

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE
DE GRENOBLE

pour obtenir le titre de
DOCTEUR ES SCIENCES

par

Alain FAURE

Ingénieur E.C.P.

SUJET

Comportement des sols au compactage: Rôle de l'argile et conséquences sur l'arrangement des grains

Soutenue le 2 Fevrier 78 devant la Commission d'Examen

M. KRAVTCHENKO	Président
M. GIROUD	} Examineurs
M. LAREAL	
M. NEGRE	
M. MONNIER	Invité

*Heureux qui comme Ulysse
a fait un long voyage...*

AVANT-PROPOS

Les travaux qui font l'objet de ce mémoire ont été accomplis dans le cadre de l'Institut National de la Recherche Agronomique. En premier lieu au Laboratoire des Sols, au C N R A de Versailles, puis à la Station de Science du Sol au Centre de Recherche d'Avignon.

Monsieur le Professeur KRAVTCHENKO a bien voulu m'offrir l'hospitalité en acceptant que ce mémoire soit présenté à l'Université Scientifique et Médicale de Grenoble : je lui adresse l'expression de ma profonde gratitude. Qu'il soit également remercié de l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le Jury de ma thèse.

Monsieur le Professeur HENIN, sans qui ce travail n'aurait pas été entrepris, m'a accordé lors de mes premières années à l'INRA de longues heures de son temps précieux. Je le remercie bien chaleureusement de cette aide précieuse et efficace.

Monsieur LAREAL Maître de Conférence à l'INSA de Lyon a bien voulu accepter de faire partie du Jury. Je le remercie pour l'intérêt qu'il a porté à mes travaux.

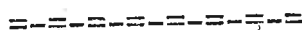
Que Monsieur le Professeur NEGRE soit aussi remercié d'avoir bien voulu s'intéresser à ce travail et d'avoir accepté de participer au Jury d'examen.

Que Monsieur GIROUD Directeur à l'IRIGM reçoive l'expression de ma reconnaissance pour les conseils qu'il m'a donnés et le soin qu'il a mis à me guider lors de la phase terminale de ces travaux.

Monsieur MONNIER, Directeur de la Station de Science du Sol d'Avignon a su me faire bénéficier, jour après jour, de son expérience des sols agricoles. C'est grâce à cette présence précieuse que ce mémoire tente de répondre simultanément à certaines préoccupations de Génie Civil et d'Agriculture.

Je ne saurais oublier que cette recherche est surtout la conséquence d'un travail d'équipe, fait d'entraide et de collaboration amicale. Que soient donc associés à ce mémoire tous ceux qui, à Versailles comme en Avignon, ont participé à l'élaboration des résultats et des théories présentés dans ce mémoire. Chacun saura trouver dans ces pages la part de ce qui fut l'objet de son intervention.

S O M M A I R E



	<i>Pages</i>
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I	
COMPACTAGE DES SOLS AUX FAIBLES TENEURS EN EAU	5
I.1 Seuil de sensibilité au compactage	6
I.1.1. Mise en évidence	6
I.1.2. Propriétés de l'argile à ce seuil	9
I.1.2.1. Propriétés hydriques	9
I.1.2.2. Propriétés mécaniques	13
I.1.3. Influence de l'énergie de compactage	25
I.1.4. Influence de la nature de l'argile	28
I.1.5. Conclusion	31
I.2. Conséquences sur la compacité des mélanges sable-argile	32
I.2.1. Lois d'arrangement théorique des grains	33
I.2.1.1. Notations générales et définitions	33
I.2.1.2. Loi de Substitution parfaite	34
I.2.1.3. Loi de Remplissage parfait	36
I.2.1.4. Loi d'Additivité	38
I.2.1.5. Conclusion	40
I.2.2. Résultats expérimentaux au seuil de sensibilité	41
I.2.2.1. Notations	41
I.2.2.2. Présentations de résultats	44
I.2.2.3. Etude des mélanges à comportement non sableux	48
I.2.2.4. Les mélanges à comportement sableux	57
I.3 Conclusion	68

CHAPITRE II

COMPOTEMENT DE L'ARGILE COMPACTEE SEULE	71
II.1 Notion d'état physique fictif	71
II.2 Compactage a l'oedomètre	75
II.3 Etude du premier maximum :	
Définition de la limite de retrait des agrégats	85
II.4 Généralisation de la définition de la limite de liquidité	87
II.5 Compactage a la coupelle d'Atterberg	89
II.6 Etude analytique du comportement de l'argile compactée seule	96
II.7 Conclusion	103

CHAPITRE III

COMPOTEMENT DES MELANGES AU DELA DU SEUIL DE SENSIBILITE	105
III.1 Résultats généraux	106
III.2 Les mélanges à comportement non sableux	107
III.2.1. Mélanges avec la Kaolinite	111
III.2.1.1. Les mélanges argileux	111
III.2.1.2. Les mélanges argilo-sableux	112
III.2.2. Mélanges avec la montmorillonite	116
III.2.3. Conclusion	119
III.3. Les mélanges a comportement sableux	120
III.4. Le triangle de texture	128

CONCLUSION	133
------------	-----

ANNEXE	139
--------	-----

Figures 7-1 à 7-15	141
--------------------	-----

9-1 à 9-8	148
-----------	-----

Tableaux I à XXIV	153
-------------------	-----

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

PRINCIPALES NOTATIONS

=====

I - INDICES.

- e,a,s,r En indice inférieur précisent que les notations auxquelles ces lettres sont affectées concernent des grandeurs obtenues expérimentalement ou obéissant aux lois d'Additivité, de Substitution, de Remplissage.
- c En indice supérieur précise que les notations auxquelles cette lettre est affectée concernent des grandeurs relatives au seuil de sensibilité au compactage.
- f En indice inférieur précise que les notations auxquelles cette lettre est affectée concernent des grandeurs physiques dites "fictives".
- i En indice inférieur représente dans un mélange le pourcentage d'argile dont la nature minéralogique est indiquée par la lettre indiquée.
- l En indice supérieur précise que les notations auxquelles cette lettre est affectée concernent des grandeurs limites.
- o En indice inférieur ou supérieur précise que les notations auxquelles cette lettre est affectée concernent des grandeurs physiques caractérisant les phases (ou les populations de grains, au chap. I) hors mélange.

II - NOMS DES MATERIAUX

- B_o Sable grossier de Brou pris comme référence
- F_o Sable fin de Fontainebleau pris comme référence
- K_o Argile kaolinite de référence

- M_0 Argile montmorillonite de référence
 FK_i Mélange de sable de Fontainebleau avec i % de kaolinite
 FM_i, BK_i, BM_i Définitions analogues avec la montmorillonite et le sable de Brou.
 S_j Population de grains sphériques isodimensionnels de diamètre D_j

III - GRANDEURS RELATIVES A L'ENERGIE DE COMPACTAGE

- E_0 kJ/m^3 Energie de référence, de valeur 590 kJ/m^3
 m_0 kg Masse de la dame de compactage de référence : 1 kg
 m kg Masse de la dame de compactage pour une énergie quelconque
 n_0 Nombre de coups par couche de l'essai de référence : 30
 n Nombre de coups par couche pour une énergie quelconque.
 h cm Hauteur de chute commune à toutes les énergies utilisées : 20 cm

IV - GRANDEURS PHYSIQUES ELEMENTAIRES

- M_s kg Masse de la phase solide
 M_s^a kg Masse de la phase solide de l'argile
 M_s^s kg Masse de la phase solide du squelette
- $$M_s^a + M_s^s = M_s$$
- M_w kg Masse d'eau contenue dans le matériau
 V m^3 Volume total du matériau, ou volume total du mélange des populations S_j de grains isodimensionnels
 V_j m^3 Volume total de la population S_j
 V_{Sj} m^3 Volume de la phase solide de la population de grains S_j
 V_s m^3 Volume de la phase solide
 V_s^a m^3 Volume de la phase solide de l'argile
 V_s^s m^3 Volume de la phase solide du squelette

$$V_s^a + V_s^s = V_s$$

V_w m³ Volume d'eau contenue dans le matériau

V_g m³ Volume de gaz

$$V_s^a + V_s^s + V_w + V_g = V$$

V - GRANDEURS PHYSIQUES ET MECANIQUES

A	%	Teneur en argile	$= \frac{M_s^a}{M_s}$	
b_j		Volume relatif de la phase solide de la population j	$= \frac{V_{Sj}}{V}$	
b_j^o		$= \frac{V_{Sj}^o}{V_j}$		
c, c'		Coefficients de perturbation par rapport aux lois théoriques.		
δ_o		Indice de sensibilité au compactage de l'argile		
g		Accélération de la pesanteur.		
γ_d	N/m ³	Poids volumique sec du matériau	$= \frac{M_s}{V} \cdot g$	
γ_s^a	N/m ³	Poids volumique de la phase solide d'argile	$= \frac{M_s^a}{V_s^a} \cdot g$	
γ_s^s	N/m ³	Poids volumique de la phase solide du sable	$= \frac{M_s^s}{V_s^s} \cdot g$	
γ_s	N/m ³	Poids volumique de la phase solide	$= \frac{M_s}{V_s} \cdot g$	
$\frac{\gamma_d}{\gamma_w}$		Densité sèche du matériau		
γ_w	N/m ³	Poids volumique de la phase eau	$= \frac{M_w}{V_w} \cdot g$	
I_C^E	%	Indice de consistance à l'énergie E	$= \frac{w^l - w}{w^l - w^c}$	
I_L^E	%	Indice de liquidité à l'énergie E	$= \frac{w - w^c}{w^l - w^c}$	
I_P^E		Indice de plasticité à l'énergie E	$= w^l - w^c$	
m_j	%	Proportion pondérale de la population S_j de grains isodimensionnels dans le mélange.		
n	%	Porosité de mélange ou de matériau	$= 1 - \frac{V_{Sj}^o}{V_j}$	
n_j^o	%	Porosité propre à la population j	$= 1 - \frac{V_g}{V_j}$	
γ	%	Volume relatif de gaz	$= \frac{V_g}{V}$	

S	%	Teneur en sable	$= \frac{M_s^s}{M_s}$
ζ, ζ'		Coefficients de réactivité au compactage des matériaux au seuil de sensibilité.	
w	%	Teneur en eau totale	$= \frac{M_w}{M_s}$
w^a	%	Teneur en eau de la phase argile au seuil de sensibilité	$= \frac{w^c}{A}$
w^c	%	Teneur en eau du matériau au seuil de sensibilité au compactage	
w'	%	Teneur en eau excédentaire du matériau	$= w - w^c$
w_L	%	Limite de Liquidité d'Atterberg	
w_p	%	Limite de Plasticité d'Atterberg	
w_s	%	Limite de Retrait	

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

=====

Que ce soit sur le terrain ou en laboratoire, toutes les études effectuées dans les domaines de la physique ou de la mécanique du sol font appel à la notion de compacité. Pour quantifier cette notion, la grandeur de référence, en général facilement mesurable, est le poids volumique sec γ_d .

Mais pour caractériser l'état physique d'un sol de façon plus complète, il est nécessaire de considérer le couple de grandeurs poids volumique sec - teneur en eau, ainsi que le seul invariant physique pour un sol donné, son poids volumique de solide γ_s .

