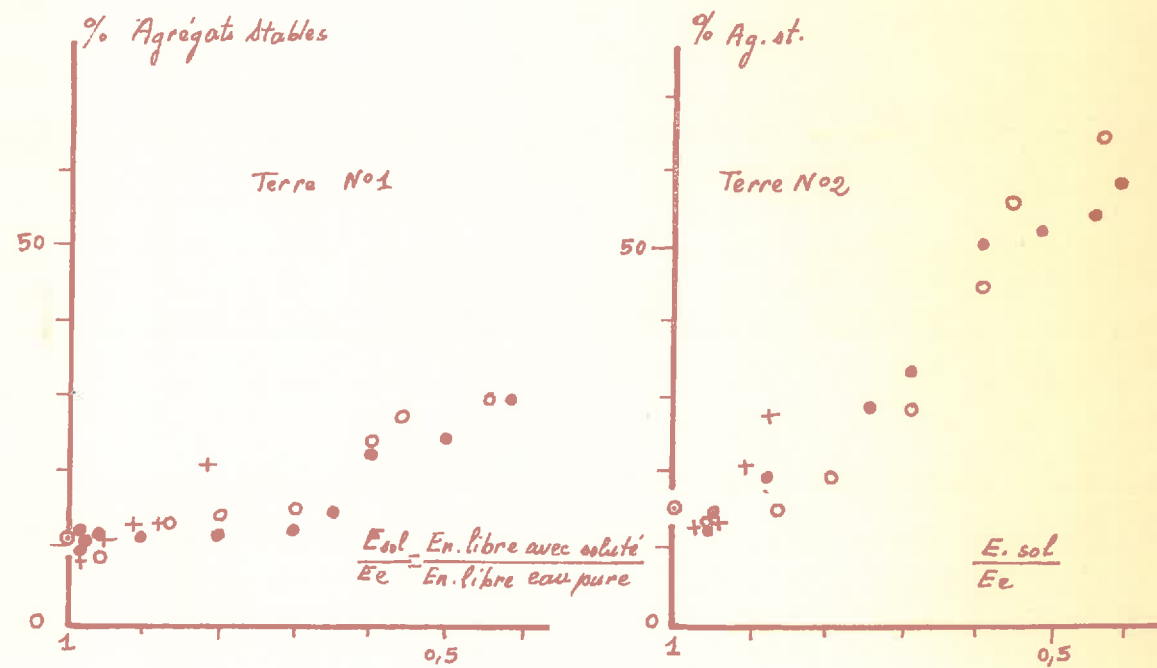
TABLEAU II

COMPOSITION GRANULOMETRIQUE DES TERRES
(1ère série) - (en pour cent de terre sèche)

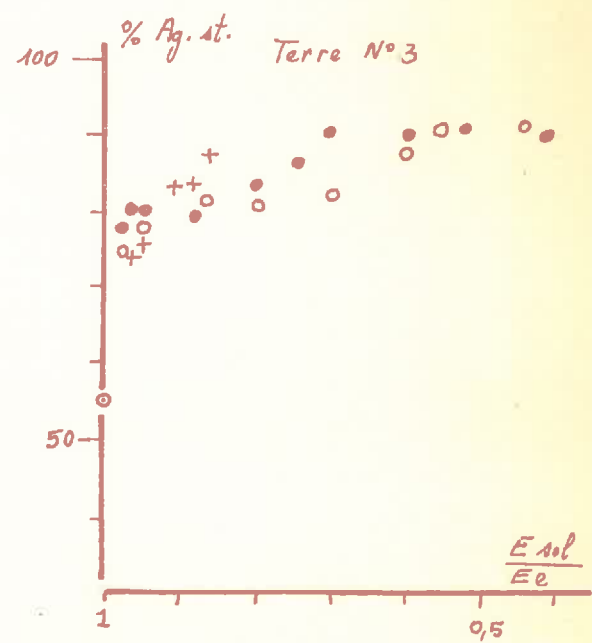
Terre n°	Origine de la terre	Matières Organiques	2	2 à 20	20 à 50	Calcaire
	Horizon B des cases C.N.R.A. à Versailles	0,6	29	20,4	42,4	0
	Horizon A - Ferme de la Minière C.N.R.A.	1,4	16,3	24,8	45,5	0
	Terre argileuse des Marais de l'Ouest	3,4	60,7	28,7	1,8	1,4

FIGURE N° 1

INFLUENCE DES VARIATIONS DE L'ENERGIE LIBRE
DE L'EAU SUR LE TAUX D'AGREGATS STABLES



Traitement par
l'eau pure ○
des solutions de $CaCl_2$ ●
" " " $MgCl_2$ ○
" " " $NaCl$ +



On observe bien une certaine influence de la variation d'énergie libre sur la stabilité de la structure sans qu'il soit possible pour autant de décider si l'énergie libre est seule responsable du phénomène ou si cette responsabilité incombe à une ou plusieurs autres propriétés ayant varié en même temps.

LA VISCOSITE - INTERVENTION DE L'ASPECT DYNAMIQUE DU PHENOMENE

Or, dans le cas des solutions salines, l'un des facteurs subissant des variations importantes avec la concentration est la viscosité. Il s'agissait donc, pour vérifier l'influence possible de la viscosité, d'utiliser des solutions pour lesquelles l'augmentation de viscosité est liée non pas à des variations d'énergie libre mais simplement au poids moléculaire du soluté. Nous avons choisi des solutions de saccharose. Ce soluté entraîne une augmentation importante de viscosité avec sa concentration. Par contre, l'énergie libre de l'eau varie peu. De plus, l'addition de saccharose ne provoque aucune variation notable de tension superficielle.

Le tableau N° III résume les résultats obtenus pour les trois terres en traitement.

TABLEAU III

INFLUENCE DE LA VISCOSITE SUR LA STABILITE STRUCTURALE

Terre N°	Stabilité structurale mesurée dans l'eau pure	Stabilité structurale mesurée dans des solutions de saccharose de viscosité (en centipoises) :	
		1,7	14
1	11	16	45
2	14	22	65
3	55	71	85

La lecture de ce tableau montre bien que la seule augmentation de viscosité de la solution, dans laquelle le pourcentage d'agrégats stables est mesurée, entraîne un effet protecteur important.

Ce facteur viscosité n'était pas inclus dans la théorie antérieure. Son intervention exclut une interprétation basée seulement sur des données statiques et impose de poser le problème en termes dynamiques.

Nous avons donc repris l'étude des modèles en nous efforçant d'analyser cet aspect dynamique du phénomène.

CHAPITRE II

ETUDE THEORIQUE DES PHENOMENES CAPILLAIRES
INTERVENANT AU COURS DE L'HUMECTATION DES AGREGATS
ENONCE D'UNE THEORIE

REMARQUES THEORIQUES - POSSIBILITES D'ECHAPPEMENT DE L'AIR

La pénétration de l'eau dans les pores du sol obéit aux lois de la capillarité. Pour un agrégat de la taille de ceux mis en expérience, c'est-à-dire de diamètre compris entre 1 et 2 mm, les dimensions sont faibles. De plus, l'eau pénètre dans toutes les directions. C'est pourquoi nous avons traité le problème comme s'il s'agissait de pores horizontaux.

Le ménisque liquide est animé d'une vitesse v que l'on peut exprimer sous la forme (BOUASSE 1924, d'après POISEUILLE) :

$$v = \frac{dz}{dt} = \frac{r^2}{8 \eta z} P$$

où t est le temps

z , la longueur de la colonne de liquide

r , le rayon du capillaire considéré

η , la viscosité du liquide

P , la pression capillaire

$$\text{avec } P = \frac{2 T_2 \cos \alpha}{r}$$

si T_2 est la tension superficielle du liquide
et α son angle de raccordement avec le sol

Il vient donc :

$$v = \frac{r^2}{8 \eta z} \frac{2 T_2 \cos \alpha}{r}$$

$$(4) \quad v = \frac{2 r T_2 \cos \alpha}{8 \eta z}$$

Considérons maintenant deux pores de rayons R et r, communiquant tous deux avec l'extérieur.

Pour une même longueur atteinte par l'eau, le rapport des vitesses respectives de progression des ménisques dans les deux pores est :

$$\frac{V_R}{V_r} = \frac{R}{r}$$

et si R est plus grand que r,

on a $V_R > V_r$

L'eau pénètre donc plus vite dans les pores dont le rayon est plus grand et, en conséquence, une même longueur mouillée est atteinte plus rapidement par le liquide dans un gros pore que dans un petit pore.

Avant l'humectation, les pores, plus ou moins anastomosés sont remplis d'air. Cet air se trouve comprimé par la poussée des ménisques et son emprisonnement dépend des rapports de vitesse des ménisques avançant dans les différents canalicules.

Cependant, les conditions de compression de l'air peuvent être telles qu'il peut s'échapper en partie à l'orifice de certains pores avant que le ménisque ait pu se former. Les agrégats ont d'ailleurs une forme très irrégulière et l'on peut penser que la particule n'est pas immédiatement mouillée sur toute sa surface.

En effet, s'il est impossible d'analyser un tel phénomène, du moins est-il raisonnable d'appliquer aux irrégularités un raisonnement analogue à celui fait pour les pores et d'admettre que les solutions visqueuses s'étalent plus rapidement sur des surfaces planes avant la formation des ménisques à l'orifice des pores que sur les surfaces irrégulières des agrégats.

Des bulles d'air peuvent donc se former à l'orifice des pores non obstrués et constituer ainsi une protection à l'égard du liquide environnant.

Sous l'effet des forces capillaires développées par les ménisques progressant dans les pores mouillés, une partie de l'air inclus peut ainsi s'échapper.

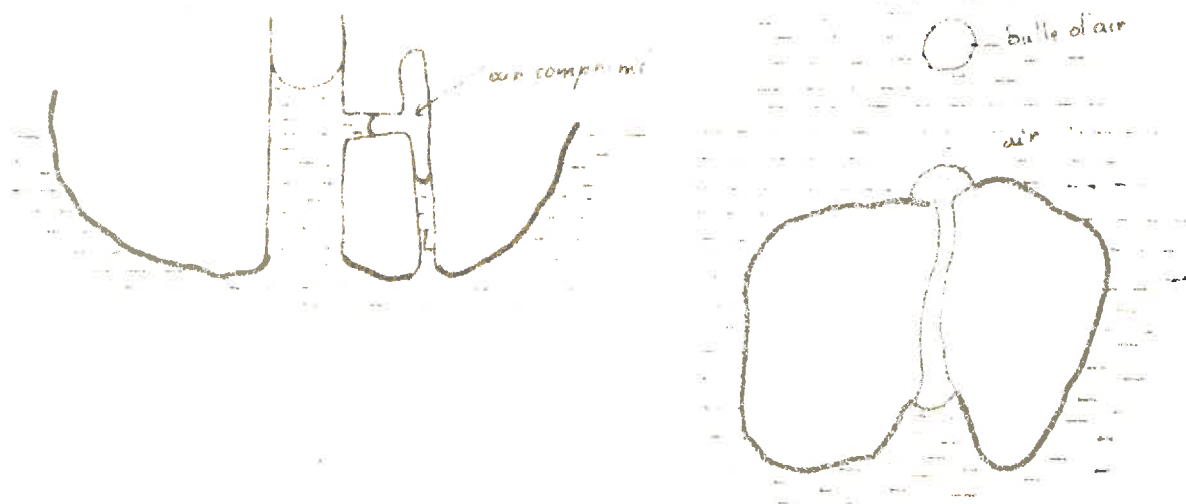
Ces remarques théoriques sont d'ailleurs confirmées par l'observation directe.

En effet, si l'on plonge brutalement des agrégats dans l'eau, on peut remarquer, précédant l'éclatement, des chapelets de petites bulles d'air s'échappant de l'agglomérat. Cela indique bien que certains pores ne sont pas obstrués par les ménisques liquides et que, par leurs orifices, une partie de l'air primitivement inclus dans l'agrégat peut s'échapper.

Nous avons schématisé figure n° 2 quelques exemples d'emprisonnement ou d'échappement de l'air, ceux-ci n'étant bien entendu nullement limitatifs car de multiples autres cas peuvent certainement se présenter.

FIGURE N° 2

QUELQUES EXEMPLES DE MODE DE CAPTAGE
DE L'AIR A L'INTERIEUR DES AGREGATS



On ne peut évidemment étudier que des cas particuliers.

Toutefois, en tenant compte des remarques précédentes, il semble que les phénomènes principaux entrant en jeu soient :

- d'une part, les vitesses respectives de pénétration des ménisques dans les capillaires selon les diamètres des pores.
- d'autre part la manière dont le liquide est susceptible de s'étaler à la surface de la particule.

La théorie antérieure supposait que tout l'air contenu dans les agrégats restait emprisonné. En fait, nous venons de voir qu'une partie de l'air peut s'échapper sous pression.

S'il en est ainsi, on peut penser que selon la façon dont l'air sera emprisonné et selon les possibilités d'échappement qui lui seront offertes, sa compression sera différente et entraînera des efforts variables s'opposant aux forces de cohésion.

Il convient donc d'examiner, dans cette nouvelle optique, la pression interne à laquelle est soumis l'air inclus dans les agrégats.

LA PRESSION INTERNE

Considérons, pour un agrégat, que :

V_0 est sa porosité totale

P_0 , la pression atmosphérique

P_i , la compression atteinte par l'atmosphère interne de

l'agrégat par suite de la poussée des ménisques liquides.

V_i , le volume occupé par l'atmosphère interne à la pression P_i .

V_e , le volume d'air ayant pu s'échapper avant l'éclatement.

On peut écrire :

$$P_0 (V_0 - V_e) = P_i V_i$$

$$\text{soit } P_i = \frac{P_0 (V_0 - V_e)}{V_i}$$

V_i peut être explicité en tenant compte du liquide ayant pénétré dans les capillaires mouillés.

En effet :

$$V_i = V_o - n\pi R_i^2 z$$

Si n est le nombre de capillaires mouillés

R_i , leur rayon moyen

et z la longueur atteinte par les ménisques à l'intérieur des capillaires

Il vient alors :

$$P_i = \frac{P_o (V_o - V_e)}{V_o - n\pi R_i^2 z} \quad (5)$$

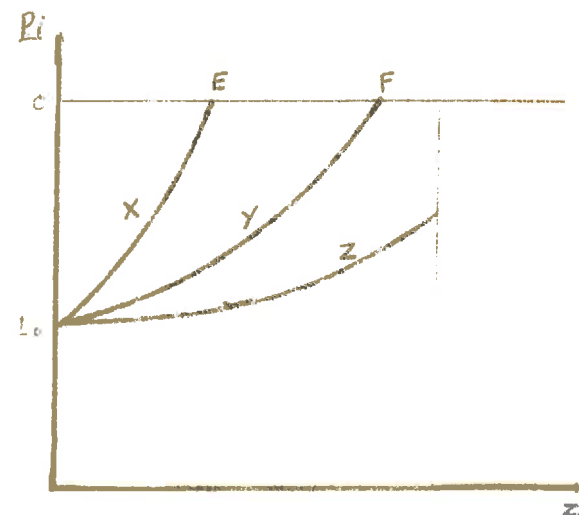
On peut représenter graphiquement les variations de P_i en fonction de z (figure n° 3). Nous avons tracé quelques unes des courbes de la famille représentée par l'équation (5) aux différentes valeurs de V_e .

L'éclatement a lieu lorsque P_i atteint la cohésion C de la terre humide.

Si V_e est nul, l'éclatement a lieu en E (courbe X).

FIGURE N° 3

VARIATIONS DE LA PRESSION INTERNE
AU COURS DE L'HUMECTATION



En réalité l'air n'est pas totalement emprisonné ainsi que nous l'avons constaté précédemment par le raisonnement et par l'observation, donc V_e n'est pas nul. Une partie de l'air inclus initialement dans l'agrégat peut s'échapper par certains pores. En conséquence, l'accroissement de la pression interne est moins rapide. Le phénomène peut donc se représenter sous forme de la courbe Y, l'éclatement se produisant en F c'est-à-dire pour une pénétration plus profonde des ménisques liquides. Il peut aussi arriver que la quantité d'air susceptible de s'échapper soit telle que la pression critique d'éclatement ne soit jamais atteinte. Ce cas est représenté par la courbe Z, pour laquelle l'agrégat a été imbibé entièrement avant que la pression interne ait pu s'élever jusqu'à la pression critique d'éclatement.

Cette représentation graphique schématise un phénomène qui, de par la nature même du matériau, est beaucoup plus complexe. En effet, les pores du sol sont difficilement assimilables à des capillaires parfaits, leur forme et leur dimension étant extrêmement variables. De plus au cours de l'humectation, la terre subit une augmentation de volume apportant certainement des modifications importantes dans le système capillaire primitif de l'agrégat.

Cependant, dans l'état actuel de nos moyens d'investigation, ces différents points nous sont pratiquement inaccessibles. Les simplifications apportées permettent de dégager le sens d'un mécanisme physique. Il est évidemment nécessaire de le confronter avec les faits réels par des séries d'expériences sur le matériau considéré. Dans la mesure où les résultats expérimentaux concorderont avec la théorie il sera alors possible d'admettre que ce mécanisme rend effectivement compte, en les dépouillant d'effets secondaires, des phénomènes qui se déroulent dans le milieu naturel.

ENONCÉ D'UNE THEORIE

A la suite de ces remarques on est conduit à admettre le mécanisme théorique suivant dont les conséquences seront soumises à l'expérience :

Lorsqu'un agglomérat de terre est plongé dans un liquide, celui-ci pénètre par les plus gros pores alors que, sous l'influence de la poussée des ménisques liquides, une partie de l'atmosphère interne de l'agrégat s'échappe par certains capillaires non obstrués. La vitesse de pénétration d'une part et la vitesse d'échappement de l'air d'autre part, règlent l'établissement d'une pression interne qui, si elle atteint une valeur supérieure à celle des forces de cohésion liant les particules élémentaires de la terre humide, provoque l'éclatement de l'agrégat.

Afin d'introduire cet aspect dynamique du phénomène, nous avons été amenés à modifier la formule de HENIN en écrivant :

$$s = C - P_i$$

où

s représente la résultante des conditions déterminant la stabilité des agrégats, c'est-à-dire la différence entre deux forces opposées constituées par :

- la cohésion de la terre humide C
- la pression maximale susceptible d'être atteinte par l'air emprisonné dans l'agrégat, P_i .

2ème P A R T I E

A N A L Y S E E X P E R I M E N T A L E

D U P H E N O M E N E

CHAPITRE I

TECHNIQUE ANALYTIQUE

CONFIRMATION DU PHENOMENE D'ECLATEMENT

METHODE

Les différents éléments réunis dans les pages qui précèdent montrent le nombre important de facteurs pouvant entrer en jeu dans le phénomène de destruction des agrégats.

Afin de définir leur importance respective, il importe évidemment d'utiliser des liquides de traitement susceptibles d'entraîner des modifications connues pour un ou plusieurs des paramètres intervenant dans le mécanisme.

Le jeu des comparaisons entre les taux d'agrégats stables mesurés dans les différents liquides devraient alors permettre de préciser le rôle réel des paramètres en cause.

TEST DE STABILITE

Il convient évidemment de disposer d'une technique de mesure pouvant rendre compte des incidences de l'emploi de tels liquides de traitement sur le pourcentage d'agrégats restant stables.

Au cours de ses travaux sur la stabilité structurale HENIN a mis au point une technique analytique permettant le calcul d'un indice S d'instabilité. Ce test est appliqué sur des agrégats dont le diamètre est inférieur à 2 mm.

Il consiste à effectuer un tamisage sous l'eau (tamis de 0,2 mm) de l'échantillon après différents prétraitements suivis d'une imbibition brutale par l'eau. On recueille sur le tamis les agrégats restés stables. Afin de rendre le tamisage aussi régulier que possible

FEODOROFF a proposé un appareil mécanisant partiellement l'opération. Les éléments fins dispersés au cours de l'opération sont également mesurés pour les échantillons prétraités ou non. L'indice S est obtenu par calcul en combinant les différents résultats. Il permet de porter un jugement sur le comportement des sols en place et parfois sur les raisons de ce comportement.

Nous avons adopté cette technique mais en lui apportant d'importantes simplifications :

Les prises sur lesquelles les mesures sont effectuées sont constituées d'agrégats restant entre les tamis de maille 1 et 2 mm afin d'être assurés d'opérer sur les agrégats seuls et non sur les particules élémentaires qui les composent. 5 grammes d'agrégats ainsi triés sont imbibés brutalement par le liquide de traitement dans un bécher de 250 cc forme haute. Après une attente de 30 minutes, le contenu du bécher est déversé sur un tamis (mailles de 0,2 mm). Le tamisage dans le même liquide de traitement est effectué à un rythme régulier grâce à l'appareil de FEODOROFF (30 coups en 30 secondes). Après lavage si nécessaire et séchage, le poids des particules terreuses restées sur le tamis permet de déterminer le pourcentage d'agrégats stables pour le traitement considéré.

Afin de s'assurer de la reproductibilité des résultats, chaque essai est réalisé en double et renouvelé lorsque les écarts sont jugés trop importants.

Cette technique ne peut permettre une mesure absolue car les actions mécaniques du tamisage font intervenir des phénomènes d'abrasion auxquels les terres les plus fragiles peuvent être très sensibles. Cependant les essais effectués ont pour but de comparer les comportements d'une même terre soumise à différents traitements et n'exigent donc que la connaissance de valeurs relatives.

Les sables grossiers appartenant à la fraction comprise entre 0,2 et 2 mm restent sur le tamis. Nous avons exprimé tous les

résultats en tenant compte de cette fraction qui n'intervient d'ailleurs vraiment que pour trois des terres retenues.

TERRES EN EXPERIMENTATION

Nous avons réalisé ce travail sur des échantillons couvrant une large gamme de granulométries. Certains d'entre eux, utilisés dès le début de nos essais, étaient en quantité insuffisante. Au fur et à mesure que la nécessité de nouvelles déterminations s'imposait, ces échantillons ont été épuisés. Ils n'ont donc pu subir la totalité des expériences.

En fait, nous avons opéré sur trois séries de terres. La première contenait trois échantillons dont les caractères physiques sont résumés tableau N° II - p. 11. Elle nous a permis d'énoncer une hypothèse de travail et de dégager les principaux aspects des mécanismes de dégradation structurale.

Une deuxième série de 3 échantillons nous a servi à préciser ces mécanismes. Enfin, grâce à la troisième série, la plus nombreuse, nous avons pu confirmer leur caractère général.

Nous avons résumé tableau N° IV les renseignements concernant les terres de ces deux dernières séries.

TABLEAU N° IV

COMPOSITION GRANULOMETRIQUE
(en pour cent de

DES TERRES EN EXPERIMENTATION
terre sèche

Désignation et origine des échantillons	Matières organiques	< 2 μ	2 à 20 μ	20 à 50 μ	50 à 200	0,2 à 2 mm	Calcaire
5 - Laumes - Sol argileux de la région de Dijon	2,6	66,1	25	6	0,2	0,1	0
5 - Manhoue (Moselle) - Terre sensible au tassement et à l'hydromorphie	1,3	50,4	27,3	19,2	1,2	0,6	0
7 - Ajoncourt (Moselle) Sous-sol	1,2	36,2	26,5	23,3	9,8	3	0
3 - Le Robinet - Sol battant près de Bey/Seille (Meurthe-&-Moselle)	0,6	21,8	39,3	33,5	3	1,8	0
9 - Malacourt (Moselle) Sol battant	1,4	18,8	41,1	32,3	3,1	3,3	0
1 - Ile d'Elle - "Bri" des Marais de Vendée	1,0	56,0	30,8	9,6	0,3	0,2	2,1
2 - Saint-Georges - Sol battant près de Nantes	2,6	16,4	41,1	7,7	20,5	11,6	0
3 - Belle Etoile - Sol sablo-limoneux (Loire-Atlantique)	1,8	6,5	10,7	40,1	11,7	29,2	0

CONFIRMATION DU PHENOMENE D'ECLATEMENT

Reprenant le schéma de YODER, HENIN a réalisé une série de manipulations faisant apparaître l'importance de la quantité d'air retenue à l'intérieur des agrégats. C'est ainsi que la stabilité croît notablement lorsque les particules sont imbibées sous vide. Inversement, si l'humectation est réalisée sous pression, le pourcentage d'agrégats stables diminue par rapport à celui obtenu en opérant à la pression atmosphérique. Ces résultats sont résumés dans le tableau N° V

TABLEAU N° V

(d'après HENIN - Plant and soil 1947 n° 8)

POUR CENT D'AGREGATS STABLES OBTENUS APRES HUMECTATION DANS
UNE ATMOSPHERE A LA PRESSION DE :

	0,01 at.	0,25 at.	1 at.	3 at.
Sablrière Horizon B	32	19	10	6
Limon rouge	76	51,5	18	4
Versailles - Sol cultivé	62,5	44,0	20	7
- forêt (Horizon A)	-	85	63,5	40
Sol Station Clermont- Ferrand	-	-	94	90

De même, des agrégats imbibés avec précautions par capillarité présentent une stabilité supérieure à des agglomérats du même échantillon mouillés brutalement. En procédant ainsi, une certaine quantité d'air est chassée avant son emprisonnement par les ménisques liquides.

Enfin, pour une même terre, un échantillon prélevé humide c'est-à-dire dont une partie de l'air inclus dans les pores a été remplacé par de l'eau, donne, à l'analyse d'agrégats un pourcentage d'agrégats stables plus grand qu'un échantillon prélevé à l'état sec.

Reprenant le principe des manipulations effectuées par HENIN, nous avons réalisé l'imbibition sous vide des terres par l'eau et certains des liquides de traitements choisis. De plus, pour plusieurs échantillons l'imbibition a été effectuée dans des enceintes à vide partiel (de 0,02 à 1 atmosphère).

Les particules terreuses déposées dans des béchers sont placées en atmosphère raréfiée durant plusieurs heures. Le liquide de traitement préalablement dégazé, est alors introduit par aspiration dans l'enceinte et canalisé dans les béchers grâce à une boîte distributrice. Le contenu des béchers est ensuite tamisé de la même manière que pour la réalisation du test en présence d'air, après avoir été abandonné durant 30 minutes.

Dans tous les cas, l'imbibition sous vide entraîne une augmentation de stabilité par rapport à la même manipulation sous pression atmosphérique (Tableau N° VI).

