

RESUME :

Nous avons établi les courbes de retrait et de potentiel de 17 matériaux naturels. La gamme de nos échantillons a été choisie de façon à couvrir un large éventail de teneurs en argile. Nous avons réhumecté des agrégats tamisés à 2-3 mm à un potentiel de 3 mbars. Le retrait a été conduit par équilibres successifs en presse de Richards puis par évaporation au dessus de solutions d'acide sulfurique de différentes concentrations.

Contrairement aux points caractéristiques de la courbe de retrait, la teneur en argile apparait comme le facteur déterminant la typologie de la courbe de retrait. Nous avons défini un gonflement potentiel dont les éléments prédictifs sont la teneur en argile et l'indice des vides à 3 mbars.

La discussion porte ensuite sur les modalités d'utilisation de ce gonflement pour la prévision de l'évolution naturelle de la structure.

SUMMARY :

Shrinkage and potential curves on 17 natural aggregate samples have been set up. Samples have been chosen to cover a large scale of clay contents : from 11 to 65 %. Aggregates were rewetted at equilibrium with 3 mbars suction, and then dried successively up to equilibrium according to suction intensity : in Richards's press and with H_2SO_4 solutions at different concentrations.

Shrinkage curves' characteristics look to be more correlated with clay content than with any particular curve's point coordinates. Shrink-swell potential, defined as swelling between oven dried and 3 mbars water suction, appears to be efficient to classify soil materials' "structural activity". Correlations with shrinkage values, obtained for different water suction variations, are given. Consequences upon structural evolution are discussed.

PLAN

I	INTRODUCTION	1
II	RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE	4
III	MATERIEL ET METHODES	6
	III-1 PREPARATION DES ECHANTILLONS	6
	III-1-1 Objectifs	6
	III-1-2 Préparation des agrégats de 2 - 3 mm	6
	III-1-3 Réhumectation des agrégats	7
	a/ Choix de la dépression minimale	8
	b/ Durée d'humectation	8
	III-2 RELATION POTENTIEL - TENEUR EN EAU	10
	III-2-1 Première étape : équilibre de potentiel en presse de Richards	10
	III-2-2 Deuxième étape : équilibre en phase vapeur	11
	a/ Principe et matériel	11
	b/ Avantages et inconvénients	11
	III-3 LA COURBE DE RETRAIT	11
	III-4 EXPRESSION DES RESULTATS	13
	III-5 PRESENTATION DES MATERIAUX UTILISES	15
IV	RESULTATS ET INTERPRETATION	16
	IV-1 CARACTERISTIQUES DE LA COURBE DE RETRAIT	16
	IV-1-1 Domaine saturé	16
	a/ Définition expérimentale	16
	b/ Amplitude	18
	c/ Point d'entrée d'air	19
	IV-1-2 Domaine non saturé	20
	a/ Amplitude du retrait résiduel	20
	b/ Limite de retrait	22
	b ₁) Définition expérimentale	22
	b ₂) Potentiel et teneur en eau	23
	IV-2 GONFLEMENT POTENTIEL - GONFLEMENT EN PLACE	24

IV-2-1 Retrait ou gonflement potentiel	24
IV-2-2 Amplitude du retrait en place	26
a/ Discussion des bornes	26
a ₁) Borne supérieure	26
a ₂) Borne inférieure	27
b/ Les gonflements en place	27
c/ Influence de la teneur en argile	29
V CONCLUSION	31
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	33

I - INTRODUCTION

Pour implanter une culture, l'agriculteur effectue un certain nombre d'opérations destinées en particulier à modifier l'état physique du sol. L'ensemble de ces travaux constitue un itinéraire technique, qui a comme objectif l'obtention de conditions optimales pour la croissance et le développement du végétal cultivé.

L'état structural du sol évolue sous l'effet de ces interventions humaines, mais aussi par l'action de facteurs naturels. Pour raisonner chaque intervention, il est donc nécessaire d'établir un pronostic sur l'évolution probable de la structure du sol sous l'effet de ces facteurs naturels. La Station de Science du Sol d'Avignon étudie le cas particulier du semis direct permanent : avec l'utilisation de cette technique, le maintien ou la création d'une structure favorable dépend étroitement des facteurs naturels d'évolution de la structure. Le pronostic d'évolution de celle-ci définit, dans ce cas, l'aptitude physique du sol au semis direct (STENGEL 1980).

On peut distinguer deux types de facteurs naturels d'évolution de la structure :

- les facteurs biologiques : essentiellement l'action de la faune du sol,
 - les facteurs climatiques : action du gel, des variations d'humidité.
- Ces dernières agissent parfois en interaction avec certains facteurs biologiques (les racines dans les phénomènes de granulation étudiés par TRI 1968).

Parmi les seconds, nous considèrerons ici les variations de teneur en eau. Elles peuvent agir sur la structure suivant différentes modalités :

+ Destruction par éclatement à l'humectation :

C'est ce qui se produit lors de phénomènes de battance ou de prise en masse, par excès d'eau, dans certains sols limoneux. Cette action peut aller jusqu'à la dispersion des particules élémentaires. Ces phénomènes ont déjà été très étudiés. Leurs risques d'apparition sont estimés de façon satisfaisante à partir de l'évaluation de la stabilité structurale. (MONNIER 1965, CONCARET 1967, HENIN et al 1969).

+ Fragmentation et prise en masse résultant des phénomènes de retrait et de gonflement :

L'intensité de ces phénomènes correspond à ce que l'on appelle "l'activité structurale". Cette notion est souvent très intuitive et rarement accompagnée d'une définition précise. Nous retiendrons la suivante : c'est l'aptitude d'un matériau à se fragmenter à partir de l'état continu, sous l'effet des alternances humectation - dessiccation. Une évaluation de cette activité structurale pourrait être la mesure du volume et de la maille des fissures obtenues après une histoire hydrique standard. Un tel test serait lourd et difficile à mettre en place. L'activité structurale résultant des phénomènes de retrait - gonflement, on admet, généralement que celle-ci est directement liée à l'amplitude de retrait ou de gonflement. Ainsi a-t-on pratiqué des tests de gonflement sous faible charge hydrique ou mécanique qui définissent un gonflement qualifié de "potentiel". On peut rapprocher de ces tests celui de HENIN - BOSQUET (1966) qui, compte tenu du mode de réalisation, apprécie une amplitude de retrait.

L'emploi de ces tests permet de fixer des seuils d'apparition de certains processus d'évolution structurale. Ainsi TRI (1973) a montré qu'il est nécessaire d'avoir un gonflement potentiel supérieur ou égal à 15 % pour que la granulation sous prairie puisse avoir lieu.

Leurs résultats sont fortement corrélés à la constitution des matériaux (teneur en argile, teneur en matières organiques, capacité d'échange en cations, surface spécifique) (SEED 1962, MAERTENS 1969, RANGANATHAM 1965, TRI 1973, GREENEKELLY 1974, ROSS 1978).

Cependant, si ces tests permettent de prévoir dans certains cas un type d'évolution structurale, ils sont insuffisants pour :

- prévoir l'intensité de cette évolution, c'est-à-dire l'activité structurale telle que nous l'avons définie.
- passer d'une évaluation de l'activité structurale, considérée comme une caractéristique du matériau, à la prévision du comportement du sol en place.

En effet, si l'on conserve nécessairement l'hypothèse que l'activité structurale est étroitement liée à l'amplitude du retrait - gonflement, cette dernière doit être évaluée en tenant compte du fait que la constitution du matériau influe sur ses propriétés hydriques, et plus précisément sur l'intervalle de potentiel dans lequel il évolue. Pour passer au compor-

tement en place, il faudra ensuite tenir compte des variations de teneurs en eau fonction de la profondeur, du climat, de la culture,...etc.

Pour chaque matériau, deux courbes sont donc nécessaires. Tout d'abord, la courbe de potentiel qui permet, connaissant les pF probables in situ, de voir à quelle gamme d'humidités cela correspond. Ensuite, avec la courbe de retrait, on peut évaluer le gonflement probable du matériau pour la gamme d'humidités précédemment repérée.

L'objectif principal de ce mémoire est, à l'aide de la combinaison de ces deux courbes sur différents matériaux, d'acquérir les moyens nécessaires à l'amélioration du pronostic d'évolution naturelle de la structure. Ceci doit servir, par la suite, à mieux apprécier l'aptitude d'un sol au semis direct.

Après un bref aperçu des connaissances actuellement disponibles sur les phénomènes de retrait et de gonflement, nous décrirons, en justifiant leur emploi, les différentes techniques utilisées. Nous montrerons ensuite ce que les résultats obtenus apportent au sujet de retrait d'échantillons naturels et quant à la prévision de l'amplitude de retrait gonflement probable en place.

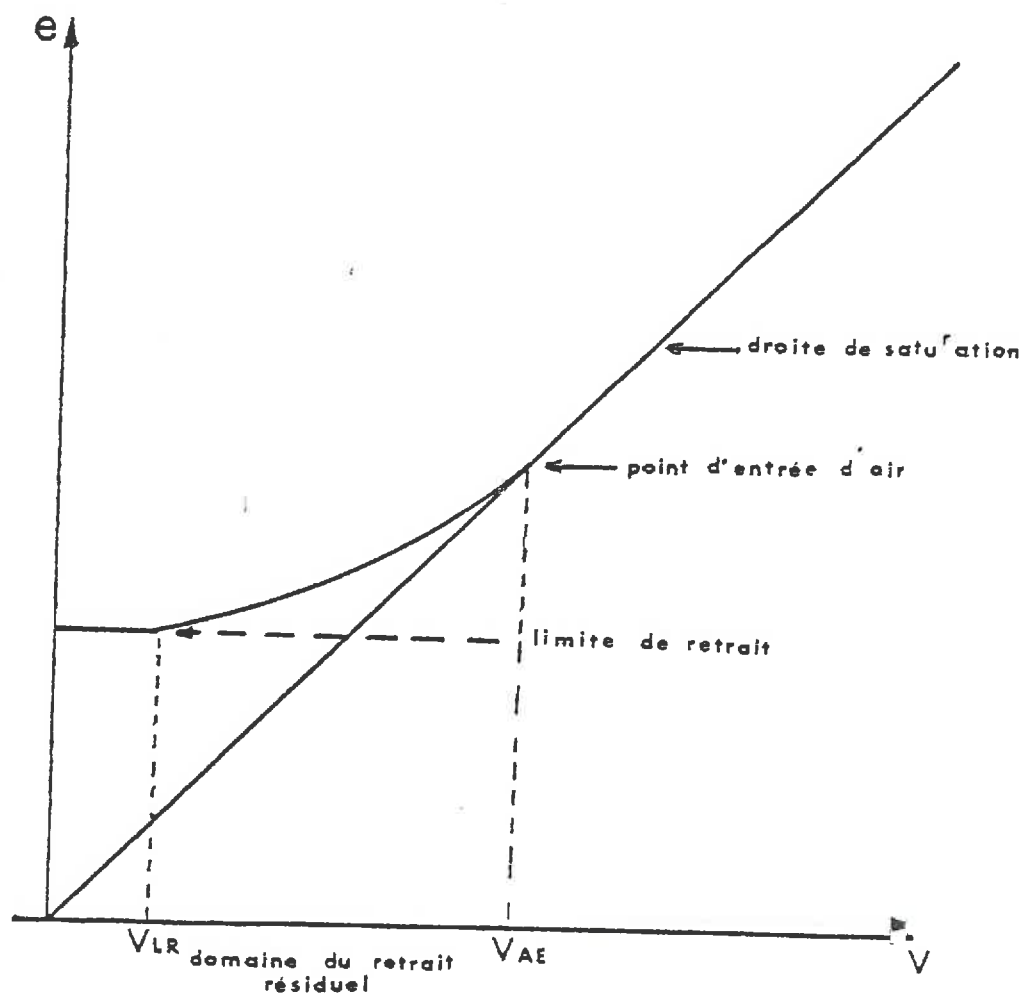


fig. 1 : Elements caractéristiques d'une courbe de retrait.

II - RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE

HAINES a publié en 1923, une description des différents domaines d'une courbe de retrait d'un matériau gonflant initialement continu et saturé en eau. Il distinguait trois domaines. La première partie de la courbe est celle pour laquelle une diminution de volume de l'échantillon correspond au volume de l'eau perdue. Le volume total est égal à la somme des volumes de solide et d'eau. La relation volume teneur en eau est linéaire. La courbe représentative est appelée la droite de saturation. Pour la partie intermédiaire, la perte d'eau ne se traduit plus par une perte de volume équivalent. Il y a donc entrée d'air dans le matériau. Enfin, pour les humidités les plus faibles, on ne constate plus de variation du volume de l'échantillon. Le point marquant la fin de la droite de saturation est appelé point d'entrée d'air. Le point à partir duquel le volume de l'échantillon devient constant est dénommé limite le retrait. (figure 1).

Le seul élément connu et prévisible de la courbe de HAINES est la droite de saturation. Néanmoins nous ne connaissons pas les bornes de ce domaine saturé : teneur en eau correspondant au gonflement potentiel et point d'entrée d'air. L'équation de la droite de saturation présente de ce fait un intérêt prévisionnel extrêmement restreint.

Depuis, de nombreux travaux ont été effectués sur les phénomènes de retrait et de gonflement. Ces recherches portent sur les argiles pures ainsi que sur des matériaux naturels :

- Sur argiles pures :

Des études physico-chimiques ont abouti à l'élaboration de la théorie de la double couche diffuse de GOUY et CHAPMAN. Contrairement à l'objectif de ses auteurs, elle ne permet pas de prévoir les paramètres de la courbe de retrait, ni leurs relations avec le potentiel de l'eau sauf dans le cas de smectites sodiques dispersées (QUIRK 1968).