Hormis le cas où un sol est saturé, la relation entre son poids volumique sec et sa teneur en eau n'est pas une relation bijective. Il est évident, en effet, qu'à une teneur en eau donnée, le même sol peut avoir des poids volumiques secs différents et réciproquement. Ces différentes valeurs possibles de l'un des deux paramètres, lorsque l'autre reste constant, sont obtenues en modifiant ce que certains auteurs appellent "l'histoire du matériau".

L'histoire d'un matériau est l'ensemble des contraintes de toutes natures, climatiques, dynamiques, etc..., qui dans le passé se sont exercées simultanément ou consécutivement sur ce matériau : c'est cette histoire qui donne à chaque instant une certaine valeur au poids volumique sec et à la teneur en eau. Tenter d'expliquer l'influence de l'un de ces paramètres sur l'autre exige donc de connaître l'histoire du matériau ou mieux d'être maître de cette histoire. Ainsi cette histoire apparaît comme étant la résultante énergétique à un moment donné de l'ensemble des contraintes, ce mot étant pris au sens large, qui se sont exercées sur lui depuis l'origine des temps. Cette résultante énergétique doit tenir compte non seulement des intensités mises en jeu mais également de la nature de ces énergies : énergie cinétique (essais PROCTOR), pressions statiques (oedomètre), énergies de succion ou d'humectation, énergie thermique, etc... et de leur temps d'application.

Un grand nombre d'auteurs, ILKER 1969, CLEGG & PAUL 1967, ALBERRO 1967, HORN & DEERE 1962, se sont attachés à établir des équivalences entre certaines de ces énergies en choisissant pour chacune d'elles une intensité telle que le matériau ait le même comportement mécanique quel que soit le type d'énergie en jeu. Il est clairement apparu que ces équivalences ne suivent pas les mêmes lois selon le matériau utilisé et ne peuvent, en conséquence, être considérées comme universelles.

Inversement, de nombreuses caractéristiques, hydriques pour la plupart, telles les Limites d'Atterberg ou la Limite de Retrait, ont été définies sans référence énergétique. Ces Limites sont d'un intérêt pratique indéniable et servent elles-mêmes de références à d'autres grandeurs caractérisant les sols liées à ces Limites par de nombreuses lois empiriques, la corrélation de SKEMPTON (1957) entre la Limite de Liquidité et l'indice de compression en est un exemple, ou les corrélations entre les limites Atterberg et les caractéristiques du maximum Proctor - KUMBASAR & TOGROL, 1969 ; VOIGHT, 1973.

Dans l'étude que nous avons entreprise sur le compactage des sols, nous avons utilisé comme matériaux des mélanges, en proportions choisies, d'un sable et d'une argile. Le mélange de ces deux constituants a été effectué de telle façon que l'argile et le support sableux soient associés et organisés sous forme d'agrégats ⁽¹⁾ reproduisant ainsi, du mieux possible, le mode d'arrangement des particules dans les milieux naturels. De ce fait, nous nous sommes attachés à supprimer l'influence des différences d'histoires entre les constituants en prenant les précautions suivantes :

- Les deux argiles utilisées -une montmorillonite et une kaolinite- ont été extraites d'un sol par dispersion des particules en suspension, puis lavées et rendues homoioniques Ca^{++} .

- Les deux sables utilisés -un sable fin et un sable grossier- ont été lavés de leurs éléments fins (argile et limons).

(1) Le tamisage à sec nécessite un broyage du matériau. Toutefois, ce broyage doit être conduit avec précaution pour ne pas casser les grains de sable, de graviers, cailloux, etc... Il est convenu d'appeler agrégats les éléments passés à travers le tamis. Dans le cadre de cette étude, ces agrégats ont ainsi une taille maximale de 2 mm. Un agrégat est donc un assemblage plus ou moins résistant de grains de sable, et limons éventuellement, et de particules d'argile. Il a donc nécessairement son propre indice des vides.

- Les mélanges d'une argile et d'un sable ont été effectués alors que l'argile est en suspension dans l'eau.

Il est permis de penser que ces précautions ont, en grande partie, effacé l'histoire de chacun des constituants et que leurs mélanges ont tous été dotés de la même histoire énergétique au cours de leur préparation.

La première partie de notre étude a pour but de comparer, en fonction de la teneur en eau, les comportements des mélanges sable-argile lorsque, à de faibles teneurs en eau, ils sont compactés sous une énergie de type et de grandeur donnés. Cette comparaison permet de définir la notion de sensibilité des sols au compactage et de mettre en évidence le rôle prépondérant qu'assume le constituant argile sur cette sensibilité.

De ce fait, la deuxième partie est entièrement consacrée à la recherche des propriétés de l'argile, débarrassée de son support sableux, qui puissent expliquer son action fondamentale au cours du compactage d'un sol. Cette recherche a été entreprise en utilisant des énergies de grandeurs ou de types différents donnant ainsi aux résultats obtenus un caractère plus général. Les conclusions qui en sont tirées permettent enfin de considérer les Limites Atterberg comme le résultat non plus d'un test mais d'une mesure de caractéristique mécanique du matériau à un niveau d'énergie bien déterminé.

Ces conclusions permettent également de proposer, dans la troisième partie, une explication du comportement des mélanges sable-argile au cours de leur compactage aux teneurs en eau supérieures au seuil de sensibilité.

C H A P I T R E I

COMPACTAGE DES SOLS AUX FAIBLES TENEURS EN EAU

=====

Le procédé le plus pratique pour compacter un matériau en laboratoire est le procédé PROCTOR. L'énergie utilisée est une énergie cinétique produite par la chute d'une dame tombant d'une hauteur constante un certain nombre de fois. La valeur de cette énergie dépend donc de trois paramètres indépendants : masse de la dame, hauteur de chute et nombre de coups. L'existence de ces trois degrés de liberté entraîne qu'une même quantité d'énergie cinétique peut être produite par des combinaisons multiples de ces trois paramètres mais les conséquences sur le matériau ne sont pas nécessairement identiques. Il est certain en effet que pour une hauteur donnée, une dame de 1 kg tombant une seule fois n'entraîne pas de la part du sol le même comportement qu'une dame de 200 g. tombant 5 fois de suite. Dans les deux cas pourtant, la dépense totale d'énergie est la même (JOHNSON A.W. & SALLBERG J.R., 1962).

Se définir un niveau d'énergie est donc insuffisant, il est nécessaire d'en préciser simultanément le mode d'application.

Etant donné le grand nombre de mesures que nous nous étions proposé, nous avons considéré un moule de compactage de dimensions plus petites que celles préconisées dans l'essai Normal et, tout en conservant la même valeur de l'énergie totale, nous avons été contraints d'en modifier le mode d'application. Ainsi cette énergie E_0 (pour une dame de masse m_0 et un nombre de coups par couche n_0) choisie comme référence de tous nos essais a des caractéristiques différentes de celles de l'essai Normal et le tableau I nous permet de les comparer entre elles.

Lorsque nous avons été amenés à considérer d'autres valeurs de l'énergie de compactage, nous avons tenu à "quantifier" les variations du mode d'application en adoptant les règles suivantes :

- a) la hauteur de chute reste constante et égale à 0,20 m
- b) de façon générale la valeur de la masse de la dame peut s'exprimer par $m = k.m_0$ et le nombre de coups par $n = h.n_0$ où k et h sont des coefficients de proportionnalité.

Nous avons choisi pour des raisons de commodité de prendre $k = h$ donnant ainsi à l'énergie l'expression $E = k^2.E_0$.

Si le choix de la deuxième règle n'a été motivé qu'en vue de réduire le nombre de paramètres indépendants, le choix de la première répond au désir de rendre l'énergie cinétique produite par un coup directement proportionnelle à la valeur de la masse de la dame, dont la vitesse en fin de chute est constante quel que soit le niveau d'énergie auquel l'essai est effectué.

Outre la "mise à zéro" de l'histoire recherchée par le mode de préparation que nous avons choisi, nous avons supprimé toutes les perturbations d'arrangement des agrégats qui pourraient éventuellement être dues aux variations incontrôlables de la forme géométrique des grains sableux (d'origines variées) ou aux différentes capacités d'adsorption de l'eau par des argiles de natures différentes.

L'étude du comportement des sols au compactage a été conduite principalement avec les mélanges contenant la kaolinite. Les échantillons notés FK_1 ont comme support sableux le sable fin de Fontainebleau et ceux notés BK_1 le sable grossier de Brou. Les caractéristiques granulométriques de ces sables sont données en annexe à l'aide du tableau II.

Nous avons noté F_0 et B_0 les sables de Fontainebleau et Brou, K_0 et M_0 les argiles kaolinite et montmorillonite lorsqu'ils sont compactés seuls, l'indice zéro indiquant qu'il s'agit de référence commune à l'ensemble des travaux de la Station d'Avignon.

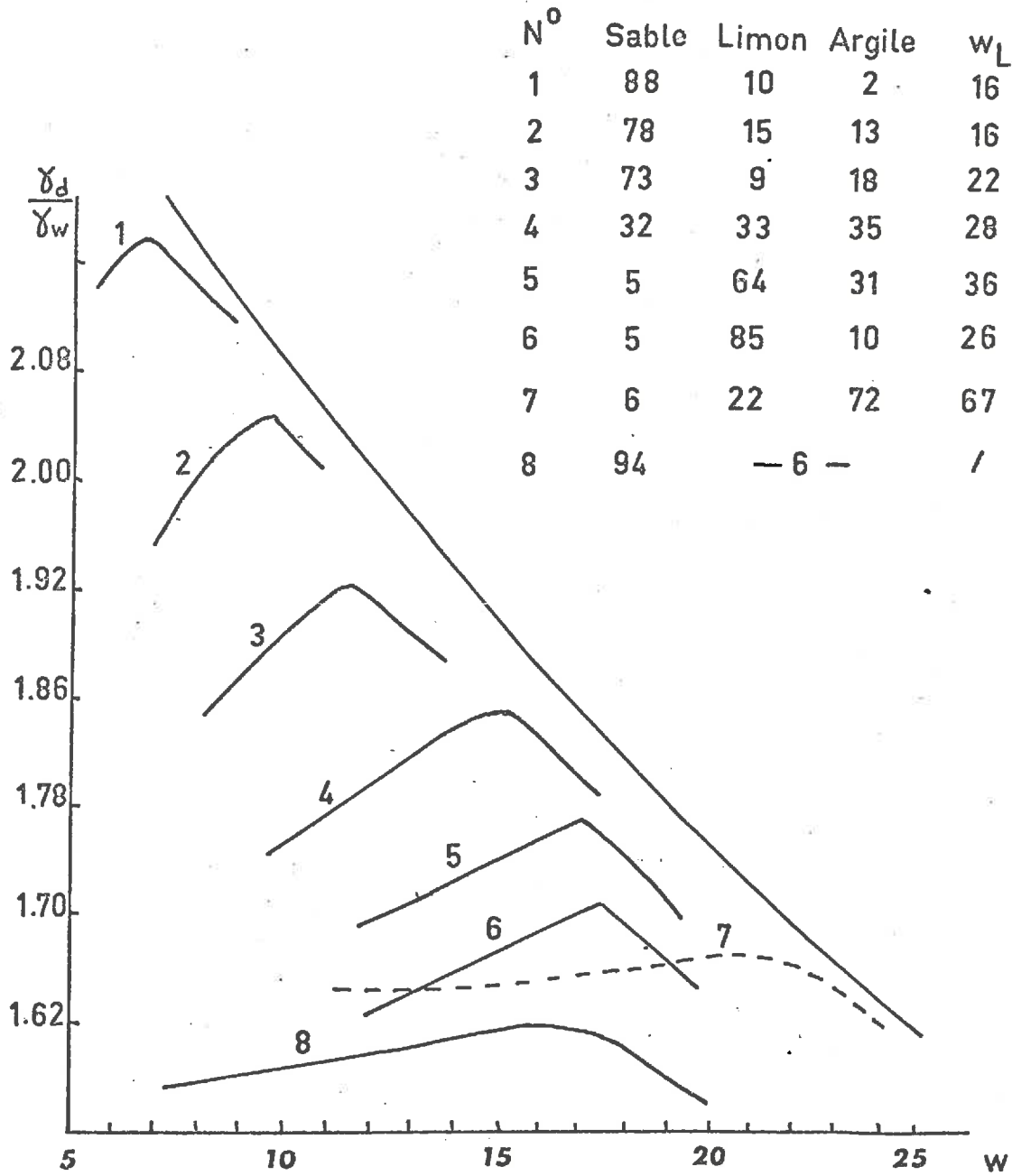
I.1 - SEUIL DE SENSIBILITE AU COMPACTAGE.