TABLEAU N° VI

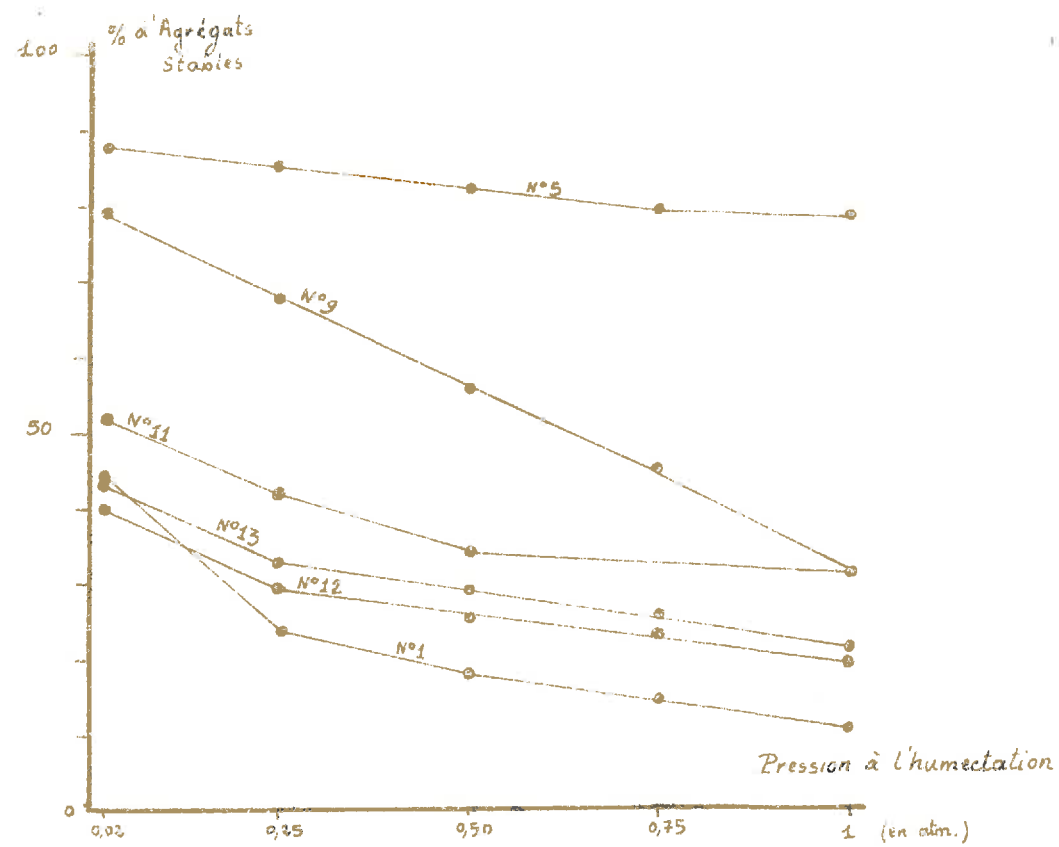
POUR CENT D'AGREGATS RESTES STABLES APRES HUMECTATION
EN PRESENCE D'AIR ET SOUS VIDE

	Terre N°									
	1	2	3	5	6	7	9	11	12	13
Humectation à l'air	10,5	7,5	54,5	78,5	72	51,5	30,8	31	19,7	21
Humectation sous vide	44	28	63,5	87	83	82,5	79,5	52	40	43,5

Sous vide partiel, l'influence de la quantité d'air se traduit par une augmentation constante du taux d'agrégats stables avec le vide réalisé (figure n° 4)

FIGURE N° 4

EFFETS DE L'HUMECTATION SOUS VIDE PARTIEL SUR LE POURCENTAGE D'AGREGATS STABLES



Ainsi, non seulement l'hypothèse de la prédominance de l'éclatement dans la destruction structurale se trouve appuyée par ces résultats, mais l'on peut de plus constater le rôle considérable joué par la quantité d'air emprisonné à l'intérieur des agrégats dans l'intensité du phénomène.

Remarquons cependant que les courbes représentant le pourcentage d'agrégats stables en fonction des conditions de pression au moment de l'imbibition ne présentent pas toutes la même allure. Les phénomènes d'abrasion en cours de tamisage déjà signalés entrent certes en jeu mais ce fait traduit également des variations importantes dans la sensibilité à l'action de la quantité d'air inclus selon les terres.

Le taux d'agrégats stables mesuré pour la terre N° 9 (figure N° 4) s'accroît considérablement par l'imbibition sous un vide partiel peu important. Par contre le taux d'agrégats stables mesuré pour la terre N° 12 dans les mêmes conditions n'est que faiblement supérieur à celui mesuré par imbibition sous la pression atmosphérique.

Ces comportements très différents sont vraisemblablement liés à l'architecture même du matériau et particulièrement à la répartition de la porosité.

CHAPITRE II
ACTION DE LA VISCOSITÉ

RESULTATS EXPERIMENTAUX

Grâce aux manipulations effectuées sur la première série de 3 terres, nous avons pu constater une augmentation importante du pourcentage d'agrégats stables lorsque la viscosité des solutions de traitement est accrue.

Afin de vérifier s'il s'agit là d'un phénomène général, nous avons effectué des analyses d'agrégats sur les deux autres séries d'échantillons.

Nous avons opéré dans des solutions de saccharose de plus en plus concentrées, c'est-à-dire de viscosité croissante. Les concentrations en poids de 20 %, 40 %, 50 % et 55 %, correspondaient, pour les températures auxquelles nous avons travaillé à des viscosités de 1, 7, 5, 4, 14 et 24 centipoises.

Les résultats de ces manipulations sont présentés figure N° 5 sous forme de graphiques. Ils permettent de constater une augmentation très nette de la stabilité des agrégats pour des concentrations croissantes de saccharose et ceci pour toutes les terres en traitement.

Le phénomène apparaît quelle que soit la quantité d'air retenue à l'intérieur des agrégats. Nous avons en effet, pour plusieurs terres procédé à la même expérience en assurant l'imbibition dans une enceinte maintenue à une pression de 0,02 atmosphère. La faible quantité d'air résiduel diminue alors l'importance de l'éclatement, mais l'augmentation de viscosité des solutions conserve les mêmes effets (figure N° 5).

FIGURE N° 5

INFLUENCE DE LA CONCENTRATION DE SOLUTIONS DE SACCHAROSE SUR LE TAUX
D'AGREGATS STABLES, L'IMBIBITION ETANT REALISEE A L'AIR ET SOUS
ATMOSPHERE RAREFIEE

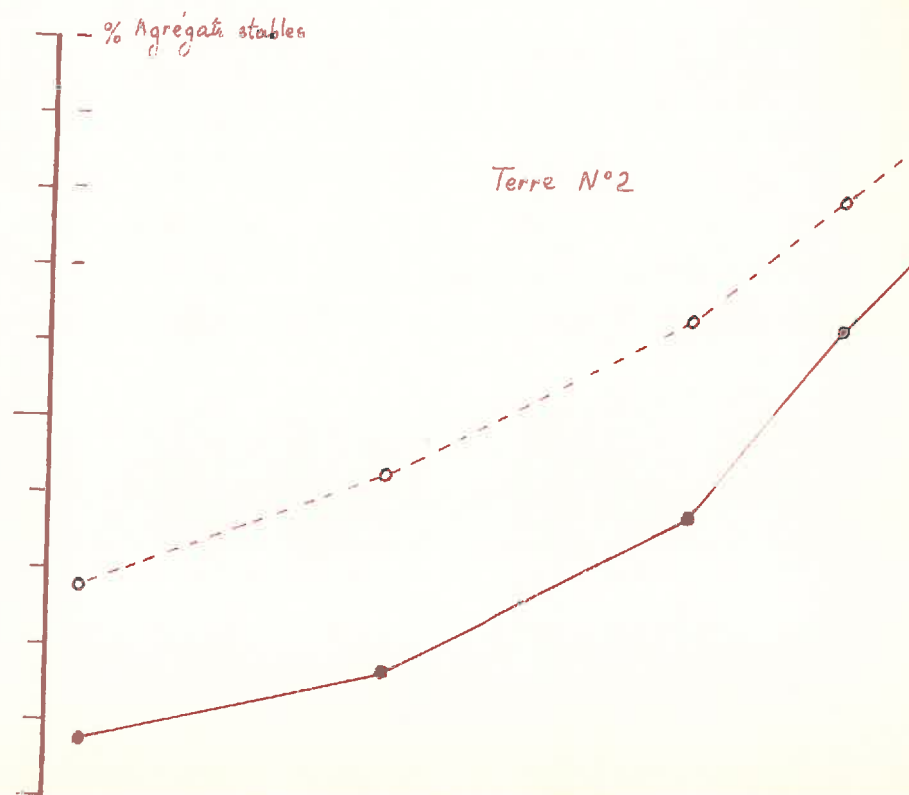
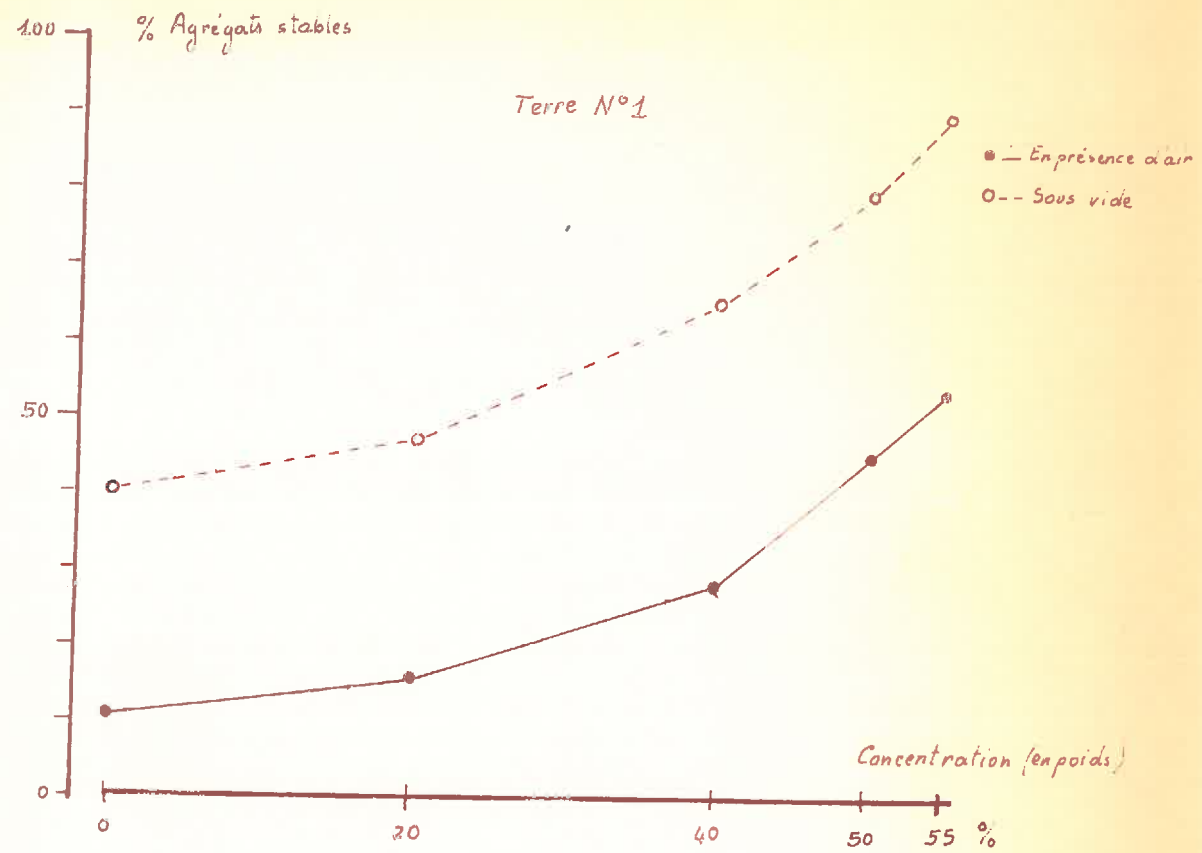


FIGURE N° 5 (Suite

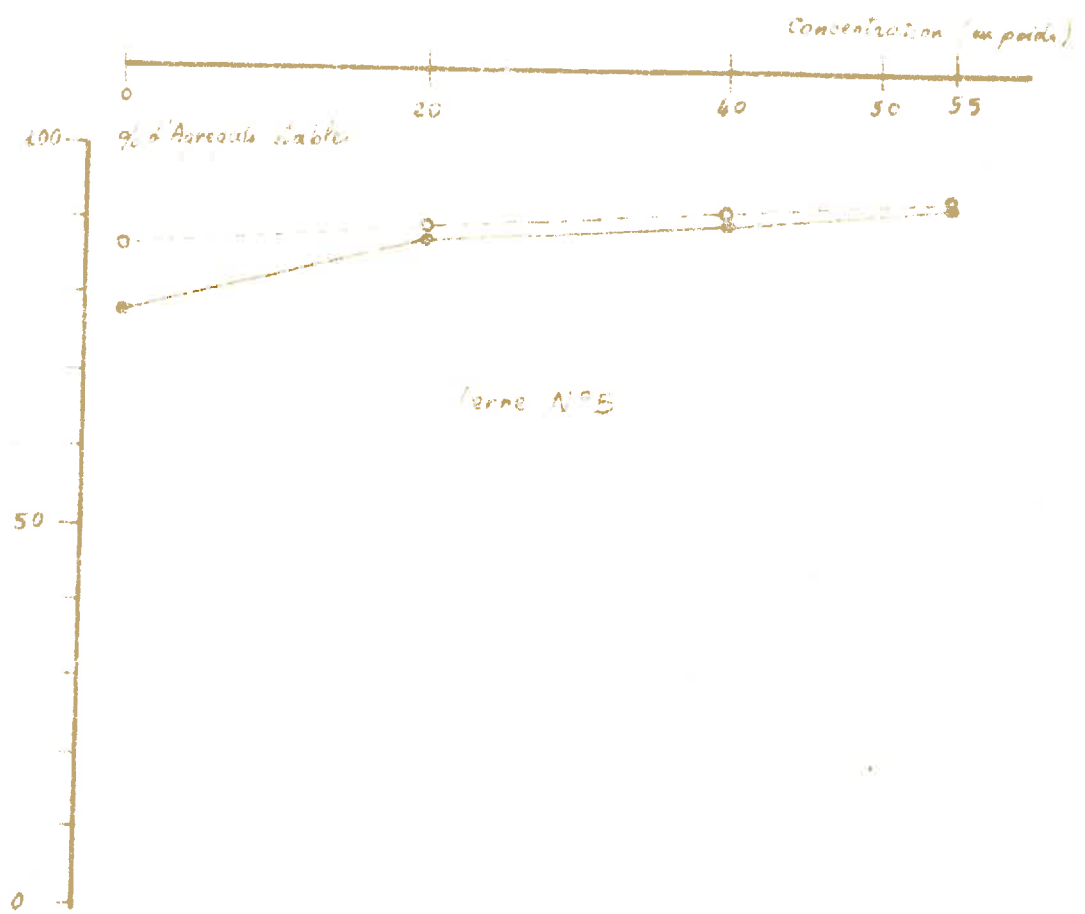


FIGURE N° 5 (Suite ...)

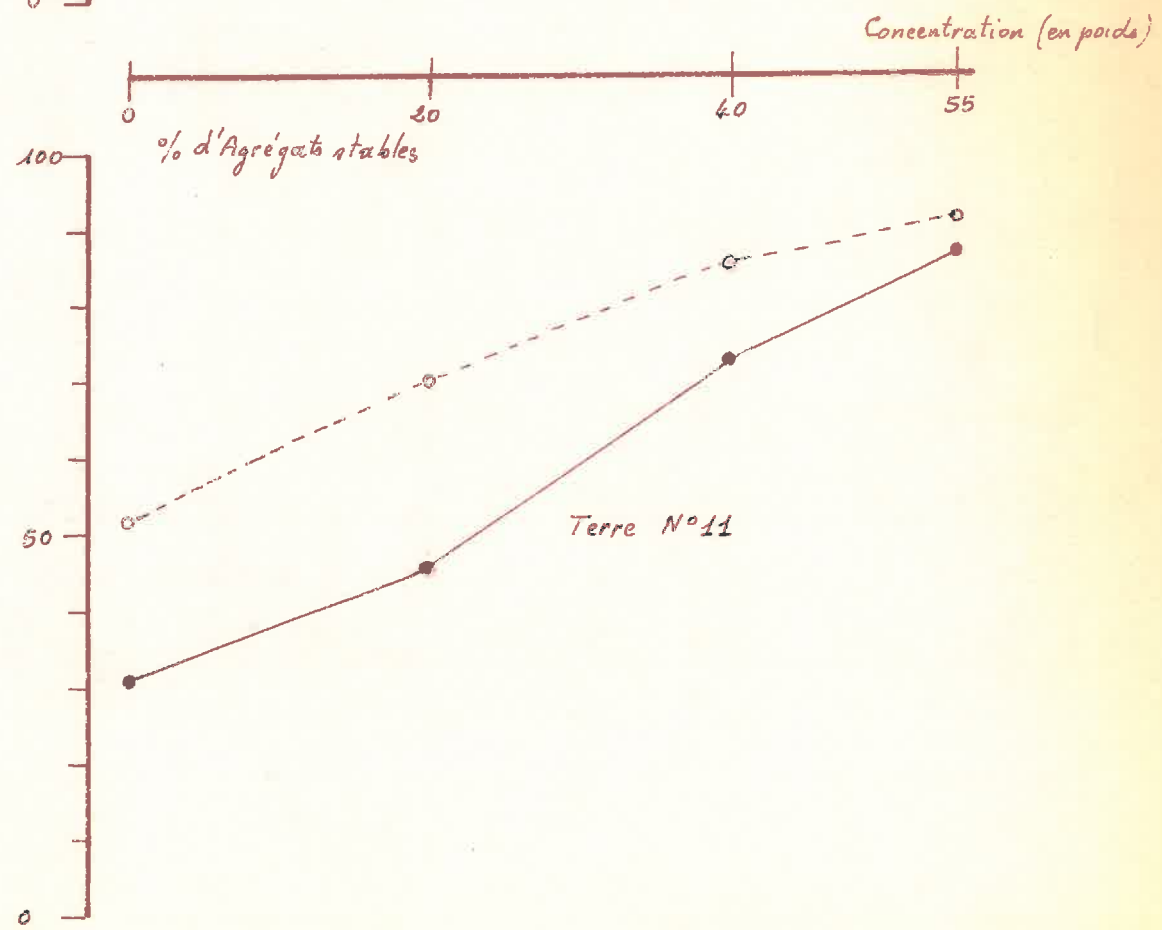
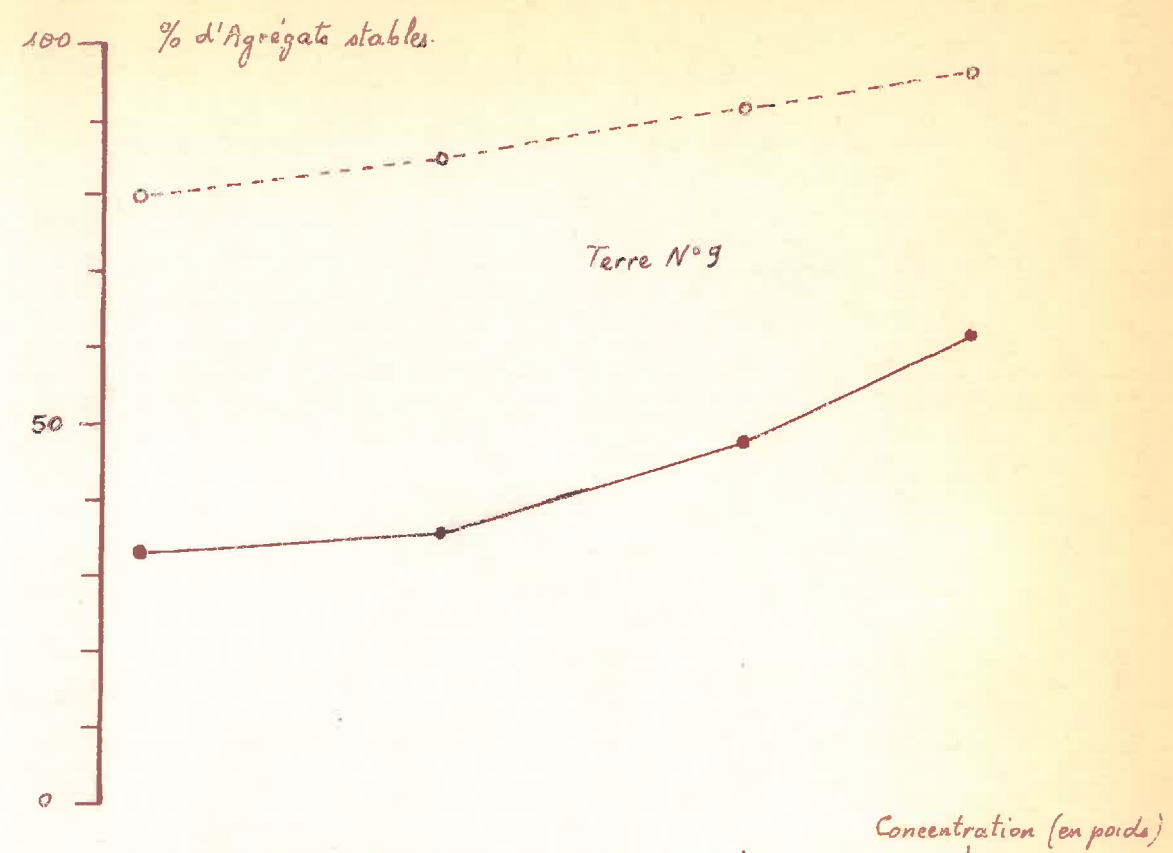
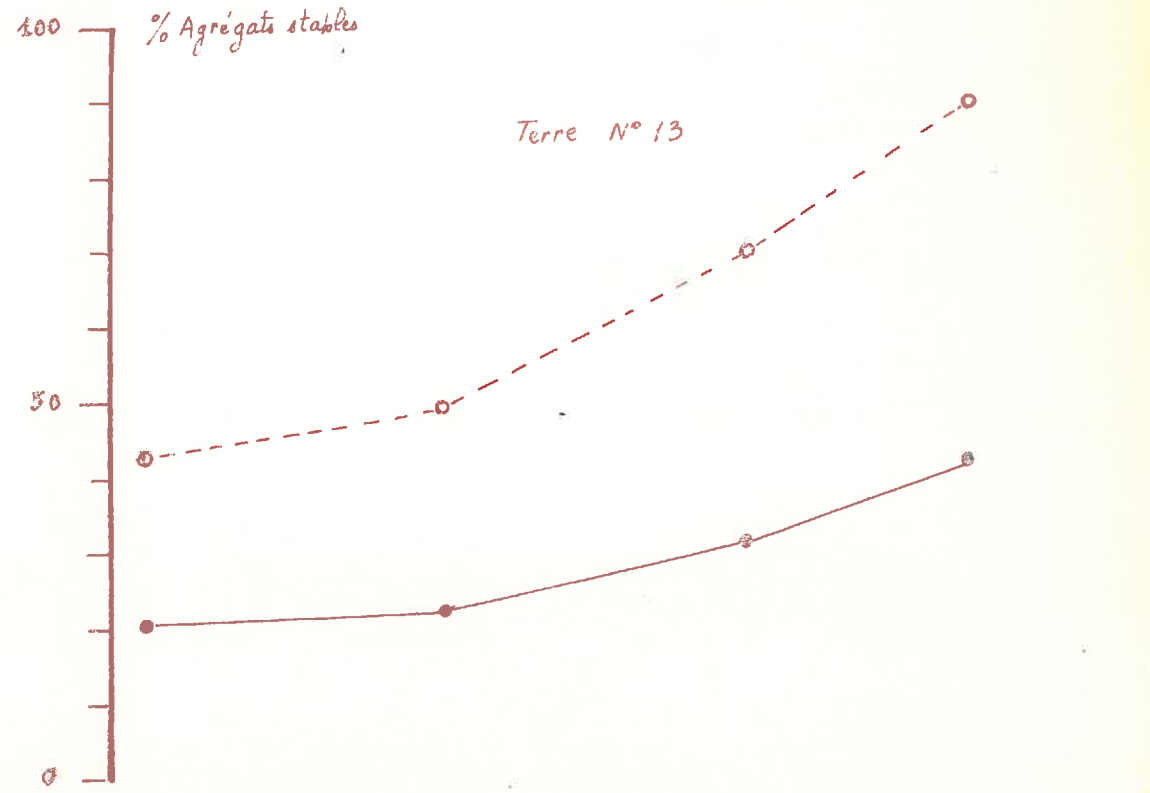
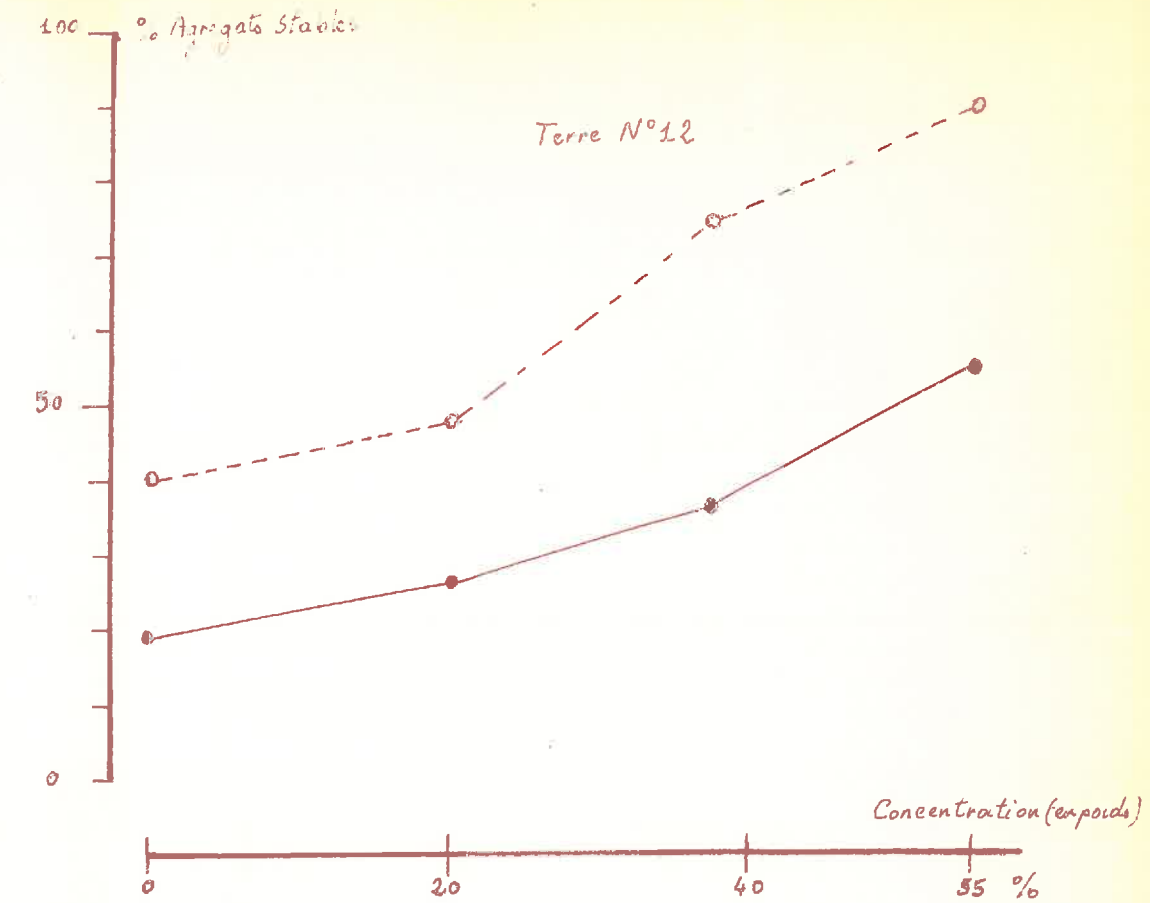


FIGURE N° 5 (Suite ...)



MECANISME DE L'EFFET VISCOSITE

Lorsque l'on utilise comme liquides de traitement des solutions de saccharose en remplacement de l'eau pure, l'atmosphère interne de l'agrégat n'est pas modifiée. En effet, l'addition de sucre n'affecte pas la tension de vapeur de l'eau. Nous avons d'autre part vérifié qu'elle n'entraîne pas de conditions d'hydratation différentes et telles que le diamètre des pores à l'état humide et par là, la pression capillaire en soient affectés. En effet, des mesures de gonflement effectuées sur mottes après imbibition par l'eau et par des solutions de saccharose ont donné des résultats identiques. Elles montrent bien que les conditions d'hydratation ne sont aucunement modifiées. De plus on sait que l'addition de saccharose à l'eau ne provoque pas de changements notables de tension superficielle. En conséquence il est possible de conclure à l'égalité des pressions capillaires lorsque, pour une même terre, des solutions sucrées ou de l'eau pure sont utilisées comme liquides de traitement.

Les résultats des manipulations effectuées à l'aide de solutions sucrées permettent donc d'enregistrer les effets entraînés par la seule variation de viscosité. A travers ces effets, ils permettent aussi de mettre l'accent sur les aspects dynamiques du phénomène.

En effet, les solutions visqueuses pénètrent moins rapidement que l'eau à l'intérieur des pores du sol. D'autre part, la surface de l'agrégat est elle-même mouillée plus lentement, tous les pores n'étant pas obstrués simultanément.