L'organisation des argiles et ses variations au desséchement et à la réhumectation ont été précisées (TESSIER 1975, 1980). On constate des différences suivant les types minéralogiques d'argile. Mais aucun moyen de prévision du comportement au gonflement n'apparaît, sauf dans le cas de la kaolinite qui paraît se rapprocher du problème des particules rigides du

squelette.

- Dans les cas des mélanges argile-squelette et des matériaux naturels, aucune prévision du retrait n'est possible. Il n'existe que des ajustements. Certains d'entre eux reposent sur des considérations théoriques (GROENEVELT et PARLANGE 1974, SPOSITO et GIRALDEZ 1976). D'autres sont purement empiriques (UYOT et al 1979, STENGEL 1981). Aucun ajustement de courbe de retrait n'a de justification théorique suffisante pour être généralisé. Nous constatons qu'aucun d'entre eux ne s'adapte à l'ensemble de nos courbes expérimentales. De plus, dans notre cas, l'utilisation d'ajustements de différents types aurait été illusoire. Compte tenu du nombre et de la précision des résultats expérimentaux dans le domaine non saturé, nous n'aurions pas amélioré la précision par rapport au tracé manuel des courbes. N'utilisant pas d'ajustement, il est souvent plus arbitraire de déterminer les deux points singuliers de la courbe : Limite de retrait et point d'entrée d'air. L'essentiel des connaissances sur le domaine non saturé, pour le type d'échantillons que nous étudions porte donc sur l'ordonnée à l'origine de la courbe. Celle-ci correspond à la porosité texturale à l'état sec, dont les relations avec la constitution ont été étudiées par FIES (1978) STENGEL (1979) FIES et STENGEL (1981). Par ailleurs, STENGEL (1981) a constaté sur des échantillons remaniés que la limite de retrait de mélange argile squelette, semble déterminée par le point d'entrée d'air de l'argile pure. La vérification de cet élément prédictif d'un point singulier de la courbe sur des matériaux naturels serait intéressante. C'est pourquoi nous avons introduit dans les matériaux étudiés des argiles pures, extraites d'échantillons naturels faisant partie de notre population.

III - MATERIEL ET METHODES

III - 1 PREPARATION DES ECHANTILLONS

III - 1-1 Objectifs :

Nous cherchons les moyens d'une évaluation satisfaisante de "l'activité structurale". Nous souhaitons donc disposer d'une caractéristique permanente du matériau, au moins à l'échelle de quelques années, pour un système de culture stable (en particulier avec une intensité moyenne de contraintes mécaniques peu variable). D'autre part, il est nécessaire, pour permettre les comparaisons, d'éliminer les effets d'états structuraux variables d'un matériau à l'autre. Nous devons donc avoir des échantillons à structure continue. Deux moyens peuvent être utilisés pour les obtenir :

- De nombreux auteurs (KHEYRABI 1968, MAERTENS 1969) utilisent des malaxages de matériaux humides. Cependant, on obtient dans ce cas des gonflements très différents entre l'échantillon remanié et le matériau d'origine en place. L'effet des humectations - dessications précédemment subies a clairement été démontré par comparaison des courbes de potentiel de matériaux remaniés, en dessèchement puis réhydratation (De CRECY 1975, TESSIER et al. 1980).
- Des agrégats de petites dimensions, utilisés pour l'évaluation de la porosité texturale, peuvent être considérés comme présentant une structure continue (MONNIER et al, 1973).

C'est cette dernière solution que nous retiendrons.

III - 1-2 Préparation des agrégats de 2 - 3 mm

Ces agrégats de 2 - 3 mm ne se trouvent pas nécessairement à l'état naturel dans le sol. Ils sont obtenus à partir d'un prélèvement, par concassage puis tamisage. Le concassage doit permettre à la quasi totalité de l'échantillon de passer au travers du tamis (3 mm). Les mottes doivent être brisées sans compactage, ce qui aurait pour effet de modifier la porosité texturale. Il faut donc agir avec précaution. De ce fait, le concassage s'effectue, après séchage à l'air de l'échantillon, à l'aide d'un maillet, par petits coups successifs.

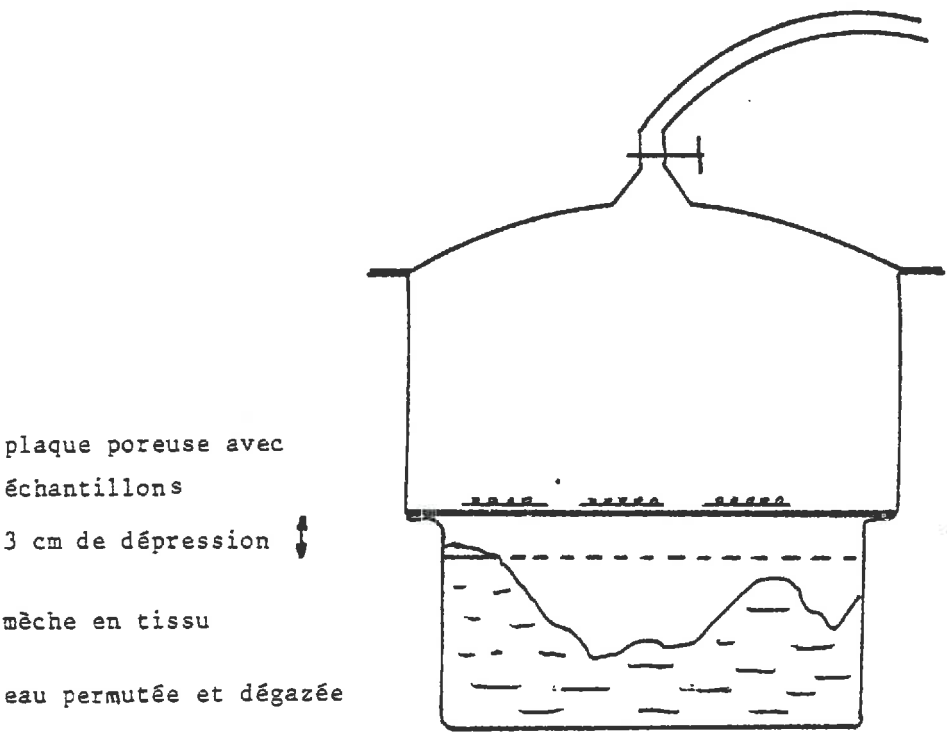


fig. 2 - Schéma du dessiccateur utilisé pour l'humectation des échantillons.

III - 1-3 Réhumectation des agrégats.

Compte tenu du temps dont nous disposions, il n'était pas possible de construire point par point les courbes de gonflement et de retrait afin de mettre en évidence une éventuelle hystéresis.

Plusieurs auteurs sont d'ailleurs d'accord pour affirmer qu'il n'y a qu'un faible effet d'hystéresis sur les courbes de retrait dans les couches de surface des sols cultivés (YONG et WARKENTIN 1975, STENGEL 1979). Il fallait choisir lequel des deux phénomènes étudier. Nous avons opté pour la dessiccation avec réhumectation standard préalable. Ce choix est justifié par un argument technique. Nous avons en effet la possibilité d'obtenir rapidement par évaporation, des points complétant la courbe de retrait obtenue par équilibres de potentiel successifs. On ne peut évaluer le potentiel correspondant à ces points, que si la relation potentiel-teneur en eau est établie en dessiccation. (voir § III 3).

L'objectif de la réhumectation est d'amener l'échantillon au départ à l'état d'hydratation ou de gonflement maximum.

Pour cela, nous devons obtenir l'équilibre avec un potentiel de l'eau le plus faible possible.

Pour ce faire, nous avons utilisé le dispositif, dont le schéma figure à la page ci-contre (figure n° 2) :

Il est composé d'un dessiccateur, contenant, dans sa partie inférieure, de l'eau permutée dégazée. Au dessus, se trouve une plaque poreuse recouverte d'un tissu en coton qui sert de mèche. Chaque échantillon est constitué d'un petit papier filtre sur lequel sont étalés environ trois grammes d'agrégats secs. Il seront disposés sur cette plaque. Ceux-ci en place, on fait fonctionner la pompe à vide une minute environ, de façon à diminuer la pression d'environ 720 millimètres de mercure. Ceci a pour but d'éviter, lors de la réhumectation, des surpressions d'air à l'intérieur des agrégats, qui auraient pour conséquence de les faire éclater. Tous les échantillons d'un même sol sont ainsi laissés, dans un premier temps 48 heures.

Deux points particuliers de ce procédé doivent retenir l'attention. Il s'agit du temps de réhumectation et du niveau de l'eau sous la plaque.

! échantillons	: BI	: BIII	: BIV	: VA	: MA3	: MA4	!
! w % à 0,5 mbars	: 46,5	: 47,6	: 40,2	: 32,6	: 36,6	: 41,4	!
!	: 52,9	: 53,0	: 39,2	: 35,5	: 35,2	: 43,7	!
! w % à 3 mbars	: 31,7	: 30,9	: 32,7	: 32,2	: 31,9	: 34,5	!
!	: 31,5	: 31,1	: 31,5	: 31,6	: 32,4	: 35,4	!
!	:	:	:	:	:	:	!

Tableau n°1 - Humidités pondérales à 0,5 et 3 mbars.

Tableau n°2 - Reproductibilité des mesures d'humidité pondérale après la réhumectation :
Influence de la durée de réhumectation :

! t	: 48 h	: 96 h	!
! w %	: 32,2	: 34,1	!
!	:	:	!

Exemple de Marsillarques A3:

N.B. Voir conséquences sur la courbe de potentiel à la page suivante.

a/ - Choix de la dépression minimale

Un gonflement potentiel au sens strict serait obtenu par l'application d'un potentiel de l'eau nul. L'obtention d'un tel potentiel nécessite l'immersion des échantillons dans l'eau. Il serait alors impossible d'effectuer une mesure de teneur en eau sans que l'échantillon ne s'égoutte. Il est donc nécessaire d'avoir une faible dépression entre les échantillons et le niveau de l'eau. De plus, pour de très faibles dépressions, nous avons constaté une destruction des agrégats, qui perdent leur cohésion. D'autre part, il existe, à ce niveau de potentiel, des ménisques importants entre les agrégats, entre les agrégats et le papier filtre, et des films d'eau autour des agrégats. Il y a donc impossibilité technique de faire des mesures d'humidité ayant un sens. En conséquence, nous avons choisi la dépression la plus faible, qui puisse permettre des mesures de teneur en eau et préserver la géométrie des agrégats. L'expérience a montré que ces conditions sont remplies pour une succion de 3 mbars. Ce choix pose un problème quant à l'évaluation du gonflement potentiel au champ. Il est en effet vraisemblable, que dans le cas d'un engorgement temporaire ou d'une nappe perchée, on obtienne un gonflement correspondant au potentiel nul. Les résultats obtenus sur quelques matériaux à un niveau de dépression de 0,5 mbars montrent des différences d'humidité importantes avec celles obtenues à 3 mbars (tableau 1). Ces écarts sont dus, sans que l'on sache dans quelles proportions, d'une part à la différence de gonflement, d'autre part aux ménisques indésirables dont nous avons précédemment parlé. On remarque, d'ailleurs, que les différences de teneurs en eau aux deux dépressions, sont plus élevées pour les matériaux à texture plus grossière. On peut supposer que pour ceux-ci les ménisques et films d'eau sont plus importants, les aspérités de surface étant plus nombreuses et plus grandes.

b/ - Durée d'humectation

Nous avons choisi au départ un temps de réhumectation de 48 heures. Cependant, dans certains cas, nous avons constaté une absence de variation d'humidité entre 3 mbars de dépression et la première pression appliquée (20 mbars). Cela pouvait laisser supposer une hydratation incomplète du matériau. Nous avons, alors, porté la durée de réhumectation à quatre jours. Nous avons effectivement constaté de légères augmentations des teneurs en eau à 3 mbars (figure 3). Cette difficulté n'est intervenue que dans le cas de nos matériaux les plus argileux. Dans la majorité des cas la durée initialement prévue de 48 heures était suffisante.

