



HAL
open science

Dessèchement et réhumectation des pâtes argileuses : unification des résultats

J. de Crecy

► **To cite this version:**

J. de Crecy. Dessèchement et réhumectation des pâtes argileuses : unification des résultats. *Annales Agronomiques*, 1975, 26 (6), pp.651-669. hal-02730308

HAL Id: hal-02730308

<https://hal.inrae.fr/hal-02730308v1>

Submitted on 2 Jun 2020

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

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

DESSÈCHEMENT ET RÉHUMECTATION DES PÂTES ARGILEUSES : UNIFICATION DES RÉSULTATS

J. DE CRÉCY

avec la collaboration technique de J. ANDRÉ

Station d'Agronomie,

Centre de Recherches agronomiques Antilles-Guyanne, I. N. R. A.,

Domaine Duclos,

97170 Petit-Bourg

RÉSUMÉ

Il est habituel de déterminer les caractéristiques hydriques (courbes humidité-pF) avec des sols séchés à l'air et tamisés.

Dans cette étude, les sols sont utilisés sous forme de pâte argileuse à la limite de liquidité, et l'humidité est exprimée sous la forme d'un rapport entre l'indice des vides et celui qui correspond à la limite de liquidité, soit :

$$e' = \frac{e}{eWL} \times 100 = \frac{W}{WL} \times 100.$$

Les courbes e'/pF , réalisées au moyen d'une méthode osmotique, concernent tant la phase de dessèchement que de réhumectation, faisant apparaître nettement l'effet d'hystérésis.

L'ensemble des résultats expérimentaux peut se représenter par une équation du type suivant :

$$e' = Zd [18,7 + A(Zr - 5)]$$

où $\begin{cases} Zd = 7-pF \text{ atteint au dessèchement,} \\ Zr = 7-pF \text{ à la réhumectation,} \\ A = \text{paramètre qui prend une valeur d'autant plus élevée que les argiles sont actives} \\ \text{(variation totale de 0 à 3,74).} \end{cases}$

Équation qui se réduit à :

$$e' = Zd [18,7 + A(Zd - 5)]$$

pour la seule phase de dessèchement.

Ces deux expressions acquièrent une portée très générale en raison de la diversité des sols expérimentés et des types d'argiles, et traduisent l'identité du processus pour chacune des phases.

Cette équation reste valable tant que les pâtes sont saturées, c'est-à-dire, tant que la limite de retrait n'est pas atteinte.

Par ailleurs, la comparaison de nos résultats avec des essais de compression montre qu'il s'agirait pour les sols saturés et consolidés de phénomènes semblables sinon identiques.

INTRODUCTION

L'étude des relations entre le sol et l'eau s'accompagne d'une mesure des forces globales de rétention, qu'il est convenu d'exprimer en centimètres de hauteur d'eau, et par commodité, par le pF qui en est le logarithme décimal.

Il est d'usage courant, sinon protocolaire, de mesurer le pF sur un sol séché à l'air, tamisé à 2 mm et homogénéisé.

Cependant, l'état de ce matériau présente de nombreux inconvénients du fait qu'un certain nombre de facteurs extérieurs à la mesure viennent modifier les résultats.

En effet, il s'est avéré que pour le sol séché à l'air, il fallait tenir compte de la structure héritée et des conditions de dessèchement (MONNIER, 1968), du mode de réhumectation, du degré de tassement et de malaxage (PÉRIGAUD, 1963 et auteurs cités).

Nous avons préféré choisir un état du matériau moins sujet à des modifications aléatoires. C'est la raison pour laquelle nous avons utilisé des pâtes argileuses à la limite de liquidité d'Atterberg.

La reproductibilité s'en trouve facilitée, car la limite de liquidité est une humidité caractéristique d'un état physique bien déterminé.

Nous espérons ainsi, en supprimant des variations difficilement mesurables, mettre en évidence des déterminismes que nous chercherons à unifier.

MÉTHODES ET TECHNIQUES

A. — Matériel expérimental

Nous avons sélectionné cinq types de sol aussi différents que possible pour conférer aux expérimentations le plus grand caractère de généralité (tabl. 1 a, b, c).

TABLEAU 1 a

Caractéristiques physiques des sols étudiés

N°	Type de sol	WL	WP	IP	WR
1	Sol brun calcaire de surface (Dijon)	46,6	22,4	24,2	10,0
2	Sol ferrallitique (15-25 cm) (Guadeloupe)	90,0	42,0	48,0	20,0
3	Ferrisol de surface (Cuba)	65,0	30,4	34,6	19,2
4	Vertisol de surface (Guadeloupe)	104,5	36,5	68,0	11,4
5	Vertisol de profondeur (Guadeloupe).....	124,6	32,3	92,3	12,0

WL : Limite de liquidité WP : Limite de plasticité
IP : Indice de plasticité WR : Limite de retrait

Déterminati

Granulomét

Argile (0-2 μ)Limos (2-50 μ)Sables (50-2 000 μ)

Matière organiq

pH (eau)

Capacité d'écha
(me/100)Cations échan
(me/100)

Ca

Mg

K

Na

CE/Arg.

IP/Arg.

Les analyses

N°
des sols

1

2

3

4

5

Gi =

Kc =

Méta H =

I alt. =

¹⁴M-¹⁴V =

M =

Les analys
de Strasbourg (

TABLEAU I b
Caractéristiques physico-chimiques

Déterminations	N° des sols				
	1	2	3	4	5
Granulométrie :					
Argile (0-2 μ)	37,4	52,2	54,5	64,0	88,0
Limons (2-50 μ)	45,1	30,3	39,0	29,4	9,0
Sables (50-2 000 μ)	17,5	17,5	6,5	6,6	3,0
Matière organique (%)	1,9	1,3	2,2	6,9	0,8
pH (eau)	8,0	4,4	6,3	7,8	8,0
Capacité d'échange (CE) (me/100 g)	20,3	14,8	12,9	42,6	38,7
Cations échangeables (me/100 g) :					
Ca	Sat	3,10	9,00	Sat	Sat
Mg	0,67	0,55	1,17	4,29	7,47
K	0,56	0,12	0,76	0,98	0,37
Na	0,06	0,21	0,05	0,36	2,05
CE/Arg. (%)	0,54	0,28	0,24	0,67	0,44
IP/Arg. (%)	0,65	0,92	0,64	1,06	1,05

Les analyses physico-chimiques ont été effectuées au laboratoire d'analyses I. N. R. A. (Arras).