I.1.1. Mise en évidence.

Par les essais Proctor, l'allure de la courbe de variations du poids volumique sec d'échantillons à diverses granulométries en fonction de la teneur en eau au moment du compactage nous est très familière (fig. 1 et 2

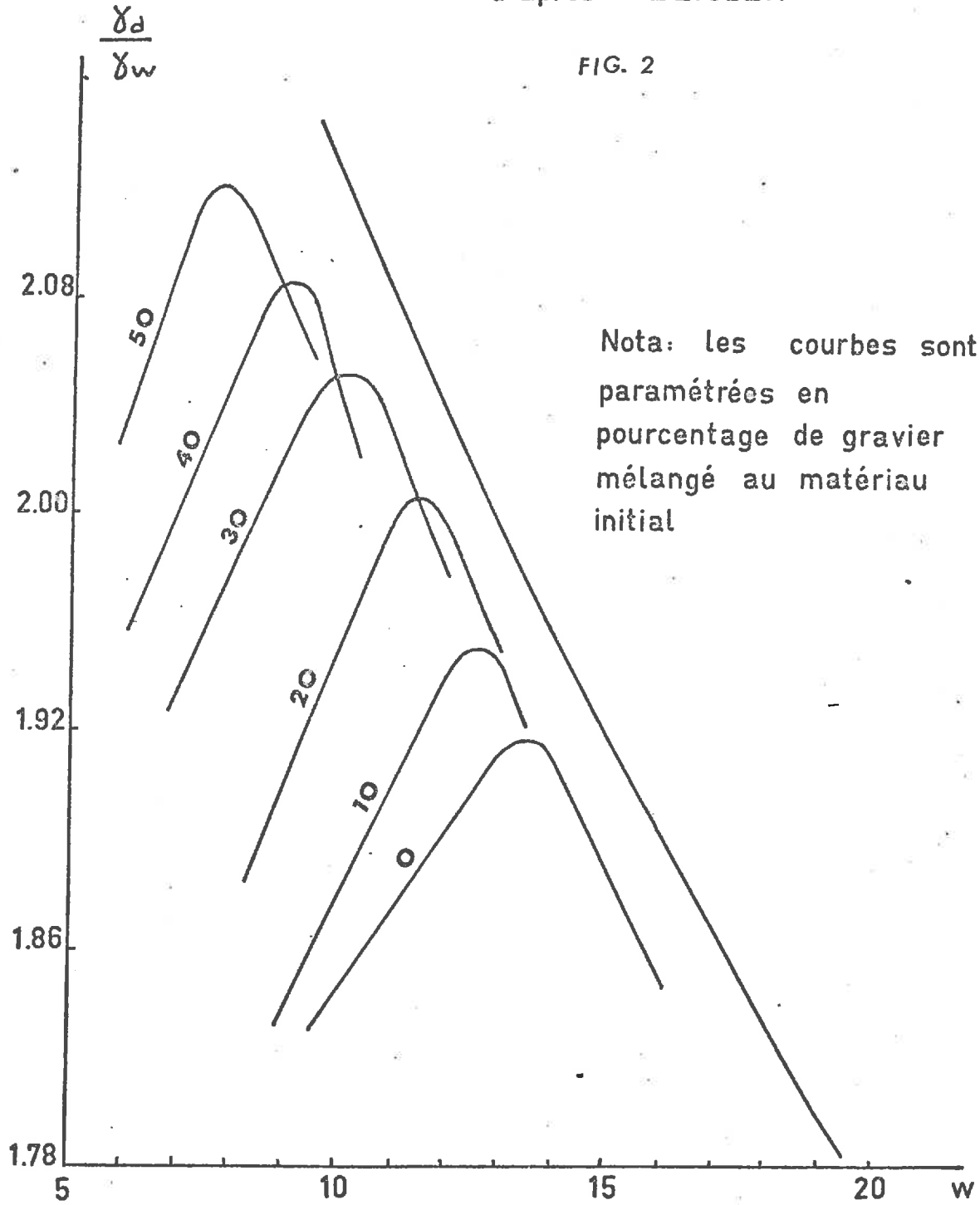
INFLUENCE de la TEXTURE sur la COMPACTITE

FIG. 1 d'après MADDISON



INFLUENCE de la TEXTURE sur la COMPACTITE

d'après ZEIGLER



évoquant les travaux de MADDISON L., 1944 et de ZEIGLER, 1948) : tout mécanicien du sol sait en effet qu'il existe un maximum de compacité lié à la texture particulièrement recherché sur les chantiers de Travaux Publics (SCHON, 1966). Mais l'allure de cette courbe est moins bien connue pour des valeurs de teneurs en eau relativement faibles. Nous nous sommes attachés pour chacun des échantillons fabriqués à déterminer la courbe complète de $w = 0 \%$ jusqu'à une teneur en eau transformant le matériau en une boue apparemment non compactable.

La fig. 3 représente l'allure générale de la courbe complète pour deux échantillons à 24 % et 47,2 % de kaolinite (tableau III) à l'énergie de référence E_0 . Il apparaît ainsi que chaque échantillon présente un seuil de teneur en eau w^c , point particulier de la courbe de compactage. Si l'échantillon est à une teneur en eau w inférieure à w^c nous constatons qu'il n'est pas sensible aux effets du compactage, alors qu'à une teneur en eau supérieure il accuse une augmentation de compacité qui le conduit au maximum. Cette teneur en eau critique w^c correspond donc aux conditions hydriques minimales requises pour que la sensibilité au compactage de l'échantillon commence à se manifester sous l'énergie E_0 . L'existence de ce seuil apparaît déjà en 1957 dans les travaux de TURNBULL & FOSTER (1957) cités par JOHNSON & SALLBERG (fig. 4).

I.1.2. Propriétés de l'argile à ce seuil w^c .

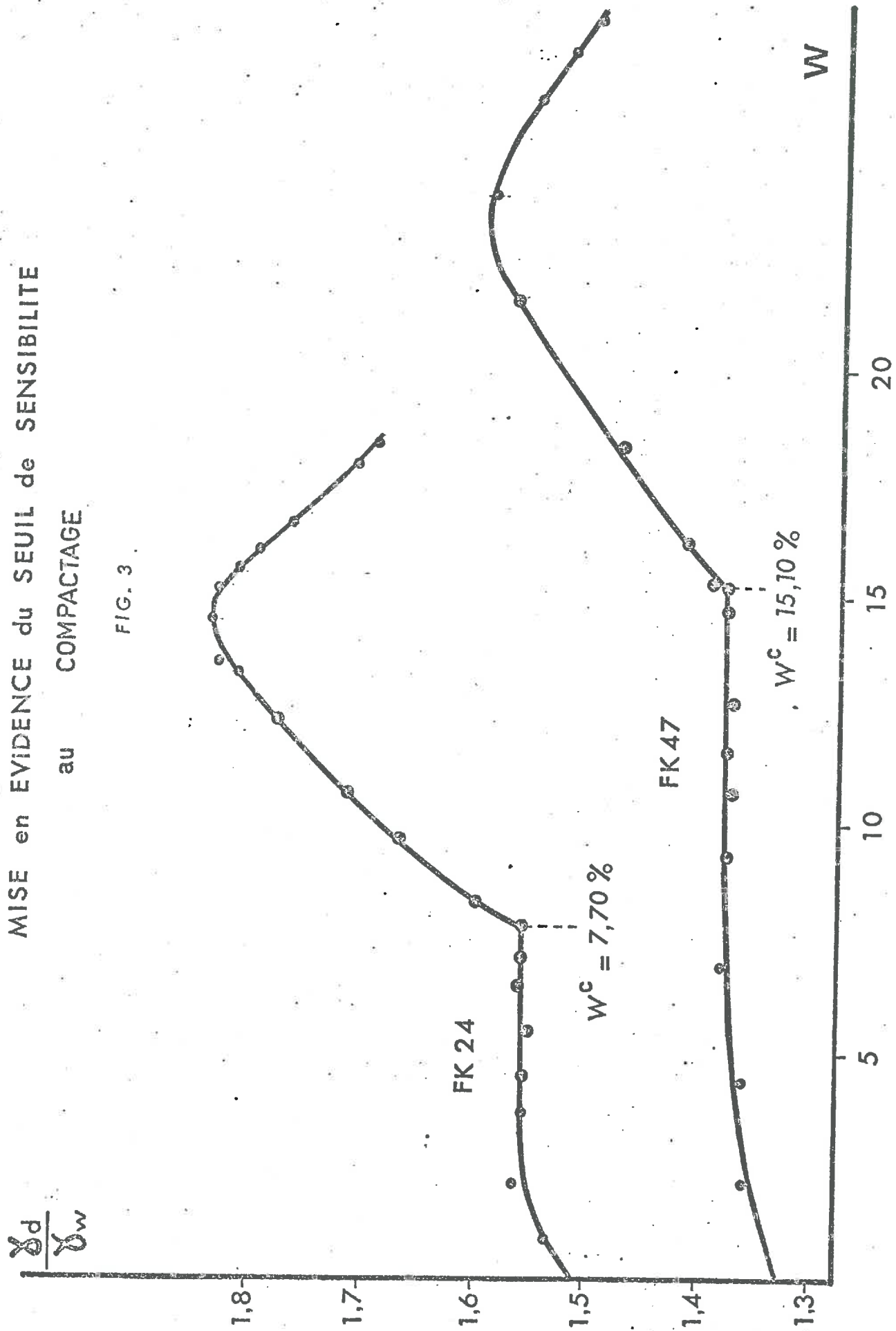
I.1.2.1. Propriétés hydriques.