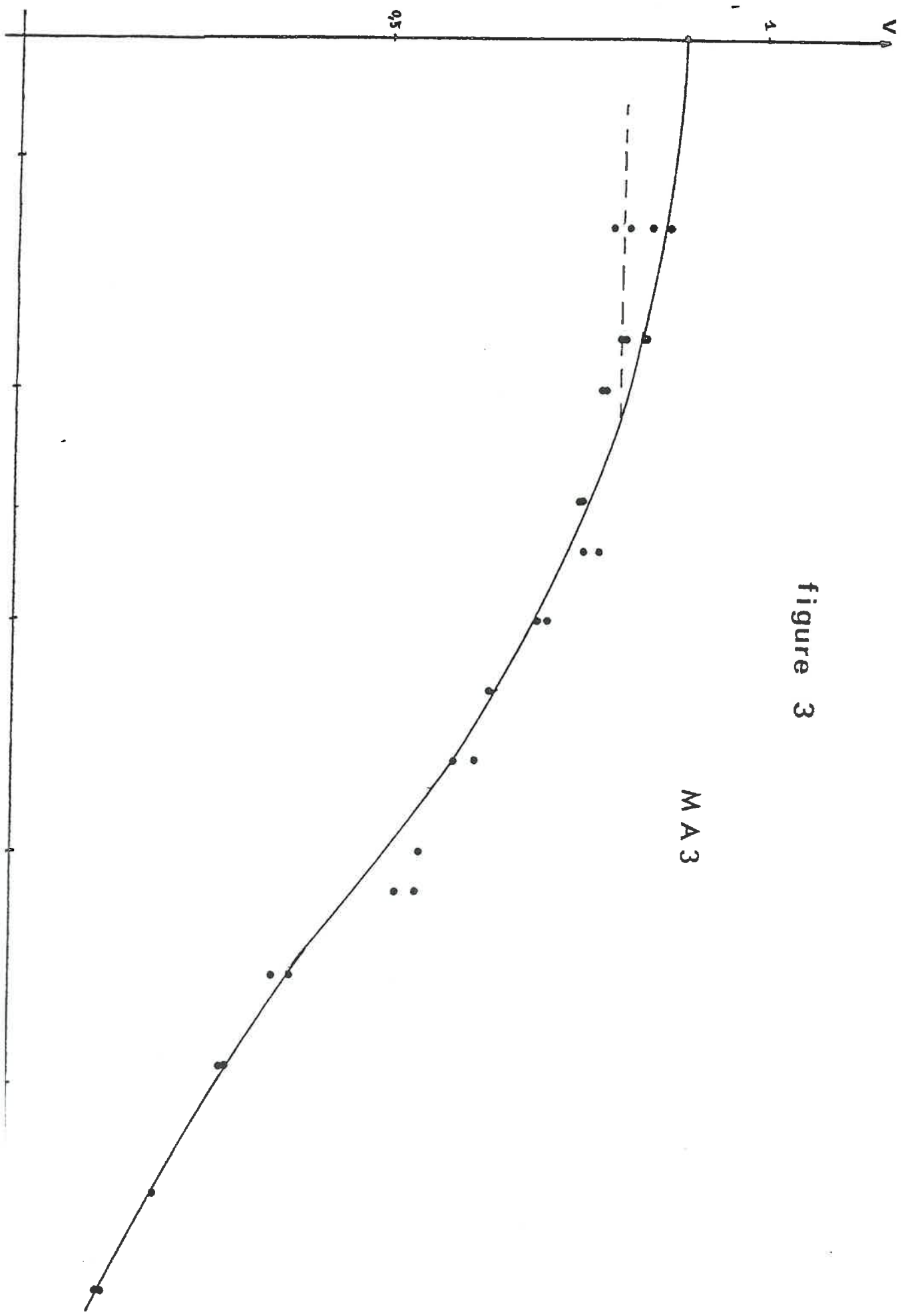
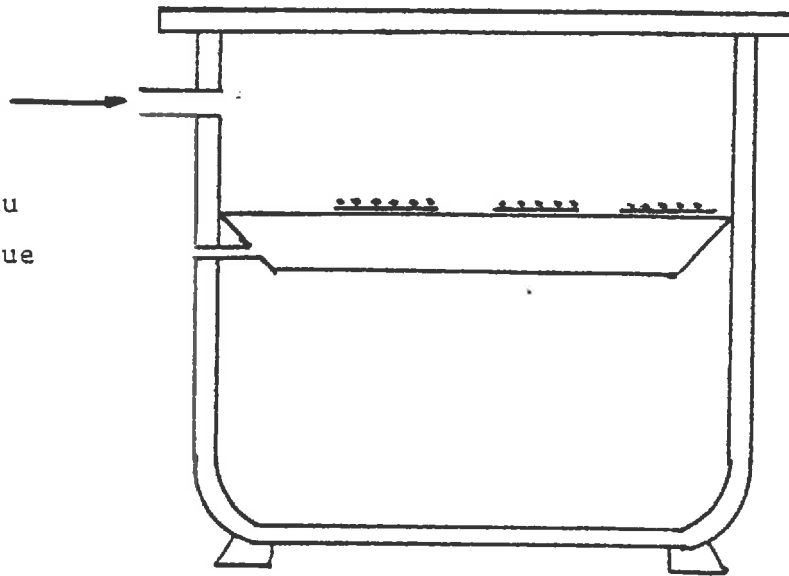


figure 3

MA3

pression



laque poreuse saturée en eau
noche à pression atmosphérique

fig. 4 - Schéma de la presse de Richards

III - 2 RELATION POTENTIEL - TENEUR EN EAU

La relation potentiel - teneur en eau est l'expression de la quantité d'eau retenue dans les agrégats, en équilibre avec une succion donnée. L'élaboration de cette relation comprend deux étapes :

- les échantillons réhumectés par équilibre à 3 mbars sont placés dans une presse de Richards et soumis à des pressions croissantes de 20 mbars à 15 bars, sur des plaques poreuses de qualité correspondant aux pressions appliquées.

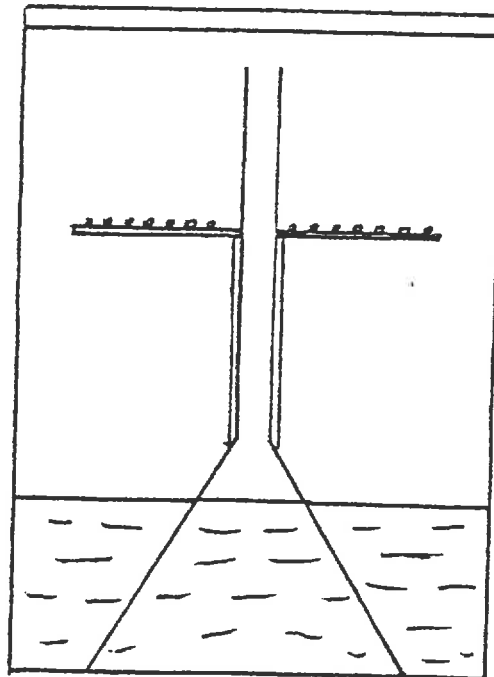
- pour atteindre les pressions élevées nous avons eu recours à des équilibres en phase vapeur.

III - 2-1 Première étape : équilibre de potentiel en presse de Richards

La presse de Richards est une enceinte métallique comportant une arrivée d'air sous pression contrôlée par un manomètre. A l'intérieur, sont introduites des plaques poreuses supportant les échantillons. Sous chacune de ces plaques, se trouve une poche d'air à pression atmosphérique communiquant avec l'extérieur (cf. figure ci-contre). Lorsque l'on applique une pression correspondant à un pF donné, l'eau est chassée à travers la plaque poreuse jusqu'à ce que l'on atteigne le nouvel état d'équilibre. On considère que cet état est atteint au bout de 48 heures. Il est important, qu'au départ, la plaque poreuse soit saturée en eau. Il ne faut pas qu'un effet de pompage, de la part de la plaque, ne se rajoute à l'effet de la pression pneumatique exercée.

Le principal inconvénient de cette technique est le temps nécessaire à l'obtention des équilibres. Pour éliminer l'effet possible de la cinétique de dessiccation sur la teneur en eau à l'équilibre, un échantillon doit être amené à un potentiel donné en passant par tous les équilibres correspondant à des succions plus faibles. Nous avons dû, de ce fait, limiter le tracé des courbes à neuf points, correspondant aux succions suivantes : 20, 100, 300, 500 mbars, 1, 2, 4, 10 et 15 bars.

échantillons



solution d'acide sulfurique

fig. 5 - Schéma des bocaux utilisés pour les équilibres en phase vapeur.

! concentration	:	84,2	:	165,5	:	336,6	:	521,1	!
! en H ₂ SO ₄ en g/l	:		:		:		:		!
! contrainte	:		:		:		:		!
! correspondante	:	35 bars	:	85 bars	:	300 bars	:	800 bars	!
! -----	:		:		:		:		!
! pF	:	4,54	:	4,93	:	5,48	:	5,90	!
!	:		:		:		:		!

Tableau 3 : Contrainte exercée pour une concentration en H₂SO₄ donnée.

III - 2-2 Deuxième étape : équilibres en phase vapeur

III - 2-2 a/ Principe et matériel

Cette technique est basée sur les propriétés déshydratantes de l'acide sulfurique. En fonction de la concentration d'acide, on obtient la contrainte de dessèchement voulue. Le principe de cette technique est très voisin de la précédente. La présence d'acide sulfurique remplit le même rôle que la pression pneumatique exercée. Dans la pratique, les échantillons sont placés dans des bocaux hermétiquement fermés, contenant au fond la solution d'acide sulfurique à la concentration désirée (schéma et tableau ci-contre).

III - 2-2 b/ Avantages et inconvénients

Ce procédé comporte deux inconvénients. Le temps nécessaire à l'obtention de l'équilibre est particulièrement long. Pour être à l'abri de toute mauvaise surprise, il faut compter un délai de quinze jours à trois semaines entre la mise en place des échantillons et leur prélèvement. D'autre part, l'intensité de la déshydratation provoquée par l'acide est très sensible à toute variation de la température (~~voir tableau ci-contre~~). Ceci nous a conduit à travailler dans une pièce climatisée à 20°C, les bocaux étant placés dans un bain thermostaté à la même température. Le principal atout de cette technique réside dans la possibilité d'atteindre des contraintes très élevées, (pressions supérieures à 30 bars soit pF 4,5) qu'il est plus délicat d'obtenir par pression pneumatique. Nous avons employé cette technique à 35 et 85 bars pour l'ensemble des matériaux, ainsi qu'à 300 et 800 bars pour les échantillons qui, à 85 bars, avaient des humidités encore élevées.

Après chaque équilibre, l'humidité pondérale a été déterminée par séchage à l'étuve à 105°C pendant 24 heures.

III - 3 LA COURBE DE RETRAIT

A chaque équilibre de potentiel, nous avons effectué une mesure de volume apparent sur deux prélèvements, par la méthode de la poussée hydrostatique dans le pétrole, d'agrégats précédemment saturés par le même liquide (MONNIER et al 1973) (voir figure 6).

La courbe de retrait exprimant le volume apparent de l'échantillon en fonction de son humidité a été construite, dans un premier temps, avec deux fois onze ou treize points, avec en plus, deux mesures de volume sur échantillons secs (24 heures à l'étuve à 105°C). Ceci est souvent insuffi-

Presse de Richards

Mesure du poids total humide

Saturation des échantillons en pétrole pendant 48 h

essuyage

Mesure de :

+ masse du b cher de pétrole
+ poussée de la nacelle vide

Nacelle : tamis fin en Laiton

Mesure de :

masse du b cher de pétrole
+ poussée de la nacelle vide
+ poussée des agrégats contenus dans
la nacelle

Echantillons :
 tuve à 105 C
pendant 24 h

↓
poids total sec
et tare

W %

par différence : poussée des agrégats

↓
densité du pétrole

↓
densité apparente
des agrégats

fig. 6 : Schéma des étapes de la mesure de densité apparente des agrégats par la méthode de poussée hydrostatique dans le pétrole.

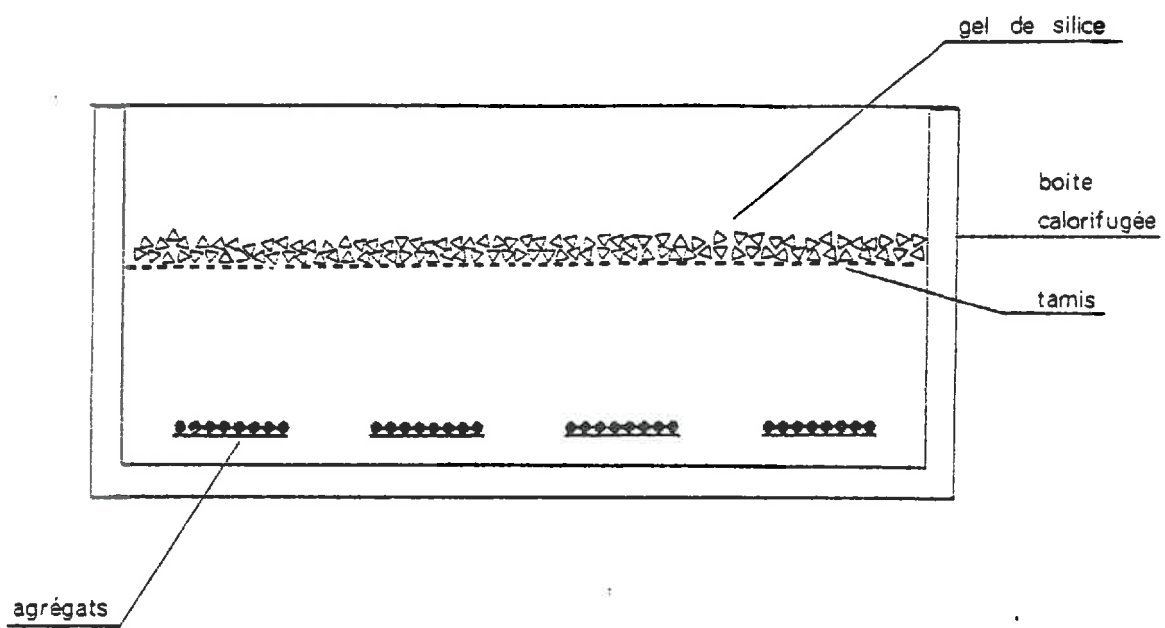


fig. 7 : Schéma du dispositif de séchage par gel de Silice.

sant. Nous avons utilisé pour compléter ces points, une méthode par évaporation continue. Elle consiste à placer, dans le fond d'une boîte fermant hermétiquement, les échantillons réhumectés à 3 mbars. On place au dessus des échantillons un grillage supportant un gel de silice qui assure leur déshydratation (voir fig. 7). On prélève les échantillons plus ou moins rapidement en fonction de la gamme d'humidité désirée. Les résultats ainsi obtenus se situent sur une courbe qu'on peut considérer comme identique à celle obtenue par équilibres, comme le montre l'exemple de la figure n°8 qui confirme ainsi les résultats de STENGEL (1981) obtenus sur mélanges argile-limon. Le gros avantage de cette méthode par évaporation continue est sa rapidité et sa facilité de mise en oeuvre.