TABLEAU I c
Déterminations minéralogiques aux RX

N° des sols	Gi	Kc	Méta H	I alt.	¹⁴ M- ¹⁴ V	M
1		2		2	6	
2			10			
3	+	7			3	
4		0,5				9,5
5		1			1	8

Gi = Gibbsite (+ = traces)
Kc = Kaolinite (+ traces de chlorite)
Méta H = Métahalloysite
I alt. = Illite altérée
¹⁴M-¹⁴V = Interstratifié montmorillonite-vermiculite
M = Montmorillonite.

Les analyses minéralogiques ont été effectuées au laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de Strasbourg (H. PAQUET).

P	IP	WR
4	24,2	10,0
0	48,0	20,0
4	34,6	19,2
5	68,0	11,4
3	92,3	12,0

sticité
rait

B. — *Techniques analytiques*

Les limites d'Atterberg ont été déterminées suivant les normes ASTM en usage dans les laboratoires routiers.

Nous rappelons que les limites d'Atterberg sont des humidités caractéristiques des états physiques des pâtes :

- la limite de liquidité WL qui sépare l'état liquide de l'état plastique ;
- la limite de plasticité WP qui sépare l'état plastique de l'état semi-solide susceptible de rupture à la déformation ;
- la limite de retrait WR qui sépare l'état saturé d'eau de l'état non saturé, par introduction d'air en fin de dessèchement, ce qui correspond à une limite de rétraction du sol.

La limite de liquidité a été déterminée en construisant la droite humidité/log N avec au moins cinq points de mesure. La variabilité des sols n'a pas permis en effet d'utiliser la méthode du point unique avec toute la sécurité désirable.

Mesure du pF.

Nous avons choisi une méthode qui permette de dessécher les pâtes par voie humide pour rester assuré d'une saturation complète par l'eau en évitant toute entrée d'air.

Celle de WALDRON et MANBEIAN (1970) a paru convenir le mieux aux conditions de nos expérimentations.

C'est une méthode de détermination du pF par osmose avec des solutions étalonnées de polyéthylène glycol 6000 dans l'eau. La pâte est introduite dans un tube de dialyse et celui-ci est plongé dans une solution de PEG dont la concentration correspond à un pF donné (tabl. 2). Cette méthode peut être utilisée entre pF 2,1 et pF 4,4 environ. Nous avons choisi une gamme depuis pF 2,1 jusqu'à 4,2, avec des écarts réguliers de 0,3 unité pF.

TABLEAU 2

Caractéristiques des solutions aqueuses de polyéthylène glycol 6000 utilisées

pF	Concentration en g/l de solution	Indice de réfraction (30°C)
2,1	29	1,3360
2,4	44	1,3376
2,7	64	1,3404
3,0	92	1,3440
3,3	133	1,3496
3,6	187	1,3568
3,9	259	1,3668
4,2	346	1,3783

Pour vérifier et corriger éventuellement les taux de concentration en PEG, nous avons, en complément de la méthode, établi une correspondance entre celles-ci et l'indice de réfraction. On peut ainsi détecter commodément les variations entraînées tant par l'évaporation que par les échanges d'eau entre la pâte et les solutions de PEG.

Mode opératoire

Pour la phase de dessèchement, les pâtes, portées à une humidité légèrement supérieure à la limite de liquidité sont introduites dans les tubes de dialyse et plongées dans la solution qui correspond à pF 2,1 qui est le premier de la gamme. Nous avons vérifié que l'équilibre osmotique était

atteint en 48 heures par précaution. Le tube de dialyse est séché à l'air avant le commencement de la même expérience.

Pour la phase de mesure, la gamme de pF est choisie en fonction de la porosité de la paroi du tube.

Les courbes de préférence à l'humidité relative se traduisent par le volume total, la porosité et l'indice de réfraction. L'indice de réfraction est le rapport de la densité de la pâte à la densité de l'eau :

ϵ = Indice de réfraction
 γ_s = Densité relative
 W = Humidité

Ainsi, l'indice de réfraction est l'indice de réfraction de la pâte divisé par l'indice de réfraction de l'eau.

Si nous rapportons l'indice de réfraction à un taux relatif de dessèchement, nous appellerons dans la suite l'indice de réfraction relatif des pâtes :

Ce mode de mesure est simple, mais égale à la mesure de l'indice de réfraction rapporté au volume de la pâte.

Les résultats sont exprimés en fonction de la porosité (a et b) pour la mesure de la densité relative. Nous avons également mesuré l'indice de réfraction pour l'ensemble des pâtes de pF 4,2 à pF 2,1, à un dessèchement constant. Dans ces cas, le phénomène est le même.

Le phénomène est le même sur l'effet d'un dessèchement.

Dans le cas de la totalité de l'eau, la mesure de l'indice de réfraction est la mesure de l'indice de réfraction.

Annales agronomiques

atteint en 48 heures, mais pour les sols très argileux et très plastiques, il est préférable d'attendre par précaution une soixantaine d'heures.

Le tube de dialyse est alors retiré, soigneusement essuyé et pesé. Puis on passe successivement de la même manière à toute la gamme des pF.

Pour la phase de réhumectation, avec la méthode osmotique, rien n'interdit de réutiliser la gamme de pF en sens inverse, puisque l'eau des solutions de PEG est susceptible de traverser la paroi du tube de dialyse dans les deux sens jusqu'à l'équilibre des tensions de part et d'autre.

Mode de représentation des résultats

Les courbes d'humidité/pF sont souvent représentées en utilisant l'humidité volumique de préférence à l'humidité pondérale pour y inclure plus directement la notion de porosité. Mais la porosité se traduit par une expression complexe, dans le sens où le volume des vides se rapporte au volume total, lequel est la somme du volume du solide et du volume des vides. La variation de la porosité en fonction du volume des vides s'exprime par une hyperbole.

L'indice des vides, couramment employé en mécanique des sols, est une expression simple : c'est le rapport entre le volume des vides et le volume du solide. Dans le cas d'un sol saturé, nous avons :

$$e = W \cdot \gamma_s$$

e = Indice des vides,

γ_s = Densité réelle du solide,

W = Humidité pondérale exprimée par rapport à l'unité.

Ainsi, l'indice des vides, dans le cas de saturation, est-il le produit de l'humidité par la masse spécifique du solide.

Si nous rapportons l'indice des vides à celui qui correspond à la limite de liquidité, nous avons affaire à un taux d'indice des vides relatifs à celui de la WL, ou plus simplement ce que nous appellerons dans la suite du texte, au taux relatif des vides (e') exprimé en pourcentage. Ainsi le taux relatif des vides se traduit-il, en définitive, par le rapport de l'humidité pondérale à la WL :

$$e' = \frac{e}{e_{WL}} \times 100 = \frac{\gamma_s \cdot W}{\gamma_s \cdot WL} \times 100 = \frac{W}{WL} \times 100.$$

Ce mode de représentation permet de se référer non seulement à un taux d'humidité spécifique, mais également à un état physique constant pour chacun des sols (WL), tout en restant un rapport volumique.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats expérimentaux bruts ont été portés dans les tableaux 3 a et 3 b.