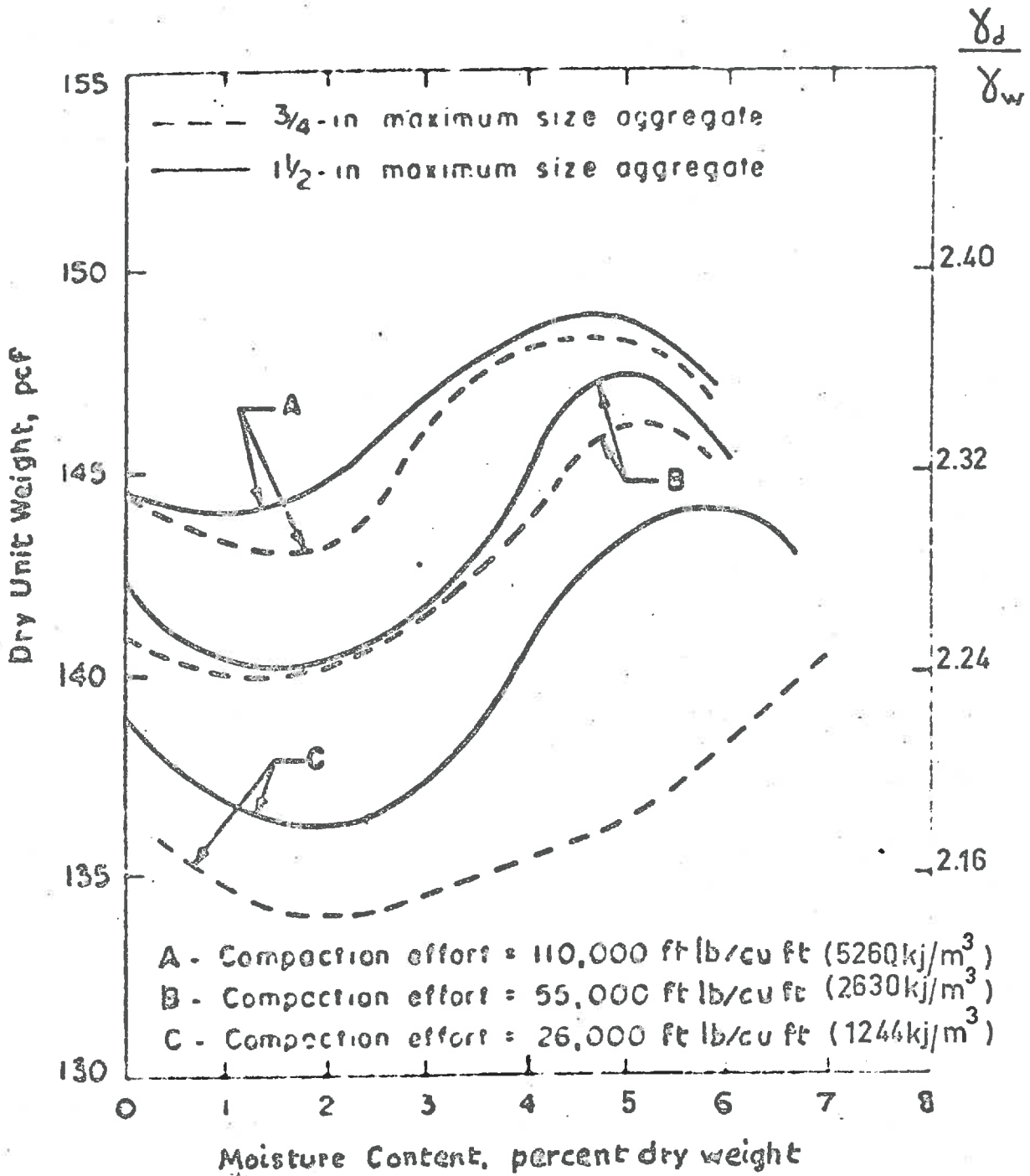
La comparaison des valeurs de ces teneurs en eau critiques pour tous les échantillons FK_i et BK_i peut être faite en fonction de la seule variable permettant de les distinguer entre eux : leur teneur en argile. Cette variation est linéaire (fig. 5) comme l'indique la constance du rapport w^c/A dont la valeur moyenne, calculée en cherchant la corrélation entre w^c et A , est égale à 0,318 avec un coefficient de corrélation égal à 0,99 pour 21 valeurs expérimentales dans une gamme de teneurs en argile de 3 % à 100 % (tableau IV).

Or cette valeur 0,32 du rapport $\frac{w^c}{A}$ correspond pour cette kaolinite à la teneur en eau obtenue avec un P_f de 4,6 environ alors que le décrochement de la courbe de Peltier se fait au P_f de 4,8. Ainsi les quantités d'eau apportées aux mélanges au moment de leur compactage à des teneurs en

MISE en EVIDENCE du SEUIL de SENSIBILITE
au COMPACTAGE

FIG. 3





compactage dynamique à différentes énergies - mise en évidence du seuil de sensibilité

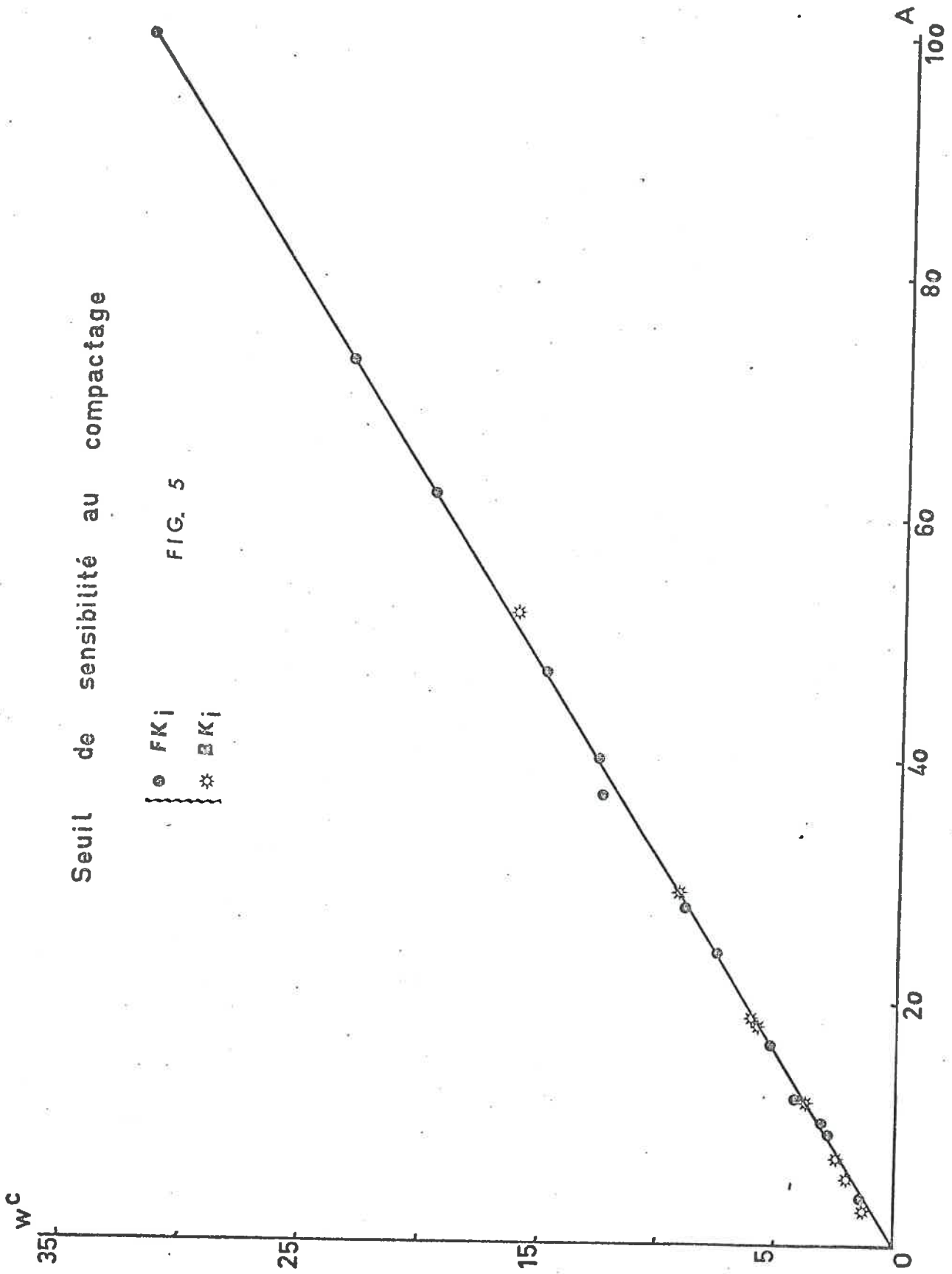
FIG. 4

d'après TURNBULL et FOSTER
1957

Seuil de sensibilité au compactage

○ FKj
* BKj

FIG. 5



eau voisines de w^c sont entièrement adsorbées par la kaolinite qu'ils contiennent. Au point singulier de chaque courbe de variations, cette kaolinite se trouve donc toujours dans le même état hydrique défini par la teneur en eau $w^a = \frac{w^c}{A} = 31,8 \% \simeq 32 \%$.

Ainsi il est possible d'énoncer la première conclusion :

"Les échantillons ne sont pas sensibles aux effets du compactage tant que la kaolinite qu'ils contiennent n'a pas atteint le seuil de teneur en eau défini par w^a alors que la moindre variation de teneur en eau au delà de ce seuil critique entraîne des variations importantes de leur compacité".

Nous nous sommes proposés de nous assurer que l'existence de ce seuil n'est pas spécifique à cette seule argile : une étude a été effectuée sur 27 échantillons provenant de divers types de sols agricoles. Ces sols ont des granulométries très variées, avec des teneurs en argile comprises entre 9 % et 59 %, des teneurs en limons fins et grossiers entre 5 % et 80 % et des teneurs en sable entre 9 % et 77 %. Le comportement de ces sols vis à vis du compactage est qualitativement le même que celui des échantillons fabriqués en laboratoire et présentent tous un seuil hydrique de sensibilité bien marqué. Les rapports $\frac{w^c}{A}$ obtenus sont égaux cependant à 0,38 et non 0,32 comme précédemment avec un coefficient de corrélation égal à 0,94 (fig. 6).

Il apparaît que w^a est lié à la nature de l'argile (nous verrons en I.1.4 ce qu'il en est avec la montmorillonite). GUERIF (1976) a montré que pour une argile donnée ce seuil est lié à la teneur en matière organique et nous verrons en I.1.3 l'influence de l'énergie de compactage. L'existence de cette discontinuité sur la courbe $(\frac{\gamma_d}{\gamma_w}, w)$ a déjà été mise en évidence par PAGEN & JAGANNATH (1967) et CLERIN (1973) notamment, bien que ces Auteurs n'aient pas exploité les valeurs numériques dont ils disposaient.