III - 4 EXPRESSION DES RESULTATS

Les courbes de retrait sont le plus fréquemment exprimées dans les coordonnées suivantes :

$$+ \frac{W}{\rho_w} \text{ en abscisse : } W = \text{humidité pondérale}$$

$$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3 \text{ Masse volumique de l'eau}$$

$$+ \frac{1}{\rho_d} \text{ en ordonnée : } \rho_d = \text{densité apparente du matériau.}$$

Afin de pouvoir comparer plus aisément nos matériaux nous avons éliminé l'effet de densités de solide différentes en prenant :

+ en ordonnée l'indice des vides (volume des vides rapporté au volume de solide) :

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$$

ρ_s : densité de solide
 ρ_d : densité apparente du matériau

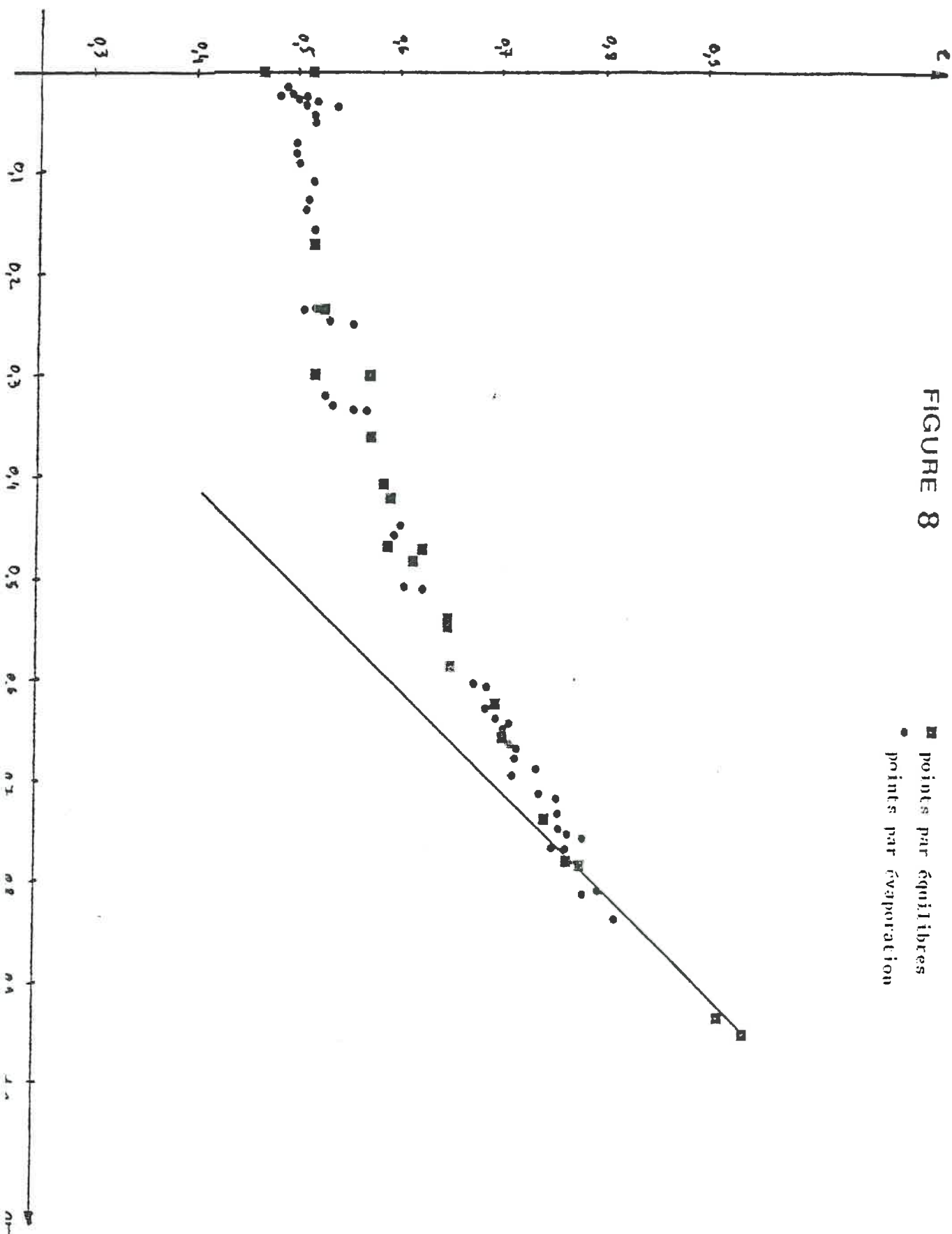
+ en abscisse la grandeur :

$$v = \frac{W}{\rho_w} \rho_s$$

W : humidité pondérale
 ρ_w : densité de l'eau
 ρ_s : densité de solide

qui représente le volume d'eau dans l'échantillon rapporté au volume de solide.

fig. 8 : Influence du mode de déshydratation sur la courbe de retrait.



L'allure des courbes de retrait n'est absolument pas modifiée, il s'agit d'une simple similitude (composé d'une translation et d'une homothétie). Ainsi la droite de saturation se confond avec la première bissectrice.

Pour les courbes de potentiel, en abscisse, sont portées les valeurs de pF : $pF = \log \Psi$ où Ψ est la succion exprimée en millibars. L'humidité en ordonnée est exprimée dans la même unité que pour la courbe de retrait :

$$v = \frac{W}{P_w} \rho_s$$

III - 5 PRESENTATION DES MATERIAUX UTILISES

Nous avons utilisé deux types de matériaux :

- Nous utilisons 17 matériaux naturels, choisis de façon à couvrir une gamme de teneurs en argile étendue, puisque ce constituant est, à priori, celui qui a le plus de chance de faire varier l'activité structurale.

Notre travail concerne essentiellement les horizons de surface pour lesquels la limitation du gonflement due au poids des horizons supérieurs est trop faible pour être prise en compte. Cependant, nous avons été contraints de prendre quelques échantillons du sous-sol (0,5 à 1,5 m). L'interprétation les concernant admet qu'ils sont en position de surface.

- Nous disposons également de quatre argiles pures provenant de matériaux naturels également utilisés (Foigneville, Versailles HB, Marsillargues, les Vignères).

Ces argiles ont été extraites de la façon suivante. Après destruction des matières organiques, l'échantillon a été dispersé à l'hexamétaphosphate de sodium. La capacité d'échange a été saturée par l'ion Ca^{++} . L'argile a ensuite été extraite par sédimentation puis centrifugation.

La présence de ces quatre argiles pures va nous permettre de comparer la courbe de retrait de l'argile avec le comportement du matériau naturel correspondant.

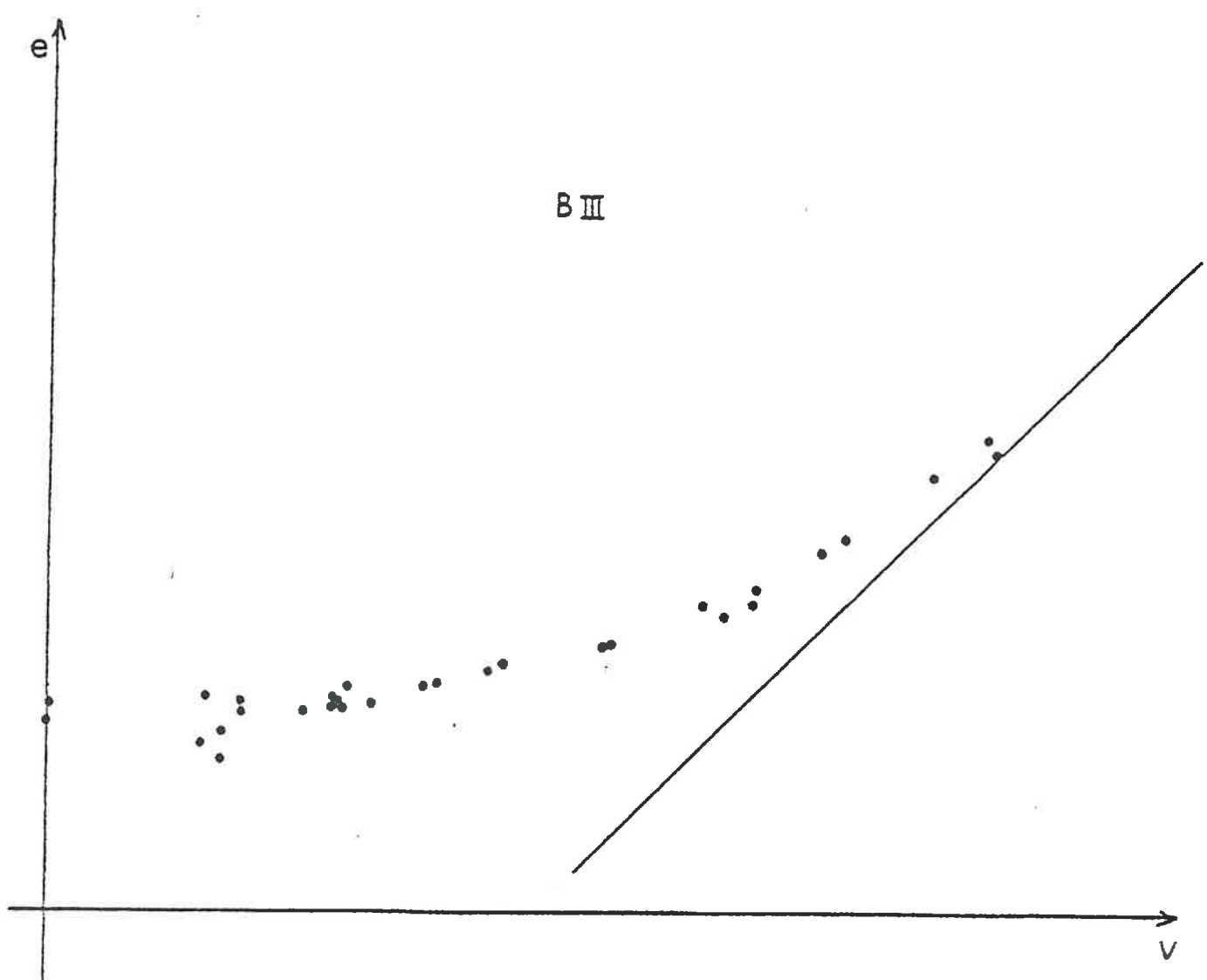


fig. 9 : Courbe de retrait ne permettant pas de définir une droite de saturation expérimentale.

IV - RESULTATS ET INTERPRETATION.

Nous présentons en premier lieu les caractéristiques de nos courbes expérimentales. Nous définirons, ensuite, un gonflement potentiel dont nous verrons les modalités de transposition au gonflement en place.

IV - 1 CARACTERISTIQUES DE LA COURBE DE RETRAIT

IV - 1-1 Domaine saturé

a/ - Définition expérimentale

Nos résultats expérimentaux nous amènent à distinguer deux cas dans l'étude des domaines saturés :

+ Le nombre des points expérimentaux de ce domaine ne permet pas de définir une droite de saturation expérimentale.

Ce cas se présente lorsque la dispersion des points est forte (échantillon LSA), et pour un domaine saturé d'amplitude réduite (échantillons BI, BII, BIII, BIV) (figure 9).

Le point d'entrée d'air est alors déterminé graphiquement comme l'intersection de la courbe de retrait résiduel et de la droite de saturation théorique. Les indices des vides dans le domaine saturé sont obtenus à partir de la valeur expérimentale de v et de l'équation de cette droite, calculée avec la valeur mesurée de la densité de solide ρ_s .

+ Lorsque les points expérimentaux sont suffisamment nombreux, nous avons calculé, par régression, l'équation de la droite de saturation expérimentale. Dans la plupart des cas, celle-ci diffère peu de la droite de saturation théorique, (tableau 4). Cependant, pour trois échantillons (MA4, VA, VB) nous obtenons des droites expérimentales dont la pente est peu différente de 1 (tableau 4), mais situées au-dessus de la droite théorique, ce qui indique la persistance d'un petit volume d'air dans les agrégats (figure 10). Ceci peut-être le résultat :

- de l'insuffisance du vide créé dans les dessiccateurs lors de l'humectation des agrégats.

- de l'existence de constituants peu mouillables dans les matériaux concernés.

Nous avons assimilé ce comportement pseudo-saturé au comportement saturé.

A Cette réserve près, on peut considérer qu'il existe pour tous nos échantillons un domaine saturé .