Les ménisques liquides, jouant le rôle de pistons, repoussent et compriment l'air inclus, comme dans le cas du traitement par l'eau. Mais ce mouvement est plus progressif et permet vraisemblablement à l'air de s'écouler en quantité plus importante par les pores non obstrués.

Or la pression maximale à laquelle cet air est soumis dépend à la fois de la vitesse d'avancement des ménisques et des possibilités d'échappement. Donc, si l'on travaille sur un même matériau, c'est-à-dire avec une même quantité d'air initiale et

une même répartition des pores dans leur forme et leurs dimensions, la pression interne maximale sera moins importante lorsque les agrégats sont traités par des solutions visqueuses que lorsque le liquide de traitement est de l'eau pure.

Là encore, l'observation directe confirme l'interprétation théorique.

Nous avons en effet déjà noté le chapelet de bulles d'air s'échappant des agglomérats avant l'éclatement lorsque ceux-ci sont plongés dans l'eau.

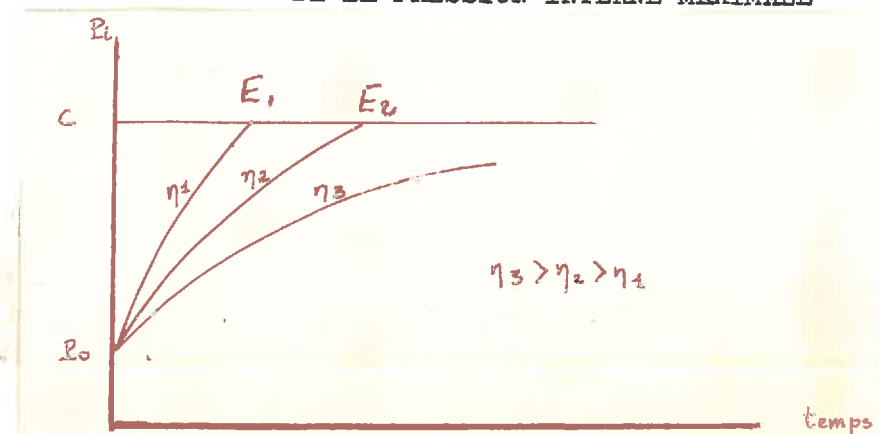
Si l'on effectue cette expérience en remplaçant l'eau par des solutions visqueuses de saccharose, la même remarque peut être effectuée mais la vitesse d'échappement des bulles est beaucoup plus réduite. Cela montre bien que l'air est repoussé moins violemment que dans le cas d'une imbibition par l'eau et qu'il dispose donc d'une durée plus importante pour s'échapper.

On peut illustrer ce phénomène en comparant ses effets à ceux provoqués par l'avancement d'un piston dans un cylindre dont une extrémité fermée est percée d'un trou. Si le piston est repoussé très rapidement, l'air inclus est fortement comprimé bien qu'il puisse s'échapper en partie. Par contre, si le mouvement du piston est lent, la compression sera faible car l'air dispose d'un temps plus long pour sortir du cylindre.

Si l'on admet qu'un tel phénomène régit le comportement des agrégats, il est possible de l'illustrer par une représentation graphique (figure N° 6).

FIGURE N° 6

EFFETS DE LA VISCOSITE DES SOLUTIONS SUR L'ETABLISSEMENT
DE LA PRESSION INTERNE MAXIMALE



Un liquide peu visqueux (η 1) pénètre rapidement dans les pores. Seule une faible partie de l'air inclus peut s'échapper. L'éclatement a lieu en E_1 lorsque P_i atteint une valeur égale à la cohésion C de la terre humide.

Par contre, si la vitesse d'imbibition est lente (liquide de viscosité η 3), l'air inclus peut se maintenir à une pression inférieure à la pression critique de rupture, car, en grande partie, il aura pu s'évacuer.

Enfin, la pression critique peut n'être atteinte que lorsque l'agrégat est presque totalement humecté. La rupture (en E_2) n'intéresse alors qu'une partie de l'agrégat. Il ne s'effectue qu'un éclatement partiel.

NECESSITE DE VERIFICATIONS.-

L'effet de la viscosité des solutions de traitement est nettement mis en évidence grâce aux manipulations qui précèdent. Cependant nous n'avons travaillé qu'avec des solutions de saccharose qui, nous l'avons vu, n'entraînent par rapport à l'eau pure, des modifications ni dans les conditions d'hydratation, ni dans les tensions capillaires développées.

Il faut maintenant vérifier si la viscosité est seule en cause ou si d'autres facteurs interviennent dans le déroulement des mécanismes.

Pour cela, nous avons choisi d'utiliser des liquides de traitement tels que des modifications d'autres caractères physico-chimiques accompagnent les variations de viscosité.

CHAPITRE III

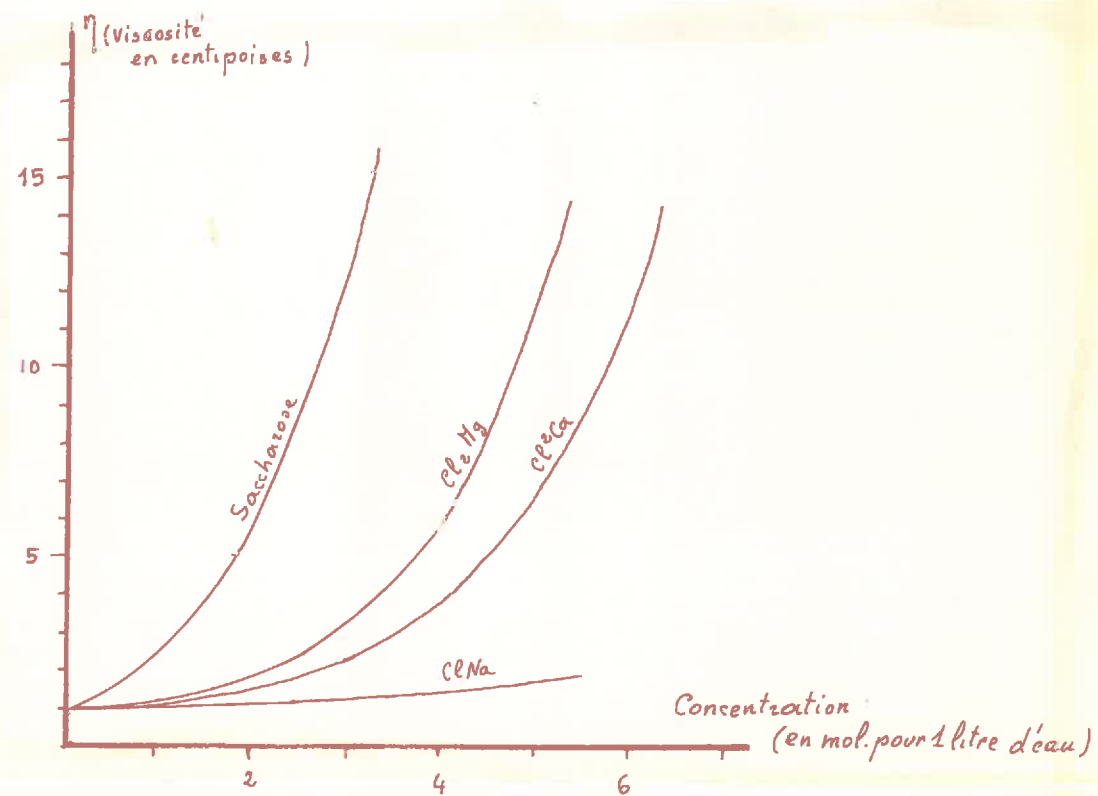
INTERVENTION DE LA VITESSE D'HUMECTATION

ANALYSES D'AGREGATS DANS DES SOLUTIONS SALINES

Si l'on utilise des sels minéraux comme solutés, la plupart des propriétés physico-chimiques de la solution varient avec la concentration. Simultanément sa viscosité croît. Nous avons tracé figure N° 8 les courbes rendant compte de cet accroissement pour des solutions de Chlorure de Sodium, Magnésium et calcium en les comparant à celles obtenues pour des solutions de saccharose.

FIGURE N° 7

VARIATIONS DE LA VISCOSITE DE SOLUTIONS DE SELS
ET DE SACCHAROSE EN FONCTION DE LEUR CONCENTRATION



Bien que nettement moins importante pour les solutions salines que pour les solutions de saccharose, l'augmentation de viscosité en fonction de la concentration reste notable.

L'action du facteur viscosité de la solution de traitement sur le pourcentage d'agrégats stables devrait donc apparaître en utilisant à diverses concentrations, des solutions de sel.

Nous avons effectué l'analyse d'agrégats dans de telles solutions et représenté graphiquement (figure N° 8) les variations du taux d'agrégats stables en fonction de la viscosité pour les terres des deux premières séries d'échantillons. Sur les mêmes graphiques, nous avons tracé les courbes régulières obtenues en traitant les mêmes terres par des solutions sucrées de viscosité croissante.

On voit que le taux d'agrégats stables subit effectivement d'importantes variations lorsque la viscosité des solutions salines utilisées augmente. Cependant, si pour les terres N° 2, 3 et 6, les points portés sur le graphique sont voisins de la courbe tracée grâce aux manipulations effectuées dans les solutions de saccharose, il n'en est pas de même pour les terres N° 1, 7 et 8, les points s'écartant alors notablement de cette courbe. Notons d'ailleurs que, pour une même viscosité, l'effet protecteur des solutions salines est le plus souvent inférieur à celui de la solution sucrée.

Le seul effet viscosité ne peut donc rendre compte du comportement des sols lorsque l'analyse d'agrégats est réalisée dans des solutions salines.

Or, lorsque l'on remplace l'eau pure par des solutions de saccharose de concentrations croissantes, nous avons signalé que la tension capillaire n'est aucunement modifiée. D'autre part, nous avons pu constater que ces solutions n'introduisent pas de modifications dans les conditions d'hydratation des particules de terre, c'est-à-dire comme nous le verrons plus loin, de leur cohésion.

FIGURE N° 8

INFLUENCE DE LA VISCOSITE DES SOLUTIONS DE TRAITEMENT SUR LE TAUX
D'AGREGATS STABLES

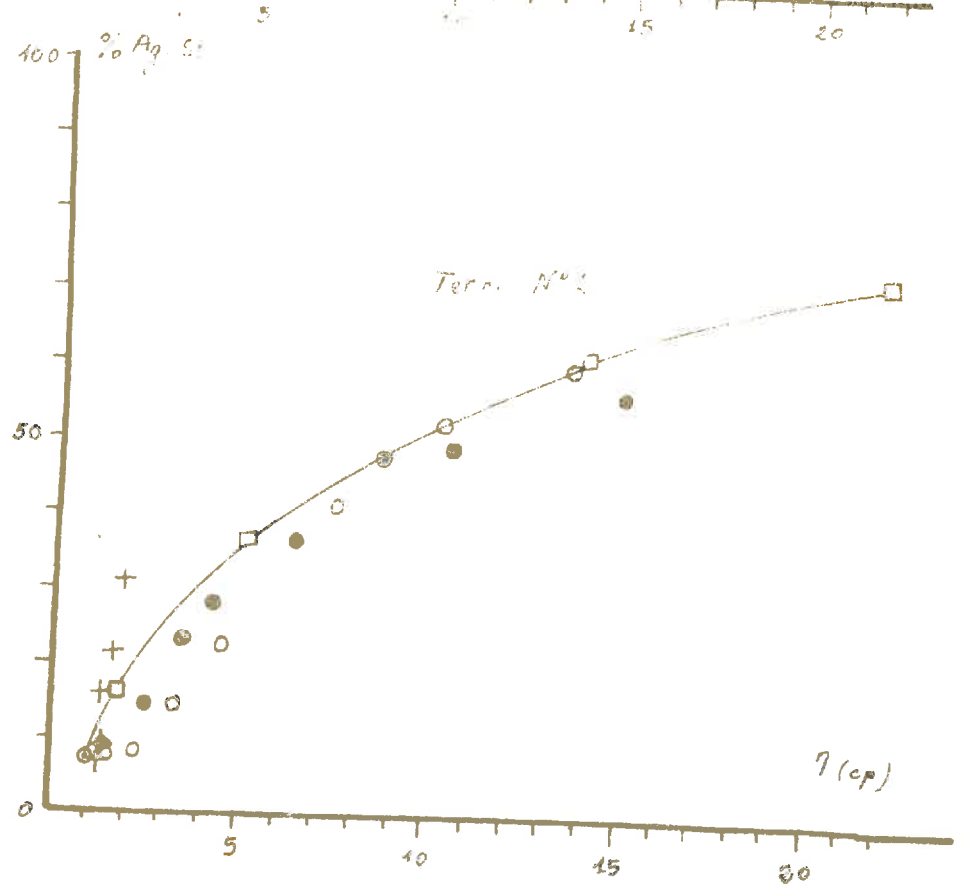
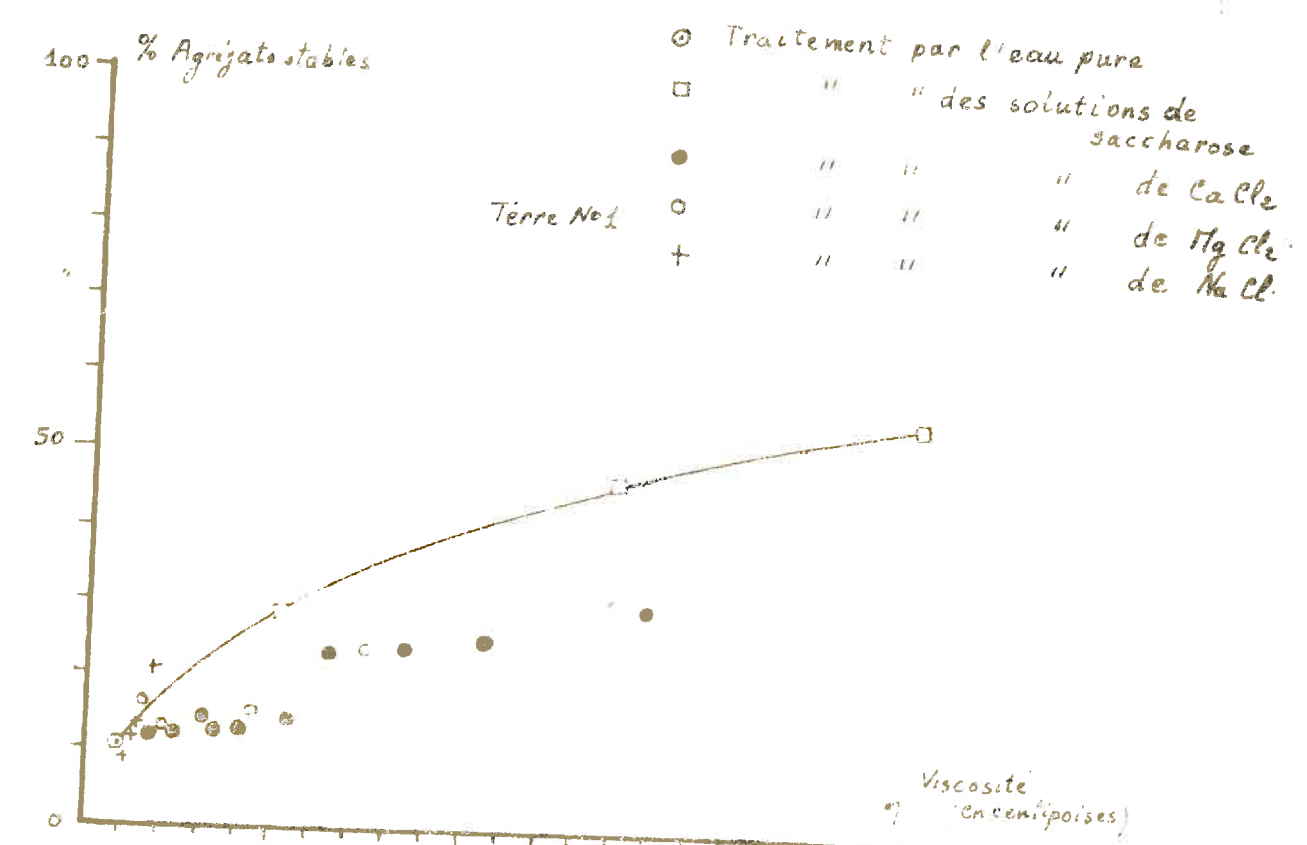


FIGURE N° 8 (Suite)

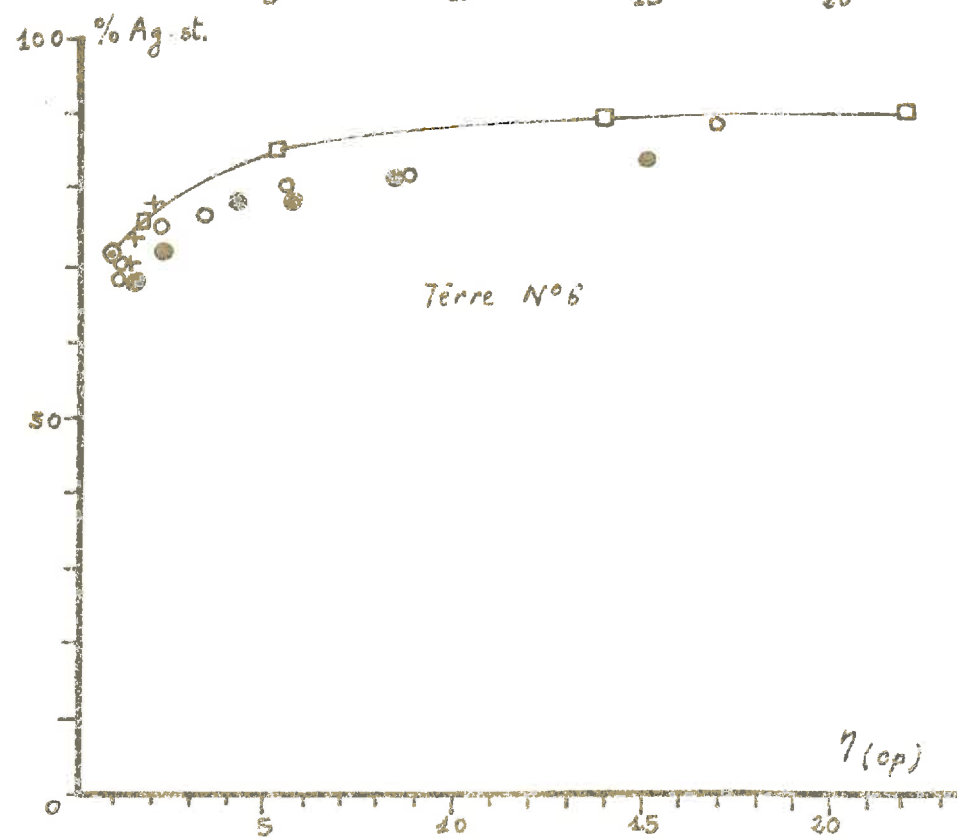
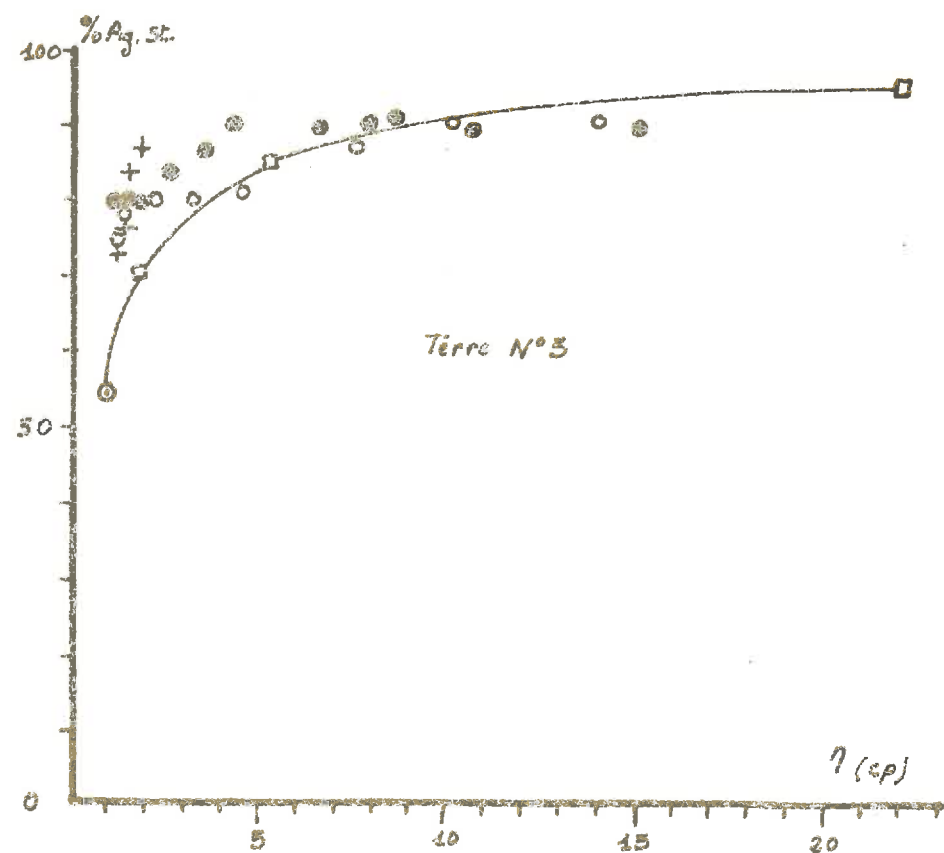
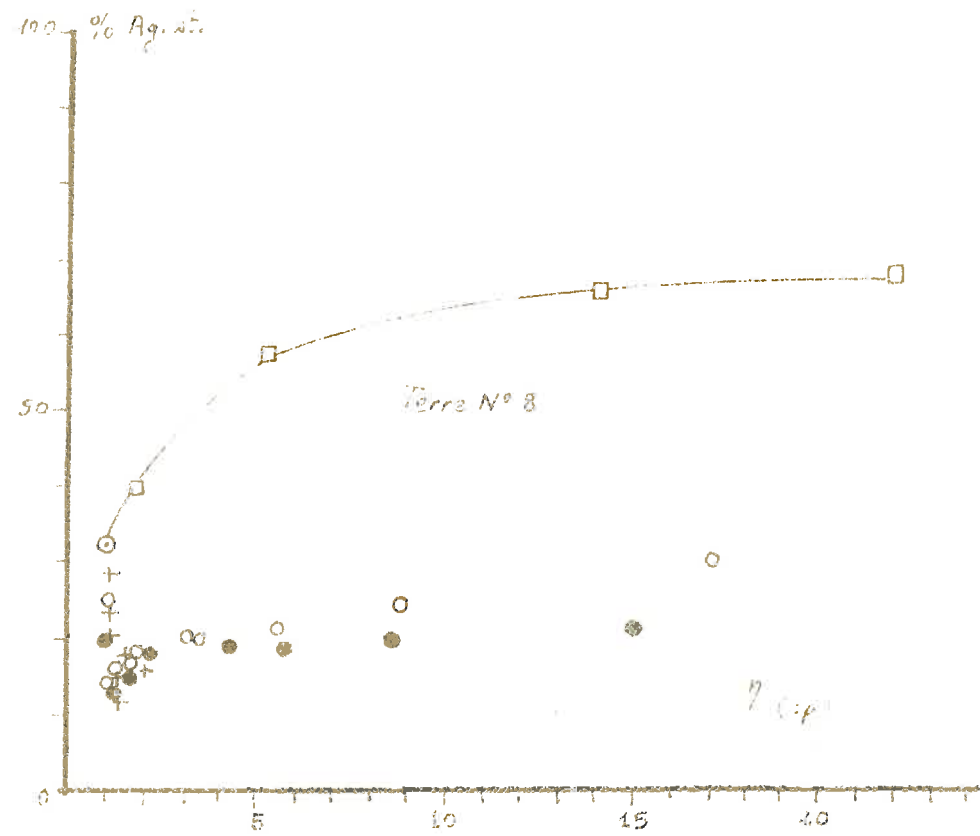
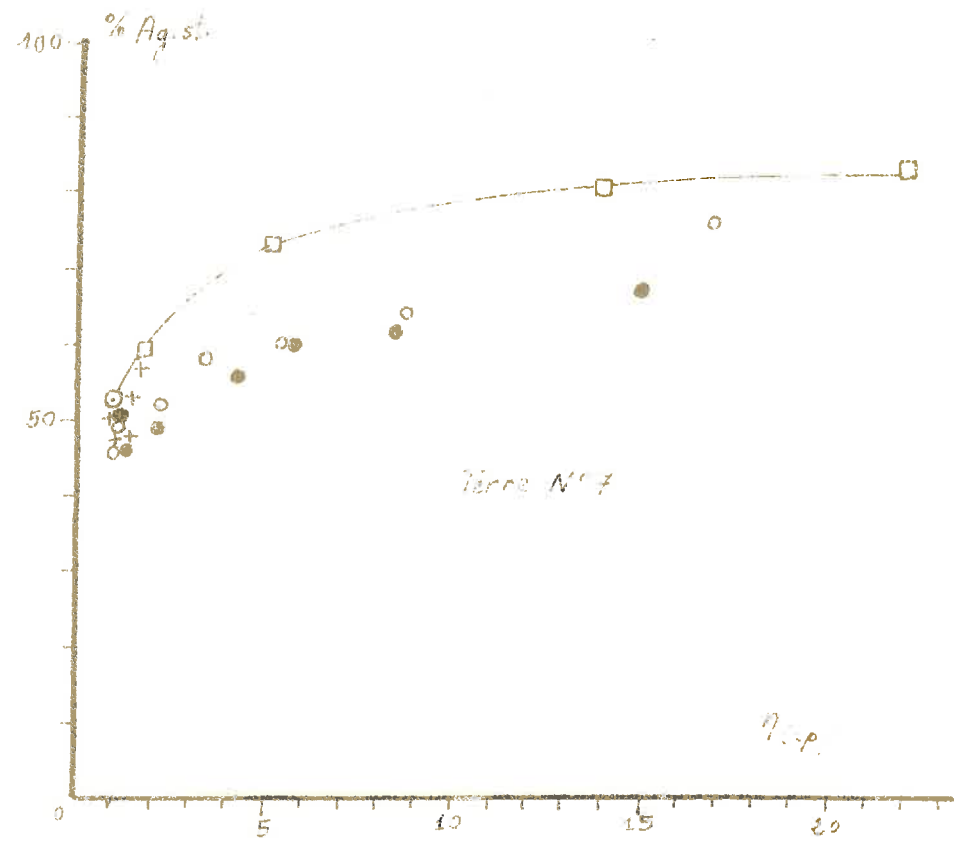


FIGURE N° 8 (Suite)



Au contraire lorsque le liquide de traitement est une solution saline, un certain nombre de propriétés se trouvent modifiées par rapport à l'eau pure, par exemple la tension de vapeur et la tension superficielle. De plus, les échanges d'ions entre le sol et la solution peuvent changer sensiblement la réaction de la terre vis-à-vis de l'eau.

Les tensions capillaires à l'intérieur des pores et les conditions d'hydratation de la terre étant ainsi modifiées, la vitesse d'avancement des ménisques et les possibilités d'échappement de l'air inclus peuvent subir d'importants changements par rapport aux traitements par l'eau ou par les solutions sucrées. On peut s'attendre à ce que le mode d'établissement de la pression interne maximale soit très différent.

TEMPS NECESSAIRE A L'HUMECTATION

Certaines des valeurs caractéristiques de la solution telles que la viscosité ou la tension superficielle peuvent être connues facilement par des mesures ou par des tables. Par contre il est malheureusement très difficile d'apprécier des valeurs telles que l'angle de raccordement sol/liquide.

Cependant, l'action simultanée des différentes variables a comme effet une humectation plus ou moins rapide des agrégats. On peut donc, par une mesure du temps nécessaire à l'humectation par les différentes solutions obtenir une connaissance globale des effets entraînés par l'ensemble des facteurs en cause bien que ceux-ci ne puissent être mesurés séparément.