Exprimés en taux relatifs des vides (e'), ils ont été représentés sur la figure 1 (a et b) pour la phase de dessèchement et sur la figure 2 (a et b) pour la phase de réhumectation. Nous rappelons que les dessèchements ont été effectués de pF 2,1 à pF 4,2, et pour l'ensemble des pâtes, la réhumectation a été effectuée par inversion (soit de pF 4,2 à pF 2,1) ; en ce qui concerne la pâte n° 2, nous avons, en supplément, procédé à un dessèchement de pF 2,1 à 3,9 et à une réhumectation de pF 3,9 à 2,1. Dans tous les cas, le phénomène d'hystérésis apparaît nettement.

Le phénomène d'hystérésis est défini d'une manière générale comme un retard sur l'effet d'une action, quand celle-ci est appliquée en sens inverse.

Dans le cas qui nous occupe, pour un même pF appliqué, on ne retrouve pas la totalité de l'eau retenue après réhumecté un sol préalablement soumis à la dessiccation.

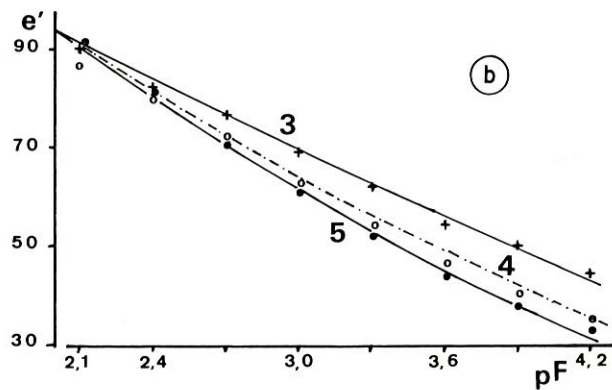
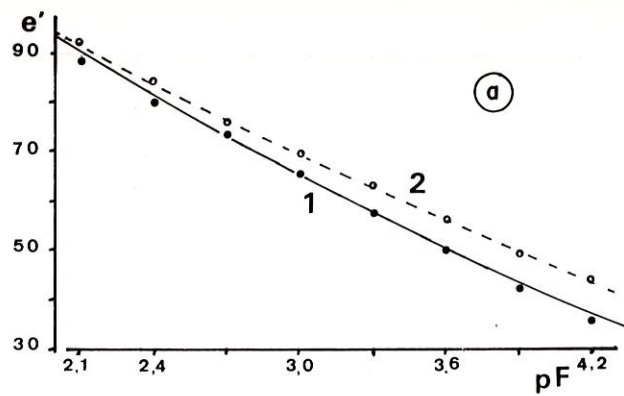


FIG. 1. — Relations entre l'indice relatif des vides (e') et le pF, en phase de dessèchement, pour 5 types de sols (Les traits représentent les valeurs théoriques ; les points, les résultats expérimentaux)

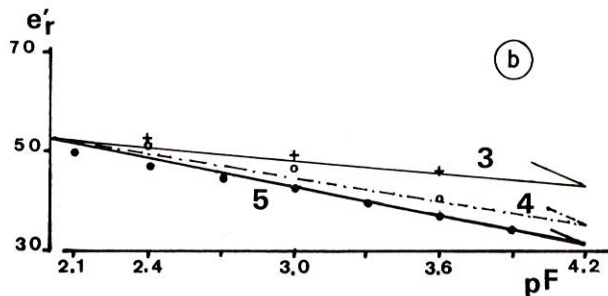
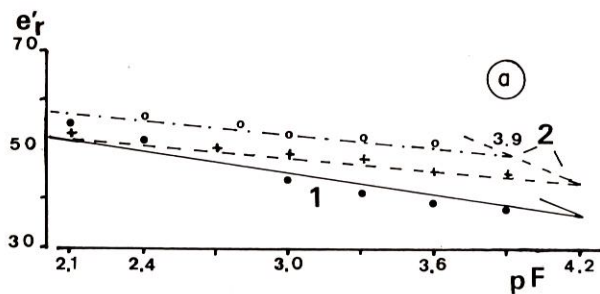


FIG. 2. — Relations entre l'indice relatif des vides (e') et le pF, en phase de réhumectation, pour 5 types de sols

A. — Ex

Nous con
selon une dro
manifeste.

La régul
Toutefois, il
au maximum

Nous po

TABLEAU 3 a

Humidités pondérales des pâtes au dessèchement

N° pâte	pF							
	2,1	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,2
1	41,2	37,3	34,4	30,5	26,8	23,3	19,7	16,5
2	82,8	76,6	68,0	62,7	57,1	50,9	44,6	40,0
3	58,9	53,7	50,0	45,0	40,7	35,7	33,1	29,3
4	91,0	84,4	75,5	65,4	57,4	48,1	42,4	37,1
5	113,0	101,1	88,0	76,5	65,3	55,9	47,3	41,6

TABLEAU 3 b

Humidités pondérales des pâtes à la réhumectation
après dessèchement à pF 4,2 et pF 3,9 (2*)

N° pâte	pF						
	3,9	3,6	3,3	3,0	2,7	2,4	2,1
1	17,8	18,5	19,5	20,6	—	24,3	25,7
2	40,8	42,3	43,5	44,6	45,5	46,3	47,7
2*	—	46,7	47,2	47,9	49,9	57,2	—
3	—	31,1	—	32,2	—	33,8	—
4	—	42,6	—	48,6	—	53,5	—
5	42,4	46,0	49,1	53,8	56,1	58,6	61,3

A. — Expression mathématique des courbes e'/pF (phase de dessèchement)

Nous constatons que si, pour certaines pâtes (2 et 3), les points semblent s'aligner selon une droite, il n'en est pas de même pour les autres qui accusent une courbure manifeste.

La régularité des données suggère la possibilité d'une expression mathématique. Toutefois, il faut tenir compte du fait que les dessèchements obtenus correspondent au maximum à pF 4,2, laissant ainsi une incertitude au-delà de ce pF.

Nous pouvons disposer d'une donnée limite supplémentaire et théoriquement

applicable à toutes les courbes. En effet, quand l'humidité devient nulle, le pF vaut alors pratiquement 7, soit environ 10 000 bars.

En admettant la régularité des courbes de telle sorte que $e' = 0$ quand $pF = 7$, nous ajoutons une donnée de plus aux résultats expérimentaux.