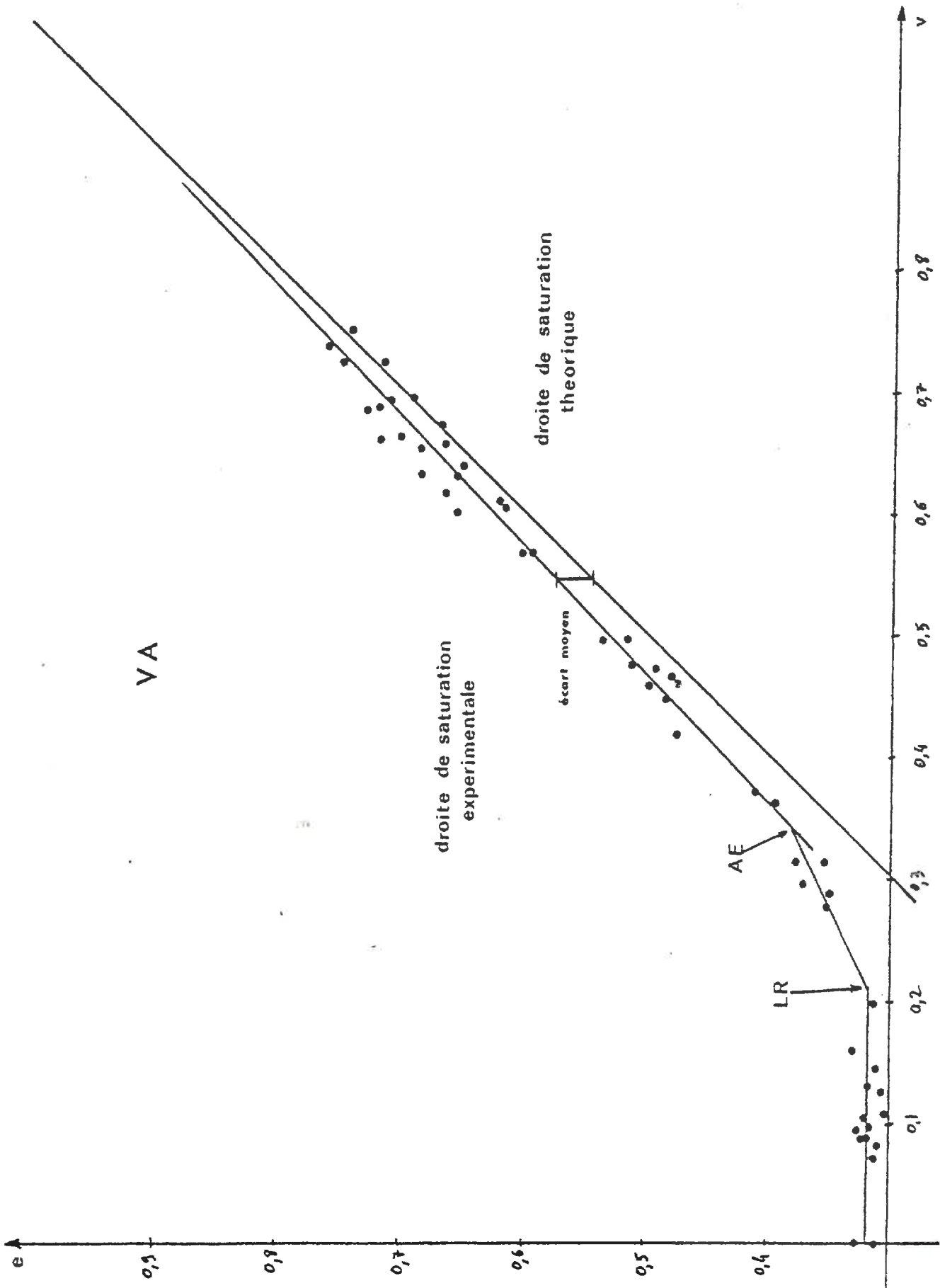


fig.10 : Exemple d'un échantillon présentant une droite de pseudo saturation.

Droites de saturation expérimentales				pseudo-saturation : écart moyen en ordonnée entre courbes théorique et expérimentale
n	r	équations	échantillon	
20	0,998	$e = 1,039v - 0,049$	SN75	
18	0,997	$e = 1,040v - 0,031$	SNO	
19	0,971	$e = 1,119v - 0,080$	MA3	
20	0,964	$e = 1,034v - 0,025$	MA5	
18	0,985	$e = 1,050v - 0,008$	MA4	0,0325
27	0,994	$e = 0,956v + 0,072$	VB	0,0425
29	0,981	$e = 0,944v + 0,059$	VA	0,029

Tableau 4 : Equations des droites de saturation expérimentales.

Tableau 5 : Valeurs des caractéristiques des courbes de retrait de nos
17 matériaux naturels.

Echantil lons	A %	$e_{0,48}$	$e_d = e_{LR}$	e_{AE}	$\psi_{AE}(pF)$	ψ_{LR}	Δe_{sat}	Δe_r	Δe_{max}
BI	29,4	0,86	0,42	0,70	2,2	4,8	0,16	0,28	0,44
BII	22,4	0,95	0,50	0,77	1,8	4,7	0,18	0,27	0,45
BIII	18,4	0,84	0,56	0,78	1,4	5	0,06	0,22	0,28
BIV	23,7	0,87	0,47	0,70	2,1	4,9	0,17	0,23	0,40
VA	53,4	0,88	0,32	0,34	4	5,4	0,54	0,02	0,56
VB	55,6	0,93	0,33	0,40	4,1	5,5	0,53	0,07	0,60
MA3	40	0,89	0,445	0,60	3,6	5,1	0,29	0,155	0,445
MA4	49,3	0,97	0,48	0,63	3,7	4,8	0,34	0,14	0,48
MA5	52,7	1,07	0,44	0,80	3,1	5,5	0,27	0,36	0,63
ALO	19	0,76	0,50	0,55	2,5		0,21	0,05	0,26
AL2	19	0,85	0,55	0,65	2,2	4,2	0,20	0,10	0,30
P3	19,1	0,75	0,47	0,51	2,7	4,9	0,24	0,04	0,28
LSA	11,3	0,81	0,65	0,65	2,25		0,16	0	0,16
SP	35	0,83	0,42	0,59	3,2		0,24	0,17	0,41
SN75	64,5	1,51	0,40	0,74	4,5	5,3	0,77	0,34	1,11
SNO	64,9	1,11	0,39	0,56	4,3		0,55	0,17	0,72
VER	28 5	0,95	0,52	0,78	2,1		0,17	0,16	0,33

b/ - Amplitude

Le domaine saturé est déterminé par deux bornes qui sont :

+ le point d'entrée d'air comme borne inférieure.

+ le point de la droite de saturation correspondant à l'humidité à 3 mbars, comme borne supérieure. L'amplitude du domaine saturé est estimée par :

$$\Delta e_{\text{sat}} = e_{0,48} - e_{\text{AE}}$$

$e_{0,48}$: indice des vides à pF 0,48 (3mbars)

e_{AE} : indice des vides à l'entrée d'air.

L'amplitude de saturation est extrêmement variable suivant les échantillons (tableau 5), à la fois en valeur absolue et par rapport au retrait potentiel $\Delta e_{\text{max}} = e_{0,48} - e_d$, où e_d est l'indice des vides à l'état sec.

Δe_{sat} est étroitement lié à la teneur en argile (A) suivant l'équation :

$$\Delta e_{\text{sat}} = 0,0092 A - 0,0305 \quad n = 17 \quad r = 0,870 \quad ***$$

On ne peut conclure que difficilement à une influence de la position des bornes sur l'amplitude du domaine saturé. Les relations avec les bornes sont les suivantes :

+ borne inférieure e_{AE} : $n = 17$ $r = 0,431$ (significatif à $p = 0,10$)

+ borne supérieure $e_{0,48}$: $n = 17$ $r = 0,738$, mais un seul point est responsable de l'essentiel de la liaison. Avec $n = 16$, $r = 0,474$ (significatif à $p = 0,10$).

L'amplitude du domaine de saturation est également liée avec l'indice des vides à l'état sec par la relation :

$$\Delta e_{\text{sat}} = - 1,556 e_d + 1,021 \quad n = 17 \quad r = 0,716 \quad **$$

L'indice des vides à l'état sec peut-être considéré comme un élément prédictif de l'amplitude du domaine de saturation. Il semble cependant moins précis que la seule teneur en argile.

c/ - Point d'entrée d'air

Le potentiel au point d'entrée d'air est très variable suivant les échantillons. Exprimé en pF, il est très lié à la teneur en argile :

$$\log |\Psi_{AE}| = 0,049 A + 1,186 \quad r = 0,901^{***} \quad n = 17$$

Pour le point d'entrée d'air comme pour d'autres caractéristiques de la courbe de retrait, c'est la teneur en argile qui constitue l'élément prédictif le plus fiable. Elle est plus performante que les caractéristiques de la courbe

facilement mesurables. Nous en avons, ici, une nouvelle confirmation en examinant le lien de Ψ_{AE} avec l'indice des vides à l'état sec (e_d) et avec l'indice des vides à 3 mbars ($e_{0,48}$) :

$$+ \text{ entre } \Psi_{AE} \text{ exprimé en pF et } e_{0,48} : n = 17 \quad r = 0,572 *$$

$$+ \text{ entre } \Psi_{AE} \text{ exprimé en pF et } e_d : n = 17 \quad r = 0,729^{***}$$

$$\Psi_{AE} \text{ (en pF)} = - 8,442 e_d + 6,824$$

Pour les matériaux argileux ($A > 50\%$), le potentiel à l'entrée d'air correspond à une succion élevée, voisine de 10 bars. Il y a une exception (MA5) pour laquelle la distribution des points expérimentaux introduit une imprécision sur la détermination du point d'entrée d'air, et donc, sur la valeur de Ψ_{AE} (nous avons éliminé pour la suite de la discussion les résultats concernant ce matériau).

Cette succion élevée à l'entrée d'air a deux conséquences importantes :

+ pour ces matériaux argileux, dans une large gamme de potentiel l'analyse de la porosité distinguant porosité texturale et structurale permet également d'évaluer directement porosité saturée et porosité libre à l'air. En effet, l'étude morphologique de la porosité structurale, pratiquée sur les sols VA et VB, indique qu'à l'état saturé en place, les pores structuraux ont dans leur quasi totalité des dimensions supérieures à quelques dizaines de microns (FIES travaux non publiés). On peut donc les considérer comme vide d'eau à une succion de l'ordre de 100 mbars. Entre cette valeur de la succion et Ψ_{AE} (~ 10 bars), la porosité texturale reste saturée, la structurale remplie d'air en quasi totalité. En particulier si l'on choisit pour distinguer micro et macroporosité un seuil de succion situé dans cet intervalle, la microporosité correspond, à ce seuil de succion, à la porosité texturale.

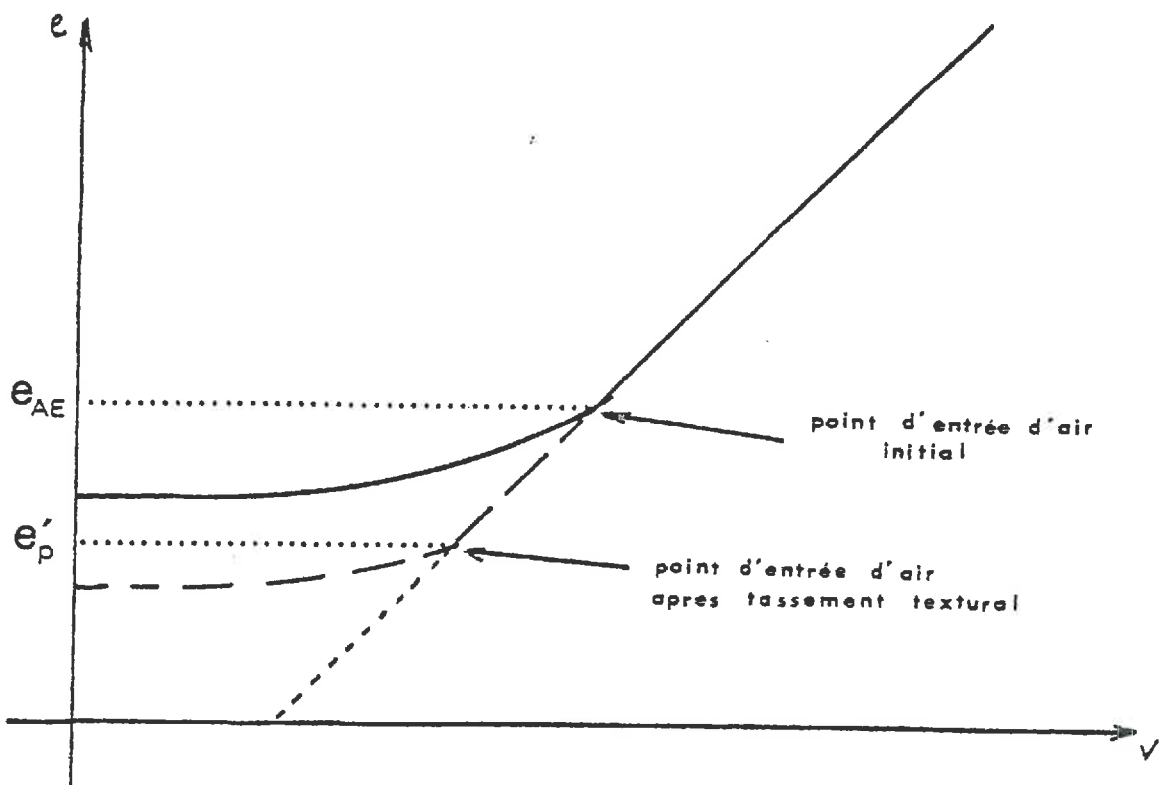


fig. 11 : Conséquence d'un tassement textural sur la courbe de retrait.

+ comme l'indiquait des travaux expérimentaux antérieurs sur le compactage (FAURE et FIES 1972, FAURE 1978), ces matériaux présentent peu de risques de tassement textural. En effet, tant que la porosité texturale est saturée, un tassement textural ne peut avoir lieu que par consolidation, c'est-à-dire par perte d'eau sous l'effet de la contrainte. Cette consolidation n'a lieu que si l'on exerce une contrainte P supérieure à la succion Ψ_p du sol en place.