Dans ce but, nous avons réalisé dans des conditions identiques la mesure du temps nécessaire à l'humectation d'agrégats d'un même échantillon par les différents liquides. Cette notion de temps d'humectation a l'avantage de réunir les mêmes composantes que celles figurant dans l'expression théorique de P_i y compris l'affinité sol/liquide.

Il est toutefois évident que ce test, s'il permet des comparaisons entre le comportement d'agrégats d'une même terre soumis

à divers liquides ne saurait en aucun cas autoriser des confrontations entre plusieurs terres soumises aux mêmes traitements. En effet, la porosité totale de deux terres ainsi que la répartition des pores sont très différentes et entraînent des possibilités d'écoulement de l'air très dissemblables, toute comparaison étant ainsi interdite.

Pratiquement, nous avons réalisé ce test de la manière suivante :

Les agrégats (de même taille que ceux utilisés pour les autres tests) sont déposés sur une plaque poreuse humectée dans des conditions identiques pour chaque série d'expériences. Le temps nécessaire à l'imbibition de chaque agrégat est noté, le test étant effectué sur plusieurs dizaines de particules.

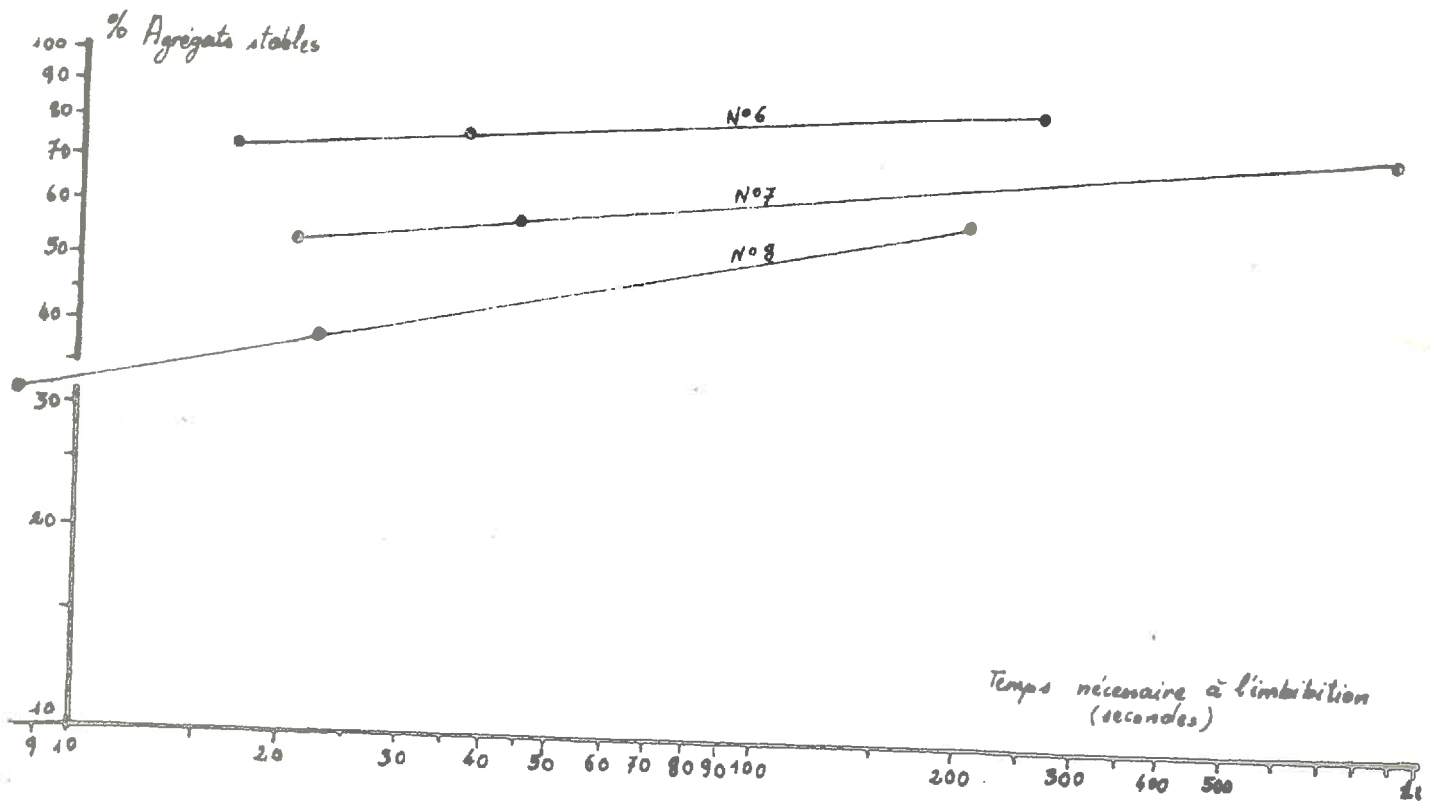
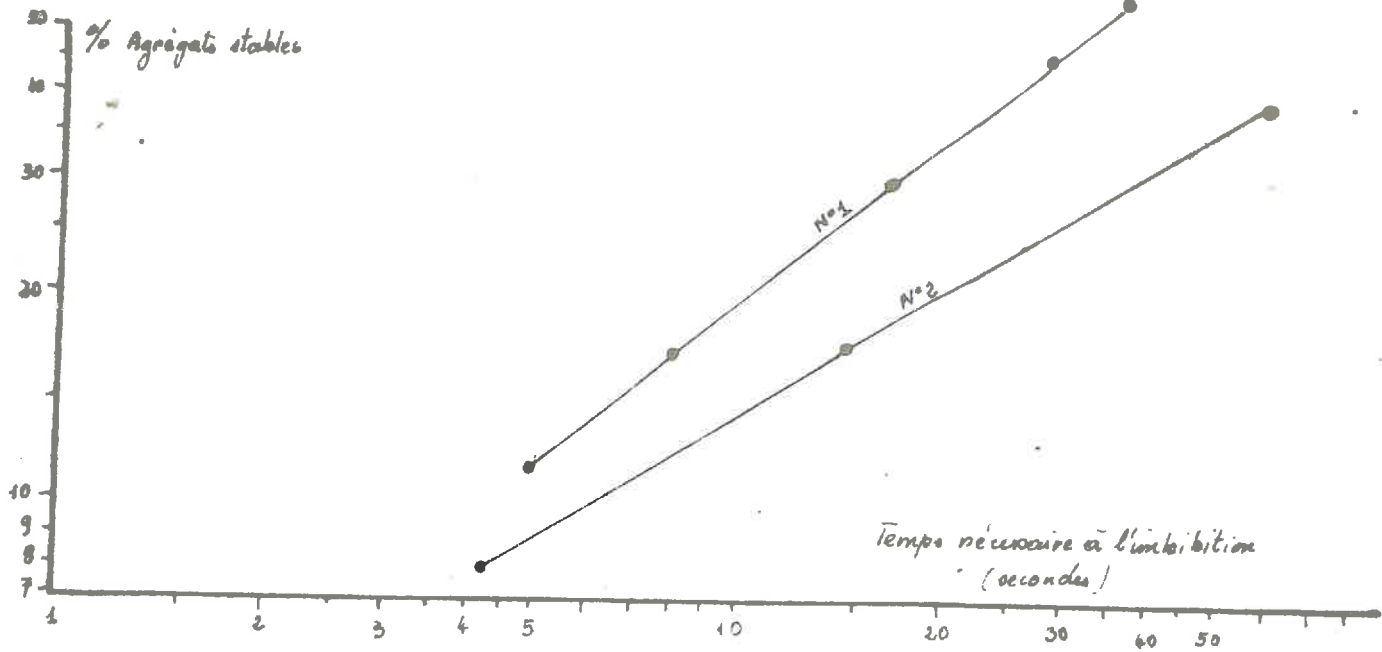
Pour une terre et pour un liquide d'imbibition, les mesures ainsi réalisées permettent l'obtention d'une moyenne représentative car elles sont extraites d'une population normale comme le prouve le calcul du critérium de PEARSON que nous avons reproduit pour deux exemples (V. annexe 2).

HUMECTATION PAR LES SOLUTIONS DE TRAITEMENT

Ce test a été appliqué aux terres en expérimentation en utilisant des solutions sucrées aux mêmes concentrations que celles dans lesquelles nous avons réalisé les tests de stabilité. Pour chaque terre, nous avons ensuite représenté graphiquement l'accroissement du taux d'agrégats stables en fonction du temps nécessaire à l'humectation. Ces graphiques ont été établis en coordonnées bi-logarithmiques (Voir figure N° 9). On voit qu'il est possible de faire passer pour chaque terre une droite par les points expérimentaux correspondants. Il semble donc bien qu'une relation lie la stabilité et la vitesse d'imbibition. Cependant chaque échantillon a ses caractères propres et en particulier une porosité et une répartition des diamètres de pores qui règlent la manière dont l'atmosphère interne est comprimée. C'est pourquoi chaque droite possède sa position et sa pente, traduisant certes l'existence d'une relation monotone entre le taux d'agrégats stables et la vitesse

FIGURE N° 9

INFLUENCE DU TEMPS NECESSAIRE A L'IMBIBITION SUR LE TAUX
D'AGREGATS STABLES
(Traitement par des solutions de saccharose)



d'imbibition, mais cette relation tenant compte des caractères propres à chaque sol.

Nous avons également appliqué ce test à l'humectation des terres par certaines des solutions salines dans lesquelles ont été effectuées les analyses d'agrégats.

Dans la mesure où les conditions d'emprisonnement de l'air réglées par la vitesse d'humectation, entrent seules en jeu, les points correspondant aux traitements par ces solutions devraient se placer sur les courbes de la figure N° 9 obtenues en traitant par les solutions sucrées.

En effet, si cette hypothèse était exacte, pour un même temps nécessaire à l'humectation, c'est-à-dire pour des conditions d'emprisonnement de l'air identiques, les résultats de l'éclatement des agrégats devraient être les mêmes quelle que soit la solution qui le provoque.

Nous avons donc placé les points correspondant aux solutions salines sur les graphiques de la figure N° 9. On voit (figure N° 10) que ces points s'écartent parfois notablement des droites tracées grâce aux solutions de saccharose.

Si pour les terres N° 6 et 7 les différences sont faibles, les N° 1 et 2 montrent déjà une divergence sensible entre les deux groupes de résultats et la terre N° 8 apparaît franchement aberrante.

Or nous avons remarqué précédemment que l'intervention de solutions salines introduit d'importantes variations dans les conditions d'hydratation de la terre. On peut alors s'attendre à ce que la cohésion de la terre humide soit très différente selon la nature du liquide d'imbibition et nous nous proposons d'examiner dans quelle mesure ce phénomène peut expliquer les écarts constatés entre les taux d'agrégats stables obtenus dans des solutions salines et dans des solutions sucrées entraînant le même temps nécessaire à l'imbibition.

FIGURE N° 10

INFLUENCE DU TEMPS NECESSAIRE A L'IMBIBITION SUR LE TAUX
D'AGREGATS STABLES

(Traitement par des solutions salines)

- Traitement par l'eau pure
- Traitement par des solutions de $CaCl_2$
- " " " " " $MgCl_2$
- + " " " " " $NaCl$

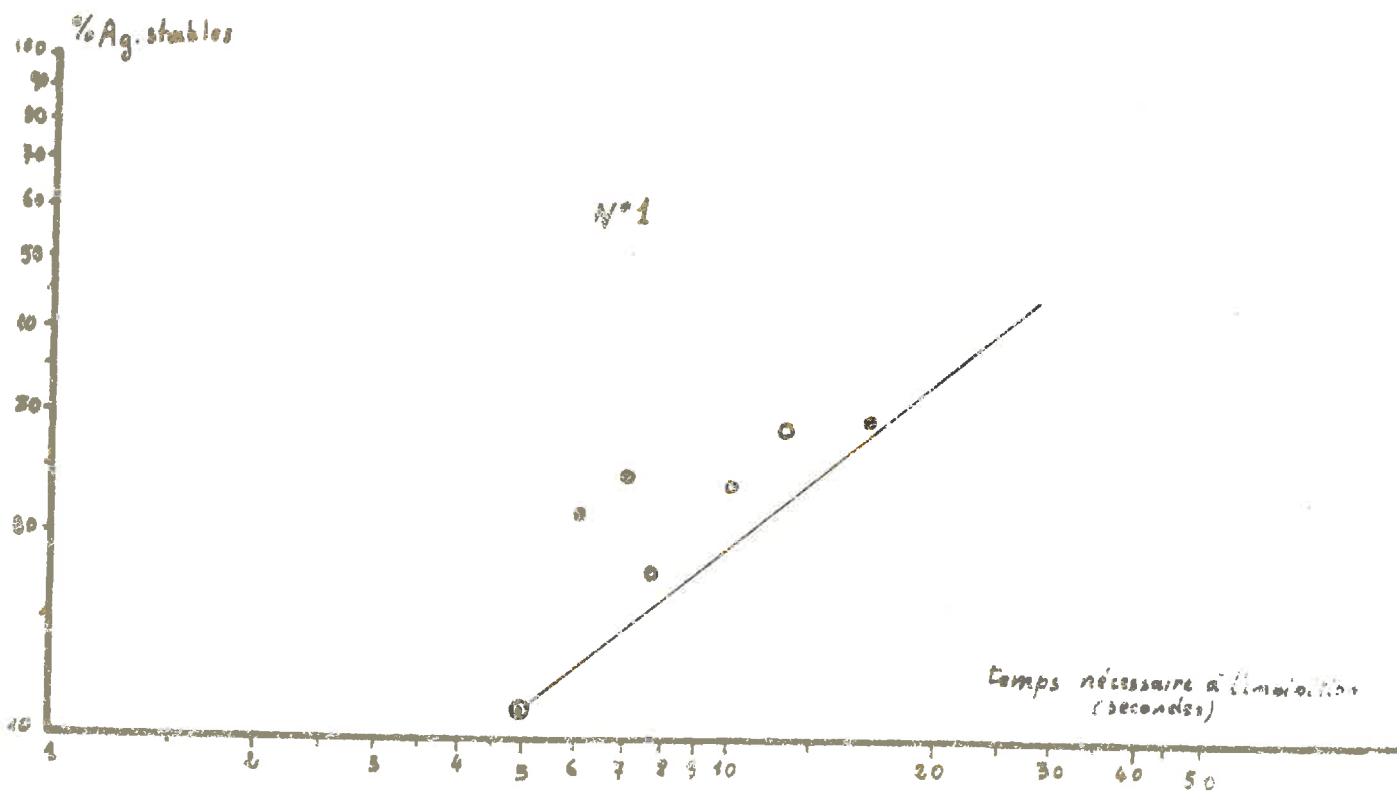
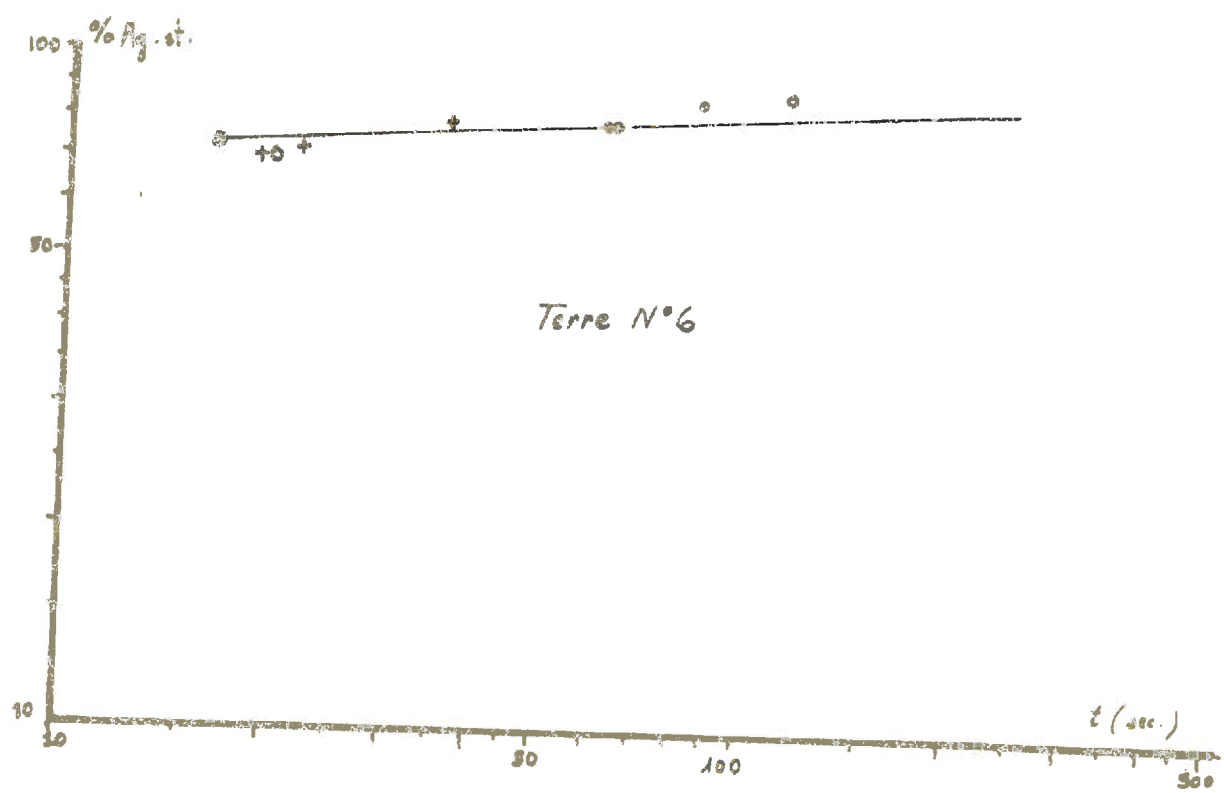
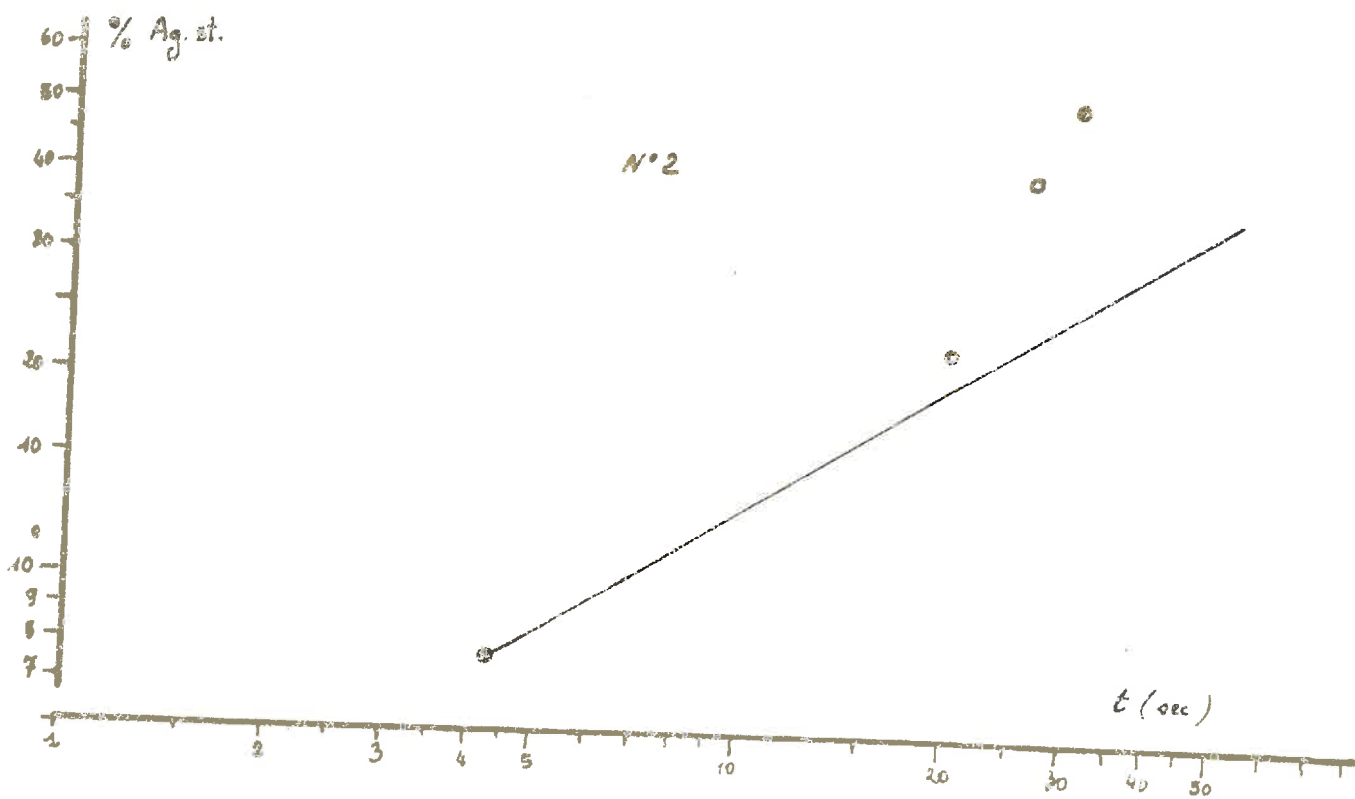
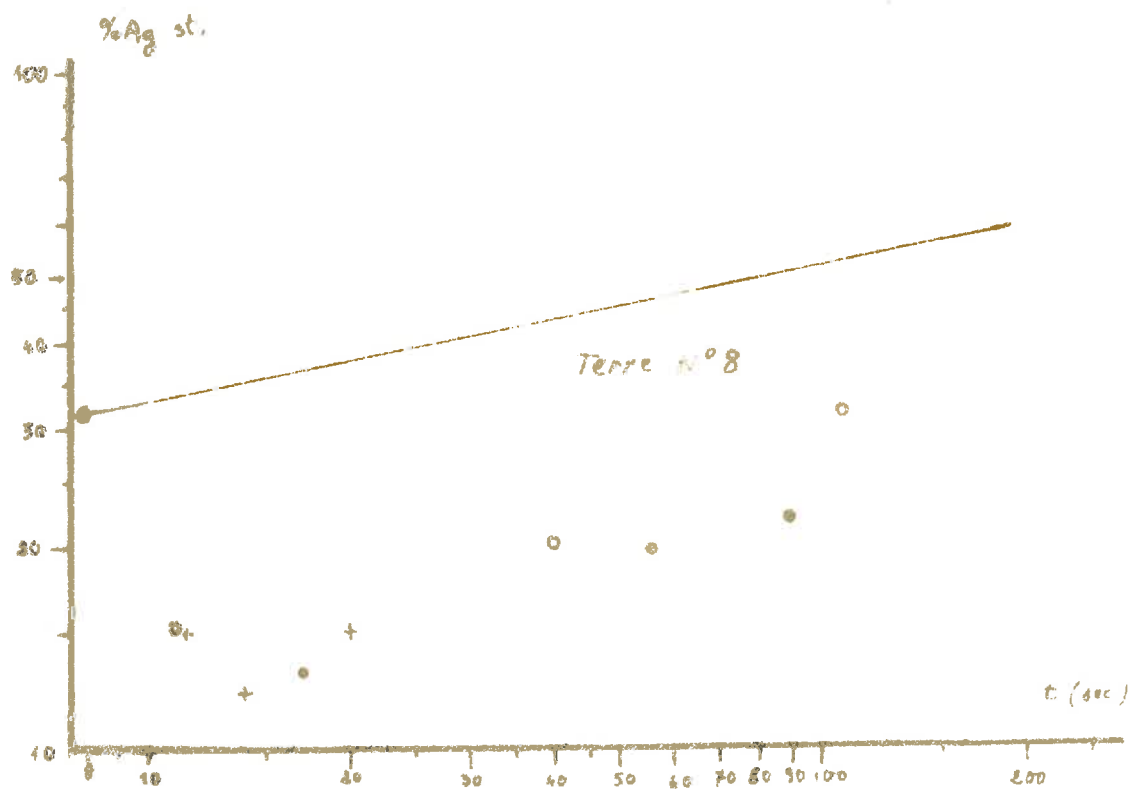
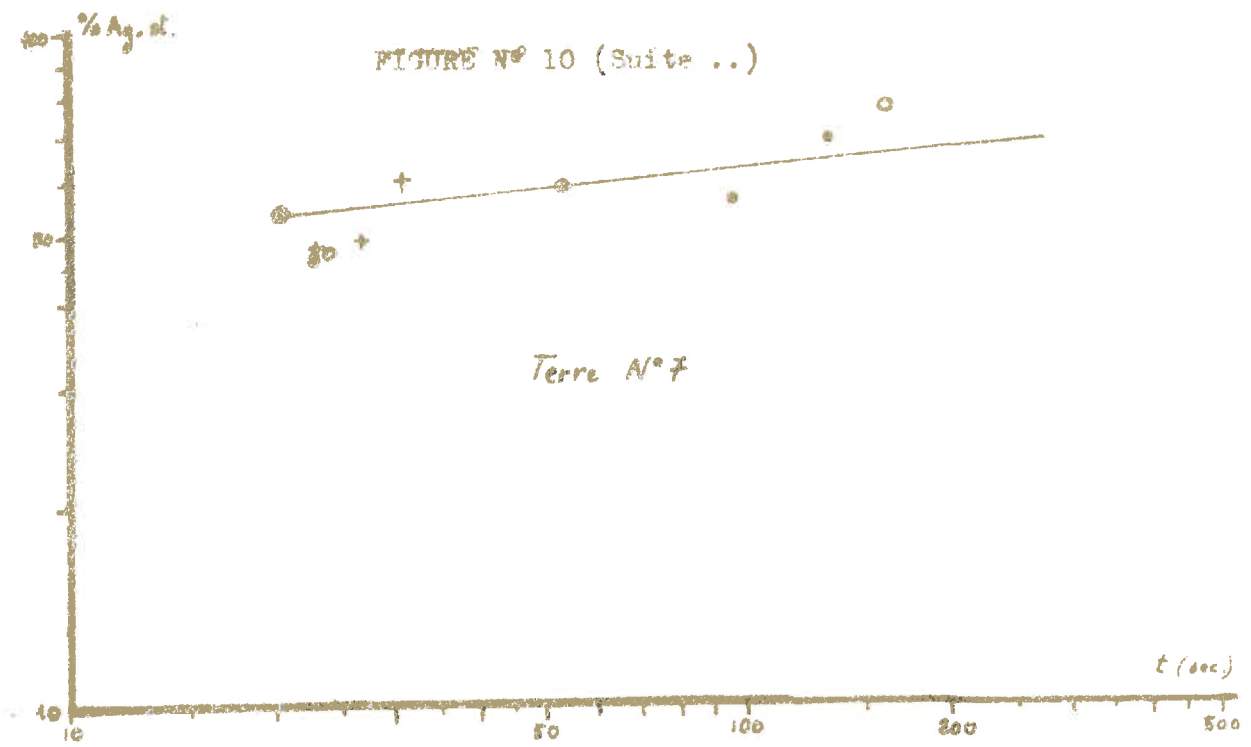


FIGURE N° 10 (Suite ...)





C H A P I T R E IV

LA COHESION

MESURE DE LA COHESION

En premier lieu, il est nécessaire de mettre en oeuvre une technique susceptible de rendre compte des variations de cohésion.

La plupart des travaux antérieurs portant sur la cohésion des terres ne mentionnent que des mesures effectuées sur des terres se différenciant par leur teneur en argile et leur compacité sous l'effet de pétrissages préalables à l'état humide.

Or il est bien évident que la rupture des agrégats intervient alors que la terre est déjà humectée. C'est donc des mesures de cohésion sur la terre humide qu'il est nécessaire de réaliser.

De plus, le façonnement en patons de la terre humide entraîne automatiquement de profonds changements dans la répartition des pores et, par là, dans les conditions de compression de l'atmosphère interne des particules de terre.

L'application de la méthode de travail que nous nous sommes fixée exige l'utilisation d'une technique telle que les mesures de cohésion soient réalisées sur des agrégats non modifiés et humides.