Nous allons examiner si les données sont compatibles avec une équation du type suivant :

$$e' = aZ^2 + bZ \quad (1)$$

où $Z = 7 - pF$, et qui satisfait à l'annulation de e' quand $Z = 0$ (soit $pF = 7$).

Pour chaque courbe de dessèchement, a et b ont été déterminés par régression multiple à deux variables (tabl. 4).

TABLEAU 4
Détermination des coefficients a et b

	Numéro des pâtes				
	1	2	3	4	5
a	2,43	1,45	1,24	2,71	3,41
b	6,40	11,62	12,35	4,78	1,75
r ($n = 9$)	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999

Le coefficient de corrélation r s'applique à la régression entre les valeurs réelles et calculées au moyen de l'équation (1), de e' en fonction de Z . Pour chaque courbe, on dispose de 8 points expérimentaux (qui sont, par ailleurs, la moyenne de 5 à 6 répétitions), et d'un point supplémentaire pour lequel on admet les coordonnées $e' = 0$, $Z = 0$.

Les valeurs élevées du coefficient de corrélation indiquent que les courbes expérimentales répondent de façon satisfaisante à l'équation (1) proposée.

En examinant le tableau 4, il semble qu'il y ait un effet de compensation entre les valeurs de a et b . En les portant sur un graphique, on constate en effet qu'elles sont liées linéairement. Un calcul de corrélation pour les cinq couples de valeurs donne la relation suivante :

$$b = 18,68 - 5,04 a ; \quad r = 0,999 ; \quad n = 5$$

et en arrondissant : $b = 18,7 - 5 a$.

L'effet de compensation existe bien, et nous sommes dès lors autorisés à remplacer b par sa valeur dans l'équation (1) :

$$e' = aZ + (18,7 - 5a) Z$$

soit :

$$e' = Z [18,7 + a(Z - 5)] \quad (2)$$

Ainsi les courbes
rentes constante

Pour ne pas
par un A majusc

Il faut tout
assez nombreux
 $e' - pF$ pour ol
et aux manipula
écart de 1 p. 100

Par exemple

La précision est
basses, car les ca
Il s'agit donc d'

B. — (

1. Valeurs comm

Dans l'équ
les sols expérim

d'où $WL = p$.

Ainsi suffir
d'une pâte pour
coupelle de Cas

Certains ar
entre la limite

La présence
coefficient direc
entre la métho
argileuses, car
la seconde.

2. Limites phys

Le paramè
 $pF = 7$, le pro
un taux relatif
et ensuite, en c
La valeur

Ainsi les courbes e'/pF ne dépendent-elles plus que d'un paramètre (a) et de différentes constantes.

Pour ne pas introduire de confusion de lecture, nous désignerons ce paramètre par un A majuscule.

Il faut toutefois remarquer que la détermination de A doit résulter d'essais assez nombreux et requiert en principe la connaissance de l'ensemble des courbes $e' - pF$ pour obtenir une précision acceptable, car les variations dues aux pesées et aux manipulations ont une incidence importante sur le calcul de A. En effet, un écart de 1 p. 100 sur e' entraîne une forte variation de A.

Par exemple :

$$\text{Pour } \begin{cases} e' = 60 \text{ à } pF \ 3 & A = 3,7 \\ e' = 61 \text{ à } pF \ 3 & A = 3,45 \end{cases}$$

La précision est donc d'autant moins bonne que les limites de liquidité sont plus basses, car les calculs concernent des humidités qui sont ensuite rapportées à la WL. Il s'agit donc d'une détermination de type statistique.

B. — Conséquences entraînées par l'équation (2) des courbes e'/pF

1. Valeurs communes de e' à $pF \ 2$.

Dans l'équation (2), quand $Z = 5$, soit $pF = 2$, nous avons, quels que soient les sols expérimentés :

$$e' = \frac{W}{WL} = 18,7 \times 5 = 93,5$$

d'où $WL = p. \ 100$ d'humidité à $pF \ 2 \times 1,069$.

Ainsi suffirait-il de mesurer avec une méthode appropriée l'humidité à $pF \ 2$ d'une pâte pour en déterminer la limite de liquidité, sans passer par la méthode de la coupelle de Casagrande.

Certains auteurs (VON SHAHABI, 1971) ont trouvé une très bonne corrélation entre la limite de liquidité et $pF \ 2$, mesuré par centrifugation et sur les pâtes, soit :

$$WL = 11,7 + 0,88 W \text{ à } pF \ 2.$$

La présence d'un terme constant explique en partie la plus faible valeur du coefficient directeur de la droite, et par ailleurs, les résultats diffèrent sensiblement entre la méthode par centrifugation et la méthode par osmose pour les pâtes très argileuses, car la translation hydrique s'effectue moins bien par la première que par la seconde.

2. Limites physiques de l'équation (2).

Le paramètre A ne peut dépasser certaine valeur. En effet, quand $Z = 0$ (soit $pF = 7$), le produit $A(Z - 5)$ ne doit pas excéder la valeur de 18,7 car il en résulterait un taux relatif des vides (e') négatif, ce qui, d'une part est physiquement impossible, et ensuite, en contradiction avec l'annulation de e' à $pF \ 7$.

La valeur maximale de A sera donc $18,7 : 5 = 3,74$.

(2)

3. Calcul du pF des limites d'Atterberg.

Une fois connue la valeur de A, on peut facilement calculer le pF des différentes limites d'Atterberg, qui, pour les 5 sols expérimentés, ont été portés dans le tableau 5.

TABLEAU 5
pF des limites d'Atterberg ⁽¹⁾

N° pâte	WL	pF	WP	pF	WR	pF
1	46,6	1,79	22,4	3,70	10,0	5,09
2	90,0	1,75	42,0	4,04	20,0	5,38
3	65,0	1,74	30,4	4,10	19,2	5,02
4	104,5	1,80	36,5	4,24	11,4	5,73
5	124,6	1,82	32,3	4,47	12,0	5,54

⁽¹⁾ Correspondances établies au moyen de l'équation (2).

Pour les pâtes expérimentées, les dessèchements effectués jusqu'à pF 4,2 se situent tous au-dessus de la limite de retrait. En principe, et suivant les travaux de HAINES (1923), le volume de retrait doit être égal au volume d'eau soustraite par succion, et à la réhumectation, le phénomène d'hystérésis a lieu sans introduction d'air. Il faut donc attribuer à ce phénomène, dans les pâtes, une autre cause que le piégeage d'air.

4. Relations entre le paramètre A et la nature des argiles.

Les sols n° 2 et n° 3 sont à base de kaolinite, le sol n° 1 d'illite et les n° 4 et 5 de montmorillonite (cf. tabl. 1 c). On peut constater une progression des valeurs de A dans le sens de l'activité des argiles, de 1,24 à 3,41.