Si l'on applique une charge P telle que $\Psi_{AE} > P > \Psi_p$, en admettant que le temps d'application est suffisamment long pour provoquer la consolidation, on obtiendra à l'équilibre un indice des vides du matériau $e_p > e_{AE}$ (indice des vides à l'entrée d'air). L'effet du tassement par la charge mécanique P sera alors analogue à celui d'une déshydratation. On peut donc admettre que la courbe de retrait gonflement n'est pas modifiée, et qu'en conséquence, il n'y a pas de modification de l'organisation texturale du matériau. On ne risque un éventuel tassement que si la charge P est supérieure à la succion au point d'entrée d'air Ψ_{AE} . Dans ce cas, on obtiendrait à l'équilibre un indice des vides $e'_p < e_{AE}$, la porosité texturale restant saturée (figure 11). La réalisation d'une telle hypothèse est très peu probable compte tenu des pressions exercées le plus fréquemment par les engins agricoles par rapport aux valeurs de Ψ_{AE} de ce type de matériau.

Quant à l'humidité au point d'entrée d'air v_{AE} , elle n'est liée étroitement à aucune des caractéristiques facilement mesurables de la courbe de retrait, ni à la constitution des échantillons.

Relation de v_{AE} avec :	A %	$r = 0,269$	NS
	$e_{0,48}$	$r = 0,290$	NS
	e_d	$r = 0,540$	*

IV - 1-2 Domaine non saturé

a/ - Amplitude du retrait résiduel

L'amplitude du retrait résiduel Δe_r est définie comme la différence entre l'indice des vides à l'entrée d'air e_{AE} et l'indice des vides à l'état sec e_d (ou l'indice des vides à la limite de retrait e_{LR}).

$$\Delta e_r = e_{AE} - e_d = e_{AE} - e_{LR}$$

On constate (tableau 5) que l'amplitude de retrait résiduel, nulle pour notre échantillon le moins argileux (LSA), atteint sa valeur maximale pour les échantillons à teneur en argile comprise entre 20 et 30 %, puis décroît sensiblement pour les échantillons plus argileux, jusqu'à une teneur de l'ordre de 60 %. Ceci, à la fois en valeur absolue Δe_r , ou en valeur relative $\frac{\Delta e_r}{\Delta e_{\max}}$

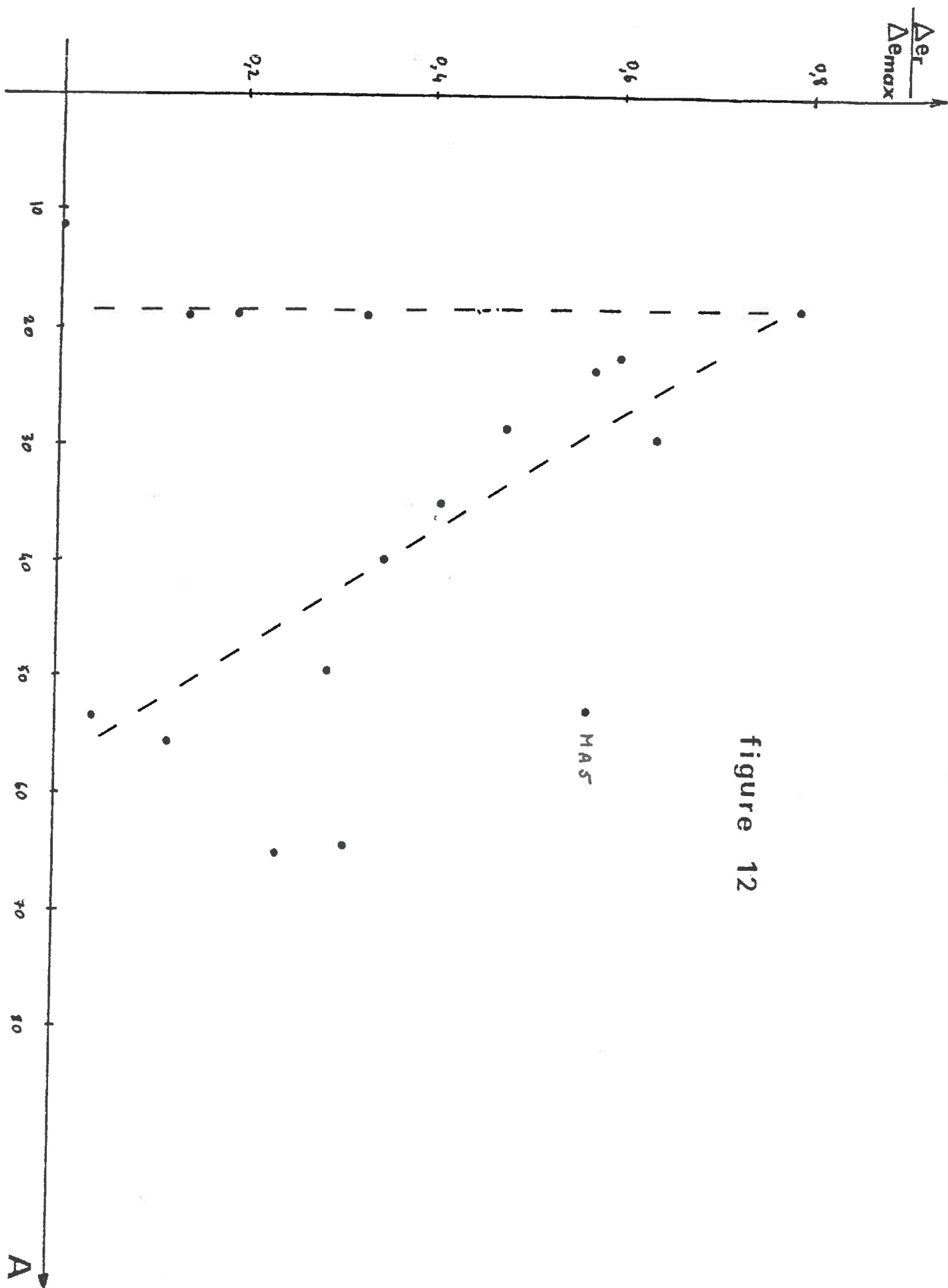


figure 12

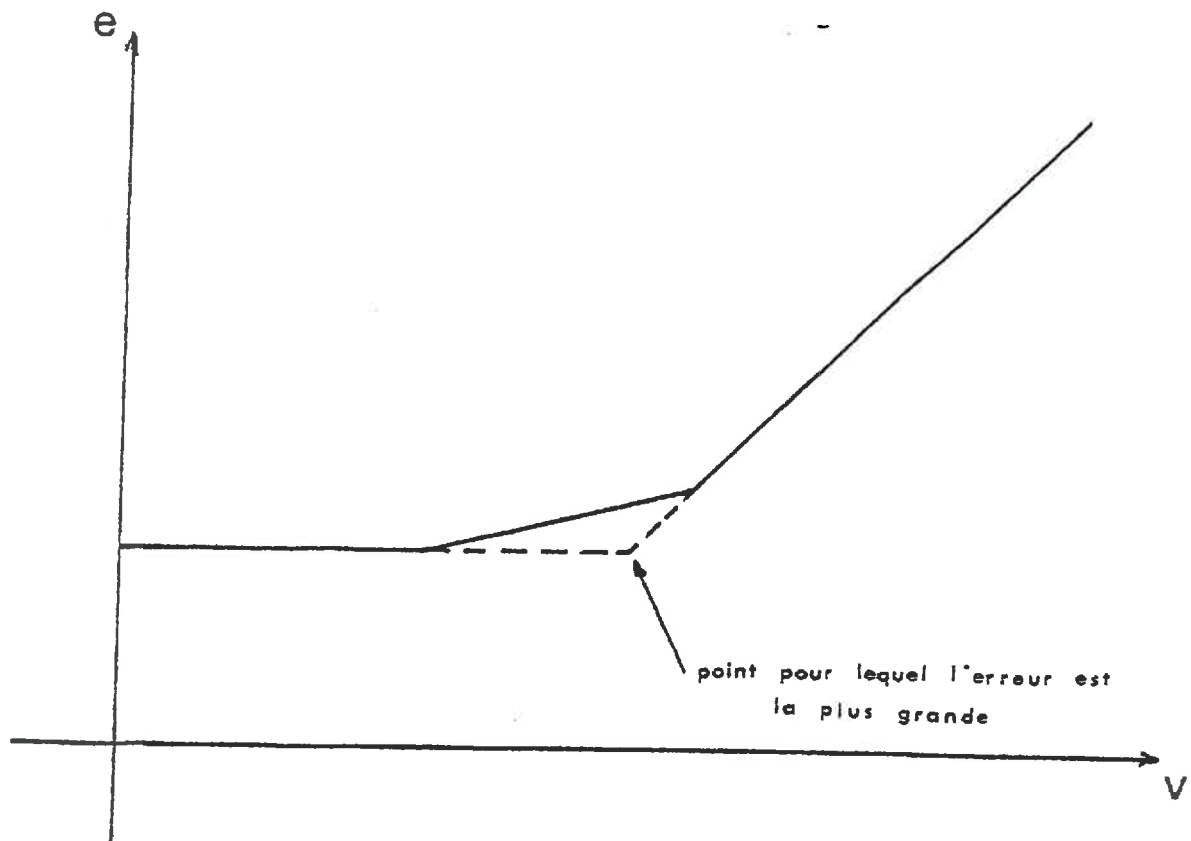


fig. 12 : Approximation de PELTIER.

!	Echantillons	:	n	:	r	!
!	VA	:	38	:	0,982	!
!	VB	:	28	:	0,993	!
!	MA4	:	36	:	0,990	!
!	SN75	:	25	:	0,999	!

Tableau 6 : Corrélations entre les indices des vides expérimentaux et les indices des vides obtenus par l'approximation de PELTIER sur nos échantillons les plus argileux.

(figure 12). Les valeurs obtenues pour les échantillons les plus argileux (SNO - SN75), suggèrent un accroissement dans la classe texturale des "argiles" (triangle de texture du GEPPA). Ces variations sont en accord avec la typologie des courbes de retrait obtenue par STENGEL sur des mélanges artificiels :

- pour $A < 15\%$: il n'existe pas de retrait résiduel.
- quand $15\% < A < 60\%$ le retrait résiduel est lié à l'interaction argile-squelette. Il apparaît en outre, sur nos échantillons naturels, que son amplitude décroît avec A.
- pour $A > 60\%$: la courbe de retrait résiduel a l'allure de celle de l'argile pure. Il n'est donc pas étonnant qu'elle ne vérifie pas la relation existant pour des teneurs plus basses.

Pour des textures légères ou argileuses, l'approximation de PELTIER permet de tracer une courbe de retrait avec une prévision acceptable :

+ pour les textures à faible teneur en argile ($A < 15\%$), on peut agir ainsi en toute rigueur, puisque la courbe de retrait est alors la juxtaposition d'une horizontale avec la droite de saturation.

+ pour les textures argileuses ($A > 50\%$), les résultats calculés à partir de la valeur expérimentale de $e_{0,48}$ et de e_d , par l'approximation de PELTIER sont étroitement corrélés aux résultats expérimentaux (tableau 6). L'erreur maximale qui est l'écart entre la limite de retrait, au sens de PELTIER, et la courbe expérimentale (figure 13), est en moyenne de 12 % pour nos différents échantillons. Dans de nombreux cas, pour la pratique de l'analyse de la porosité au champ, et compte tenu de la dispersion des mesures de la densité du sol en place, elle peut être tolérable.

b/ Limite de retrait

b - 1 Définition expérimentale

L'existence d'un domaine de teneur en eau pour lequel il n'y a plus de variation de volume du matériau apparaît de façon claire sur mélanges artificiels argile-limon pour des teneurs en argile allant de 15 à 60 % (STENGEL 1981).

La transition, du domaine de retrait résiduel au domaine de non-retrait, apparaît clairement par l'intermédiaire d'une variation brusque de la pente de la courbe de retrait. L'existence d'une discontinuité et donc d'une limite de retrait au sens strict, ne repose cependant sur aucun support théorique.

Nous l'avons admise pour nos matériaux naturels, aucune de nos courbes n'apportant de contradiction à cette hypothèse.

Dans quelques cas nous avons renoncé à déterminer cette limite de retrait. La faible pente du domaine de retrait résiduel ou la dispersion des valeurs expérimentales ne permettait pas de la placer sans ambiguïté (échantillons SP, SAO).

b - 2 Potentiel et teneur en eau

Les valeurs de potentiel à la limite de retrait Ψ_{LR} exprimées en pF et les teneurs en eau v_{LR} correspondantes figurent au tableau. Ψ_{LR} varie entre 4,2 et 5,5 bars.

A ce niveau de contrainte hydrique, on peut considérer qu'il n'y a plus d'effet d'interaction squelette-argile sur la rétention de l'eau. On se situe, en effet, dans une gamme de succions pour lesquelles l'eau extraite est très vraisemblablement de l'eau interfoliaire. D'autre part, lorsque la teneur en argile est élevée, les propriétés de déformation du matériau sont fortement dépendantes des propriétés mécaniques de l'argile dont la cohésion devient très forte (KEZDI 1974). On peut donc supposer que l'hypothèse de STENGEL suivant laquelle la limite de retrait dans un matériau complexe argile-squelette dépend exclusivement des propriétés de l'argile, s'applique à nos échantillons naturels. La relation entre l'humidité à la limite de retrait v_{LR} et la teneur en argile (A) semble le confirmer.

$$n = 13 \quad r = 0,739^{**} \quad v_{LR} = 0,0027 A + 0,094$$

Sur mélanges artificiels, il semble par ailleurs, que le potentiel à la limite de retrait du mélange coïncide avec celui du point d'entrée d'air de l'argile pure. La vérification de cette conclusion dans le cas de nos matériaux naturels supposerait que la limite de retrait soit déterminée par un comportement de l'argile provenant d'un niveau d'organisation acquis dès la première organisation et non modifié par la suite.