Cependant la disposition des éléments constitutifs du sol est très irrégulière ainsi d'ailleurs que la distribution des forces de liaison assurant la fonction des particules élémentaires aussi bien dans leur intensité que dans leur nature. On ne peut donc s'attendre à ce que les variations de cohésion en fonction de la taille suivent les lois de la similitude.

Dans ces conditions, il paraît très difficile sinon impossible de réaliser sur un tel matériel des déterminations ayant une valeur absolue. Il faut donc utiliser un test capable de donner au moins le sens et l'amplitude des variations de cohésion lorsqu'elle est artificiellement modifiée.

Nous avons retenu la mesure de la résistance à l'écrasement des agrégats. Celle-ci reste en effet sous la dépendance des forces de cohésion bien qu'il paraisse difficile de la relier à ces dernières par une relation mathématique, les agrégats ne se présentant pas sous des formes géométriques simples.

MESURE DE LA RESISTANCE A L'ECRASMENT

La technique employée est la suivante :

Dans une enceinte sous vide, une plaque de porcelaine poreuse est maintenue saturée par le liquide de traitement. Dans la même enceinte, les agrégats sont disposés dans un récipient situé au-dessus de la plaque. Une commande manuelle extérieure permet de verser son contenu sur cette plaque.

Le vide est maintenu plusieurs heures afin d'extraire des agrégats l'air qu'ils pouvaient renfermer. Les particules de terre sont alors répandues sur la plaque poreuse. L'humectation est ainsi réalisée dans des conditions limitant au maximum les risques d'éclatement. Afin d'assurer une imbibition complète, l'ensemble est abandonné pendant 12 heures.

Les agrégats sont alors déposés un à un sur le plateau d'une balance à lecture directe. A l'aide d'une butée mobile verticale et commandée par une vis molletée, des pressions croissantes sont exercées sur la particule de terre et apparaissent quantitativement sur l'échelle optique. On note l'effort correspondant à l'écrasement, celui-ci étant nettement marqué par la brusque variation de l'échelle de lecture (figure N° 11).

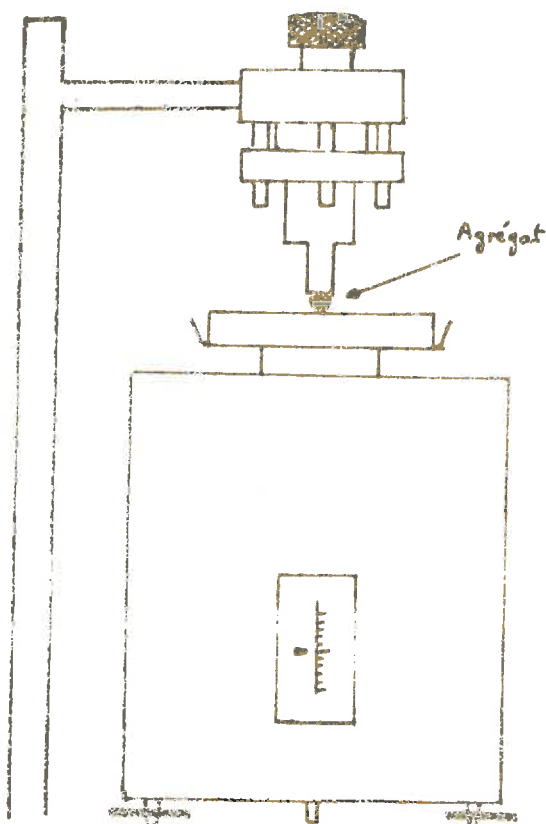
Cette mesure est effectuée pour une même terre et pour un même traitement sur plusieurs dizaines d'agrégats dont la taille (entre 1 et 2 mm) correspond à celle des particules utilisées pour les tests de stabilité.

Etant donné la petite taille des particules, il n'est pas possible de les choisir d'après leur forme. D'autre part, la mesure s'effectuant entre deux pièces rigides, on ne peut prévoir la distribution des contraintes dans l'agrégat. Seul apparaît donc un effet global.

Nous avons pu cependant vérifier la normalité de la répartition des résultats obtenus autorisant le calcul d'une moyenne représentative. Cette moyenne caractérise la résistance à l'écrasement d'une terre humide imbibée par un liquide. A titre de contrôle, nous avons renouvelé les mêmes mesures dans des conditions identiques sur d'autres prises d'essai du même échantillon. Nous avons toujours obtenu des moyennes très proches traduisant une reproductibilité très satisfaisante (I)

FIGURE N° 11

APPAREILLAGE UTILISE POUR LA
MESURE DE RESISTANCE A L'ECRASMENT DES AGREGATS



(I) on trouvera en annexe, pour deux exemples, le calcul du critérium de Pearson vérifiant que les résultats des mesures sont bien extraits de populations présentant une répartition normale.

ACTION SUR LA COHESION DES DIFFERENTS LIQUIDES DE TRAITEMENT

Nous avons appliqué le test décrit précédemment aux terres en expérimentation après humectation par l'eau et par des solutions de saccharose et de sels à différentes concentrations.

Les mesures de résistance à l'écrasement étant malheureusement longues et délicates, nous avons dû limiter l'application de ce test à quelques solutions. Au cours des essais portant sur la première série de terres (N° 1, 2, 3) nous nous sommes bornés à des mesures de résistance à l'écrasement des agrégats après imbibition par les solutions les plus concentrées. Sur la deuxième série d'échantillons (terres N° 6, 7, 8), nous avons utilisé également des solutions diluées.

Ces mesures sont rassemblées dans le tableau N° VII.

Les mesures effectuées après imbibition dans les solutions de saccharose quelle que soit leur concentration, sont toutes égales ou très voisines de celles effectuées pour la même terre dans l'eau pure. Ce fait rejoint la remarque faite précédemment et concernant l'identité des conditions d'hydratation de la terre traitée par l'eau ou les solutions sucrées. Dans le tableau, nous nous sommes bornés à indiquer pour chaque terre la moyenne des mesures effectuées en imbibant les agrégats par les diverses solutions sucrées.

Par contre, en prenant la mesure effectuée après imbibition à l'eau pure comme base de comparaison, on voit que la résistance à l'écrasement subit d'importantes variations si l'on utilise les solutions salines. L'importance et le sens de ces variations dépendent non seulement de la nature de l'échantillon traité, mais encore de la nature et de la concentration du soluté utilisé.

Toutefois une ligne générale se dégage de l'ensemble des résultats.

Dans tous les cas, la résistance à l'écrasement croît vers les fortes concentrations. Parfois (terre N° 1, traitée par Ca Cl₂), elle atteint un maximum et subit ensuite une baisse très sensible.

TABLEAU N° VII

RESISTANCE MOYENNE A L'ECRASEMENT DES AGREGATS HUMECTES

(pour un agrégat et en grammes)

1ère Série

2ème Série

Liquide de traitement		Terre N° 1	Terre N° 2	Terre N° 3	Liquide de traitement		Terre N° 6	Terre N° 7	Terre N° 8
soluté	mol/litre				soluté	mol/litre			
Mg	4,6	12,6		43,8	Cl ² Mg	4,75	12,5	9,8	3,2
	4,15	10,9	10,2	39,9		2,36	9,2	7,6	3,4
	3,88	7,5	7,6	24,2		0,2	5,2	5,3	2,8
	3,36	5,75	4,9	22,3		0,02	6	7	3,7
	2,75	5,5	3,7	20,8					
Ca	5,15	5	9,4		Cl ² Ca	5,1	13	10,9	2,4
	4,9	12,6	12,3	50		3,6	10,2	6,9	2,8
	4,55	17	12	44		1,7	6,5	7,1	3,4
	4,25		10	20,9		0,85	9	7,8	3,1
	3,95	5	4,1						
Na	4,95	8	6,6	26	Cl Na	4,95	10,4	9,3	2,5
	3,7	4,8	4	22,5		3	8,2	6,6	2,3
	2,88	5,5	3,8	20,1		0,8	6,5	6,2	2,0
						0,02	8,7	6,3	3,4
solutions de saccharose		4,6	3,9	20,5	solutions de saccharose		9,1	7,4	4
eau		4,5	3,8	20	eau		9	7,6	4

Les gammes plus complètes de concentration utilisées pour la deuxième série d'expériences permettent de plus de constater que, pour les faibles concentrations, la résistance à l'écrasement s'abaisse jusqu'à des valeurs notablement inférieures à celles obtenues après traitement à l'eau. Constatons enfin que, pour certaines terres (tel est le cas de la terre N° 8, très battante) l'utilisation de solutions de sels minéraux en remplacement de l'eau pure entraîne une baisse de la résistance à l'écrasement pour toutes les concentrations.

MONNIER (thèse 1965) à la suite de divers prétraitements a pu également constater des variations importantes de cohésion. Les mesures étaient cependant effectuées sur des patons constitués de terre pétrie et donc profondément modifiée quant à sa structure physique.

Nous verrons par la suite que ce comportement est à relier aux conditions d'hydratation de la terre. Tout se passe comme si l'absorption de certains ions limitait ou au contraire augmentait les possibilités d'hydratation des sols.

Il reste maintenant à vérifier si l'introduction de ce nouveau facteur permet une interprétation complète des phénomènes constatés.

CHAPITRE V

VERIFICATION DE LA THEORIE

LE SYSTEME DE REFERENCE

Nous avons pu voir dans le chapitre précédent que le remplacement de l'eau pure par des solutions de saccharose comme liquide de traitement n'entraîne aucune modification de cohésion de la terre humide.

D'autre part, nous avons pu constater (Chapitre II - Figure N° 5) des variations de stabilité liées aux concentrations en sucre des liquides de traitement.

S'il est alors exact, conformément à notre hypothèse, que les conditions d'éclatement sont données par la différence entre la cohésion de la terre humide et la pression interne maximale de l'air inclus, les courbes de la figure N° 9 établies à cohésion constante représentent pour les différentes terres, les variations de stabilité entraînées par les modifications de la seule pression interne.

Celle-ci est elle-même sous la dépendance de conditions de captage de l'air, c'est-à-dire comme nous l'avons vu, du temps nécessaire à l'imbibition.

Nous disposons donc là d'un véritable système de référence. En effet, pour chaque terre, il est possible de déduire de la mesure du temps nécessaire à l'humectation par le liquide de traitement, le pourcentage d'agrégats stables que devrait présenter l'échantillon si la cohésion restait invariable par rapport à l'imbibition par l'eau pure.

En réalité une telle comparaison entre les traitements par les solutions sucrées et d'autres liquides ne peut être qu'approximative puisque dans les deux cas les conditions d'hydratation risquent d'être très différentes. Cependant, dans le jeu de comparaisons qui nous intéresse, cette approximation paraît suffisante. En effet, si

l'on s'adresse au même matériau le volume d'air intéressé par la compression reste le même ainsi que la manière dont il est comprimé (possibilités d'échappement).

Dès lors, pour chaque terre et pour chaque solution, connaissant le temps nécessaire à l'imbibition, nous pouvons obtenir un taux d'agrégats stables théorique correspondant à une cohésion égale à celle de l'eau en recherchant sur les courbes de la figure les ordonnées du point correspondant au temps nécessaire à l'imbibition porté en abscisse.

Le taux d'agrégats stables réellement mesuré est généralement différent de cette valeur.

Selon notre hypothèse, cette différence ne peut être imputée qu'à une modification de la cohésion.

VERIFICATION DE L'HYPOTHESE

Afin de vérifier cette proposition, nous avons confronté dans le tableau N° VIII (p. 59) :

- le taux d'agrégats stables effectivement mesuré par analyse d'agrégats dans les différentes solutions salines (s_{sol} - colonne 6) avec la stabilité théorique à cohésion constante déduite des courbes établies grâce aux traitements dans les solutions de saccharose pour une même valeur du temps nécessaire à l'imbibition d'un agrégat (s_{th} - colonne 5).
- la résistance à l'écrasement mesurée après imbibition par les solutions salines (c_{sol} - colonne 7) avec la résistance à l'écrasement mesurée après imbibition par l'eau ou par les solutions sucrées (c_e - colonne 2)

On voit que lorsque le pourcentage d'agrégats stables mesuré est supérieur au pourcentage théorique, la résistance à l'écrasement mesurée après imbibition par la solution de traitement est elle-même supérieure à la cohésion obtenue après humectation par l'eau

TABLEAU N° VIII
INFLUENCE DES VARIATIONS DE COHESION
SUR LA STABILITE STRUCTURALE

(1) N° terre	(2) ce (en g.)	(3) Nature du soluté	(4) temps nécessaire à l'imbibition (en secondes)	(5) s _{th} %	(6) s _{sol} %	(7) c _{sol} (en g.)	(8) $\frac{s_{sol}-s_{th}}{s_{th}}$	(9) $\frac{c_{sol}-ce}{ce}$
1	4,6	Cl ² Ca	16	28	29	5	+ 0,04	+ 0,08
			7	14,5	24,3	17	+ 0,67	+ 2,70
			6	12,5	21,4	6,6	+ 0,72	+ 0,44
		Cl ² Mg	12	22	28,5	10,9	+ 0,30	+ 1,37
			10	19	23,5	7,5	+ 0,24	+ 0,63
			7,5	17,5	18	5,8	+ 0,03	+ 0,26
2	4	Cl ² Mg	30	23,8	52,7	10,2	+ 1,21	+ 1,22
			28	22,6	41	7,6	+ 0,81	+ 0,65
			25	21,5	22,6	4,9	+ 0,05	+ 0,06
6	9	Cl ² Ca	85	80	84,2	12,5	+ 0,05	+ 0,35
			62	78	78	10,2	0	+ 0,13
		Cl Na	37	76	77,8	10,4	+ 0,01	+ 0,15
			22	74,5	71	8,2	- 0,04	- 0,09
			19	73,5	70	6,5	- 0,05	- 0,28
		Cl ² Mg	115	81	88	12,5	+ 0,09	+ 0,35
			62	78	78	9,2	0	+ 0,02
			20	74	70	5,2	- 0,06	- 0,42
7	7,4	Cl ² Ca	130	63	66	10,9	+ 0,05	+ 0,48
			95	61	54	6,9	- 0,12	- 0,07
			23	52,5	44,5	7,1	- 0,15	- 0,04
		Cl Na	32	54,5	58,5	9,3	+ 0,08	+ 0,26
			27	53	47,5	6,6	- 0,10	- 0,11
			23	52,5	46	6,2	- 0,13	- 0,16
		Cl ² Mg	160	63,5	75,5	9,8	+ 0,19	+ 0,32
			54	56,7	56,7	7,6	0	+ 0,02
			24	52,5	45,6	5,3	- 0,13	- 0,28
8	4	Cl ² Ca	90	49,2	20	2,4	- 0,58	- 0,40
			56	44,5	17,7	2,8	- 0,61	- 0,30
			17	35,4	11,4	3,1	- 0,68	- 0,23
		Cl Na	20	36,4	13,5	2,5	- 0,63	- 0,37
			14	33,8	10,6	2,3	- 0,70	- 0,42
			11,5	32,8	13,5	2	- 0,59	- 0,50
		Cl ² Mg	119	51,1	29,2	3,2	- 0,43	- 0,20
			40	41,5	18,6	3,4	- 0,55	- 0,15
			11	32,3	13,8	2,8	- 0,57	- 0,30

Inversement une résistance à l'écrasement mesurée inférieure à la résistance à l'écrasement à l'eau, entraîne un pourcentage d'agrégats stables mesuré supérieur au pourcentage théorique.

Nous avons calculé les rapports $\frac{S_{sol} - S_{th}}{S_{th}}$ et $\frac{C_{sol} - C_e}{C_e}$ et porté leurs valeurs, pour les différents traitements, dans les colonnes 8 et 9 du tableau N° VIII.

Cette forme d'expression montre très nettement que les variations relatives du taux d'agrégats stables et de la résistance à l'écrasement ont dans chaque cas le même signe.

Nous avons représenté graphiquement ces résultats pour les terres 6, 7 et 8, figure N° 12 et, pour cette série d'expériences, il semble qu'il existe une certaine corrélation entre ces deux rapports. Cependant, si l'on tient compte des techniques employées, basées uniquement sur des tests, et de la difficulté évoquée précédemment de relier la résistance à l'écrasement à la cohésion réelle des agrégats, il nous paraît nécessaire de ne donner ici qu'une appréciation qualitative du phénomène.

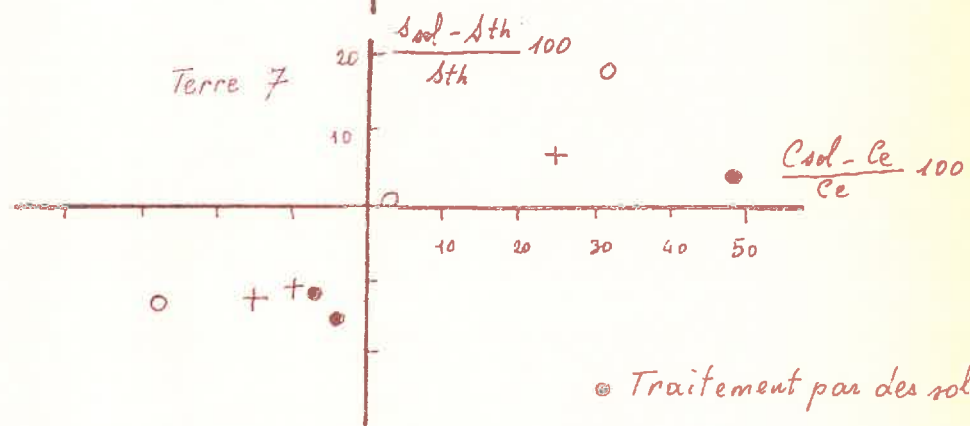
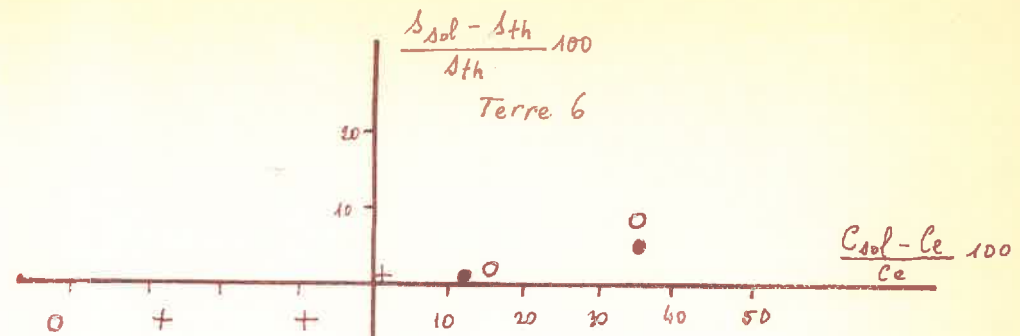
En restant dans cette optique, cet ensemble d'expériences fait apparaître le rôle de la cohésion de la terre humide et tend à confirmer ainsi notre hypothèse selon laquelle les conditions de stabilité sont données par la différence entre la cohésion de la terre humide et la pression interne maximale susceptible d'être atteinte par l'air inclus.

Il reste évidemment à vérifier le caractère général de cette formule en l'appliquant à d'autres échantillons. Il faut aussi déterminer l'importance et la nature des facteurs entrant en jeu dans les variations de C et de Pi.

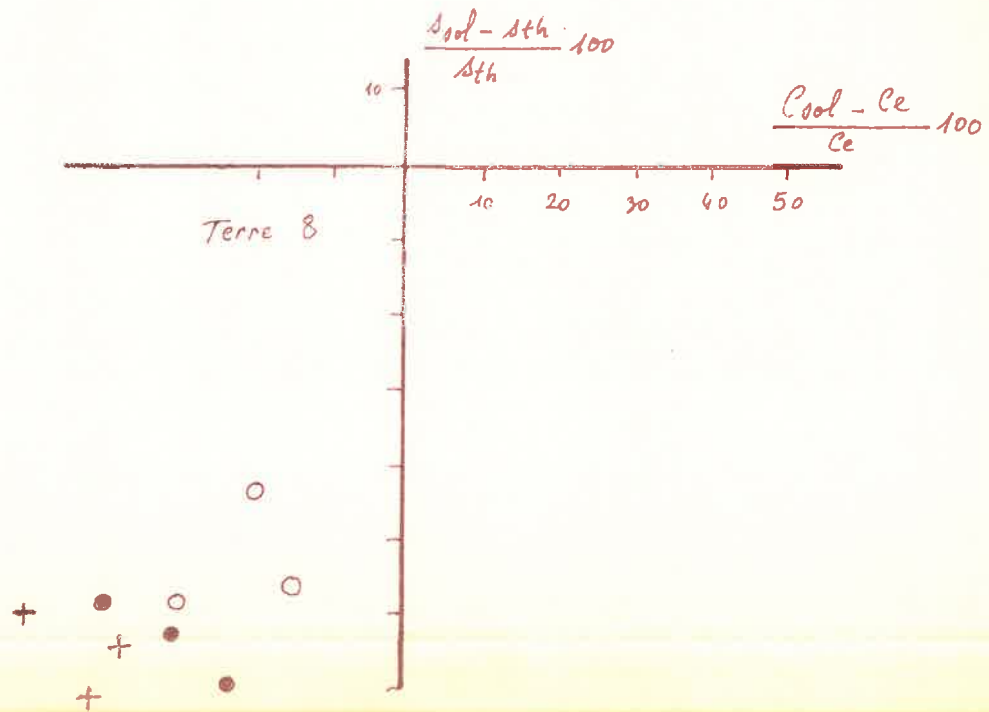
Cet ensemble fait l'objet de la troisième partie de cette étude.

FIGURE N° 12

VARIATIONS RELATIVES DU TAUX D'AGREGATS STABLES ET DE LA
RESISTANCE A L'ECRASEMENT



● Traitement par des solutions de CaCl₂
 O " " " " " MgCl₂
 + " " " " " NaCl



3ème PARTIE

DISCUSSION

C H A P I T R E I

IMPORTANCE RELATIVE DE DEUX PARAMETRES PRINCIPAUX

L'analyse expérimentale qui précède nous a permis de confronter le comportement de modèles constitués de petites particules de terres appartenant à plusieurs échantillons et les mécanismes théoriques intervenant dans le phénomène d'éclatement des agrégats.

Lorsque la cohésion est invariable (cas des traitements par l'eau et les solutions de saccharose) nous avons pu attribuer les modifications du taux d'agrégats stables aux différentes valeurs de la pression interne maximale (P_i) susceptible d'être atteinte par l'air inclus, selon les caractères de la solution de traitement.

Nous avons pu également constater que lorsque deux liquides entraînent une même valeur de P_i sur une terre, les cohésions à l'état humide (C), souvent très différentes, sont responsables des variations du taux d'agrégats stables.

Ainsi, ont pu être dégagés les deux facteurs principaux du phénomène, C et P_i .

Il apparait cependant que selon la nature de l'échantillon, l'importance respective de l'un et l'autre de ces deux facteurs n'est pas la même. En effet l'amplitude des variations du taux d'agrégats stables n'est pas systématiquement proportionnelle aux modifications de P_i ou de C .

Il est vrai que nous ne possédons aucune indication sur les valeurs réelles de C et de P_i car, dans tous les cas, nous n'avons appliqué que des tests. Ceux-ci ne peuvent rendre compte que du sens des variations des facteurs en cause en comparant les mesures effectuées pour les divers traitements.

Afin de préciser les raisons du comportement des différents sols, nous avons répété nos expériences sur les terres de la troisième

série d'échantillons (terres 5, 9, II, I2, I3) dont les caractères principaux figurent tableau N° IV (page 26)

Nous avons effectué sur ces terres les tests de stabilité, de résistance à l'écrasement et de temps nécessaire à l'imbibition dans les divers liquides déjà utilisés. Les résultats de ces mesures sont groupés tableau N° IX

TABLEAU N° IX
APPLICATION DES TESTS AUX ECHANTILLONS
DE LA TROISIEME SERIE DE TERRES

Terre N°	Liquide de traitement	Temps nécessaire à l'imbibition d'un agrégat (en secondes)	% Agrégats stables théorique à cohésion constante s_{th}	% Agrégats stables s_{sol}	Résistance à l'écrasement d'un agrégat (en g) c_{sol}	$\frac{s_{sol} - s_{th}}{s_{th}}$	$\frac{c_{sol} - c_e}{c_e}$	
5	Eau	38	78,6	78,6	8,3			
	Solutions de saccharose							
	20 % en poids	80	84,5	84,5	8,1			
	40 % en poids	280	91,0	91,0	8,1			
	Cl ² Ca	5,3 mol/litre	100	85	89,	29	+ 0,047	+ 2,56
		3,3	60	81,5	82	21	+ 0,006	+ 1,50
		I	30	77	79,4	11,6	+ 0,03	+ 0,41
		0,5	35	78	77,4	9,9	- 0,008	+ 0,20
	Cl ² Mg	4,7 mol/litre	90	84	88	20	+ 0,048	+ 1,50
		3	60	81,5	85	11,9	+ 0,043	+ 0,44
		0,5	50	80	77	9,5	- 0,04	+ 0,15
		0,25	45	79,5	80	10	+ 0,005	+ 0,22
	Cl Na	4,95 mol/litre	33	78	78	12,6	0	+ 0,52
		2,9	27	76,5	76	12	- 0,006	+ 0,46
		I	25	76	76,5	10,7	+ 0,006	+ 0,30
		0,35	33	78	76	9	- 0,025	+ 0,09
		0,2	36	78,5	78,5	8,8	0	+ 0,07

Terre N°	Liquide de traitement	Temps nécessaire à l'imbibition d'un agrégat (en secondes)	% Agrégats stables théorique à cohésion constante s_{th}	% Agrégats stables s_{sol}	Résistance à l'écrasement d'un agrégat (en g) c_{sol}	$\frac{s_{sol} - s_{th}}{s_{th}}$	$\frac{c_{sol} - c_e}{c_e}$	
9	Eau	10,8	30,8	30,8	6,6			
	Solutions de saccharose							
	20 % en poids	24	36,4	36,4	6,5			
	40 % en poids	80	47,2	47,2	-			
	Cl ² Ca	5,3 mol/litre	63	45	52	12,5	+ 0,155	+ 0,89
		3,3	38	40,5	30,8	5,3	- 0,240	- 0,197
		I	18	34,5	21,7	5,1	- 0,370	- 0,227
		0,5	17	34	26,6	4,5	- 0,218	- 0,318
		0,25	15	33,0	33,2	6,5	+ 0,006	- 0,015
	Cl ² Mg	4,7 mol/litre	60	44,5	56,5	11	+ 0,273	+ 0,66
		3	30	38,5	25,6	5,2	- 0,335	- 0,212
		0,5	11	31	23,8	4	- 0,232	- 0,394
		0,25	19	35,5	22,5	4	- 0,370	- 0,394
	Cl Na	4,95 mol/litre	20	35,2	35	6,5	- 0,005	- 0,015
		2,9	15	33	31,2	5,5	- 0,055	- 0,166
I		10	30,5	24,6	3,5	- 0,193	- 0,47	
0,35		9	29,5	19,8	3,4	- 0,328	- 0,485	
0,20		7,8	28,5	24	4,3	- 0,158	- 0,348	
11	Eau	36		31	4,7			
	Solutions de saccharose							
	20 % en poids	100		45	4,7			
	40 % en poids	450		75	-			
	Cl ² Ca	5,3 mol/litre	90	43	64	20,8	+ 0,49	+ 3,42
		3,3	62	38	44,5	12,9	+ 0,17	+ 1,75
		I	31	29,5	34	5,6	+ 0,15	+ 0,22
	Cl ² Mg	4,7 mol/litre	85	42,5	59	20	+ 0,43	+ 3,07
		3	65	38,5	45	10	+ 0,17	+ 1,13
		0,5	60	37,5	36,7	4,3	- 0,02	- 0,08
		0,25	60	37,5	35,4	3,2	- 0,06	- 0,32
	Cl Na	4,95 mol/litre	27	28	58	7,3	+ 1,07	+ 0,55
		2,9	27	28	29,5	5,7	+ 0,05	+ 0,21
		I	25	27,5	36	4,9	+ 0,31	+ 0,04
		0,35	29	28,5	28,5	4,7	0	0
0,20		36	31	28	4	- 0,10	- 0,15	

Terre N°	Liquide de traitement	Temps nécessaire à l'imbibition d'un agrégat (en secondes)	% Agrégats stables théorique à cohésion cons- tante s_{th}	% Agrégats stables s_{sol}	Résistance à l'écrasement d'un agrégat (en g.) c_{sol}	$s_{sol} - s_{th}$ s_{th}	$c_{sol} - c_e$ c_e	
12	Eau	2,8	19,7	19,7	2			
	Solutions de saccharose							
	20 % en poids	8	25,4	25,4	1,9			
	40 % en poids	25	31,6	31,6	-			
	Cl ² Ca 5,3 mol/litre	3,3	23	31,5	41,7	7,3	+ 0,323	+ 2,65
		1	10,7	26,5	27,8	5,2	+ 0,049	+ 1,60
		0,5	3,5	20,8	22	3	+ 0,058	+ 0,50
			2,2	18,5	18,5	2,25	0	+ 0,125
	Cl ² Mg 4,7 mol/litre	3	16	29	40,3	5,5	+ 0,39	+ 1,75
		0,5	7,1	24,3	27,0	3,25	+ 0,111	+ 0,625
		0,25	3,8	21,2	19,9	1,6	- 0,061	- 0,20
			3	20	17,2	1,5	- 0,135	- 0,25
	Cl Na 4,95 mol/litre	2,9	4,7	22,2	32	2,7	+ 0,44	+ 0,35
		1	3,7	21	23	2,4	+ 0,095	+ 0,20
		0,35	3,7	21	16,3	1,1	- 0,224	- 0,45
		0,20	3	20	15,3	1,7	- 0,235	- 0,15
		2,8	19,7	17,4	1,9	- 0,117	- 0,05	
13	Eau	5,7		21	1,6			
	Solutions de saccharose							
	20 % en poids	15		24,8	1,6			
	40 % en poids	50		31	1,6			
	Cl ² Ca 5,3 mol/litre	3,3	25	27,2	33,8	2,5	+ 0,242	+ 0,56
		1	15	24,8	28,2	2,1	+ 0,137	+ 0,31
		0,25	6,2	21,2	19,7	1,6	- 0,07	0
			6,2	21,2	21	1,6	- 0,01	0
	Cl ² Mg 4,7 mol/litre	3	16	25	26,8	2,6	+ 0,072	+ 0,62
		0,5	15	24,8	25	1,6	+ 0,008	0
		0,25	9	22,6	19,7	0,9	- 0,128	- 0,44
			7	21,6	19	1	- 0,120	- 0,38
	Cl Na 4,95 mol/litre	2,9	8	22,2	32,4	2,3	+ 0,46	+ 0,44
		1	6	21	21	1,5	0	- 0,06
		0,35	4,8	20,2	19,7	1,3	- 0,025	- 0,18
			4,2	19,6	18,3	1,3	- 0,066	- 0,18

Afin d'en permettre une lecture facile, nous avons :

- d'une part, représenté ces résultats sous forme graphique en traçant, pour chaque terre, la courbe de référence établie grâce aux traitements par les solutions sucrées et porté sur ce même graphique les points correspondant aux traitements par les autres liquides (figure N° 13).