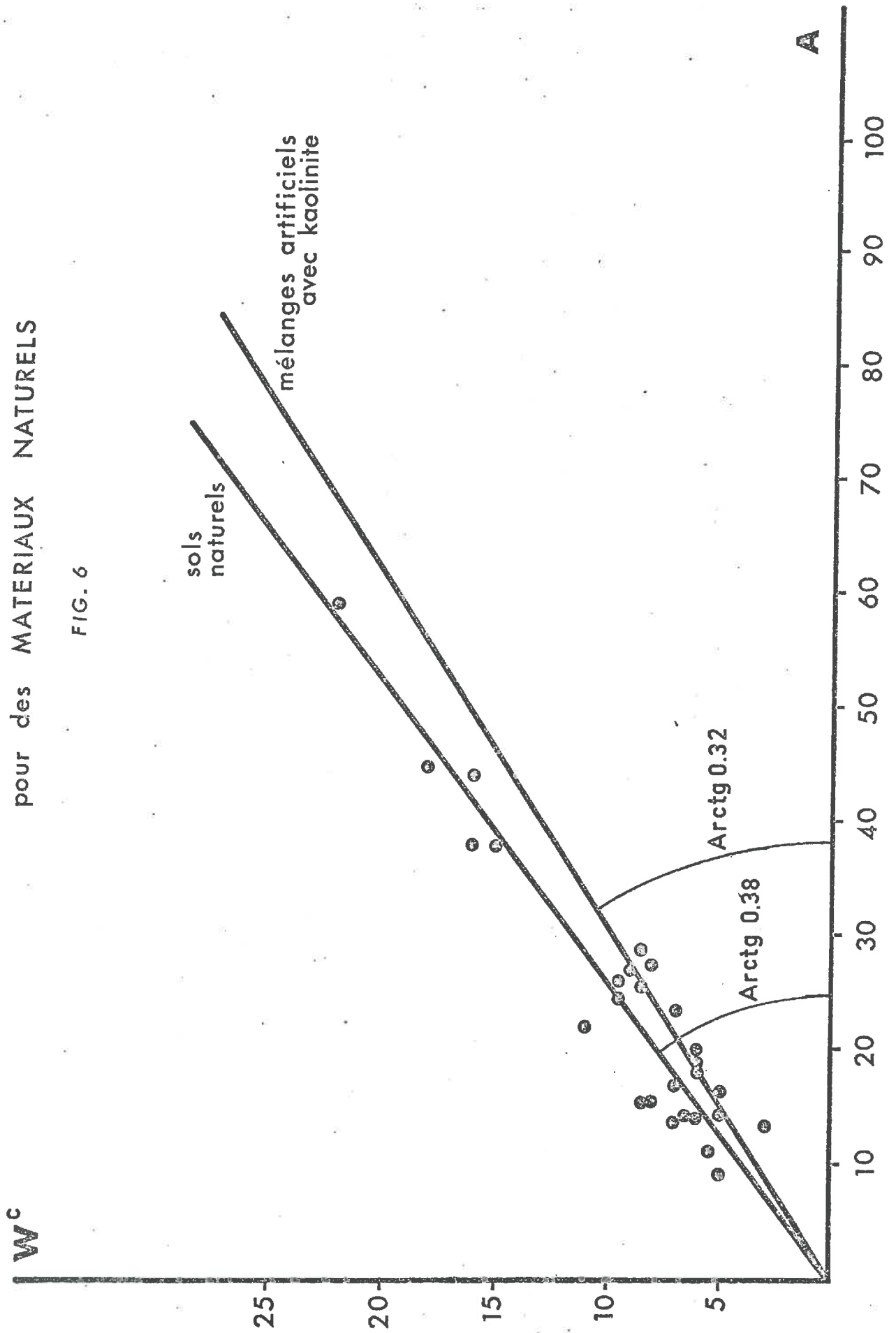
I.1.2.2. Propriétés mécaniques.

I.1.2.2.1. Essais sur la kaolinite K_o .

Pour déterminer les caractéristiques mécaniques de la kaolinite, nous avons effectué des essais rapides de compression triaxiale à la vitesse de

VARIATIONS du SEUIL HYDRIQUE
pour des MATERIAUX NATURELS

FIG. 6



1 mm/mn. Ce choix est justifié par le fait qu'aucun des échantillons n'est saturé à plus de 90 %. A une teneur en eau choisie entre 0 et 45 % environ, trois ou quatre carottes d'argile ont été fabriquées dans un moule de diamètre 35 mm et de hauteur 78 mm (donc un volume de 75 cm^3) pour être directement exploitables sur la presse de compression triaxiale avec des pressions latérales différentes pour chacune d'elles.

Deux séries de compactage ont été faites sur cette kaolinite K_0 :

- dans la première série, nous avons conservé hauteur de chute, nombre de coups, nombre de couches et énergie totale (590 kJ/m^3) du Proctor Réduit, en prenant une dame dont la masse est de 250 g.,

- dans la deuxième série, nous avons doublé le nombre de coups par couche par rapport à la première série.

Cette deuxième série nous a permis de tester la précision du compactage au niveau de la compacité et de montrer l'influence que peut avoir un type d'érouissage sur les caractéristiques mécaniques. C'est à la suite de ces deux séries de compactage que nous avons adopté les règles de variations d'énergies énoncées en introduction de ce chapitre I.

La figure 7 et le tableau V donnant les variations de la compacité en fonction de la teneur en eau permet les constatations suivantes :

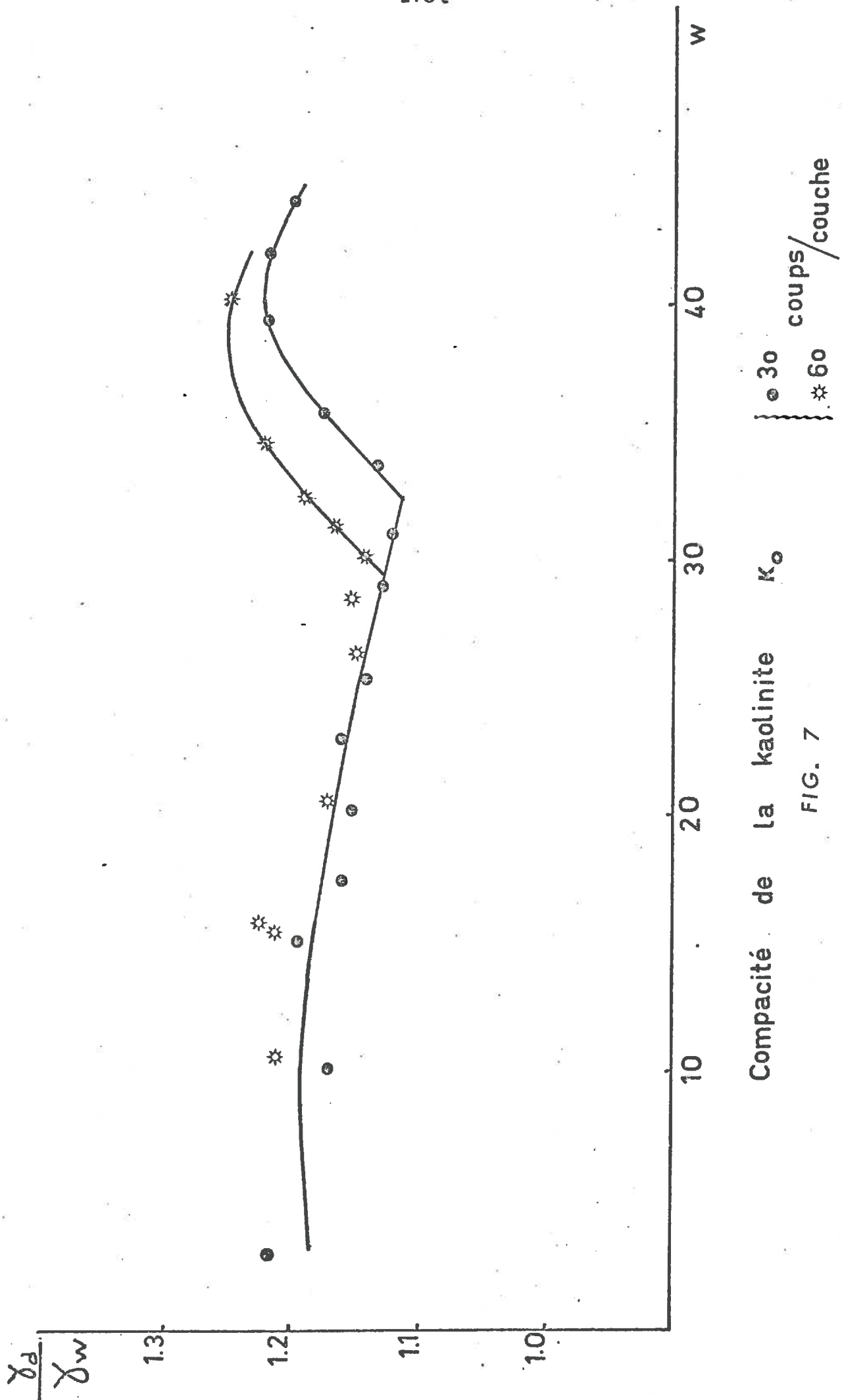
- les deux modes de compactage donnent les mêmes résultats aux teneurs en eau inférieures au seuil de sensibilité,

- ce seuil est légèrement décalé vers les faibles teneurs en eau pour la deuxième série,

- les compacités sont bien distinctes au delà du seuil de sensibilité, donnant un maximum plus grand dans la deuxième série.

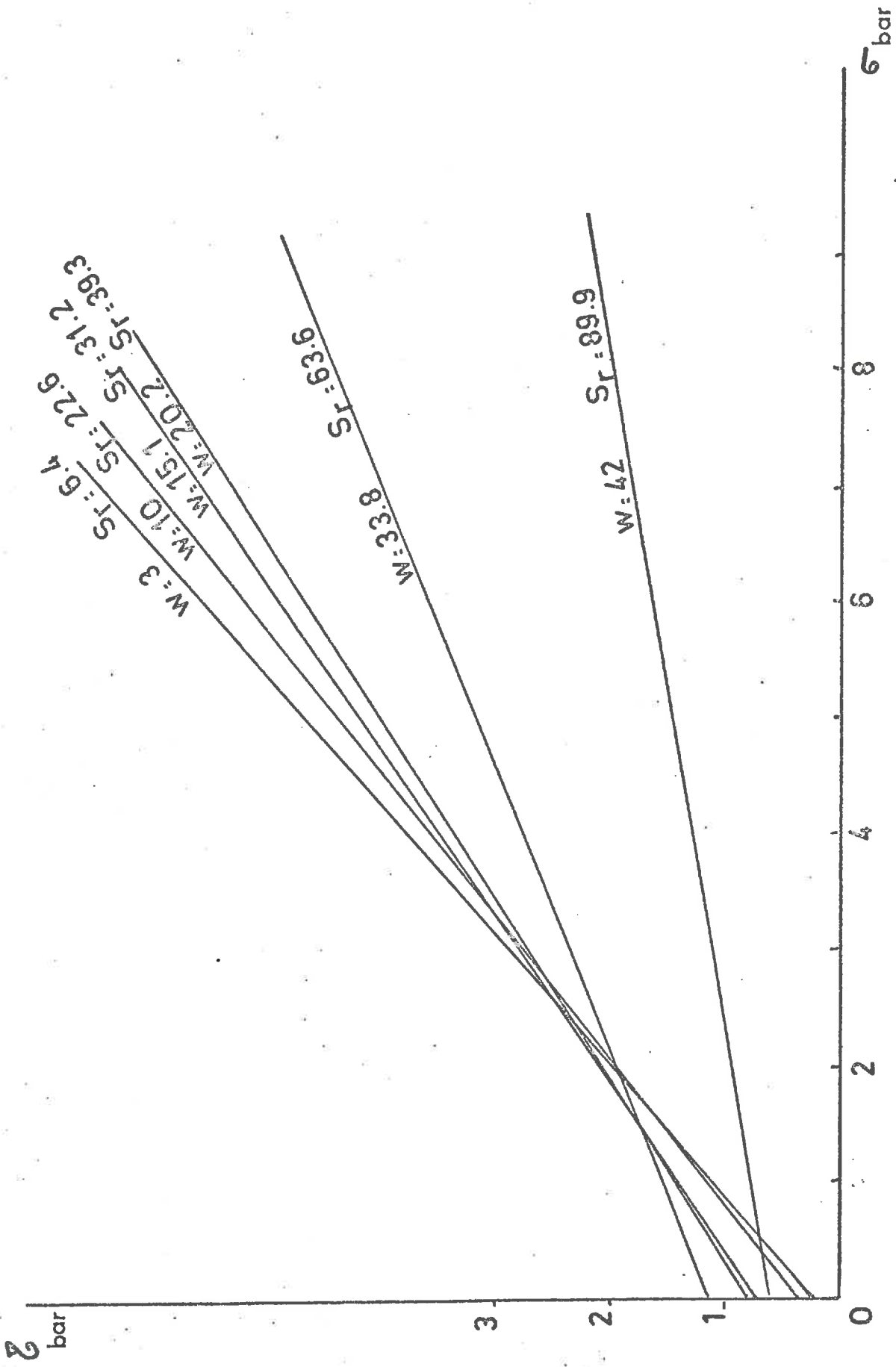
Aux essais triaxiaux, les pressions latérales sont comprises entre 0 et 4 bars. Dans la gamme de ces pressions latérales, la courbe intrinsèque obtenue en contraintes totales à chaque teneur en eau donne au matériau un * comportement mécanique répondant au critère de Coulomb (fig. 7 - 1 à 7 - 15). Tous les cercles de Mohr obtenus à une même teneur en eau sont tangents à une même droite caractérisée par un coefficient directeur $\text{tg } \varphi$ et une ordonnée à l'origine c .