Les succions aux limites de retrait de nos matériaux naturels vont de 50 à 320 bars. Les succions aux points d'entrée d'air des argiles correspondantes vont elles de 200 à 400 bars. Cependant nous ne pouvons conclure à l'équivalence des deux données compte tenu des incertitudes sur les déterminations graphiques des humidités à l'entrée d'air de l'argile v_{AE} et à la limite de retrait du matériau naturel v_{LR} .

On ne peut toutefois infirmer l'hypothèse issue des études sur mélanges artificiels et argiles pures.

IV - 2 GONFLEMENT POTENTIEL - GONFLEMENT EN PLACE.IV - 2-1 Retrait ou gonflement potentiel.

Le gonflement potentiel est la caractérisation de l'activité structurale la plus fréquemment utilisée. Il est considéré comme un test permettant de classer des matériaux. La connaissance de sa relation avec les comportements structuraux en place permet de l'utiliser comme outil de prévision.

L'expression la plus fréquente du gonflement est la suivante :

$$\frac{\text{volume humide} - \text{volume sec}}{\text{volume sec}} = \frac{V_w - V_d}{V_d}$$

en indice des vides cela donne :

$$\frac{V_w - V_d}{V_d} = \frac{\frac{1}{\rho_d} - \frac{1}{\rho_{dd}}}{\frac{1}{\rho_{dd}}} = \frac{e - e_d}{e_d + 1}$$

où : ρ_d : densité (masse de sol sec rapportée au volume humide)
 ρ_{dd} : densité à l'état sec
 e_d : indice des vides à l'état sec.

La définition du gonflement potentiel que nous adoptons est donc :

$$G_p = \frac{e_{0,48} - e_d}{e_d + 1}$$

Cherchant des moyens de prévision de la fissuration d'un sol en place et de son intensité, il apparaît nécessaire, dans un premier temps, de chercher parmi les caractéristiques couramment déterminées par l'analyse de sol, celles qui influent sur le gonflement potentiel.

Deux éléments facilement déterminables, peuvent constituer des éléments prédictifs du gonflement potentiel, avec possibilité de recouplement. Il s'agit d'une part de la teneur en argile et d'autre part de l'humidité à 3 mbars ($V_{0,48} = e_{0,48}$).

$$G_p = 0,0085 A + 0,0224 \quad n = 17 \quad r = 0,899 \quad ***$$

$$G_p = 0,847 e_{0,48} - 0,463 \quad n = 17 \quad r = 0,897 \quad ***$$

La nature de notre population ne permet pas de voir l'effet éventuel du squelette : cet effet est, à priori, sensible pour de faibles teneurs en

argile (FIES et STENGEL 1981), mais notre nombre d'échantillons à faible teneur est insuffisant. De même, pour l'éventuel effet négatif de la matière organique, notre population ne présente pas une variabilité suffisante de cette caractéristique pour chacune des classes de teneur en argile.

Les argiles gonflantes ayant souvent des CEC élevées on pouvait s'attendre à trouver une relation plus forte entre le gonflement potentiel et la CEC qu'entre le gonflement potentiel et la teneur en argile. Ceci est faux dans notre cas. Nous trouvons :

$$G_p = 0,0143 \text{ CEC} + 0,0612 \quad r = 0,752^{***} \quad n = 17$$

Parmi les explications possibles, il y a la présence de chlorites gonflantes dans certains échantillons (VA,VB), dont la capacité d'échange est faible pour des smectites.

L'effet de l'argile sur le gonflement potentiel, peut être analysé par son effet sur chacune des deux bornes servant à la définition de ce gonflement.

La borne inférieure e_d est liée à la teneur en argile par la relation :

$$e_d = - 0,0038 A + 0,6004 \quad n = 17 \quad r = 0,782^{***}$$

$$A \% < 65 \%$$

Ce résultat est très voisin de celui obtenu par SMITH, FOX et COUGHLAN et récemment confirmé par J.C. FIES. SMITH et al. trouvaient, pour une gamme de teneur en argile inférieure à 54 % :

$$e_d = - 0,0022 A + 0,533 \quad r = 0,36^*$$

La borne supérieure $e_{0,48}$ varie également en fonction de la teneur en argile :

$$e_{0,48} = 0,0072 A + 0,6736 \quad n = 17 \quad r = 0,722^{**}$$

La comparaison des pentes, fait apparaître que l'effet de la teneur en argile sur la différence $e_{0,48} - e_d$ est due pour un tiers à sa liaison avec e_d et pour deux tiers à ses variations avec $e_{0,48}$.

$$\left[e_{0,48} - e_d = 0,011 A + 0,0732 \quad n = 17 \quad r = 0,88^{***} \right]$$

!	Pression	:	pF	:	A	:	A + LF	!
!	en bars	:		:		:		!
!		:		:		:		!
!	0,1	:	2	:	$A < 5$:	$A + LF < 5$!
!		:		:		:		!
!	0,2	:	2,3	:	$A \leq 5$:	$5 < A + LF \leq 15$!
!		:		:		:		!
!	0,3	:	2,5	:	$5 < A \leq 15$:	$15 < A + LF \leq 30$!
!		:		:		:		!
!	0,5	:	2,7	:	$15 < A \leq 40$:	$30 < A + LF \leq 65$!
!		:		:		:		!
!	1	:	3	:	$A > 40$:	$A + LF > 65$!
!		:		:		:		!

Tableau 7 : potentiel de l'eau à la capacité au champ suivant la texture du matériau. (d'après CHAMAYOU).

IV - 2-2 Amplitude du retrait en place

Nous avons discuté en introduction la nécessité de prendre en compte l'amplitude des variations d'humidité probables en place, pour aboutir à l'évaluation quantitative de l'activité structurale. Cette prise en compte se justifie :

+ pour comparer les matériaux : suivant leur constitution, l'amplitude des variations d'humidité va varier.

+ pour prévoir une évolution structurale in-Situ. Dans ce cas, une véritable prévision devra intégrer les mouvements probables de l'eau et une modélisation de l'évolution hydrique des couches de surface. Ceci est actuellement impossible. On ne peut que choisir des bornes d'intervalle d'humidités correspondant à des cas typiques, à partir desquels on peut espérer discuter le sens des variations dans les cas intermédiaires.

2-2 a/ - Discussion des bornes

a1) Borne supérieure

C'est la borne correspondant à l'humidité rencontrée, la plus élevée. Ses deux extrêmes sont l'humidité au potentiel nul dans le cas d'une nappe perchée ou d'une montée générale de la nappe phréatique, et l'humidité à la capacité au champ dans le cas d'un sol ressuyant suffisamment vite, pour qu'au niveau textural on ne dépasse pas cette valeur d'équilibre.

Dans le cas d'un sol subissant des périodes "d'excès d'eau", quelle qu'en soit la cause, nous prendrons l'indice des vides correspondant à l'humidité à pF 0,48, en gardant à l'esprit le pourquoi de ce choix et les réserves faites à ce propos dans le paragraphe matériel et méthodes.

Pour un sol ressuyant bien, le problème est plus délicat : la capacité au champ est une notion peu fondée en théorie, dont l'intérêt réside dans les applications qu'on en fait. La valeur du potentiel correspondant est variable suivant la texture. Le choix de cette valeur pour une texture donnée diffère suivant les auteurs. Nous avons retenu les valeurs citées par CHAMAYOU (1975) (tableau 7). Nous avons déterminé ainsi l'humidité à la capacité au champ puis l'indice des vides correspondant.

Soulignons bien, que ce faisant, nous admettons que la relation potentiel-teneur en eau de nos agrégats reste valable in-situ. Nous admettons donc qu'il n'y a pas de limitation mécanique de leur gonflement due au frottement latéral et au poids de la terre sus-jacente. Ceci n'est vrai, en toute rigueur, qu'à proximité de la surface. On peut l'admettre, en simplifiant,

pour l'épaisseur de la couche travaillée, le volume de pores structuraux étant fréquemment^m suffisant pour considérer que le gonflement est libre. Le cas de l'évolution structurale dans les couches cultivées en semis direct permanent pose à cet égard un problème. L'hypothèse de gonflement libre a peu de chance de rester valable, après quelques années, sur toute l'épaisseur de l'ancienne couche travaillée.

Des études sur les propriétés hydrodynamiques des sols en semis direct, conduites à la station d'Avignon, indiquent cependant, que la courbe de potentiel obtenue sur de petits éléments structuraux reste applicable in-situ. Mais la relation potentiel-teneur en eau est modifiée par rapport au sol travaillé.

a2) Borne inférieure

C'est la borne, aux conditions les plus sèches rencontrées sur le terrain. En surface, les mottes sont soumises à la demande climatique. La borne inférieure correspond alors à un séchage à l'air. L'humidité pondérale après séchage à l'air est très faible. Le point correspondant sur la courbe de retrait se situe vraisemblablement dans la plupart des cas, dans le domaine de non-retrait. Nous prendrons alors l'indice des vides textural sec comme borne inférieure.

A partir d'une certaine profondeur, l'évaporation devient négligeable. L'eau n'est extraite que par les racines. On admet généralement que celles-ci peuvent pomper l'eau jusqu'à une succion de 16 bars (pF 4,2). Nous prendrons l'indice des vides à ce potentiel comme borne inférieure pour le fond de la couche travaillée. Entre la surface et ce dernier horizon, il y a, dans les conditions les plus sèches, un gradient d'humidité, et donc des bornes possibles, intermédiaires entre les deux valeurs précédemment citées.

b/ - Les gonflements en place

A l'aide des bornes précédemment retenues, nous avons défini, en plus du gonflement potentiel, trois types de gonflement. Ils sont calculés de la façon suivante :

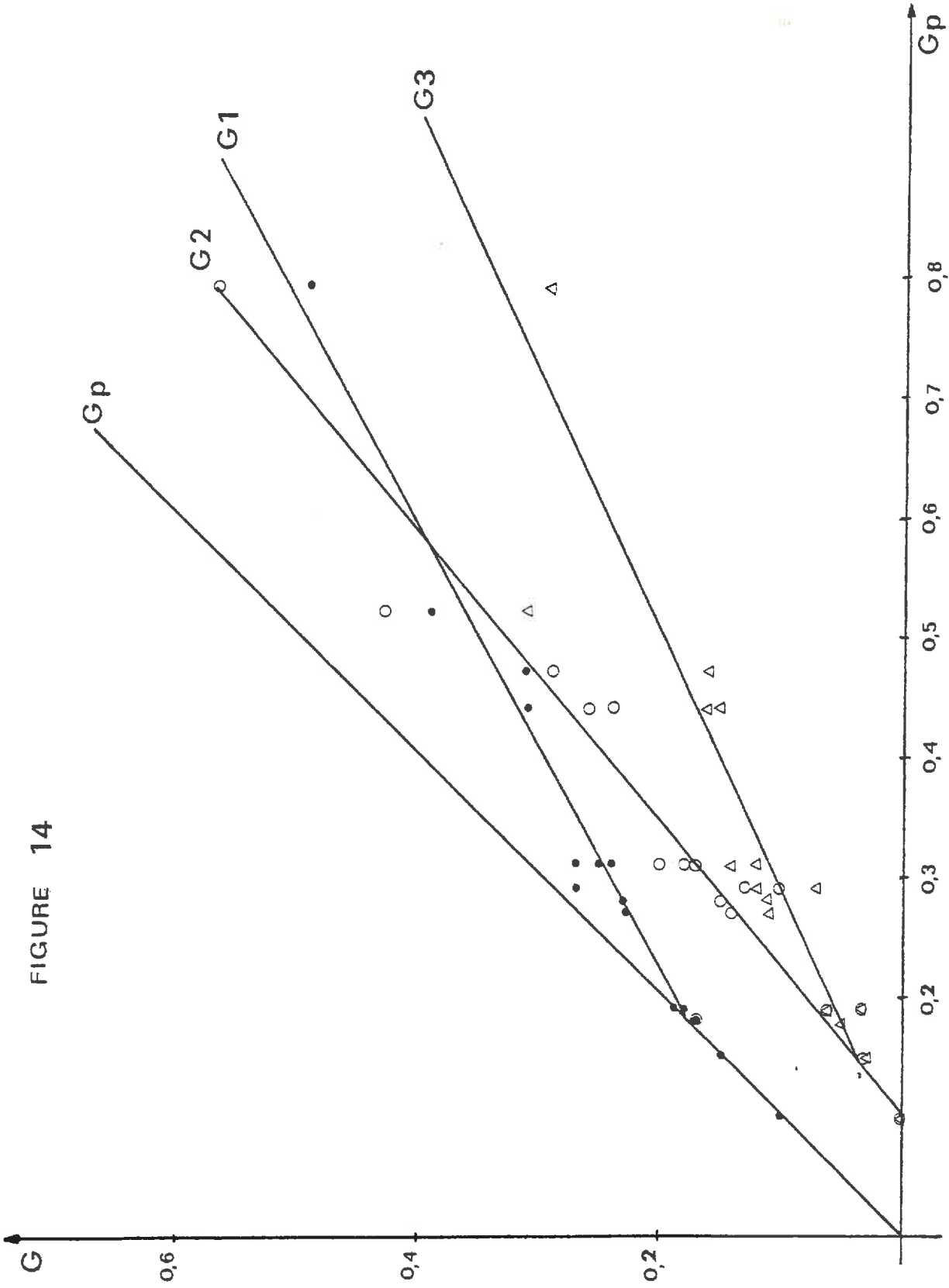
$$G_{\text{potentiel}} = \frac{e_{0,48} - e_d}{e_d + 1}$$

$$G_1 = \frac{e_{0,48} - e_{4,2}}{e_{4,2} + 1}$$

$$G_2 = \frac{e_{cc} - e_d}{e_d + 1}$$

$$G_3 = \frac{e_{cc} - e_{4,2}}{e_{4,2} + 1}$$

FIGURE 14



e_{cc} : indice des vides à la capacité au champ.