- d'autre part, calculé les variations relatives de résistance à l'écrasement dans les différentes solutions par rapport aux traitements par l'eau et les solutions sucrées $(\frac{c_{sol} - c_e}{c_e})$ et les variations relatives du taux d'agrégats stables par rapport à celui, théorique, obtenu, à cohésion constante, $(\frac{s_{sol} - s_{th}}{s_{th}})$.

Comme précédemment nous avons adopté pour ces résultats une représentation graphique qui, si elle ne fait pas ressortir une corrélation nette entre les variations relatives de la résistance à l'écrasement et de la stabilité, permet tout au moins d'émettre quelques remarques sur les comportements des différentes terres (figure N° 14).

Considérons par exemple la terre N° 5. Quelle que soit la cohésion, les variations de stabilité sont faibles ou nulles.

Il s'agit d'une terre naturellement très stable pour laquelle le processus d'éclatement ne peut jouer que faiblement car la cohésion de l'agrégat reste supérieure aux pressions internes obtenues par les traitements employés. Si l'on observe le comportement des agrégats de ce sol plongés dans les liquides, on remarque effectivement que l'agglomérat ne se détruit pas dans son ensemble, mais que latéralement de fines écailles se détachent. Il semble bien que le phénomène d'éclatement ne joue pratiquement qu'à ce niveau, les forces de liaison réunissant les particules élémentaires du sol étant pour ces petites écailles inférieures aux forces de compression développées par l'air emprisonné. Pour ces raisons, ici encore, les points expérimentaux restent très proches de la courbe de référence.

FIGURE N° 13

INFLUENCE DU TEMPS NECESSAIRE A L'IMBIBITION ET DE LA
COHESION A L'ETAT HUMIDE SUR LE TAUX D'AGREGATS
STABLES

(3ème série d'échantillons)

- Traitement par l'eau pure
- " " des solutions de saccharose
- " " " " de CaCl₂
- " " " " de MgCl₂
- + " " " " de NaCl

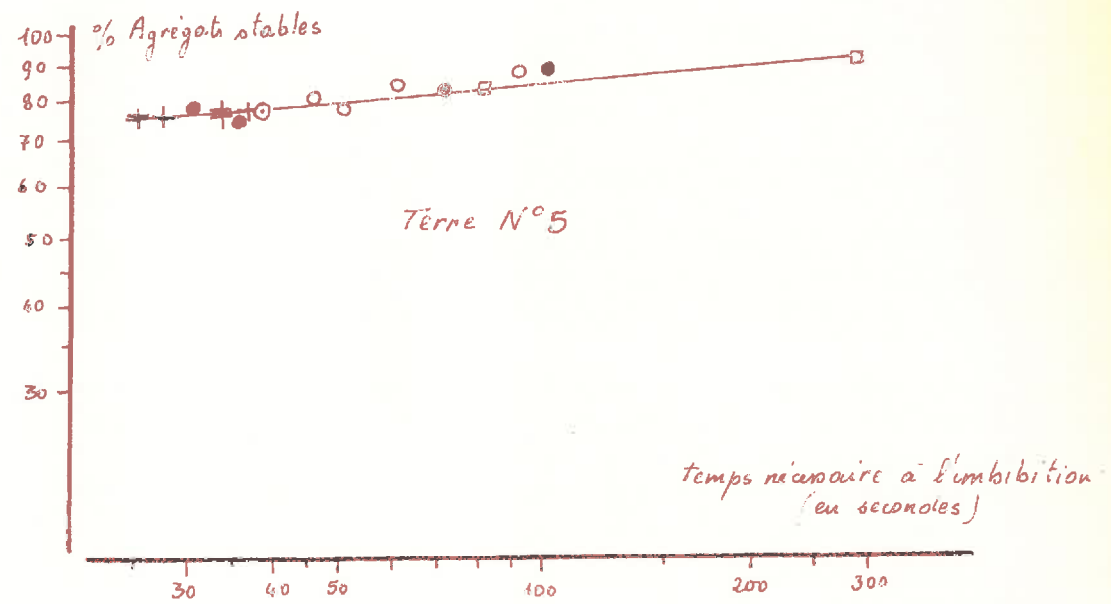


FIGURE N° 13 (Suite ..)

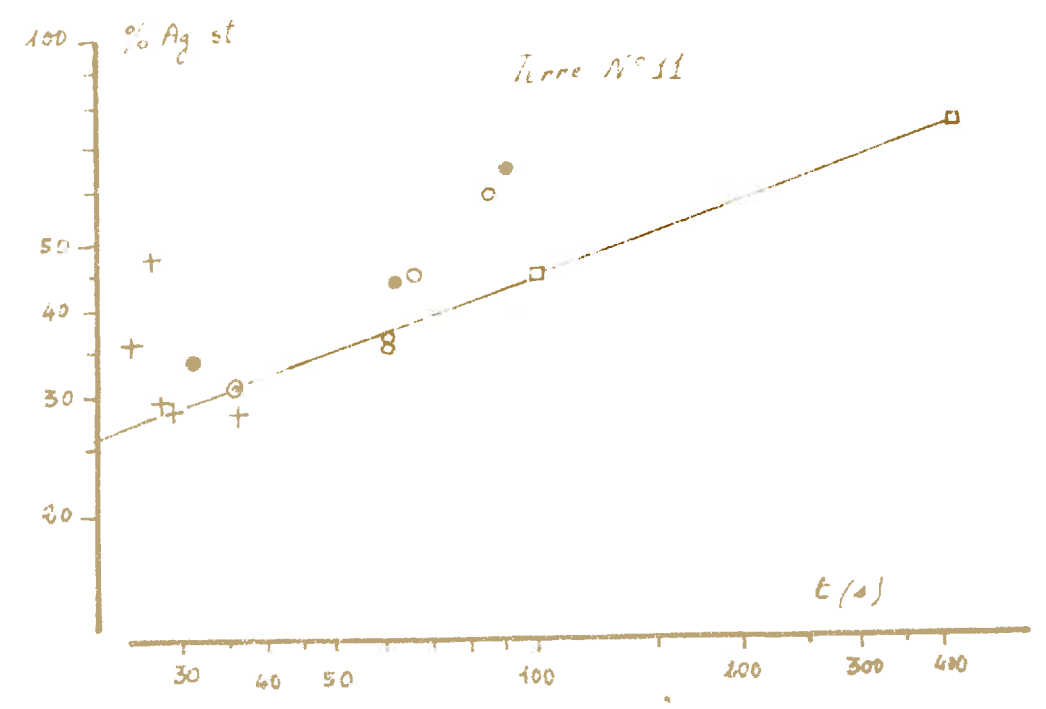
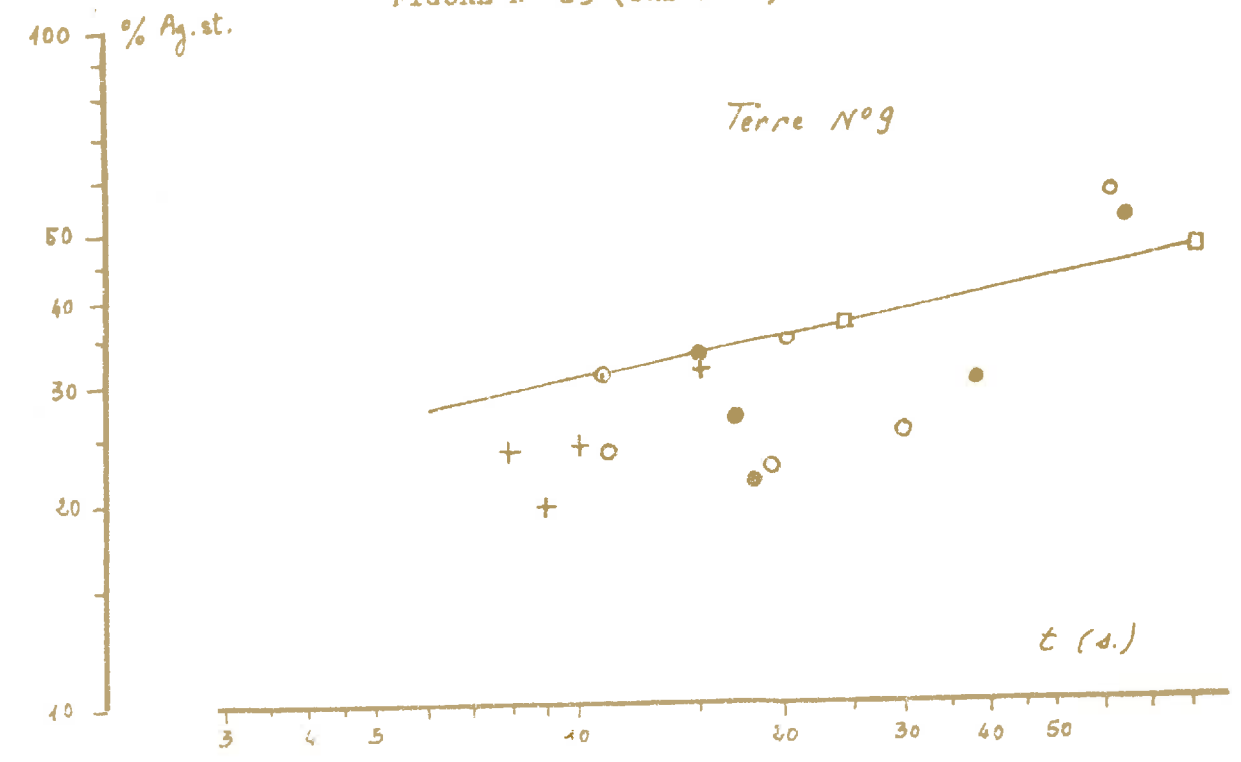


FIGURE N° 13 (Suite)

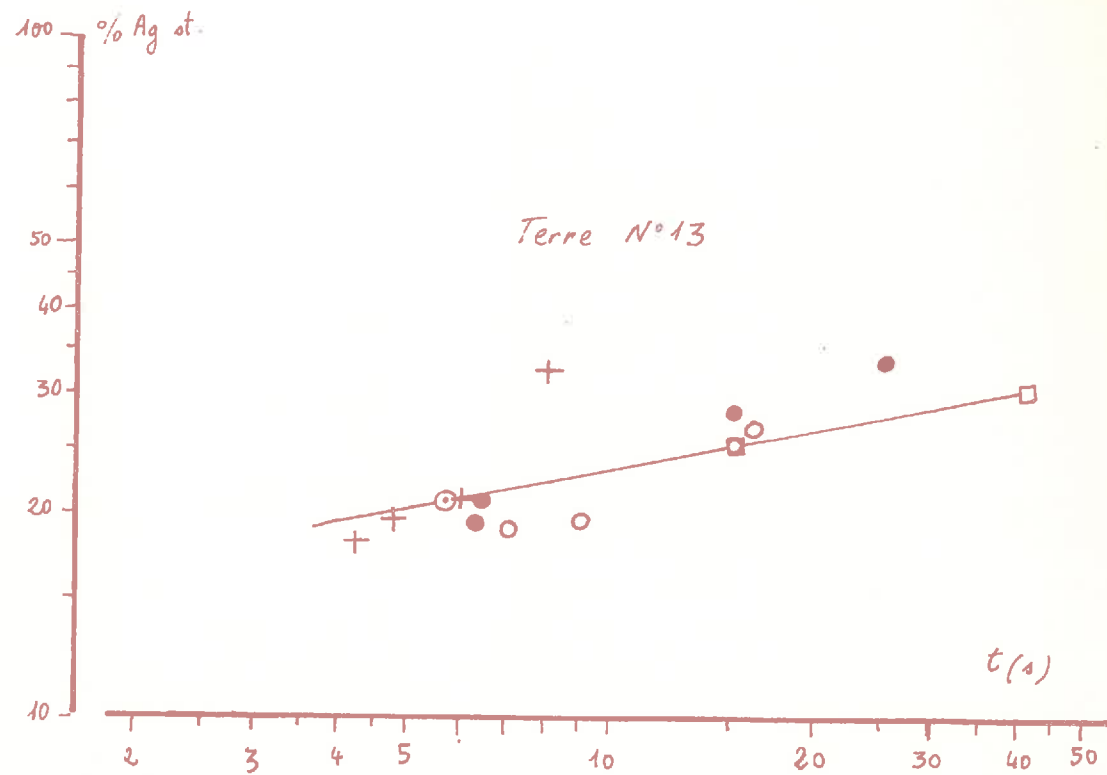
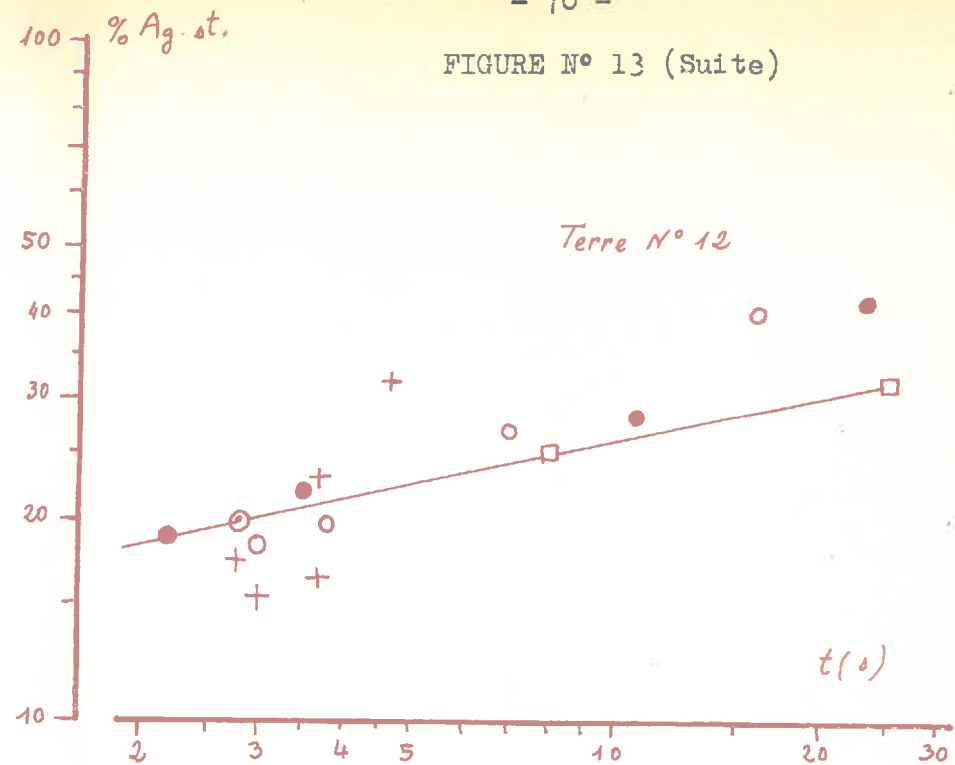
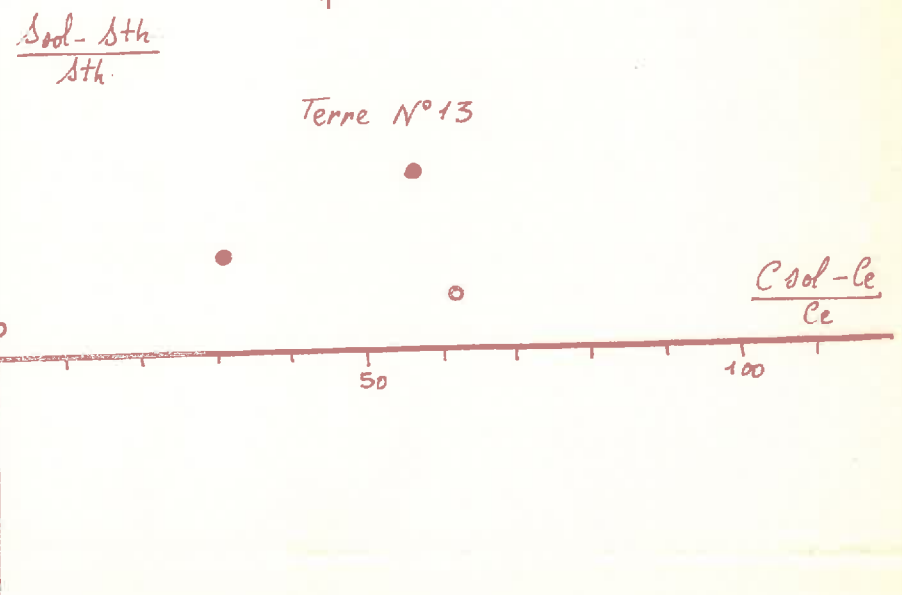
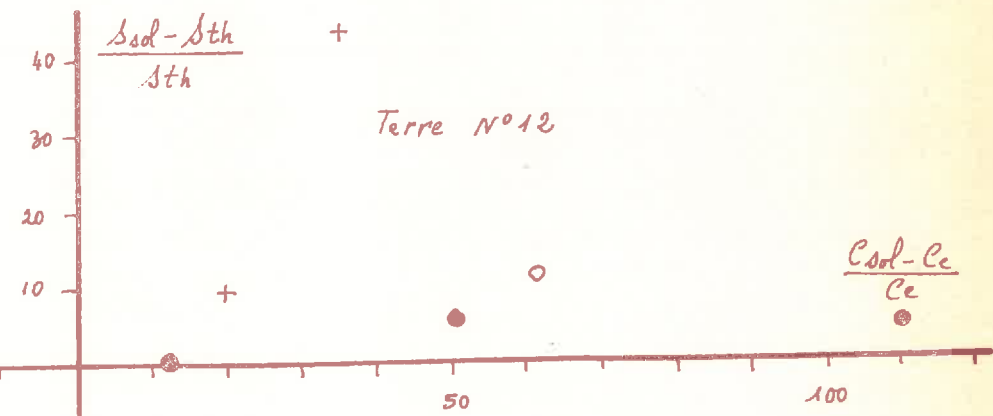
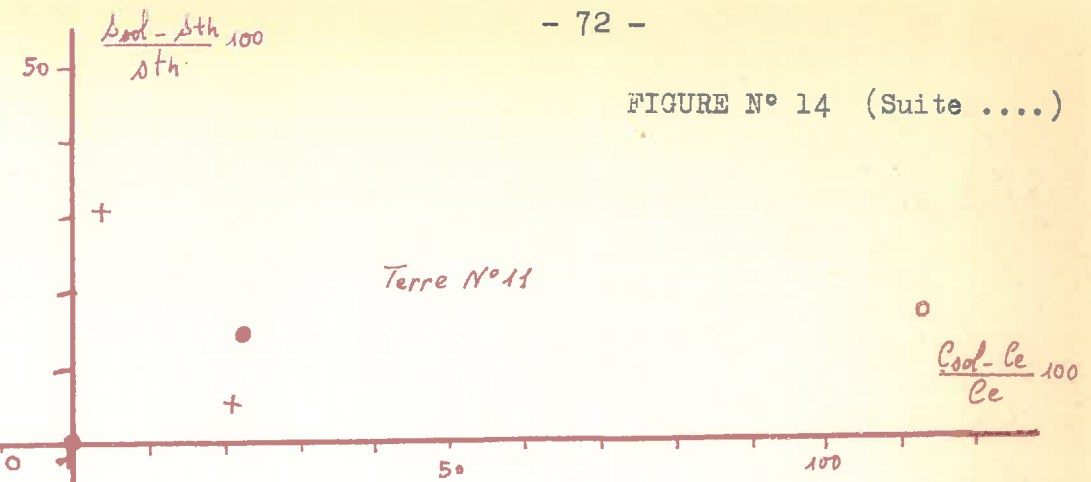


FIGURE N° 11

VARIATIONS RELATIVES DU PAIR D'INDICES STABLES WP DE LA COHESION
(10me série d'échantillons)



FIGURE N° 14 (Suite)



L'inclinaison accentuée de la courbe de référence pour la terre 11 (figure N° 13) montre les réactions marquées de cette terre aux modifications du facteur Pression interne. Elle reste également sensible aux variations de cohésion et particulièrement lorsqu'elle est traitée par des solutions de chlorure de sodium. Cette terre provient des Marais de l'Ouest où il est fréquent de constater une bonne structure en place pour les sols récemment exondés et restant chargés en sel, le dessalage entraînant souvent une dégradation. Il est probable que de tels cas mettent en jeu non seulement les variations de cohésion et de pression interne mais encore les propriétés flocculantes que les sels manifestent vis-à-vis des colloïdes.

Pour la terre N° 9, sauf à ces concentrations très élevées, les traitements par les solutions salines entraînent une chute de cohésion qui provoque un abaissement marqué du taux d'agré-gats stables. C'est là un comportement qui paraît assez général pour les terres battantes et qui semble donc lié à la répartition granulométrique (cas de la terre N° 8, figure N° 8).

Les terres N° 12 et 13 montrent une assez faible sensibilité aux variations de P_i mais par contre une réaction nette lorsque la cohésion varie. Il s'agit de terres sableuses à porosité grossière importante.

Cependant, il ne suffit pas de comparer l'importance relative de la cohésion ou de la pression interne. En réalité ces deux facteurs représentent les résultantes d'actions multiples qu'il importe de déceler pour obtenir une explication satisfaisante du phénomène.

Il convient donc d'analyser séparément ces deux facteurs en recherchant leurs composantes et en attribuant expérimentalement à celles-ci leur importance réelle.

CHAPITRE II

LA PRESSION INTERNE

EXPRESSION DE P_i

Nous avons vu précédemment que la Pression maximale P_i susceptible d'être atteinte par l'air inclus dépend à la fois de la vitesse de pénétration du liquide de traitement dans les pores du sol et des possibilités d'échappement offertes à une partie de l'air emprisonné et nous avons écrit :

$$P_i = \frac{P_o (V_o - V_e)}{V_o - n \pi R_i^2 z} \quad (5) - \text{(1ère partie, Chapitre II - p. 19)}$$

en appelant :

P_o , la pression atmosphérique

V_o , la porosité totale de l'agrégat

V_e , le volume d'air ayant pu s'échapper avant l'éclatement

R_i , le rayon moyen des plus gros pores

n , leur nombre

et z , la profondeur atteinte par les ménisques liquides à l'intérieur des capillaires.

On voit que, dans cette expression, à côté des caractères propres à l'architecture de chaque sol, figure le terme z restant sous la dépendance des interactions entre le liquide de traitement et la terre.

Nous avons pu écrire précédemment :

$$\frac{dz}{dt} = \frac{2 R T_2 \cos \alpha}{8 \eta z} \quad (4)$$

soit $z dz = \frac{2 R T_2 \cos \alpha}{8 \eta} dt$

En intégrant cette équation il vient :

$$z^2 = \frac{T_2 R \cos \alpha}{2\eta} t + K$$

avec $K = 0$ puisque Z est nul lorsque $t = 0$

$$\text{soit : } z = \sqrt{\frac{T_2 R \cos \alpha}{2\eta}} t$$

ANTUNES DA SILVA, PEREIRA GOMES ET LUISA DA FRANCA (1961)
à partir des travaux de HALLAIRE (1953) et de SWARTZENORUBER (1954)
ont retenu l'expression $\frac{T_2 R \cos \alpha}{2\eta}$ comme indice de fragilité.

Ces auteurs ont effectué les mesures de la hauteur mouillée en fonction du temps sur des colonnes de terre composées de fines particules. Ils ont montré que la représentation graphique de la fonction $z^2 = \frac{T_2 R \cos \alpha}{2\eta} t + K$ est une droite, du moins pour les faibles valeurs de t . L'expression $\frac{T_2 R \cos \alpha}{2}$ est le coefficient angulaire de cette droite.

Cet indice permet de tenir compte des conditions de pénétration de l'eau dans le sol mais non des possibilités d'échappement de l'air inclus. Il ne met donc en évidence qu'une partie des facteurs en cause et ne peut exprimer l'ensemble des propriétés réelles du sol.