Une étude complémentaire dont nous ne donnerons ici que les résultats qui se rapportent à notre sujet, nous a montré que le paramètre A n'était pas affecté par des mélanges binaires avec des doses croissantes de sable (tabl. 6), mais qu'il variait dans les cas de mélange d'argiles différentes.

Les écarts entre les différentes valeurs de e' en cas de mélange et celle de la pâte n° 5 sans mélange ne sont pas significatifs. Les valeurs de A peuvent donc être considérées comme constantes. Dans le tableau 7, les écarts entre les différentes valeurs de e' sont significatifs, et correspondent à une variation des valeurs de A.

On constate d'ailleurs que ces variations ne sont pas proportionnelles aux taux de mélange, l'influence du vertisol restant prépondérante même au-delà de 50 p. 100.

Ceci pour situer la véritable signification de ce paramètre, et dans quel sens il serait nécessaire de le considérer.

5. Interprétation
Reprenoi

Nous avo
relatif des vid
pF « privilégi
telle que F =

TABLEAU 6

Valeurs de e' à pF 3 pour des mélanges binaires
(pâte n° 5 avec des doses croissantes de sable)

Sable ajouté (%)	WL	WP	W à pF 3	e' à pF 3
0	124,6	32,3	76,2	61,2
4,7	116,5	30,5	71,4	61,1
9,1	108,0	29,2	67,3	62,3
16,7	95,7	24,0	58,6	61,2
50,0	60,6	16,2	37,8	62,3
60,0	46,5	15,0	28,8	62,0
71,5	35,5	15,0	21,2	59,7

TABLEAU 7

Valeurs A. Mélange des pâtes n° 5 et n° 2
(Vertisol. Sol ferrallitique)

N° 5 (%)	N° 2 (%)	WL	WP	W à pF 3,65	e' pF 3,65	A
100	0	124,6	32,3	54,6	43,8	3,41
50	50	110,8	35,2	50,6	45,7	3,06
30	70	106,2	39,0	50,0	47,1	2,81
0	100	90,0	42,0	49,1	54,6	1,45

5. Interprétation de l'équation (2).

Reprenons l'équation en question :

$$e' = Z [18,7 + A(Z - 5)] \quad (2)$$

Nous avons déjà signalé que lorsque $Z = 5$, c'est-à-dire lorsque $pF = 2$, le taux relatif des vides e' a la même valeur pour tous les sols. Le pF 2 apparaît donc comme pF « privilégié » ; en tenant compte de ce fait, si nous substituons à Z une valeur F telle que $F = pF - 2$, nous aurons, après transformation de l'équation (2) :

$$e' = \frac{93,5 - 18,7 F}{I} - \frac{A \cdot F(5 - F)}{II} \quad (2 \text{ bis})$$

uler le pF des différentes
portés dans le tableau 5.

CR	pF
0,0	5,09
0,0	5,38
9,2	5,02
1,4	5,73
2,0	5,54

(2).

ctués jusqu'à pF 4,2 se
et suivant les travaux de
me d'eau soustraite par
a lieu sans introduction
s, une autre cause que le

r d'illite et les n° 4 et 5
ogression des valeurs de A

si que les résultats qui se
A n'était pas affecté par
abl. 6), mais qu'il variait

mélange et celle de la pâte
peuvent donc être consi-
tre les différentes valeurs
valeurs de A.

proportionnelles aux taux
ême au-delà de 50 p. 100.
mètre, et dans quel sens il

— Le terme I est linéaire et exprime que, dans tous les cas, e' diminue régulièrement de 18,7 p. 100 par unité de pF à partir d'une valeur constante de 93,5 à pF 2.

— Le terme II est toujours positif ou nul, car F varie de 0 à 5, c'est-à-dire, entre pF 2 et pF 7. Le terme II précédé du signe moins, traduit par conséquence une diminution supplémentaire dans tous les cas.

L'importance de cette diminution n'est pas linéaire, le terme $A.F(5 - F)$ est une parabole dont l'axe de symétrie passe par la valeur $F = 2,5$, soit pF 4,5.

Le pF 4,5 apparaît, après pF 2, comme critique, c'est-à-dire, que c'est à pF 4,5 que l'effet du paramètre A devient maximum.

Si l'on admet que, par toute humidité supérieure à la limite de retrait, toute cession d'eau dans les pâtes s'accompagne d'un retrait égal en volume, nous aurions au cours du dessèchement :

— d'une part, une contraction de la pâte correspondant à un phénomène irréversible, c'est-à-dire à une déformation permanente sous contrainte qui est le propre des corps plastiques ;

— d'autre part, l'équivalent d'une compression sur un corps avec réversibilité du phénomène.

C. — Application au phénomène d'hystérésis

1. Unification des résultats.

Le phénomène d'hystérésis constaté expérimentalement ne fait que traduire, à la réhumectation, la réversibilité de la « compression » dont l'ampleur est pondérée par l'irréversibilité de la « contraction », au niveau atteint au cours du dessèchement.

En réalité, si, à la réhumectation, le taux relatif des vides est inférieur à celui qui est constaté au dessèchement — pour le même pF — c'est que la façon dont on mène l'expérience ne correspond pas véritablement à un « aller-retour ».

En effet, au dessèchement, on provoque une succion de plus en plus forte. A la réhumectation, le potentiel correspond toujours à une succion, mais de moins en moins forte, en présence d'eau. *Cependant, il n'a pas changé de signe.* Autrement dit, pour espérer obtenir une réciprocité, il faudrait qu'en retour, on applique une pression d'eau égale à la succion exercée pour amener le sol à un dessèchement donné.

En conséquence, un sol inerte, ou totalement plastique, devient théoriquement non réhumectable. En effet, seule la partie réversible du système reste sensible à une décompression, traduite par une succion moins forte.

Si cette interprétation est correcte, nous proposons de compléter l'équation (2) en fonction de ce qui vient d'être exposé, pour qu'elle puisse s'appliquer aussi à la phase de réhumectation des pâtes :

$$e'r = Zd [18,7 + A(Zr - 5)] \quad (3)$$

$e'r$ = taux relatif des vides à la réhumectation,

Zd = valeur de Z au dessèchement maximum atteint,

Zr = valeur de Z appliquée à la réhumectation,

ou encore en utilisant F (soit $F = pF - 2$)

$$e'r = [93,5 - 18,7 Fd] - [A.Fr(5 - Fd)] \quad (3 \text{ bis})$$

Si nous co
3 bis proposées
(cf. fig. 1 (a et b)
aux résultats e:
Cette conf
Elle est ill

2. Généralisat

Si on sub:

où $q = 18,7 [$

on peut comp
de compressib
de températu

La valeu

Cette co
en fonction d
un système in
pour ainsi dir

Pour mie
le produit de

— avan

— en co

de la différen
par EFHC =

Si nous comparons les résultats théoriques, calculés avec les équations 3 ou 3 bis proposées et les données expérimentales, nous constatons un très bon accord (cf. fig. 1 (a et b) et 2 (a et b)). Les traits pleins correspondent aux calculs et les points aux résultats expérimentaux.