* Pour la commodité de la lecture ces 15 figures sont reportées en annexe.



Compacité de la kaolinite K_0

FIG. 7



Droites de COULOMB en essais rapides 1mm/mn
matériau K₀ FIG. 7 - 16



La fig. 7-16, regroupant certaines de ces droites, donne de façon synoptique les variations du comportement du matériau, alors que les variations de l'angle de frottement φ et de la cohésion c (tableau V) sont portées sur les fig. 8-1 et 8-2 en fonction de la teneur en eau et 8-3 et 8-4 en fonction du degré de saturation. Ces caractéristiques mécaniques ne sont pas significativement différentes entre les deux séries de compactage : doubler l'énergie de compactage en doublant seulement le nombre de coups par couche n'entraîne pas de variations considérables au niveau des caractéristiques mécaniques.

La cohésion semble atteindre une valeur maximale, bien que les résultats soient relativement imprécis, au voisinage de 30-32 % de teneur en eau, soit 68 % de saturation environ. Par contre, les variations de l'angle de frottement du matériau en fonction de la teneur en eau de compactage (fig. 8-1) donnent des résultats bien précis. Ces valeurs de φ ne sont pas significativement différentes d'une série à l'autre parce que les énergies mises en jeu diffèrent peu l'une de l'autre, mais ses variations indiquent qu'il y a un changement dans le comportement mécanique de la kaolinite au voisinage du point singulier. L'angle de frottement interne est légèrement décroissant pour les valeurs de teneurs en eau inférieures à celle du point singulier : de 40° à 0 % d'eau, cet angle prend la valeur 30° environ à 31 % d'eau. Aux teneurs en eau supérieures à celle du point singulier, cet angle diminue rapidement pour tendre vers la valeur 0° au voisinage de 45-50 % d'eau.

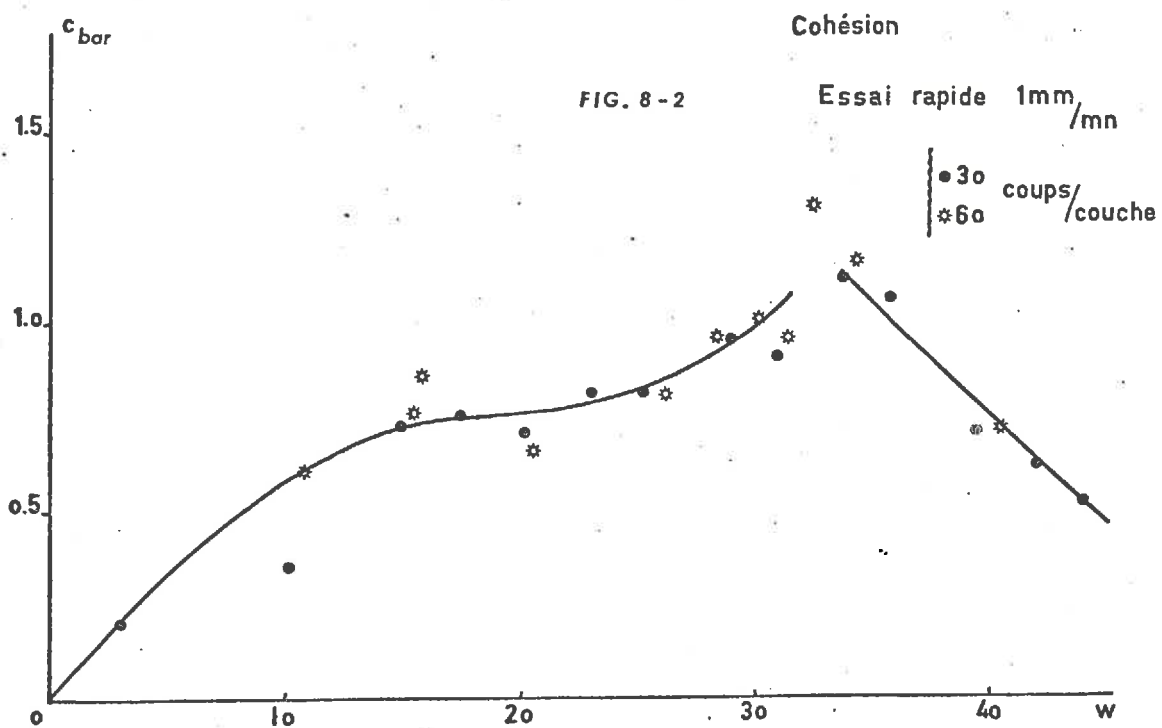
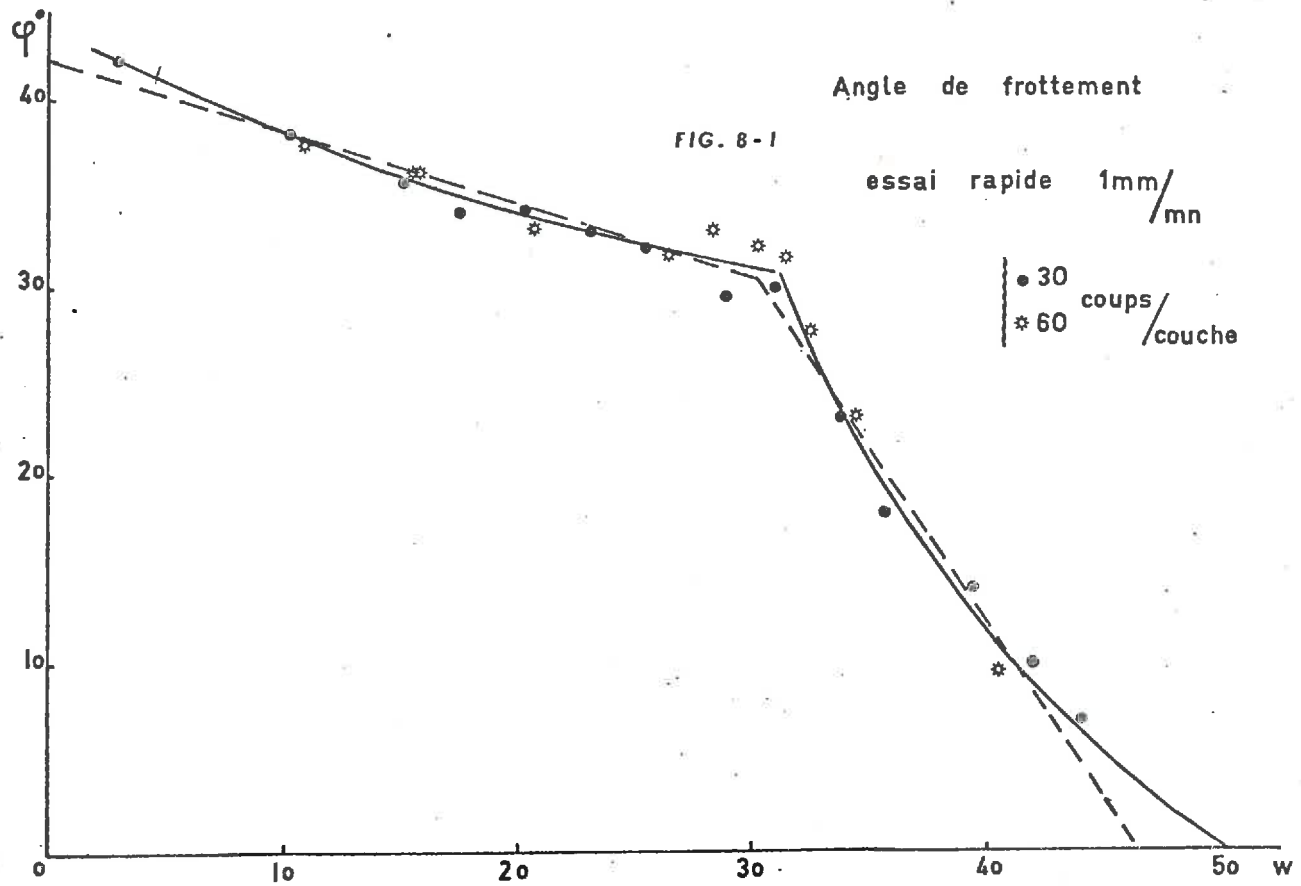
Il convient de préciser qu'entre 0 % et 32 % de teneur en eau le meilleur ajustement obtenu pour les 14 mesures faites est un ajustement linéaire, avec un coefficient de corrélation de -0.91. La droite de corrélation obtenue a pour équation :