Si l'on remplace z par $\sqrt{\frac{T_2 R \cos \alpha}{2\eta}} t$ dans l'expression de P_i , il vient :

$$P_i = \frac{V_0 (V_0 - V_e)}{V_0 - n\pi R^2 \sqrt{\frac{T_2 R \cos \alpha}{2\eta}} t} \quad (6)$$

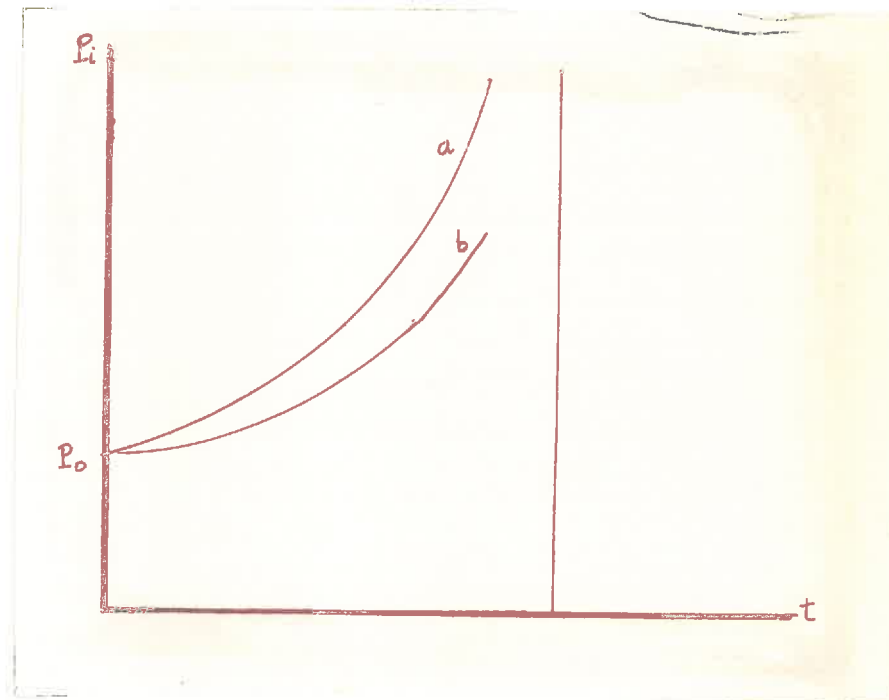
On voit que P_i est explicité par une relation comprenant un grand nombre de facteurs très difficiles à mesurer individuellement. Cette équation nous permet cependant de vérifier le sens que peuvent imprimer les variations de chacun des paramètres à la valeur de P_i . Il nous appartient d'en comparer les résultats avec ceux fournis par les faits expérimentaux.

EFFET DES DIMENSIONS DES CAPILLAIRES NON OBSTRUÉS ET DE LA VISCOSITÉ

Les variations de P_i en fonction du temps sont de la forme représentée par les courbes de la figure N° 15

FIGURE N° 15

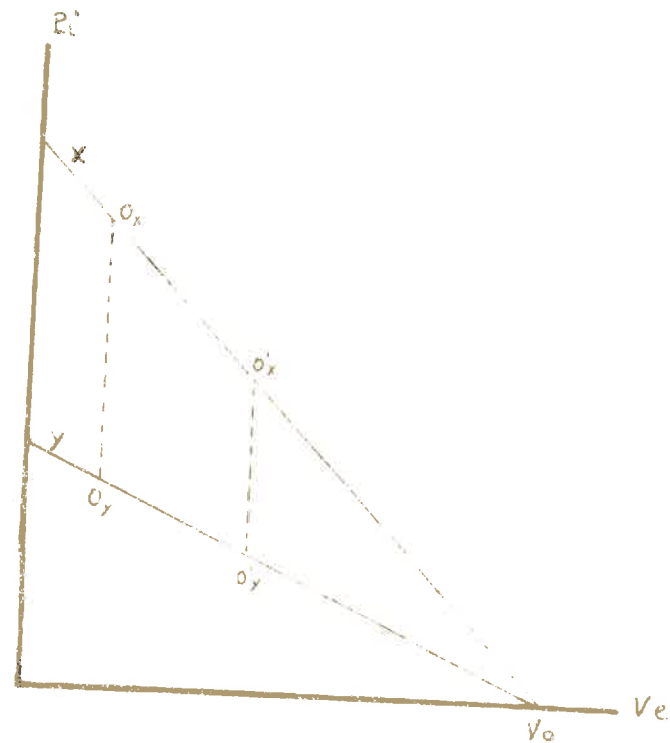
VARIATIONS DE P_i EN FONCTION DU TEMPS



Il est facile de constater que selon le volume d'air susceptible de s'échapper, P_i s'élève plus ou moins rapidement. Si V_e est petit, l'augmentation de P_i est très rapide (courbe a). Si au contraire V_e est grand, P_i n'augmente que lentement (courbe b). Il est évident que pour une même vitesse de pénétration du liquide et une même cohésion, les risques de rupture seront d'autant plus grands que V_e est petit. Or V_e est sous la dépendance des rayons des capillaires non obstrués. En effet, la quantité d'air échappée sera plus grande si le rayon est plus important. Remarquons encore que, toutes choses étant égales par ailleurs et à l'instant, P_i est une fonction linéaire de V_e (figure N° 16)

FIGURE N° 16

VARIATIONS DE P_i EN FONCTION DU VOLUME D'AIR
SUSCEPTIBLE DE S'ÉCHAPPER



Supposons alors que l'on opère à deux viscosités différentes: Pour une viscosité faible, les variations de P_i en fonction de V_e sont représentées par la droite X et pour une viscosité plus élevée, par la droite Y. On voit que les écarts ($O_x = O_y$) entre les pressions internes obtenues pour les deux viscosités sont d'autant plus grands que V_e est petit. Ce résultat graphique signifie que, plus le rayon des capillaires non obstrués est petit, plus les différences de viscosité peuvent entraîner de fortes variations du facteur P_i et donc de la stabilité si l'on travaille à cohésion constante.

Il est possible d'en obtenir une confirmation expérimentale lorsque l'on considère les stabilités obtenues à l'aide de solutions de sucre qui, rappelons le, ne modifient pas la cohésion.

Dans le tableau N° X, nous avons en effet noté :

- D'une part, le gain de stabilité obtenu par rapport à la mesure effectuée dans l'eau en traitant par la solution de sucre la plus concentrée. Considérant que la stabilité maximale est de 100 %, nous avons calculé ce gain en rapportant la différence entre les résultats des traitements au sucre et à l'eau au gain maximum susceptible d'être atteint, c'est à dire donné par la différence entre 100 % et le taux d'agrégats stables obtenus à l'eau.

- D'autre part, le volume occupé, dans 100 g de terre, par les pores dont la tension capillaire est supérieure à l'atmosphère lorsque l'alcool est utilisé comme liquide d'imbibition. Ce dernier résultat a été obtenu grâce à l'appareil de RICHARDS (pressure plate extractor).

TABEAU N° X

GAIN DE STABILITE OBTENU DANS DES SOLUTIONS
DE SACCHAROSE ET VOLUME OCCUPE PAR LES PETITS PORES

Terre N°	11	3	5	6	7	I	9	I2	I3
gain de stabilité pour cent	84	85	69	64	62	48	45	43	29
Volume des pores dont la tension capillaire est I atmosphère (pour 100 g de terre)	26,5	25,5	24	18,6	15,7	13,6	12,6	9,6	7,8

La lecture de ce tableau permet de constater que le gain de stabilité est plus important lorsque le sol possède une grande quantité de pores fins.

ACTION DE LA MOUILLABILITE

Dans l'expression de P_i , figure le terme $T_2 \cos \alpha$ faisant intervenir la tension superficielle du liquide de traitement et l'angle de raccordement sol/liquide. Ce terme rend compte des conditions de contact entre le sol et le liquide, c'est à dire de la mouillabilité du sol par la solution considérée.

D'après sa place dans l'équation établie précédemment et exprimant les variations de P_i en fonction du temps (6), la mouillabilité joue un rôle tel que son abaissement entraîne des effets analogues à une augmentation de viscosité.

Une telle action correspond bien aux constatations effectuées par d'autres auteurs. En effet lorsque le sol traité est riche en matières organiques et donc difficilement mouillable, HENIN (thèse 1938) puis MONNIER (thèse 1965) ont constaté une nette augmentation de la stabilité.

L'évaluation directe de ce terme est malheureusement très difficile. Car s'il est possible de connaître la tension superficielle d'un liquide, nous ne disposons pas de méthodes suffisamment rigoureuses pour mesurer son angle de raccordement avec un solide aussi hétérogène que la terre.

Seules des approximations sont possibles soit par des mesures d'ascension capillaire (MONNIER) soit en utilisant les propriétés des interfaces entre deux liquides (TURC, étude non publiée). Ces procédés peuvent permettre des comparaisons entre les comportements de divers sols, et en particulier, de juger de l'influence des cations fixés sur la mouillabilité.

Nous avons cependant tenté une évaluation des conditions de contact entre le liquide et le sol en partant de l'équation établie précédemment :

$$z^2 = \frac{T_2 R \cos \alpha}{2h} t \quad (7)$$

Dans la mesure où les expériences sont effectuées sur un grand nombre d'agrégats sensiblement de la même taille, et c'est là le cas de nos essais, on peut considérer qu'à humectation complète, z^2 représente une constante. De plus, si l'on considère les traitements par des solutions sucrées, la tension superficielle reste invariable.

On a donc :

$$\cos \alpha = K \frac{1}{r}$$

Nous possédons les éléments nécessaires (viscosité et temps nécessaire à l'imbibition) pour le calcul du rapport $\frac{1}{r}$.

Si, comme on pourrait le penser a priori, la mouillabilité était parfaite entre le liquide et le sol mouillé, ce rapport devrait être constant pour une même terre.

Nous avons effectué ce calcul pour plusieurs terres en utilisant les données fournies par les traitements à l'eau pure et aux solutions de saccharose à 20 et 40 % (Tableau N° XI)

TABLEAU N° XI

Rapport $\frac{1}{r}$ (centipoises)
(secondes)

(Traitement par l'eau et des solutions de saccharose)

Terre N°	6	7	8	5	9	II	I2	I3
Solution de traitement :								
Eau	0,06	0,05	0,12	0,026	0,092	0,028	0,36	0,175
Solution de saccharose à 20 %	0,047	0,039	0,082	0,021	0,071	0,017	0,21	0,115
Solution de saccharose à 40 %	0,021	0,006	0,026	0,018	0,065	0,011	0,175	0,104

On voit que le rapport $\frac{h}{t}$ n'est pas constant. D'une manière générale, pour une même terre, il s'abaisse, parfois notablement, vers les plus fortes concentrations.

Ceci ne peut s'expliquer que si l'angle ne reste pas le même pendant toute la durée de l'humectation d'un agrégat. Or on peut en effet penser que le contact entre le liquide et le sol sec s'établit imparfaitement au début de l'humectation. Le contact n'est parfait que lorsque les parois des capillaires sont déjà imbibés et l'on conçoit que plus le liquide est visqueux, plus ce contact parfait est long à s'établir. S'il en est ainsi, l'angle α varie effectivement tout au long de l'humectation. L'approximation calculée correspond donc à la valeur théorique de son cosinus (à un coefficient près) si cet angle ne subissait aucune variation pendant la totalité de l'imbibition réalisée dans le temps t (temps nécessaire à l'imbibition d'un agrégat).

On peut se demander si la mouillabilité des terres obéit aux mêmes phénomènes lorsque l'on remplace les solutions de saccharose par des solutions salines. Celles-ci sont légèrement tensio actives et l'expression de $\cos \alpha$ devient : (d'après équation 7)

$$\cos \alpha = K \frac{h}{T_2 t}$$

Nous avons effectué le calcul de $\frac{h}{T_2 t}$ pour les terres de la 3ème série d'échantillons traités par des solutions de $Cl^2 Na$, $Cl^2 Ca$ et $Cl^2 Mg$ (Tableau N° XII)

TABLEAU N° XII

Rapport $\frac{h}{T_2 t}$ - 3ème série d'échantillons

TRAITEMENT PAR LES SOLUTIONS SALINES

Terre N°	5	9	11	12	13
Traitement par eau	0,026	0,092	0,028	0,36	0,175
Traitement par solution de $Cl^2 Ca$: 5,3 mol/litre	0,145	0,23	0,16	0,64	0,58

Terre N°	5	9	11	12	13
3,3 mol/litre	0,047	0,074	0,046	0,27	0,19
1,0 "	0,039	0,067	0,037	0,33	0,185
0,5 "	0,031	0,068	-	0,49	0,0155
Traitement par solution de Cl ² Mg					
4,7 mol/litre	0,14	0,21	0,15	0,80	0,79
3,0 "	0,055	0,11	0,051	0,47	0,22
0,5 "	0,023	0,105	0,019	0,31	0,13
0,25 "	0,025	0,06	0,0185	0,36	0,15
Traitement par solution de Cl Na :					
4,9 mol/litre	0,055	0,093	0,069	0,40	0,23
2,9 "	0,049	0,088	0,049	0,36	0,22
1,0 "	0,047	0,12	0,047	0,37	0,24
0,35 "	-	0,12	0,038	0,39	0,26

Ici encore le $\cos \alpha$ théorique varie nettement avec la concentration mais il augmente avec elle.

Tout se passe donc comme si le contact entre la solution saline et le sol était meilleur lorsque la concentration de la solution du sol augmente. Il est probable que ces phénomènes sont liés aux échanges de cations qui s'effectuent entre la terre et la solution. Ce point devra faire l'objet de travaux ultérieurs débordant le cadre de cette étude dont l'ambition se borne à dégager les mécanismes de la destruction structurale.

Cependant cet ensemble d'expériences montre l'importance des conditions de contact entre le liquide et le sol sur le temps nécessaire à l'imbibition et donc sur la pression interne. Il permet de concevoir les incidences de la composition de solutions en contact avec le sol dans le milieu naturel. Si la nature des cations en présence entraîne une forte mouillabilité on peut en effet s'attendre à ce que, sous l'effet d'une forte pression interne la destruction structurale soit plus importante que celle entraînée par l'eau pure.

Notons qu'en utilisant des solutions sucrées ou même des solutions salines nous n'avons apporté que peu (cas des sels) ou pas (cas du sucre) de modifications de tension superficielle par rapport à l'eau pure. C'est pourquoi nous avons également effectué le traitement

des agrégats par des mélanges alcool/eau tensio actifs.

Pour de tels mélanges, la viscosité subit des variations en fonction des proportions d'alcool. Cet ensemble de propriétés a d'ailleurs été utilisé par HENIN, puis par DE LEENHEER pour apprécier la stabilité de la structure.

Ces variations de viscosité sont en réalité assez faibles, mais dans l'expression de P_i (6) figure le rapport $\frac{T_2}{\eta}$ pour lequel les effets conjugués des modifications de η et de T_2 entraînent des fluctuations importantes ainsi que l'on peut en juger tableau N° XIII.

TABLEAU N° XIII

Variations du rapport $\frac{T_2}{\eta}$ par rapport à l'eau pure, pour des mélanges alcool/eau

	pour cent d'alcool				
	0	25	50	75	95
$\frac{T_2}{\eta}$	1	0,23	0,135	0,185	0,26

De telles variations devraient provoquer une diminution sensible de la Pression interne maximale susceptible d'être atteinte par l'air inclus qui se traduirait, comme nous l'avons vu précédemment, par une augmentation du temps nécessaire à l'imbibition.

En fait, les mesures de t montrent qu'il n'en est rien. t reste toujours inférieur à la valeur qu'il atteindrait dans le cas de traitement par les solutions sucrées pour un même rapport $\frac{T_2}{\eta}$ (déduit des mesures antérieures). Nous avons noté tableau N° XIV quelques exemples pour $\frac{T_2}{\eta} = 0,185$

TABLEAU N° XIV

COMPARAISON DES TEMPS NECESSAIRES A L'IMBIBITION PAR LES SOLUTIONS

SUCREES ET PAR LES MELANGES ALCOOL/EAU POUR UNE MEME VALEUR DE $\frac{T_2}{\eta}$

	t pour $\frac{T_2}{\eta} = 0,185$	
	alcool 75 %	solutions sucrées = 5,4
N° 5	26	300
N° 11	24	500
N° 12	7	35
N° 13	9,7	55

Il faut donc admettre que $\cos \alpha$ est nettement plus important dans le cas de traitement par les mélanges alcool/eau que dans celui de l'eau pure ou des solutions sucrées. Comme pour les essais avec les solutions salines, nous en avons calculé la valeur au coefficient près en faisant le rapport $\frac{\eta}{T_2 t}$ (Voir tableau N° XV)

TABLEAU N° XV

Calcul du rapport $\frac{\eta}{T_2 t} = \frac{\cos \alpha}{K}$

(Traitement par l'eau pure et les mélanges alcool/eau)

	Eau pure	Mélanges alcool/eau		
		50 %	75 %	95 %
N° 5	0,026	0,15	0,21	0,13
N° 11	0,028	0,165	0,225	0,18
N° 12	0,36	1,00	0,77	0,48
N° 13	0,175	0,52	0,55	0,38

La plupart des sols sont donc beaucoup plus mouillables par les mélanges alcool/eau que par l'eau.

Pourtant le taux d'agrégats stables (Ag. %) mesuré dans ces mélanges alcool/eau croît très fortement avec la proportion d'alcool (Tableau N° XVI).

Cet accroissement de stabilité ne peut être attribué qu'aux effets de fortes augmentations de cohésion de la terre humide. Nous avons pu vérifier ce point en effectuant les mesures de résistance à l'écrasement (c) des agrégats imbibés par ces mélanges (Tableau N° XVI).

TABLEAU N° XVI

TAUX D'AGREGATS STABLES - RESISTANCE A L'ECRASEMENT
(traitement à l'alcool)

Terre N°	Eau pure		Mélanges alcool/eau					
	Aggrégats stables %	c = résis- tance à l'écrase- ment (g.)	50 %		75 %		95 %	
			Ag. %	c	Ag. %	c	Ag. %	c
1	11	4,6	69	9,1	82	18	90	23
5	78,6	8,3	90,5	43	91,8	50	92,5	100
6	72	9	88,2	16	90,4	27	91,6	46
7	53	7,4	89	10	92	20	93	40
8	32	4	74	5,8	84	7,9	92	17,5
11	31	4,7	83,2	13,5	87,3	22,1	89,6	39,7
12	29	2	64	6,3	84	12	93	16,7
13	44	1,6	68	3,9	83	8	92	15,2

On voit effectivement que la résistance à l'écrasement est considérablement accrue par la présence d'alcool dans le liquide d'imbibition.

Pratiquement, en traitant les agrégats par les mélanges alcool/eau, l'augmentation de cohésion est telle que les faibles variations possibles de la Pression interne ont des effets négligeables par rapport à ceux de la cohésion.

C H A P I T R E III

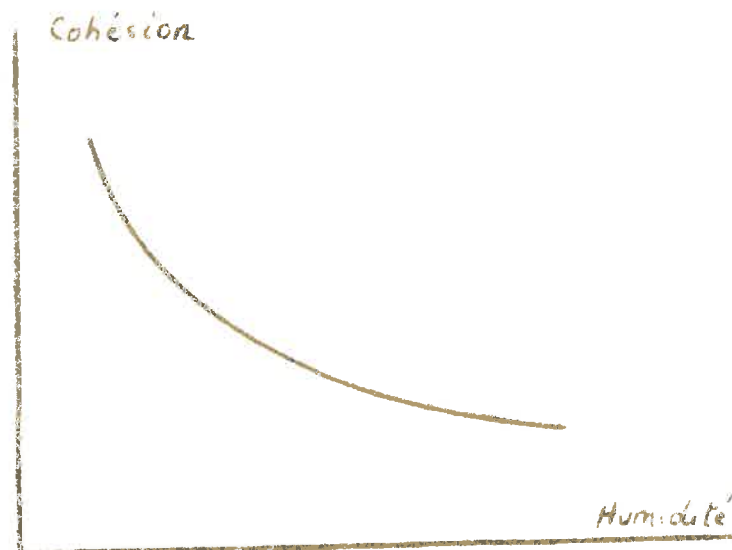
LA COHESION ET LES CONDITIONS D'HYDRATATION

COHESION ET HUMECTATION

Lorsque une terre est soumise à des humectations de plus en plus importantes, il est bien connu que sa cohésion diminue. FOUNTAINE (1956) a pu obtenir expérimentalement une courbe très régulière traduisant ce phénomène.

FIGURE N° 17

VARIATIONS DE LA COHESION
EN FONCTION DE L'HUMIDITE
(d'après FOUNTAINE) (1956)



Il est, de plus, facile de constater, même à l'oeil nu, que cette baisse de cohésion est accompagnée d'un accroissement de volume. PANABOKKE et QUIRK (1956) puis MARSHALL (1959), en comparant le comportement de plusieurs sols, ont d'ailleurs pensé que ce gonflement, suivant son importance, pouvait être responsable des différences de stabilité constatées pour les diverses terres.

En fait, HENIN et HUTTER ont montré dans un travail récent (1964) la prédominance de l'éclatement dans le phénomène, les auteurs précédents n'ayant pu obtenir une corrélation entre le gonflement et la stabilité que par l'utilisation de terres sodiques comparées à des terres non sodiques.

Cependant on peut penser que, pour une même terre, cohésion et gonflement sont étroitement liés. En effet, la cohésion d'un agglomérat terreux dépend des forces unissant les particules élémentaires qui la composent et celles-ci peuvent être profondément modifiées par les conditions d'hydratation des colloïdes constituant en fait les ciments de liaison.

Ce raisonnement nous a conduit à confronter, pour chaque traitement subi, le volume de liquide susceptible d'être absorbé par le sol et la résistance à l'écrasement des agrégats humides.

MESURE DU GONFLEMENT.

Des mottes sont déposées à l'état sec dans une nacelle après avoir été pesées. La nacelle est alors introduite dans un récipient contenant une quantité connue de solution. L'ensemble est bouché pour éviter toute évaporation. Les mottes sont laissées au contact du liquide jusqu'à complète imbibition c'est-à-dire jusqu'à poids constant. Il suffit alors de mesurer, par pesée, le poids du liquide non utilisé pour obtenir, par différence avec le poids initial, celui du liquide retenu par la motte, et connaissant sa densité, calculer son volume, ce volume correspondant au gonflement subi par la terre.

Afin de normaliser l'expression du résultat de ces mesures, nous avons choisi de retenir la valeur "g" représentant le volume de liquide absorbé par unité de volume réel de sol.

Des déterminations de "g" n'ont pu être effectuées que sur les terres appartenant à la troisième série d'expériences, car à ce stade de nos travaux, les échantillons correspondant aux deux premières séries étaient

malheureusement épuisés.

Elles ont été réalisées pour des terres et pour des traitements ayant donné lieu à des mesures de cohésion. D'une manière générale, comme KOENIGS (1961) nous constatons une baisse du gonflement lorsque la concentration augmente.

RELATIONS ENTRE LE GONFLEMENT ET LA COHESION.

Afin de vérifier l'existence d'une relation entre le gonflement et la cohésion, nous avons établi un graphique portant "g" en ordonnée et, en abscisse, la résistance à l'écrasement "c". Ainsi sur ce graphique, un point correspond, pour chaque terre, à l'application d'un traitement.

On peut alors constater, en utilisant des coordonnées logarithmiques, que les points correspondant à une même terre se disposent suivant une droite. De plus et quelle que soit la terre, la pente de cette droite reste uniforme. Les graphiques de la figure N° 18 montrent la série de droites parallèles que nous avons pu tracer à l'aide des points expérimentaux. Il semble que la gamme de granulométries couverte par les terres traitées soit suffisamment large et ce groupe de terres d'origine assez diverse pour autoriser une généralisation des résultats obtenus.

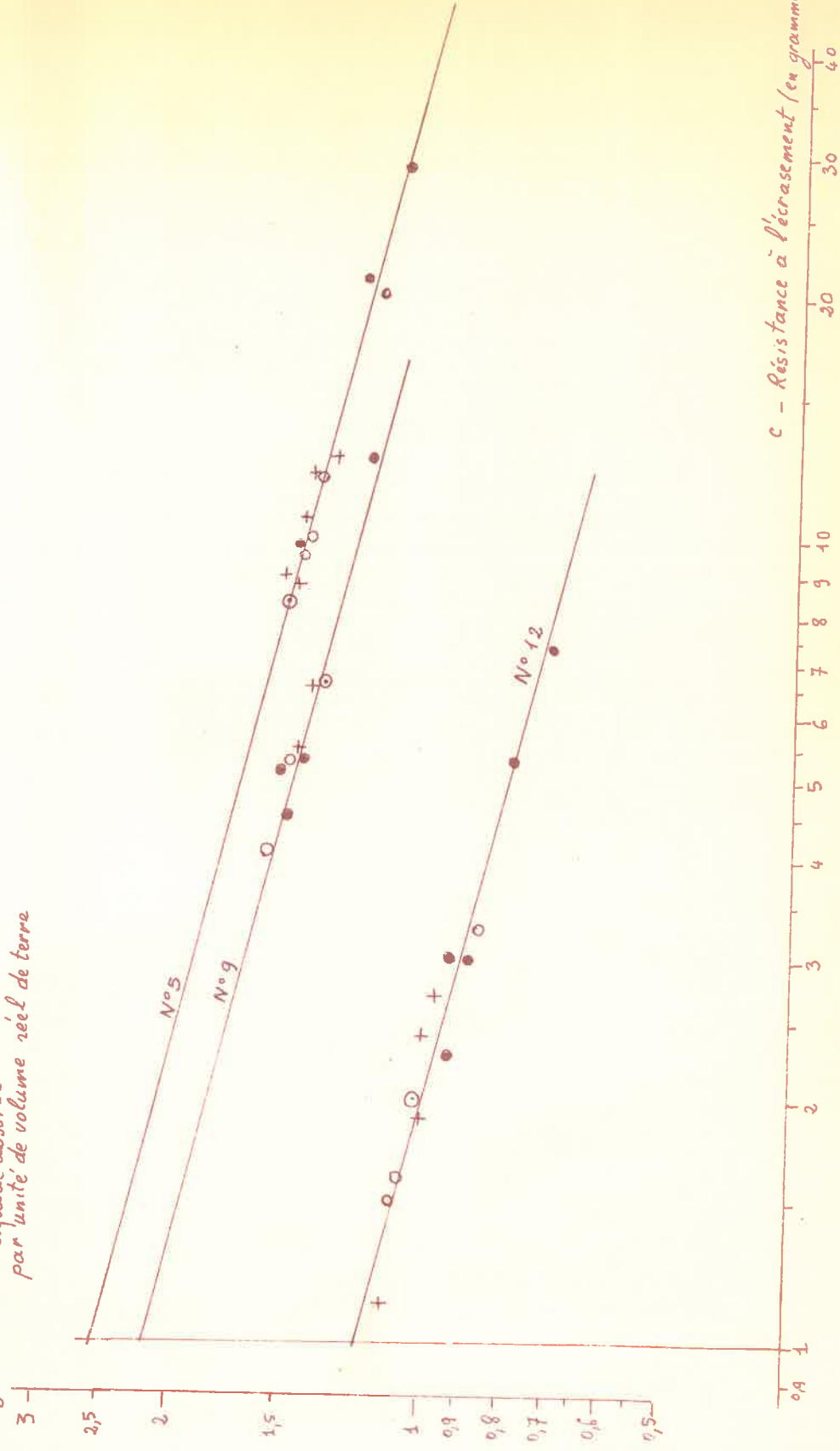
Ainsi une courbe monotone paraît donc bien lier la résistance à l'écrasement et le volume de liquide absorbé par la terre. Son équation est de la forme $C \cdot \left(\frac{c}{g}\right)^n$, n étant très voisin de 4 et g_1 représentant le gonflement théorique pour une résistance à l'écrasement de 1 gramme.

La forme de la relation reste la même pour toutes les terres. Seul varie le coefficient g_1 . On est donc conduit à penser que ce coefficient constitue une valeur caractéristique d'un sol.

Il paraît lié au taux de colloïdes. En effet, " g_1 ", point de rencontre de la droite avec l'axe des ordonnées semble d'autant plus fort que les sols sont argileux. Cependant il ne paraît pas exister de relation précise entre g_1 et le taux d'argile. Il est très vraisemblable qu'interviennent également la nature des colloïdes et leur garniture cationique.