Cette conformité est en faveur de notre hypothèse.

Elle est illustrée par la figure 3, qui en exprime le modèle théorique.

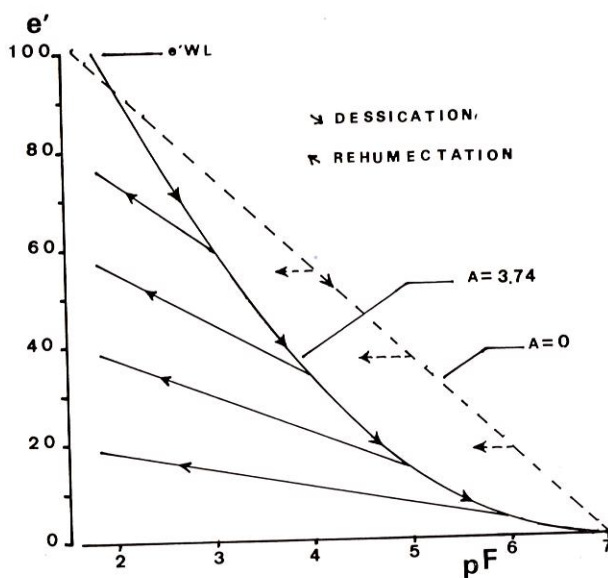


FIG. 3. — Illustration du modèle théorique

2. Généralisation.

Si on substitue à l'équation (3) une équation plus générale de la forme suivante :

$$e' = q Zd$$

où $q = 18,7 [1 - K(5 - Zr)]$ et $K = A : 18,7$,

on peut comparer les valeurs de q à un binôme de compression où K serait un coefficient de compressibilité, analogue à un coefficient de dilatation sous l'effet d'une différence de température, alors qu'il s'agit ici de différence de pression à l'échelle logarithmique.

La valeur maximale du coefficient K ne peut dépasser 0,2, soit $3,74/18,7$.

Cette compressibilité agissant sur la capacité de fixation d'eau est réversible en fonction de la différence des pressions logarithmiques, mais elle est insérée dans un système irréversible, dépendant lui-même des tensions appliquées ; elle ne joue, pour ainsi dire, que dans la marge qui lui reste.

Pour mieux fixer les idées, comparons arbitrairement e' à une surface qui serait le produit de deux côtés de valeurs q et Zd (fig. 4) :

— avant dessiccation, e' est égal à l'aire déterminée par ABCD : soit $e' (1)$;

— en cours de dessiccation, Zd diminue de Zd à Zd' , et comme q dépend en partie de la différence $Zd - Zd'$, il diminue de CD en $CH = q'$, et la surface est représentée par EFHC = $e' (2)$.

(3 bis)

Quand la réhumectation totale a lieu, Zd' reste au niveau atteint tandis que q' reprend la valeur de départ. La surface s'augmente de l'aire FGDH et a pour aire totale EGDC, soit $e'(2) + e'(3) = e'r$.

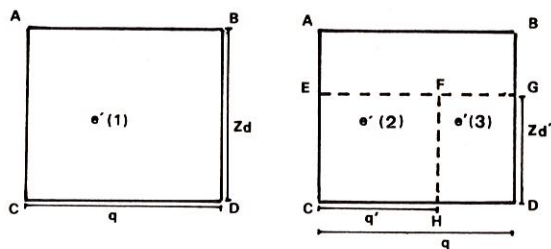


FIG. 4. — Représentation schématique de e' : avant dessiccation (1) ; en cours de dessiccation (2) et après réhumectation totale (3)

Tout se passe comme si la diminution de la surface provenait de la diminution conjointe de deux dimensions, tandis que l'augmentation de cette surface ne s'effectue que par l'augmentation d'une seule dimension, l'autre restant fixe.

Le processus qui est à l'origine de ce qu'il est convenu d'appeler hystérésis apparaît alors clairement : il n'y a réhumectation que s'il y a, pour ainsi dire, une mise en réserve d'une certaine force d'attraction au cours du dessèchement, restituée en phase de réhumectation, ce qui permet de fixer à nouveau une certaine quantité d'eau.

D. — Comparaison avec les essais œdométriques

En mécanique des sols, les essais de compression sont habituellement représentés par une relation entre l'indice des vides « e » et la pression exercée.

On constate que cette relation se traduit par une droite logarithmique dont la pente est négative (relation $e - \log p$).

Le coefficient de proportionnalité est appelé indice de compressibilité. Il est défini par la formule suivante (COSTET et SANGRELAT, 1969) :

$$Cc = \frac{\Delta e}{\Delta \log p}$$

En fait, lors des essais de compression, l'indice des vides n'est pas mesuré directement, mais à partir de la mesure des tassements, en postulant l'incompressibilité des particules solides et celle de l'eau. Quand le sol est consolidé, c'est-à-dire, quand l'air a été chassé (consolidation initiale) et que l'eau interstitielle excédentaire a été éliminée (consolidation primaire), « toute diminution de volume de l'échantillon ne peut être obtenue qu'au prix d'une expulsion d'eau » (COSTET *et al.*, 1969).

Nous retrouvons là la loi de HAINES selon laquelle le retrait du sol est égal au volume d'eau perdu. Nous sommes alors dans les mêmes conditions expérimentales que lors des essais $e' - pF$. Cela signifie que les effets d'une dépression exercée sur l'eau retenue sont identiques à ceux d'une pression exercée sur le sol saturé.

Dans le cas des essais de compressibilité où les pressions s'étagent de 0,1 à 30 bars environ, les relations $e - \log p$ sont considérées comme des droites.

Dans le cas ont été reconnue de pression considérée soit 10 000 bars mesures œdométriques

L'indice de moyenne des coefficients à 0,1 et 32 bars

Dans ces conditions

Pour faire nous disposons dessus, selon la

et qui provient limites de liquides pâtes expérimentales

En effet s

Nous obtenons

Calcul

L'accord Skempton soit estimation de

Dans le cas de caractéristiques hydriques par osmose, les relations $e - pF$ ont été reconnues comme des courbes, bien que la courbure soit faible dans la marge de pression considérée, ceci parce qu'il nous a été possible d'extrapoler jusqu'à pF 7, soit 10 000 bars environ, au moyen d'une unification des résultats, tandis que les mesures œdométriques s'arrêtent aux pressions exercées.