Nous avons exprimé chacun de ces gonflements en fonction du gonflement potentiel. Nous trouvons les droites de régressions suivantes (voir fig.14)

$$\begin{array}{lll} G_1 = 0,540 G_p + 0,081 & r = 0,978 & *** \\ G_2 = 0,835 G_p - 0,086 & r = 0,959 & *** \quad n = 17 \\ G_3 = 0,458 G_p - 0,0296 & r = 0,920 & *** \end{array}$$

Les coefficients de corrélation élevés que nous obtenons nous permettent d'utiliser ces régressions pour l'analyse comparative de nos gonflements.

Les pentes de nos équations sont toutes positives. Ceci signifie que quelle que soit l'hypothèse retenue pour les bornes du gonflement probable en place, le classement des matériaux n'est pas sensiblement modifié. Cet aspect justifie l'emploi du gonflement potentiel en tant que critère de comparaison des matériaux. Un de ses avantages est d'être le plus discriminant puisque sa gamme de variation est la plus étendue. Cependant, il existe des variations importantes d'un gonflement à l'autre (Exemple : pente de $G_3 = f(G_p) : 0,46$). Le choix judicieux de bornes adéquates présente un intérêt évident, si l'on veut attribuer au classement une valeur quantitative. Bien entendu, l'un quelconque de ces classements ne conserve sa valeur comparative que si les matériaux sont placés dans des conditions hydriques identiques. En effet, si les bornes correspondent dans un cas à G_p et dans l'autre à G_3 , le classement peut très bien s'inverser par rapport à celui qui serait obtenu sur la base de G_p ou G_3 , seul. On passe alors d'une comparaison de l'activité structurale, caractéristique du matériau, à la comparaison de l'intensité probable des processus d'évolution structurale en place.

Ainsi pourrait on schématiser l'influence de la profondeur sur l'amplitude de gonflement dans un sol à bon drainage, par un passage de G_p à G_2 puis G_3 :

G_p : pour une couche très superficielle, arrivant à son gonflement potentiel durant les épisodes pluvieux suffisamment intenses et prolongés (et pour des chemins préférentiels de circulation de l'eau gravitaire)

G_2 : dans la couche sous jacente, subissant l'effet de l'évaporation.

G_3 : au delà.

On voit qu'un changement des bornes du cycle hydrique a des conséquences différentes suivant les matériaux :

Pour un matériau à faible gonflement potentiel, le changement de borne supérieure implique l'annulation du gonflement. Les périodes très humides auraient pour ces matériaux un rôle prépondérant dans l'évolution structurale. En revanche le passage de G_2 à G_3 n'a aucun effet dans ce cas, alors qu'il intervient sensiblement pour des matériaux plus gonflants. Cette différenciation serait encore plus sensible si l'on tenait compte des propriétés hydrodynamiques des matériaux concernés.

Dans le cas de matériaux argileux, pour lesquels G_p est élevé, la conductivité hydraulique en conditions non saturées est faible. En évaporation on aboutit alors à des profils hydriques à très fort gradient, dans lesquels la couche qui peut être considérée comme sèche à l'air, et subissant le retrait G_2 , est peu épaisse. Son importance sera plus grande pour des textures plus légères.

S'il est possible ainsi de raisonner quelques cas typiques, on ne saurait aboutir à une prévision très fine qu'à deux conditions :

+ introduire une modélisation de l'évolution hydrique des couches concernées. Or actuellement celle-ci n'est pas possible, les modèles utilisés pour les couches profondes n'étant pas adéquats. En particulier, la prise en compte de l'hétérogénéité des teneurs en eau au sein des éléments structuraux à une même profondeur devient très importante.

+ expliciter la relation entre amplitude de retrait-gonflement et évolution structurale, en étudiant l'effet de l'histoire hydrique (nombre et amplitude des alternances gonflement-retrait, épaisseurs concernées) sur la porosité et la morphologie structurale. Ceci suppose, la réalisation de nombreuses études expérimentales. Les résultats, ici présentés, peuvent alors servir au choix de modalités d'expérimentation : nature et gamme de variation des variables et paramètres à étudier.

C/ - Influence de la teneur en argile

Nous avons mis en évidence l'effet de la teneur en argile sur le gonflement potentiel par l'intermédiaire des variations des indices des vides $e_{3,48}$ et e_1 avec ce facteur. Il nous reste à faire de même pour nos gonflements G_1 , G_2 et G_3 et voir comment le facteur argile fait varier les indices des vides e_{cc} et $e_{4,2}$:

+ l'indice des vides à la capacité au champ varie en fonction de la teneur en argile suivant l'équation :

$$e_{cc} = 0,0070 A + 0,467 \quad n = 17 \quad r = 0,749 \quad ***$$

On constate le parallélisme entre cette droite et la régression exprimant

les variations de l'indice des vides à pF 0,48, $e_{0,48}$, avec la teneur en argile. Ceci est difficilement explicable. Cependant si cette relation se vérifiait sur une population plus large, on aurait là un moyen très simple d'évaluation de l'indice des vides textural à la capacité au champ, à partir de l'indice des vides textural à pF 0,48.

+ l'indice des vides au point de flétrissement ne semble pas être statistiquement soumis à l'effet de l'argile. ($r = 0,057$ NS). Sa valeur moyenne est $e_{4,2} = 0,525$. Ceci signifie que lorsque cette borne est retenue, c'est la capacité d'hydratation maximum du sol, qui, seule, détermine l'amplitude du gonflement.

V CONCLUSION

Nous sommes partis de l'hypothèse suivante : l'amplitude de gonflement refait détermine l'intensité des processus d'évolution structurale. Notre objectif était d'évaluer dans quelle mesure la connaissance des courbes de retrait et de potentiel, permettait d'améliorer le pronostic d'évolution naturelle de la structure.

Nous avons abouti à deux types de conclusions :

+ Quant à l'obtention de la courbe de retrait elle-même :

Né connaissant pas sa forme, il était nécessaire, pour déterminer les points singuliers importants (entrée d'air, limite de retrait), de la tracer avec de nombreux points expérimentaux assortis d'une faible incertitude. Cette précision ne fut pas toujours suffisante. Il sera nécessaire d'améliorer pour des agrégats naturels, des techniques qui sont adéquates pour les matériaux artificiels.

De toute façon ces techniques restent lourdes. Il serait intéressant de pouvoir établir cette courbe par des corrélations avec la constitution du matériau ou des points de la courbe déterminés rapidement. Le seul élément utilisable à des fins prédictives qui soit apparu est la relation avec la teneur en argile. Il serait bien sûr nécessaire d'étudier l'effet d'autres facteurs de constitution : matières organiques, cations, etc... et l'effet de l'histoire. Il faut en fait concevoir cette recherche non comme un moyen de prévoir directement la courbe, mais plutôt d'obtenir une typologie de référence. Le type probable de courbe étant connu, on peut ensuite imaginer de la tracer à partir d'un nombre réduit de points expérimentaux. L'exemple de ce mémoire est illustratif de la nécessité de ces deux étapes. En l'absence d'hypothèses, tirées de l'étude de matériaux artificiels, sur la forme des courbes et certains éléments de leur interprétation, les résultats obtenus sur matériaux naturels auraient été difficilement utilisables.

+ Quant à la combinaison retrait potentiel :

le gonflement potentiel est suffisant pour établir un classement des matériaux si on ne cherche pas à interpréter quantitativement sa traduction en terme d'activité structurale. Les corrélations que nous obtenons entre le gonflement potentiel et les gonflements à différents seuils de potentiels de l'eau permettent d'établir, à partir d'un gonflement potentiel, des gonflements retraits pour des intervalles de potentiel différents, dont la nécessité est apparue clairement. La difficulté immédiate pour aboutir à une étape de modélisation plus avancée, se situe au niveau de la connaissance de la dynami-

que de l'eau dans les couches de surface . En attendant des progrès dans ce domaine, il est possible d'utiliser les résultats obtenus dans des profils où les mouvements d'eau sont également suivis, ou connus de manière assez grossière, de façon à tester les éléments de pronostic qu'ils fournissent. Ceci serait en particulier nécessaire dans le cas du semis direct.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

- CHAMAYOU H., 1975 - L'eau et le sol. *ENSAAM document interne.*
- CONCARET J., 1967 - Etude des mécanismes de la destruction des agrégats de terre au contact des solutions aqueuses *Ann. Agron.* 18, 65-90.
- DE CRECY J., 1975 - Dessèchement et réhumectation des pates argileuses. *Ann. Agron.*, 26(6), 651-669.
- FAURE A., 1978 - Comportement des sols au compactage rôle de l'argile et conséquences sur l'arrangement des grains. *Thèse VSM GRENOBLE.*
- FAURE A., FIES J.C., 1972 - Etude expérimentale de la sensibilité au compactage des matériaux meubles en fonction de leur composition granulométrique. *Ann. Agron.* 23(3). 317-332.
- FIES J.C., 1978. Porosité du sol : Etude de son origine texturale. *Thèse U.L.P. Strasbourg*, 139 p.
- FIES J.C., STENGEL P., 1981. Densité texturale des sols naturels :
I. Méthode de mesure - II. Eléments d'interprétation. *Agronomie* 1(8) (sous presse).
- GREENE-KELLY R., 1974. Shrinkage of clay soils : a statistical correlation with other soil properties. *Geoderma* 11, 243-257.
- GROENEVELT P.H., PARLANGE J.Y., 1974. Thermodynamic stability of swelling soils. *Soil Science* 118(1), 1-5.
- GUYOT G., CONCARET J., DE CRECY J., JACQUIN Monique, 1979 - Aptitude des sols à l'éclatement mécanique. *CR Acad. Agric.* 1370-1376.
- HAINES W.B., 1923 - The volume changes associated with variations of water content in soils. *J. Agr. Sc.* 13, 296-310.
- HENIN S., BOSQUET J., 1964 - Relations entre le comportement des sols (effritement, fissuration) et leur texture. *CR Acad. Agric.* 842-846.
- HENIN S., GRAS R., MONNIER G., 1969 - Le profil cultural *Masson PARIS*, 320 p.

- KEZDI A., 1974. Handbook of Soil Mechanics, vol. 1 : *Soil Physics*, Elsevier ed., Amsterdam, 220 p.
- KHEYRABI D., MONNIER G., 1968 - Etude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. Agron.*, 19(2), 129-152.
- MAERTENS C., 1969. Influence de quelques facteurs sur la fissuration des sols. *Science du Sol* 1, 77-83.
- MONNIER G., 1965 - Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. *Thèse Fac. des Sciences, PARIS*.
- MONNIER G., FIES J.C., STENGEL P., 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux : Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Annales Agronomiques* 24(5), 533-545.
- PELTIER R., 1959 - Manuel du laboratoire routier. *Dunod. Ed. PARIS*.
- QUIRK J.P., 1968. Particle interaction and soil swelling. *Israel Journal of Chemistry* 6, 213-234.
- RANGANATHAM B.V., SATYANARAYANA B., 1965. A rational method of predicting swelling potential for compacted expansive clays. *Proc. 6th I.C.S.M.F.E., Montreal 1965, 1, 92-96*.
- ROSS G.J., 1978. Relationships of specific surface area and clay content to shrink-swell potential of soils having different clay mineralogical compositions. *Canadian Journal of Soil Science*, 58(2), 159-166.
- SEED H.B., WOODWARD R.J., LUNGREN R., 1962. Prediction of swelling potential for compacted clays. *Proc. A.S.C.E.*, 88, 53-87.
- SMITH G.D., COUGHLAN R.J., FOX W.E., 1978. The role of texture in soil structure, in EMERSON ed. *Modification of Soil Structure*, J. WILEY, Chichester, p. 79-86.
- SPOSITO G., GIRALDEZ J.V., 1976. Thermodynamic stability and the law of corresponding states in swelling soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40, 352-358.
- STENGEL P., 1979. Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. *Annales Agronomiques*, 30(1), 27-51.
- STENGEL P., 1980 - L'aptitude du milieu physique au semis direct. *perspectives agricoles* n° 34 fev. 80 p. 33-36.
- STENGEL P., 1981 - Etude expérimentale du retrait de mélanges argile-limon. *Agronomie (sous presse)*.
- STENGEL P., 1981 - Sur les relations entre le retrait et le potentiel de l'eau dans des mélanges smectite-limon. *CR. Acad. Sci. Septembre 81*.

- TESSIER D., 1975 - Recherches expérimentales sur l'organisation des particules dans les argiles. *Thèse CNAM PARIS*.
- TESSIER D., PEDRO G., CAMARA L., 1980. Sur le comportement hydrique et l'évolution de l'organisation des argiles (kaolinites et smectites) au cours de la dessiccation et de la réhumectation *C.R. Acad. Sci. Paris*, 290, Série D, 1169-1172.
- TRI. B.H., 1968 - Dynamique de la granulation du sol sous prairie. *Ann. Agron.*, 19(4), 415-439.
- TRI B.H., MONNIER G., 1973. Etude quantitative de la granulation des sols sous prairie de graminées. *Annales Agronomiques*, 24(6), 651-677.
- YONG R.N., WARKENTIN B.P., 1975. Soil Properties and Behaviour. ELSEVIER ed., Amsterdam, 200 p.