$$\varphi = - 0.388 w + 41.95$$

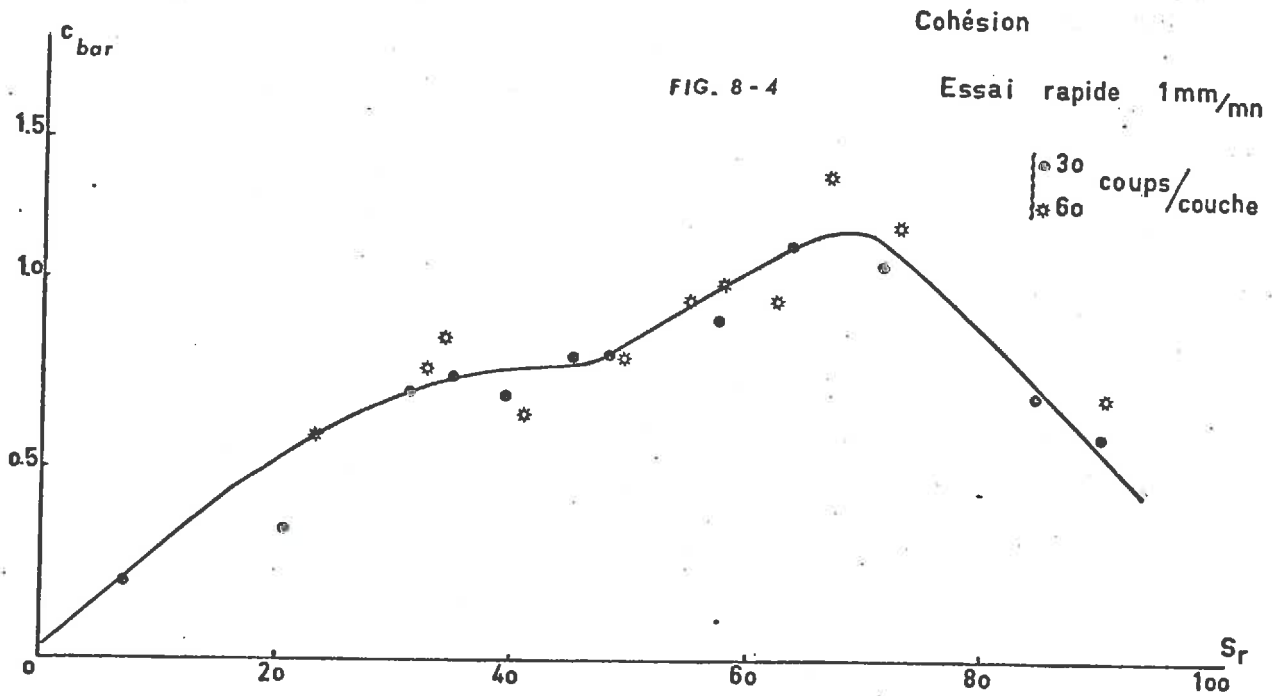
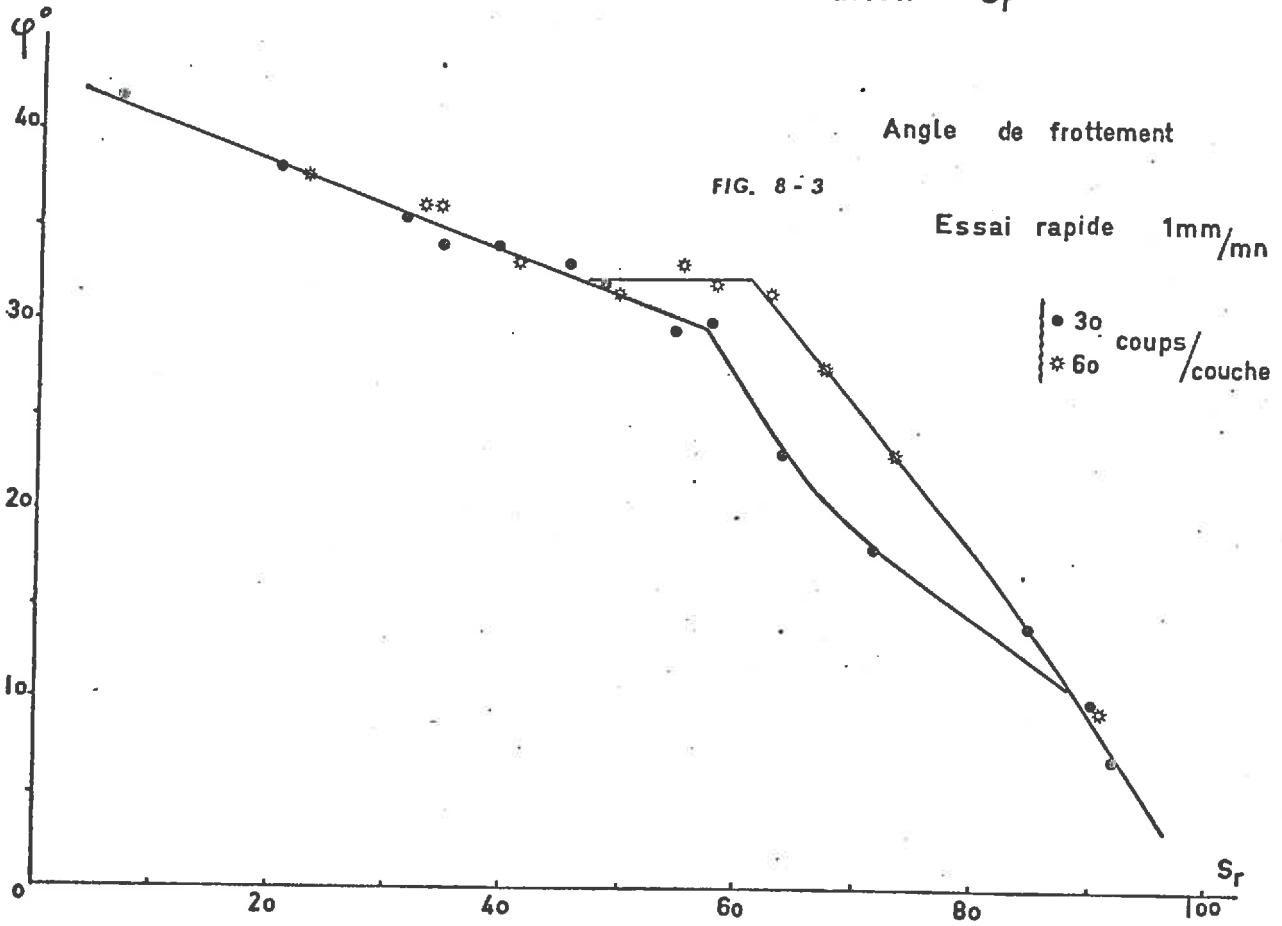
alors que pour les 10 mesures faites à des teneurs en eau supérieures à 31 % le meilleur ajustement obtenu est un ajustement parabolique avec un coefficient de corrélation de - 0.987.

Ces deux corrélations ont des coefficients très satisfaisants mais l'expression parabolique obtenue aux teneurs en eau supérieures à 30 % ne présente d'intérêt ni sur le plan fondamental ni sur le plan pratique.

Variations de φ et c de l'argile K_0
avec la teneur en eau w



Variations de φ et c de l'argile K_0
avec le taux de saturation S_r



Aussi nous lui préférerons un ajustement linéaire d'expression $\varphi = - 1.893 w + 87.54$ qui, avec un coefficient de corrélation égal à 0.952 pour les dix couples de valeurs considérés, conduit aux mêmes conclusions au sujet du point singulier mais présente l'avantage d'être plus facilement exploitable.

Le point d'intersection des deux droites de corrélation a pour coordonnées $w \simeq 30.5 \%$ et $\varphi \simeq 30^\circ$: ce point d'intersection et le point singulier des courbes de compactage ont la même abscisse aux erreurs expérimentales près.

I.1.2.2.2. Essais sur un mélange : FK 31.

Nous avons fait subir les mêmes essais au mélange FK 31 (31.4 % de teneur en argile) (fig. 9-1 à 9-8)* dont la courbe de compactage fait apparaître un point singulier à une teneur en eau voisine de 10 % (fig. 10). L'angle φ (fig. 11-1 et 11-3 et tableau VI) accuse à cette même teneur en eau un brutal changement de mode de variations. Or 10 % de teneur en eau pour ce mélange correspond à 31.8 % d'eau "ramené à l'argile" : il s'agit bien du même seuil hydrique caractéristique de la kaolinite à cette énergie.

Les variations de la cohésion de ce matériau FK 31 en fonction de la teneur en eau (fig. 11-2) donnent un maximum aux environs de 15 % qui est une teneur en eau bien supérieure à celle du point singulier. Cependant, nous constatons que les cohésions des échantillons K_0 et FK 31 atteignent leur valeur maximale pour un degré de saturation identique et proche de 70 % (fig. 8-4 et 11-4). Cette constatation conduit à penser que la variation de l'angle de frottement est liée à l'état d'hydratation de l'argile seule alors que celle de la cohésion est liée à l'état d'hydratation du mélange lui-même. C'est pourquoi ce sont les variations de l'angle de frottement qui commandent la sensibilité au compactage du matériau. D'où l'énoncé de la deuxième conclusion :

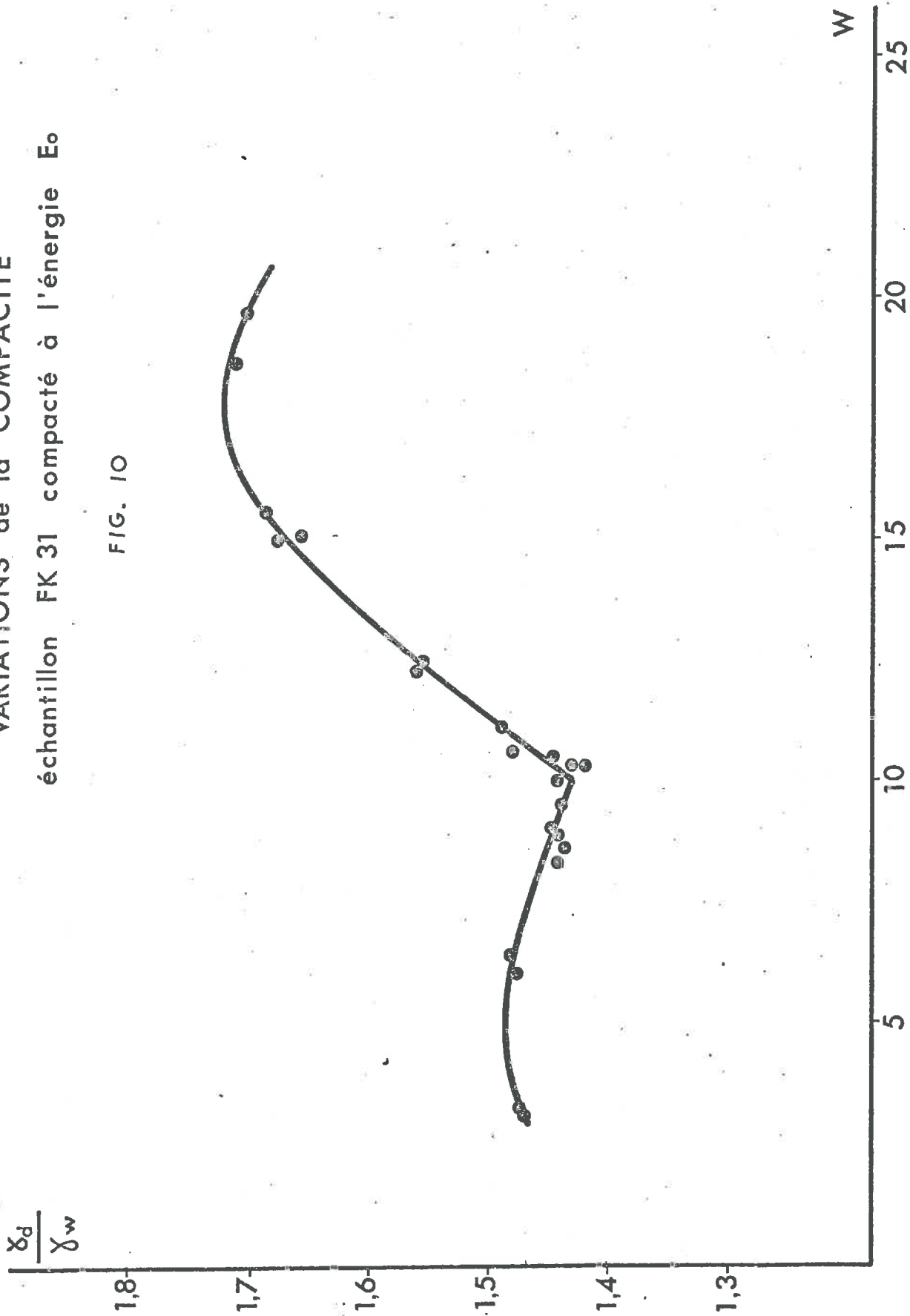
"Un mélange de sable et d'argile ne devient sensible au compactage que lorsque sa teneur en eau est telle que l'argile qu'il contient est dans le domaine où elle entre en plasticité à l'énergie utilisée".