L'indice de compressibilité C_c défini plus haut ne serait donc que la pente moyenne des courbes $e - pF$ entre pF 2 et pF 4,5 par exemple, ce qui correspond à 0,1 et 32 bars.

Dans ces conditions :

$$C_c' = \frac{\Delta e}{2,5}$$

Pour faire une comparaison, en ordre de grandeur, entre les deux méthodes, nous disposons de la corrélation de SKEMPTON, citée par les auteurs référencés ci-dessus, selon laquelle :

$$C_c = 0,007 (W_L - 10)$$

et qui provient d'une comparaison entre les résultats d'essais de compression et les limites de liquidité de différents sols. Il devient alors possible de calculer pour les pâtes expérimentées ici les deux indices :

En effet si : $C_c' = \frac{\Delta e}{2,5}$, nous aurons :

$$C_c' = \frac{93,5 - e'(\text{à } pF \text{ 4,5})}{2,5 \times 100} \times \frac{\gamma_s \times W_L}{100}$$

Nous obtenons le tableau 8 :

TABLEAU 8

Calcul de l'indice de compressibilité C_c selon (1) la corrélation de Skempton et (2) la formule proposée

N° de pâte	WL	C_c (1)	C_c' (2)
1	46,6	0,256	0,305
3	65,0	0,385	0,375
2	90,0	0,560	0,532
4	104,5	0,668	0,704
5	124,6	0,802	0,898

L'accord entre les deux modes de calcul est évident, bien que la formule de Skempton soit de nature statistique et que l'écart de 2,5 entre pF soit également une estimation de notre part.

Le fait d'assimiler les relations $e - \log p$ à des droites montre qu'il s'agit d'une approximation, car on constate (MEANS et PARCHER, 1964) que, pour certaines argiles dites « actives », on obtient des courbes légèrement concaves, ce qui vient confirmer nos propositions.

L'identité des processus ne s'arrête pas là, car les phénomènes d'hystérésis sont en tous points comparables.

Nous concluons qu'il y a les plus fortes présomptions après une étude comparée systématique, pour que les résultats des deux types de mesures coïncident.

Mais la méthode osmotique a l'avantage d'éviter la lenteur des essais oedométriques de même que la lourdeur des dispositifs mathématiques et instrumentaux qu'ils requièrent.

E. — Conditions d'établissement d'un modèle physique

L'unification des résultats concernant la déshydratation et la réhydratation des pâtes argileuses laisse entrevoir un certain nombre de conditions posées à l'établissement d'un modèle physique, ainsi :

— Pour une activité nulle de l'argile (le terme activité ayant un sens large), on constate que le sol perd un volume d'eau constant par unité pF. Autrement dit, les forces globales d'attraction pour l'eau diminuent exponentiellement avec la quantité d'eau fixée.

— Pour des argiles actives, le sol perd relativement aux matériaux non actifs une plus grande quantité d'eau que prévue par unité pF, la différence maximale se situant à pF 4,5.

— C'est dans la mesure même de cette différence que le sol est susceptible de se réhumecter. On ajoutera que ce sont précisément ces argiles qui dégagent le plus de chaleur à la réhumectation (heat of wetting des auteurs anglo-saxons), l'hygroscopicité étant située aux environs de pF 4,5.

— Le paramètre A représenterait ce qu'il est convenu d'appeler l'activité des argiles, laquelle doit pouvoir être rattachée à des propriétés spécifiques comme la géométrie des réseaux, l'écartement des feuillets et la répartition des charges, cationiques en particulier.

L'établissement des relations $e' - pF$ pourra, dès lors que celles-ci ont été unifiées, servir de bancs d'essai pour mieux nous éclairer sur la nature et l'incidence des forces en jeu en phase d'hydratation et de dessèchement des sols.

CONCLUSION

Lorsqu'on applique une succion sur une pâte saturée à la limite de liquidité, on provoque un dessèchement qui se traduit par une baisse globale d'humidité.

Cette baisse d'humidité n'est pas proportionnelle au pF et on obtient des courbes d'autant plus prononcées que la part des argiles gonflantes est importante.

Ces courbes traduisent deux effets distincts :

— l'un qui correspond à une désorption des molécules d'eau fixées, accompagnée par une contraction du matériau, en absence d'air. Les liaisons entre les particules

argileuses devient appliquée ;

— l'autre est c'est-à-dire que sible, d'où l'effet

Les phénomènes des pâtes ont été comparés avec les données

On peut conclure que le coefficient spécifique de la

En définitive, le nombre de facteurs de pF sur des sections que les caractéristiques

Que Monsieur (I.N.R.A.) veuillez

DRYING AND

Soil moisture are used at upper Soil moisture words, for saturation

Log. tension Hysteresis effect

in which $\left\{ \begin{array}{l} Z_d \\ Z_i \\ A \end{array} \right.$

In the case

These two soils and show that This equation limit of soil is not Besides the nomena would

argileuses deviennent alors de plus en plus fortes, en proportion de l'énergie de succion appliquée ;

— l'autre est un effet corrélatif s'appliquant à un système pseudo-élastique c'est-à-dire que la succion exercée provoque une déshydratation à caractère réversible, d'où l'effet d'hystérésis.

Les phénomènes qui accompagnent le dessèchement et la réhumectation des pâtes ont été représentés par une expression mathématique unique en très bon accord avec les données expérimentales.

On peut considérer avant d'aller plus loin que le paramètre A qui s'est avéré spécifique de la nature des argiles est relié à un potentiel de gonflement réversible.

En définitive, l'utilisation de pâtes a permis d'éliminer d'emblée un certain nombre de facteurs aléatoires rencontrés quand on détermine des courbes classiques de pF sur des sols structurés. Il sera ensuite plus facile d'étudier ces facteurs dès lors que les caractéristiques hydriques des pâtes serviront de référence.

Reçu pour publication en novembre 1975.

REMERCIEMENTS

Que Monsieur DUTIL, Directeur de la Station de Science du Sol de Chalons-sur-Marne (I.N.R.A.) veuille agréer mes remerciements pour l'aide qu'il m'a apportée.

SUMMARY

DRYING AND REWETTING OF CLAY-PASTES : STANDARDIZATION OF RESULTS

Soil moisture is usually determined with air-dried and softened soils. In this study, the soils are used at upper plastic limit or Atterberg's liquid limit.