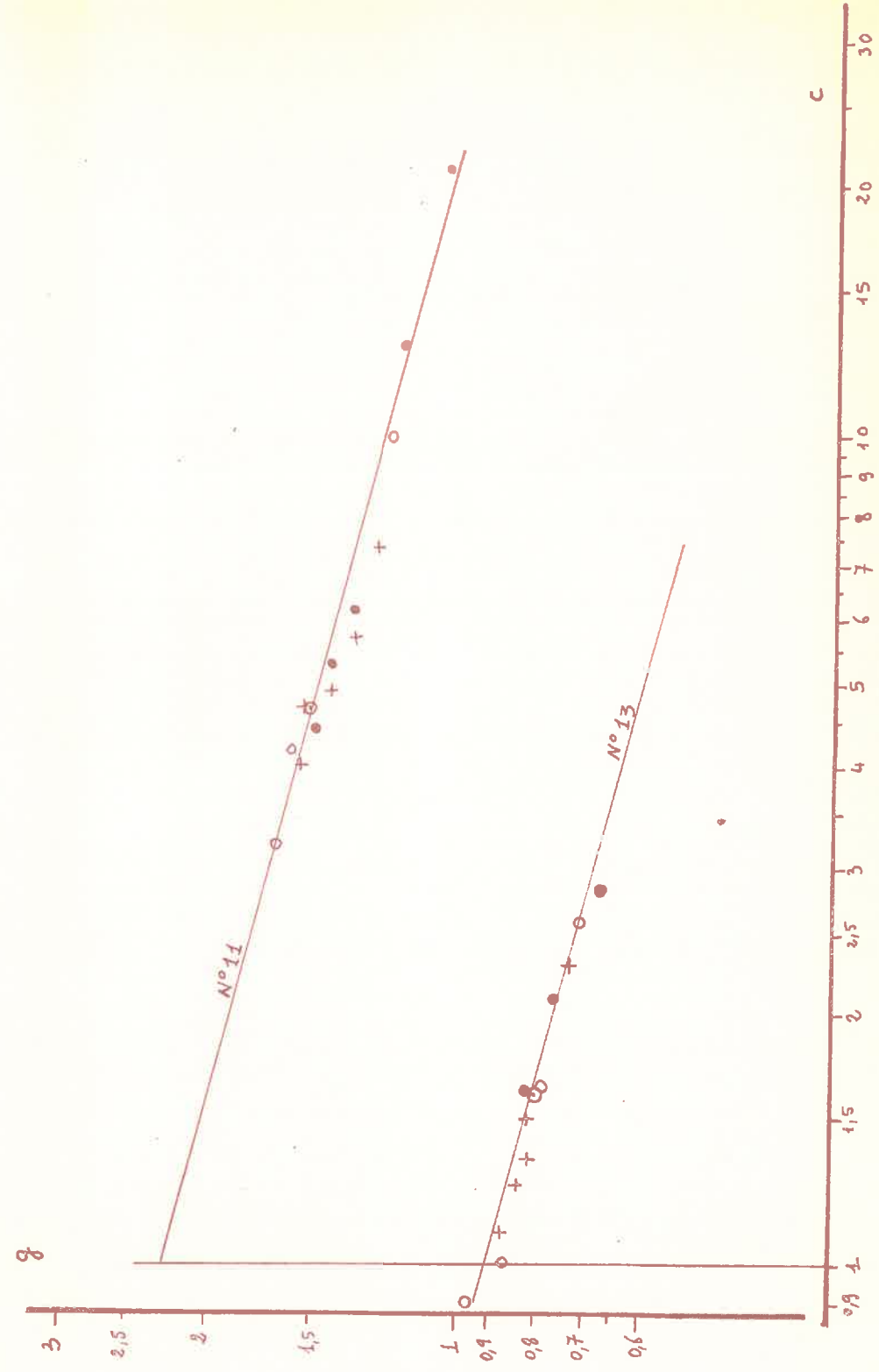
L'un des points de la droite correspond au traitement par l'eau pure. Si l'on effectue des comparaisons entre les positions occupées par ce point selon la nature de la terre, on peut remarquer que les sols les plus argileux sont à la fois les plus gonflants et les plus cohérents.

g - Volume de liquide absorbé
par unité de volume réel de terre



c - Résistance à l'écrasement (en grammes)

FIGURE N° 18 (Suite)



Cette remarque permet de comprendre pourquoi les résultats antérieurs mettant en évidence une relation entre la résistance à l'écrasement à l'état sec et la stabilité structurale constituent une première approximation de l'influence de la cohésion sur la stabilité. La stabilité structurale est en effet, comme nous avons pu le démontrer dans les chapitres précédents, en relation étroite avec la cohésion de la terre humide. Nous venons de constater d'autre part que celle-ci est plus importante lorsque le taux d'argile augmente et il est bien connu qu'un enrichissement en argile entraîne une plus grande résistance à l'écrasement à l'état sec.

Il en irait évidemment tout autrement si la cohésion de la terre était due à des ciments ne présentant pas de gonflement au contact de l'eau, comme des hydroxydes.

L'effet de la teneur en colloïdes argileux sur la stabilité a pu être également noté par HENIN et HUTTER (1964) au cours de travaux comparant l'importance respective, dans la destruction structurale, du phénomène d'éclatement et du gonflement différentiel pouvant intervenir au cours de l'humectation. Il convient cependant de noter que ce fait n'est bien entendu exact que dans la mesure où les fragments de terre constituent des ensembles suffisamment continus, c'est à dire ne présentant pas de fissures. Or dans une étude récente non publiée KHEYRABI a pu réaliser différentes compositions granulométriques afin d'étudier leur cohésion et leur stabilité. Il a constaté l'apparition de fissurations dès que le mélange comporte un taux d'argile suffisamment élevé. Il est probable que ces faits sont dus à des phénomènes d'orientation des micelles d'argile ménageant des plans de clivage. Des cas analogues peuvent évidemment se présenter dans la nature. D'ailleurs, pour certaines terres, au cours des mesures de résistance à l'écrasement, on peut remarquer une certaine fissuration pour des efforts inférieurs à ceux nécessaires pour l'écrasement proprement dit de l'agrégat.

C'est en particulier le cas de l'Ile d'Elle (Terre II)

En résumé, les résultats exposés dans cette étude sont en parfait accord avec les travaux antérieurs. La relation que nous avons établi :

exprime pour une même terre, le sens des variations de cohésion lorsque les conditions d'hydratation sont modifiées par l'utilisation de solutions autres que l'eau pure et la discussion des faits expérimentaux permet de retrouver la plupart des conclusions émises par divers auteurs sur ce problème.

CONCLUSION

- C O N C L U S I O N -

Si l'on part du schéma statique proposé par HENIN (thèse 1938) on peut obtenir une certaine interprétation de la résistance des sols à l'action de l'eau.

Ce schéma suppose que la fragmentation des agrégats est liée à la pression exercée par la pénétration de l'eau dans les capillaires du sol, cette pression étant susceptible de provoquer la rupture lorsqu'elle dépasse la cohésion de la particule.

Or lorsque l'analyse d'agrégats est réalisée dans des solutions de saccharose, on obtient un effet de stabilisation qui ne peut être interprété sur la base précédente. En effet, la viscosité de la solution, c'est-à-dire un facteur dynamique, est alors mise en cause. Nous avons alors été amenés à rassembler un certain nombre d'arguments montrant que la viscosité intervient en retardant l'emprisonnement de l'air dans les pores des agrégats.

Cependant, l'action de ces solutions ne masque pas complètement l'influence d'un vide préalable, ce qui laisse supposer l'intervention d'autres facteurs.

Nous avons donc cherché à développer une théorie dynamique en tenant compte exclusivement du groupe de facteurs (viscosité et tension superficielle des solutions, angle de raccordement sol/solution) responsable de la vitesse de pénétration des liquides et de la pression interne maximale susceptible d'être produite par l'air inclus dans la terre.

Les effets des solutions utilisées ne peuvent être comparés que globalement par des tests de vitesse d'humectation. Cependant pour certains sols, on obtient un accord raisonnable entre les prévisions et l'expérience.

Mais il reste de très nombreuses exceptions qu'il était logique d'interpréter en faisant intervenir la cohésion de la terre humide et sa cause immédiate : l'importance du gonflement. Là encore,

il a été nécessaire d'utiliser des tests. Ceux-ci ont pu être appliqués dans des conditions suffisamment comparables pour conduire à l'établissement de courbes très régulières reliant gonflement et cohésion.

Si l'on confronte alors l'influence des solutions sur la cohésion de la terre et les anomalies de comportement par rapport aux facteurs caractérisant la vitesse de pénétration et responsables de la pression interne maximale de l'air dans les agrégats, le rôle de la cohésion apparaît nettement.

Cet ensemble de résultats aboutit donc à une interprétation cohérente, quoique malheureusement seulement qualitative, du phénomène de stabilité des agrégats. Elle permet d'introduire à côté de faits dont le rôle avait été établi précédemment, l'action d'autres variables telles que la viscosité des solutions ou la vitesse d'humectation.

Enfin, on lève ainsi une contradiction apparente entre deux théories, celle expliquant la dégradation par la compression de l'air inclus dans les agrégats, théorie que nous avons confirmée, et celle rattachant cette dégradation au gonflement des agrégats. Ce n'est pas par suite du gonflement que les agrégats se détruisent, mais parce que, à cause du gonflement, la cohésion diminue.

Cet ensemble de résultats nécessite maintenant des travaux sur un plan plus fondamental et concernant les mécanismes du gonflement en présence de diverses solutions salines.

De même, si nous avons pu dégager des facteurs principaux réglant pour une terre les conditions d'établissement de la pression interne maximale, il resterait à réaliser des recherches plus poussées sur les problèmes de mouillabilité ou sur les incidences des dimensions des pores et de leur répartition sur la stabilité structurale.

Il n'en reste pas moins que les faits exposés et leurs conséquences ont une importance agronomique immédiate en mettant l'accent sur le rôle possible des sels solubles, apportés aux sols comme agents de fertilisation, sur la stabilité de la structure.

C'est une servitude de la recherche appliquée que de limiter ses objectifs à l'interprétation des mécanismes qui, pour n'être pas fondamentaux au sens habituel du terme, n'en ont pas moins des conséquences techniques, donc économiques, considérables.

A N N E X E I

CALCUL DU CRITERIUM DE PEARSON POUR 2 EXEMPLES

RESISTANCE A L'ECRASEMENT

RESISTANCE A L'ECRASEMENT
TERRE N° I imbibée par l'eau

Classes	Effectifs	Ecart	Produits	Limites des	Ecart à	Ecart	$\Pi(x)$	Δ	Effectif	Rappel	$o - c$	$(o-c)^2$	$\frac{(o-c)^2}{c}$
Centre		x	Nx	clases de	la moyenne	réduits			c	effectif			
				travail	exacte					observé o			
6,0	1	+ 6	+ 6	+ 6,5	+ 6,65	+ 3,00	1,0000						
				5,5	5,65	2,54	0,9945	0,0055	0,330	1	0,67	0,45	1,36
5,75	1	+ 5	5	4,5	4,65	2,09	0,9820	0,0125	0,750	1	0,25	0,62	0,82
5,50	3	+ 4	12	3,5	3,65	1,64	0,9495	0,0325	1,950	3	1,05	1,10	0,56
5,25	3	+ 3	9	2,5	2,65	1,19	0,8830	0,0665	3,990	3	0,99	0,98	0,24
5,0	5	+ 2	10	1,5	1,65	0,74	0,7704	0,1126	6,956	5	1,95	3,80	0,54
4,75	5	+ 1	+ 5	+ 0,5	+ 0,65	+ 0,29	0,6141	0,1563	9,378	5	4,37	19,09	2,03
4,50	14	0	-	- 0,5	- 0,35	- 0,15	0,4404	0,1737	10,422	14	4,42	19,53	1,87
4,25	11	- 1	- 11	- 1,5	- 1,35	0,60	0,2743	0,1661	9,966	11	1,04	1,08	0,10
4,00	9	- 2	18	- 2,5	- 2,35	1,06	0,1466	0,1297	7,782	9	1,22	1,48	0,19
3,75	5	- 3	15	- 3,5	- 3,35	1,51	0,0655	0,0791	4,746	5	0,25	0,62	0,13
3,5	3	- 4	- 12	- 4,5	- 4,35	+ 1,96	0,0250	0,0405	2,430	3	0,6	0,36	0,15
	60							0,0250	1,500	0	1,5	2,25	1,50

$s_1 = - 9$ $s_2 = 301$

Moyenne provisoire 8

$\bar{x} = 4,46$
 $s^2 = 4,911$
 $s = 2,216$

Pour 9 degrés de
liberté nettement au-dessous
de $P = 0,05$
(tables de χ^2)

$\chi^2 = 9,49$

RESISTANCE A L'ECRASEMENT
TERRE N° I - Solution de Cl Na à 4,95 mol/litre

Classes	Effectifs	Ecart	Produit	Limites des	Ecart à	Ecart	$\Pi(x)$	Δ	Effectif	Rappel	$o - c$	$(o-c)^2$	$\frac{(o-c)^2}{c}$
Centres		x	Nx	classe de travail	la moyenne exacte	réduits			c	effectif observé o			
10,75	I	+ 5	5	+ 5,5	5,628	2,90	0,9981	0,0019	0,1	0	0,1	0,01	0,10
10,25	I	+ 5	5	+ 4,5	4,628	2,38	0,9900	0,0081	0,58	I	0,42	0,18	0,31
10,75	II	+ 4	8	+ 3,5	3,628	1,87	0,9693	0,0207	1,45	2	0,55	0,30	0,38
10,25	II	+ 4	8	+ 2,5	2,628	1,35	0,9115	0,0578	4,05	3	1,05	1,10	0,27
9,75	III	+ 3	9	+ 1,5	1,628	0,84	0,7995	0,1120	7,84	9	1,16	1,35	0,17
9,25	III	+ 3	9	+ 0,5	0,628	0,32	0,6255	0,1740	12,18	II	1,18	1,39	0,11
9,75	IV	+ 2	18	- 0,5	- 0,372	- 0,19	0,4247	0,2008	14,06	II	3,06	9,36	0,67
9,25	IV	+ 2	18	- 1,5	- 1,372	- 0,70	0,2420	0,1827	12,80	I3	0,20	0,04	0,31
8,75	V	+ 1	II	- 1,5	- 1,372	- 0,70	0,2420	0,1308	9,15	I2	2,85	8,12	0,89
8,25	V	+ 1	II	- 2,5	- 2,372	- 1,22	0,1112	0,0694	4,80	7	2,20	4,84	1,00
8,75	VI	0	0	- 3,5	- 3,372	- 1,73	0,0418	0,0295	2	I	I	I	0,50
8,25	VI	0	0	- 4,5	- 4,372	- 2,25	0,0123	0,0123	0,8	0	0,8	0,64	0,80
8,75	7	- 2	- 24										
8,25	7	- 2	- 24										
7,75	8	- 1	- 13										
7,25	8	- 1	- 13										
7,75	9	- 2	- 24										
7,25	9	- 2	- 24										
7,75	10	- 3	- 21										
7,25	10	- 3	- 21										
7,75	11	- 4	- 4										
7,25	11	- 4	- 4										
7,75	12	- 3	- 21										
7,25	12	- 3	- 21										
7,75	13	- 1	- 13										
7,25	13	- 1	- 13										
7,75	14	- 2	- 24										
7,25	14	- 2	- 24										
7,75	15	- 3	- 21										
7,25	15	- 3	- 21										
7,75	16	- 4	- 4										
7,25	16	- 4	- 4										
7,75	17	- 4	- 4										
7,25	17	- 4	- 4										
7,75	18	- 3	- 21										
7,25	18	- 3	- 21										
7,75	19	- 2	- 24										
7,25	19	- 2	- 24										
7,75	20	- 1	- 13										
7,25	20	- 1	- 13										
7,75	21	- 1	- 13										
7,25	21	- 1	- 13										
7,75	22	- 2	- 24										
7,25	22	- 2	- 24										
7,75	23	- 3	- 21										
7,25	23	- 3	- 21										
7,75	24	- 4	- 4										
7,25	24	- 4	- 4										
7,75	25	- 4	- 4										
7,25	25	- 4	- 4										
7,75	26	- 3	- 21										
7,25	26	- 3	- 21										
7,75	27	- 2	- 24										
7,25	27	- 2	- 24										
7,75	28	- 1	- 13										
7,25	28	- 1	- 13										
7,75	29	- 1	- 13										
7,25	29	- 1	- 13										
7,75	30	- 2	- 24										
7,25	30	- 2	- 24										
7,75	31	- 3	- 21										
7,25	31	- 3	- 21										
7,75	32	- 4	- 4										
7,25	32	- 4	- 4										
7,75	33	- 4	- 4										
7,25	33	- 4	- 4										
7,75	34	- 3	- 21										
7,25	34	- 3	- 21										
7,75	35	- 2	- 24										
7,25	35	- 2	- 24										
7,75	36	- 1	- 13										
7,25	36	- 1	- 13										
7,75	37	- 1	- 13										
7,25	37	- 1	- 13										
7,75	38	- 2	- 24										
7,25	38	- 2	- 24										
7,75	39	- 3	- 21										
7,25	39	- 3	- 21										
7,75	40	- 4	- 4										
7,25	40	- 4	- 4										
7,75	41	- 4	- 4										
7,25	41	- 4	- 4										
7,75	42	- 3	- 21										
7,25	42	- 3	- 21										
7,75	43	- 2	- 24										
7,25	43	- 2	- 24										
7,75	44	- 1	- 13										
7,25	44	- 1	- 13										
7,75	45	- 1	- 13										
7,25	45	- 1	- 13										
7,75	46	- 2	- 24										
7,25	46	- 2	- 24										
7,75	47	- 3	- 21										
7,25	47	- 3	- 21										
7,75	48	- 4	- 4										
7,25	48	- 4	- 4										
7,75	49	- 4	- 4										
7,25	49	- 4	- 4										
7,75	50	- 3	- 21										
7,25	50	- 3	- 21										
7,75	51	- 2	- 24										
7,25	51	- 2	- 24										
7,75	52	- 1	- 13										
7,25	52	- 1	- 13										
7,75	53	- 1	- 13										
7,25	53	- 1	- 13										
7,75	54	- 2	- 24										
7,25	54	- 2	- 24										
7,75	55	- 3	- 21										
7,25	55	- 3	- 21										
7,75	56	- 4	- 4										
7,25	56	- 4	- 4										
7,75	57	- 4	- 4										
7,25	57	- 4	- 4										
7,75	58	- 3	- 21										
7,25	58	- 3	- 21										
7,75	59	- 2	- 24										
7,25	59	- 2	- 24										
7,75	60	- 1	- 13										
7,25	60	- 1	- 13										
7,75	61	- 1	- 13										
7,25	61	- 1	- 13										
7,75	62	- 2	- 24										
7,25	62	- 2	- 24										
7,75	63	- 3	- 21										

A N N E X E II

CALCUL DU CRITERIUM DE PEARSON POUR 2 EXEMPLES -
TEMPS NECESSAIRE A L'HUMECTATION

TEMPS NECESSAIRE A L'HUMECTATION

TERRE N° 5 - Solution de Cl Na
à 0,35 mol/litre

Classes tes	Centre	Effectifs	Ecart x	Nx	Produits Nx ²	Limites des classes de travail	Ecart à la moyenn exacte	Ecart réduits	$\Pi(x)$	Δ	Effectif calculé c	Rappel effectif observé o	o - c	(o - c) ²	$\frac{(o - c)^2}{o}$
										0,0053	0,26	0	0,26	0,068	0,26
	57,5	1	+ 5	5	25	+ 5,5	5,34	2,55	0,9947						
						+ 4,5	4,34	2,07	0,9806	0,0141	0,69	1	0,31	0,096	0,14
	52,5	2	+ 4	8	32	+ 3,5	3,34	1,59	0,9441	0,0365	1,79	2	0,21	0,044	0,02
						+ 2,5	2,34	1,11	0,8665	0,0776	3,80	3	0,80	0,64	0,17
	47,5	3	+ 3	9	27	+ 1,5	1,34	0,64	0,7389	0,1276	6,25	7	0,75	0,56	0,09
						+ 0,5	+ 0,34	0,16	0,5636	0,1753	8,58	10	1,42	2,02	0,24
	42,5	7	+ 2	14	28	- 0,5	- 0,66	- 0,31	0,3783	0,1853	9,07	8	1,07	1,14	0,13
						- 1,5	- 1,66	- 0,79	0,2148	0,1635	8,01	6	2,01	4,04	0,50
	37,5	10	+ 1	10	10	- 2,5	- 2,66	- 1,27	0,1020	0,1128	5,52	6	0,48	0,23	0,04
						- 3,5	- 3,66	- 1,74	0,0409	0,0611	2,99	4	1,01	1,02	0,34
	32,5	8	0	0	0	- 4,5	- 4,66	- 2,22	0,0133	0,0276	1,35	2	0,65	0,42	0,31
										0,0133	0,65	0	0,65	0,42	0,64

N = 49

s₁ = +8 s₂ = 220

Moyenne prévisoire 8

\bar{x} = 34,1

s² = 4,380

s = 2,093

$\chi^2 = 2,88$

Pour 9 degrés de
liberté nettement au-dessous

de P = 0,05

(tables de χ^2)

TEMPS NECESSAIRE A L'HUMECTATION
TERRE N° 11 - Solution de Cl^2Mg
à 3 mol/litre

Classes es	Centre	Effectifs	Ecart x	Nx	Produits Nx ²	Limites des classes de travail	Ecart à la moyenne exacte	Ecart réduits	$\Pi(x)$	Δ	Effectif calculé c	Rappel effectif observé o	o - c	(o - c) ²	(o - c) ² c
										0,0045	0,47	-	0,47	0,22	0,50
0	115	1	+ 5	+ 5	25	+ 5,5	+ 5,43	+ 2,62	0,9955						
0						4,5	4,43	2,14	0,9837	0,0118	1,23	1	0,23	0,053	0,04
0	105	6	4	24	96					0,0322	3,38	6	2,62	6,86	2,03
0						3,5	3,43	1,66	0,9515						
0	95	7	3	21	63					0,0725	7,61	7	0,61	0,37	0,48
0						2,5	2,43	1,17	0,8790						
0	85	13	2	26	52					0,1241	13,03	13	0,03	0,0009	0
0						1,5	1,43	0,69	0,7549						
0	75	15	+ 1	+ 15	15					0,1756	18,43	15	3,43	11,76	0,63
0						+ 0,5	+ 0,43	+ 0,20	0,5793						
0	65	22	0	-	-					0,1857	19,49	22	2,51	6,3	0,32
0						- 0,5	- 0,57	- 0,27	0,3936						
0	55	13	- 1	- 13	13					0,1700	17,85	13	4,85	23,52	1,31
0						- 1,5	1,57	0,76	0,2236						
0	45	16	- 2	- 32	64					0,1161	12,19	16	3,81	14,51	1,19
0						- 2,5	2,57	1,24	0,1075						
0	35	9	- 3	- 27	81					0,0657	6,89	9	2,11	4,45	0,64
0						- 3,5	3,57	1,73	0,0418						
0	25	3	- 4	- 12	48					0,0248	2,60	3	0,40	0,16	0,06
0						- 4,5	4,57	- 2,12	0,0170						
										0,0170	1,78	-	1,78	3,16	1,77

N = 105

s₁ = + 7 s₂ = 457

Moyenne provisoire 8

\bar{x} = 65,7
s² = 4,265
s = 2,066

$\chi^2 = 8,97$

Pour 9 degrés de
liberté nettement au-dessous
de P = 0,05
(tables de χ^2)

BIBLIOGRAPHIE

- B I B L I O G R A P H I E -

ANTUNES DA SILVA, PEREIRA GOMES, LUISA DA FRANCA (1961)

Déterminações físicas nos solos - Missao de estudos agronomicos do ultramar (Comunicaçoes - N° 11 MEAU - Lisboa Portugal)

BARY (P) (1931)

L'électro-chimie des colloïdes, ses applications industrielles. - Bulletin de la Société d'Encouragement Tome 130 pages 517-546

BLANCHET (R) (1965)

Quelques aspects récents des études relatives à l'alimentation minérale des plantes dans le sol
Science du Sol N° 2 page 109

DE BOODT (N) et DE LEENHEER (L) (1958)

Proposition pour l'évaluation de la stabilité des agrégats sur le terrain - Proc. Int. Symp. Soil Structure - Gand - pages 234-241

BOUASSE (H) (1924)

Capillarité. Phénomènes superficiels
1 Vol. 437 p. Delagrave - Edit. Paris.

CONCARET (J) (1964)

Etude des mécanismes déterminant la stabilité structurale des sols. C.R. Acad. Sc. Paris t. 259 p. 4317-4319

ELLISON (W.D.) (1954)

Mechanics of water érosion - C.R. 5ème Congrès Int. Science du Sol - Léopoldville - p. 537-548

FEODOROFF (A) (1958)

Un appareil pour le tamisage de la terre sous l'eau
Annales Agronomiques N° 4 - p. 537-548

FEODOROFF (A) (1960)

Evaluation de la stabilité structurale d'un sol (Indice S)
Nouvelles normes d'emploi pour l'appareil à tamiser.
Annales Agronomiques VI - p. 651-659

FOUNTAIN (1956)

The effect of moisture content on the mechanical properties of
Soils Brit. Soc. Soil Sci. Général Meeting - Londres.

HALLAIRE (M.) (1953)

Diffusion capillaire de l'eau dans le sol et répartition de
l'humidité en profondeur. Sous-sols nus et cultivés.
Thèse - Paris.

HANDBOOK OF CHEMISTRY AND PHYSICS

Published by The Chemical Rubber Co. 2310 Superior Avenue
N.E. Cleveland, Ohio - 45ème Edition 1964-1965

HENIN (S) (1938)

Etude physico-chimique de la stabilité structurale des terres
Thèse - Paris

HENIN (S) (1948)

Essai d'une théorie de la stabilité de la structure des sols
Plant and Soil, T. I N° 2, p. 167-178

HENIN (S) - ROBICHET (O) et JONGERIUS (A) (1955)

Principes pour l'évaluation de la stabilité structurale des
sols - Annales Agronomiques N° 4 - p. 537-557

HENIN (S) et MONNIER (G) (1956)

Evaluation de la stabilité de la structure du sol
C.R. 6ème Congrès Int. Sc. du Sol - Paris - Vol. B p. 49-52

HENIN (S) - MONNIER (G) et COMBEAU (A) (1958)

Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols
Ann. Agro. N° 1, p. 73-92

HENIN (S) et HUTTER (W) (1964)

Essai sur le gonflement comme mécanisme de la stabilité
structurale des sols. Sc. du Sol N° 2

HENIN (S) et CONCARET (J) (1965)

Sur une propriété déterminant la stabilité structurale des
terres : la cohésion à l'état humide.
C.R. Acad. Sc. Paris, t. 261 - p. 2734-2737

HUTTER (W) (1965)

Tassement. En cours de publication - Ann. Agro.

KHEYRABI (1965)

Thèse (en préparation)

KOENIGS (1961) (Thèse)

The Mechanical stability of clay soils as influenced by
the moisture conditions and some other factors - Wageningen

MARSHALL (T.J.) (1959)

Relation between water and soil - Technical communication
N° 50 - Commonwealth Bureau of Soils

MONNIER (G) (1965)

Action des matières organiques sur la stabilité structurale
des sols - Thèse. Paris.

PANABOKKE (C.R.) and OUIRK (J.P.) (1956)

Effect of initial water content on stability of soil agrégats
in water. Soil Science 83 p. 185-195

RICHARDS

Pressure plate extractor

SCHLOESING (Th.) (1885)

Chimie Agricole - Encyclopédie Frémy - Dunod à Paris
T. 10, p. 64

SWARTZENDRUBER (D) DE BOODT (M) et KIRKHAM (D) (1954)

Capillary intake rate of water and soil structure
Proc. Soil Sciences Soc. Amer. 18 : 1-7

SWARTZENDRUBER (D) (1956)

Anomalies in capillary intake explained
Proc. Soil Sciences Soc. Amer. 20 : 453-458

TURC

Etude non publiée

YODER (A) (1936)

Direct method of agrégats analysis of soil and study
of the physical nature of érosion losses
Jour. Amer. Society Agronomy T. 28 - p. 337-351

VESSEREAU (A) (1948)

Recherche et expérimentation en agriculture. T. 11 - 4