Soil moisture is expressed by void ration (e)/void ratio plastic limit (e_{WL}) rate, in other words, for saturated soils, by water content/liquid limit rate :

$$e' = \frac{e}{e_{WL}} \times 100 = \frac{W}{WL} \times 100.$$

Log. tension curves are determined by osmotic method for drying and rewetting ranges. Hysteresis effect appear clearly and experimental equation is presented :

$$e' = Z_d[18.7 + A(Z_r - 5)]$$

in which $\begin{cases} Z_d = 7 - pF \text{ at dried state,} \\ Z_r = 7 - pF \text{ at rewetting,} \\ A = \text{parameter related to clay activity (total variation range : 0 to 3.74).} \end{cases}$

In the case of drying phase only, this equation takes the following form :

$$e' = Z_d[18.7 + A(Z_d - 5)]$$

These two equations gain a far-reaching importance because of the diversity of the tested soils and show the identity of the process for each phase for all clay types.

This equation remains valid as far as pastes are saturated, that is as far as the shrinkage limit of soil is not reached.

Besides the comparison between our results and compression tests reveals that the phenomena would be similar if not identical in saturated and consolidated soils.

ZUSAMMENFASSUNG

ENTWASSERUNG UND WIEDERANFEUCHTUNG VON
TONPASTEN : VEREINHEITLI CHUNH DER ERGEBNISSE

Die Wassereigenschaften (Feuchtigkeit-pF Kurven) sind gewöhnlich mit luftgetrockneten und abgeseibeten Böden bestimmt.

In dieser Untersuchung sind die Böden als eine zur Fliessgrenze stehende Tonpaste benutzt und die Feuchtigkeit als eine Beziehung zwischen der Porenziffer und dem der Fliessgrenze entsprechenden Faktor ausgedrückt, das heisst :

$$e' = \frac{e}{eWL} \times 100 = \frac{W}{WL} \times 100.$$

Die e'/pF Kurven, die dank einer osmotischen Methode ausgearbeitet sind, betreffen die Entwässerungsphase sowie die Wiederanfeuchtungsphase und lassen einen Hysteresiseffekt deutlich erkennen.

Die gesamten experimentellen Ergebnisse können in einer Gleichung des folgenden Typs zusammengefasst worden :

$$e' = Zd[18.7 + A(Zr - 5)]$$

wo $\begin{cases} Z_d = 7 - pF \text{ zur Entwässerungsphase,} \\ Z_r = 7 - pF \text{ zur Wiederanfeuchtungsphase,} \\ A = \text{ein Parameter, das um so grösser ist als Töne aktiv sind} \\ \text{(gesamte Variationsbreite : von 0 bis 3.74).} \end{cases}$

Die Gleichung verwandelt sich in :

$$e' = Zd[18.7 + A(Zd - 5)]$$

für die einzige Entwässerungsphase.

Diese beiden Gleichungen gewinnen eine sehr allgemeine Bedeutung wegen der Vielfältigkeit der erprobten Böden und der Tontypen und zeigen die Gleichheit des Vorgangs in jede der Phasen.

Diese Gleichung gilt so lange die Pasten gesättigt sind, d ; h so lange die Schrumpfungsgrenze nicht erreicht ist.

Daneben zeigt das Vergleichen unserer Ergebnisse mit Kompressions-versuchen dass die Prozesse in gesättigten und befestigten böden ähnlich wenn nicht identisch wären.

РЕЗЮМЕ

Высушивание и новое оводнение глинистых паст. — Об'единенные результаты.

Ж. ДЕ КРЕСИ.

Водные характеристики (кривые влажности — pF) почв определяются обычно на образцах высушенных на воздухе и просеянных через сито.

В данной работе, почвы употреблялись в форме глинистых паст, находившихся на границе перехода в жидкое состояние, и их влажность выражалась в форме соотношения между показателем пустот и показателем границы этого состояния, или :

$$e' = \frac{e \times 100}{eWL} = \frac{W}{WL} \times 100.$$

Кривы
они относ
и четко в

Общн
формулой

В это
вании

личения

Форм
фазы вы

Эти
исследова
фаз про

Форм
пока не

Кром
опытов
нения по

BAVER L. D.,
CHILDS E. C.,
ability of oper
COSTET J., SA
HAINES, 1923.
MEANS R. E.,
Columbia Ol
MONNIER G.,
turale. Ann
PÉRIGAUD S.,
« Le potenti
VON SHAHAB,
Wasserbindu
WALDRON et M
Sci., 110 (6)

Кривые $\epsilon'/\rho F$ были реализованы с помощью осмотического метода; они относятся как к фазе высушивания, так и к фазе нового оводнения и четко выявляют эффект гистерезиса.

Общность экспериментальных результатов может быть выражена формулой следующего типа :

$$\epsilon' = Z_d [18,7 + A (Z_r - 5)].$$

В этой формуле $Z_d = 7$ — представляет ρF достигнутый при высушивании

$$Z_r = 7 \text{ — } \rho F \text{ при оводнении}$$

A — параметр увеличивающийся по мере увеличения активности глин (общая вариация от 0 до 3,74).

Формула эта превращается в $\epsilon' = Z_d [18,7 + A (Z_d - 5)]$ для одной только фазы высушивания.

Эти два выражения имеют общее значение благодаря разнообразию исследованных почв и типов глин, и точно идентифицируют каждую из фаз процесса.

Формула остается действительной пока пасты насыщены, то-есть пока не достигнута граница усушки.

Кроме того, сравнение полученных результатов с результатами опытов компрессии, показывает что в случаях насыщения, или упрочнения почв, явления эти остаются одинаковыми, если не сказать теми-же.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BAVER L. D., 1961. *Soil Physics*, 3^e Edition, John Wiley and Sons, New York, London.
- CHILDS E. C., YOUNG E. G., 1958. The use of moisture characteristics curves in assessing the soil stability of opencast coal sites. *Symp. Intern. Structure*, Gand, 415-421.
- COSTET J., SANGLERAT G., 1969. *Cours pratique de mécanique des sols*. Dunod, Paris, p. 88 et 111-115.
- HAINES, 1923. Cité par BAVIER L. D., *Soil Physics*.
- MEANS R. E., PARCHEL S. V., 1964. *Physical Properties of Soils*, 2^e Edition, Charles E. Merrill Books, Columbia Ohio, p. 225.
- MONNIER G., KONAN L., 1968. Influence des conditions de séchage des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. agron.*, **19** (1), 541-552.
- PÉRIGAUD S., 1963. Contribution agronomique à la mise en valeur de la Brenne (Sols hydromorphes) « Le potentiel capillaire à la capacité au champ ». *Ann. agron.*, **14** (3), 308-309.
- VON SHAHABI, 1971. Indirecte Ermittlung der Plastizitätswerte nach Atterberg durch Bestimmung der Wasserbindung. *Kultur und Flubereinigung*, **12**, 47-56.
- WALDRON et MANBEIAN, 1970. Soil moisture characteristics by osmosis with polyethylene glycol. *Soil Sci.*, **110** (6), 401-404.