L'étude de la sensibilité au compactage faite sur des échantillons de laboratoire et sur des échantillons de provenance naturelle a montré que cette sensibilité n'est pas un phénomène textural mais un phénomène dépendant seulement de l'état dans lequel se trouve le constituant argile seul. Ainsi

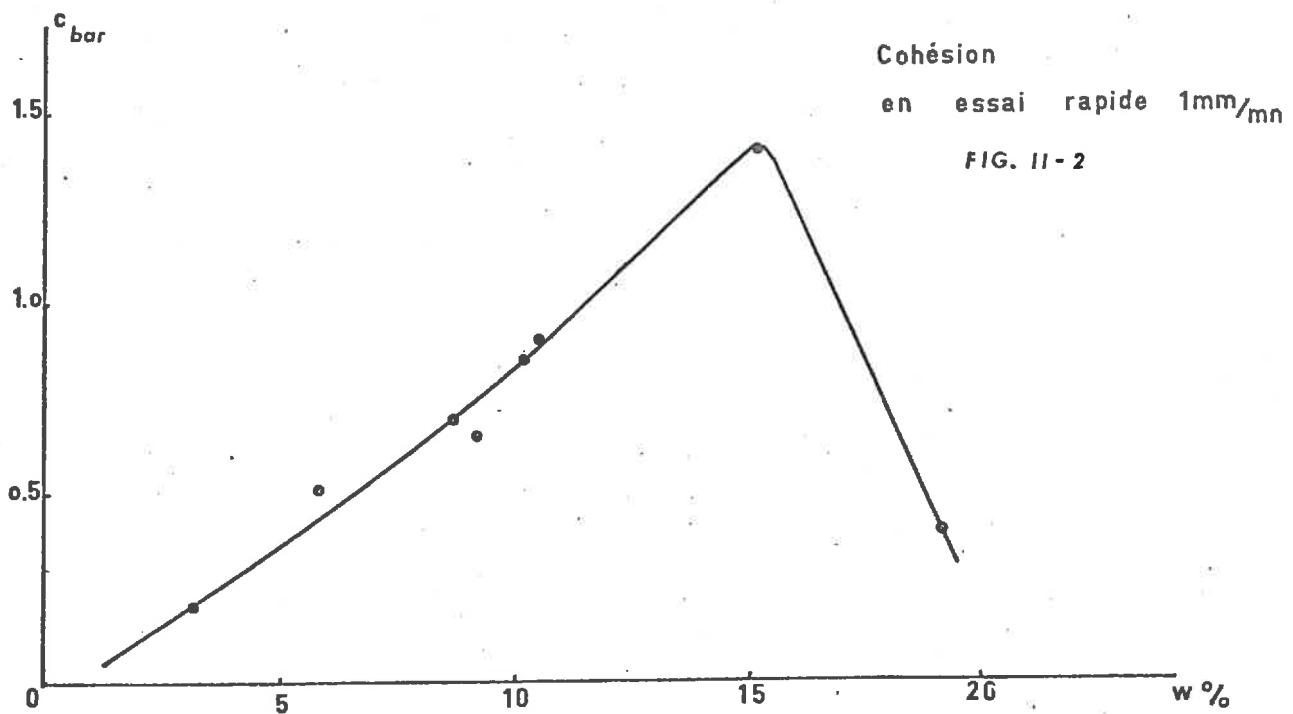
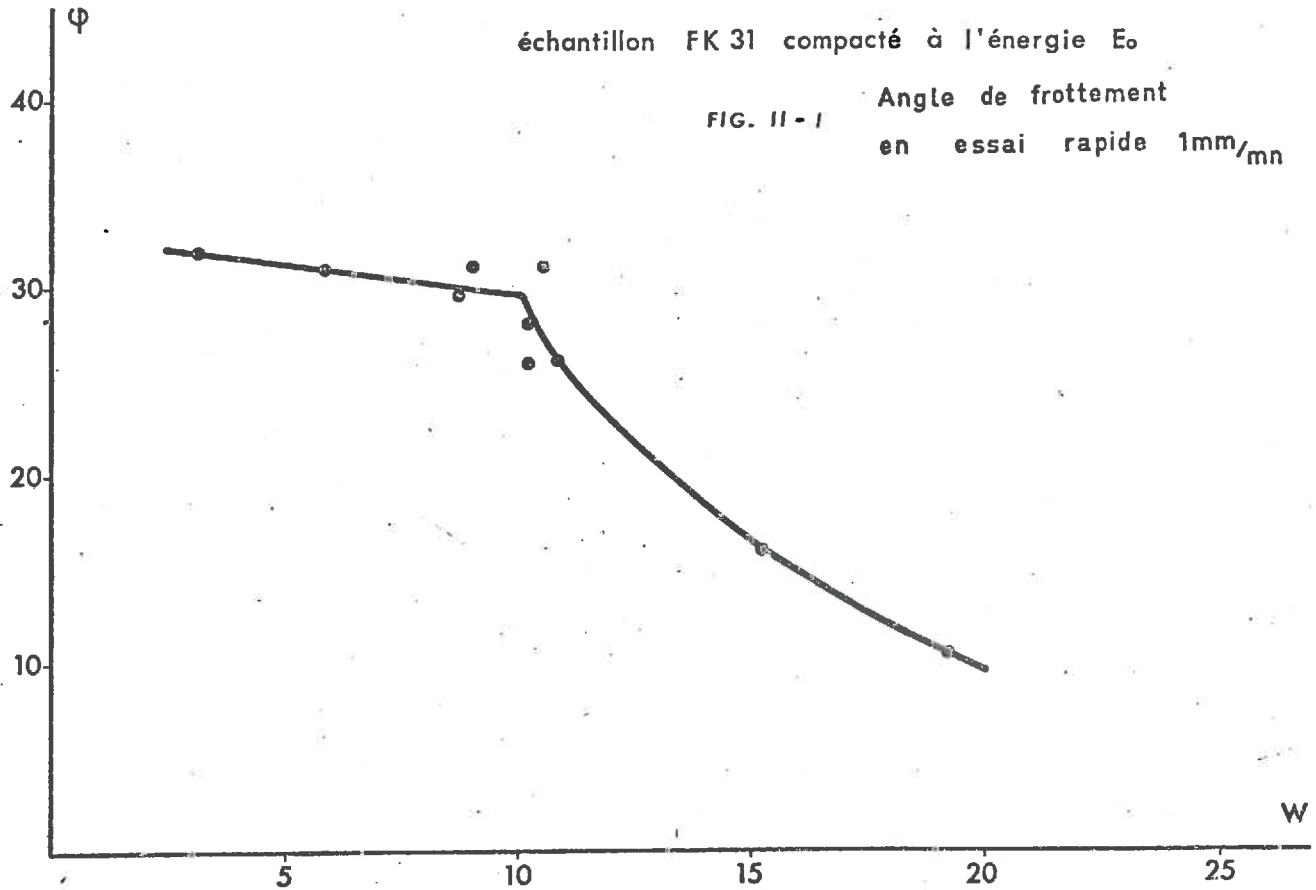
* Même remarque qu'en page 15 pour ces 8 figures.

VARIATIONS de la COMPACTITE
échantillon FK 31 compacté à l'énergie E_0

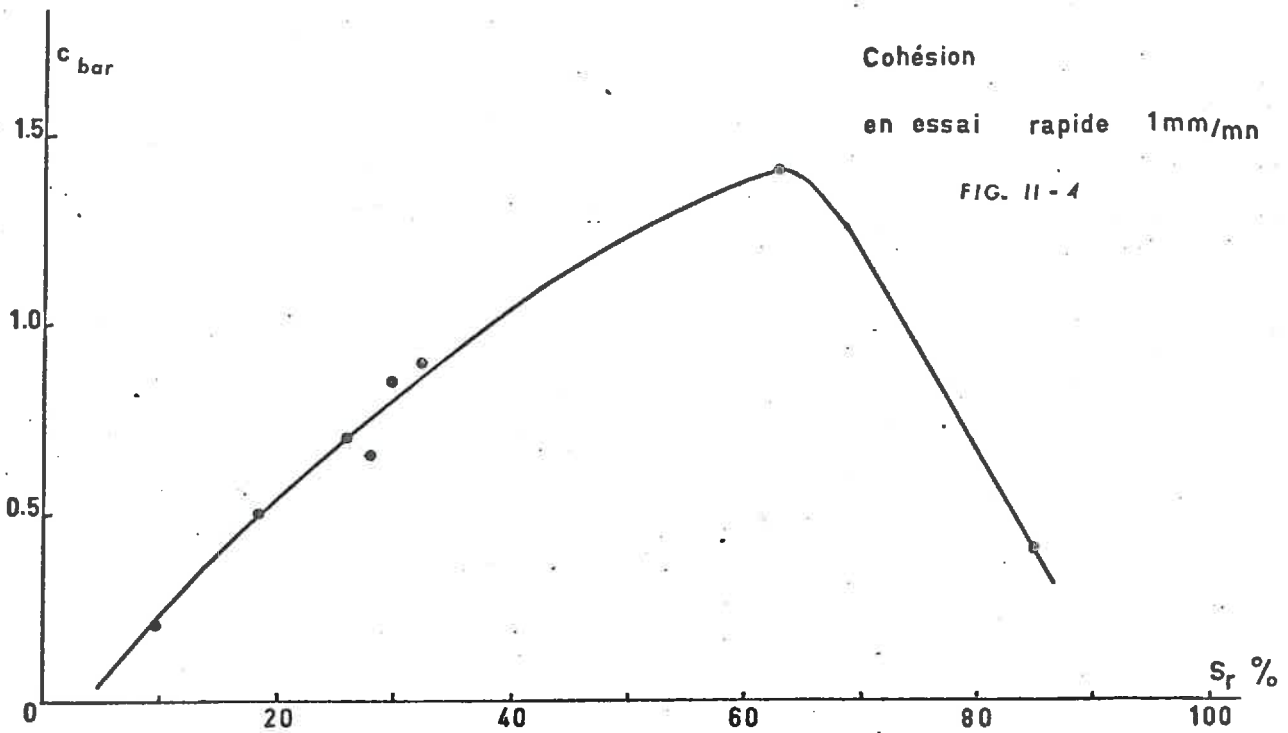
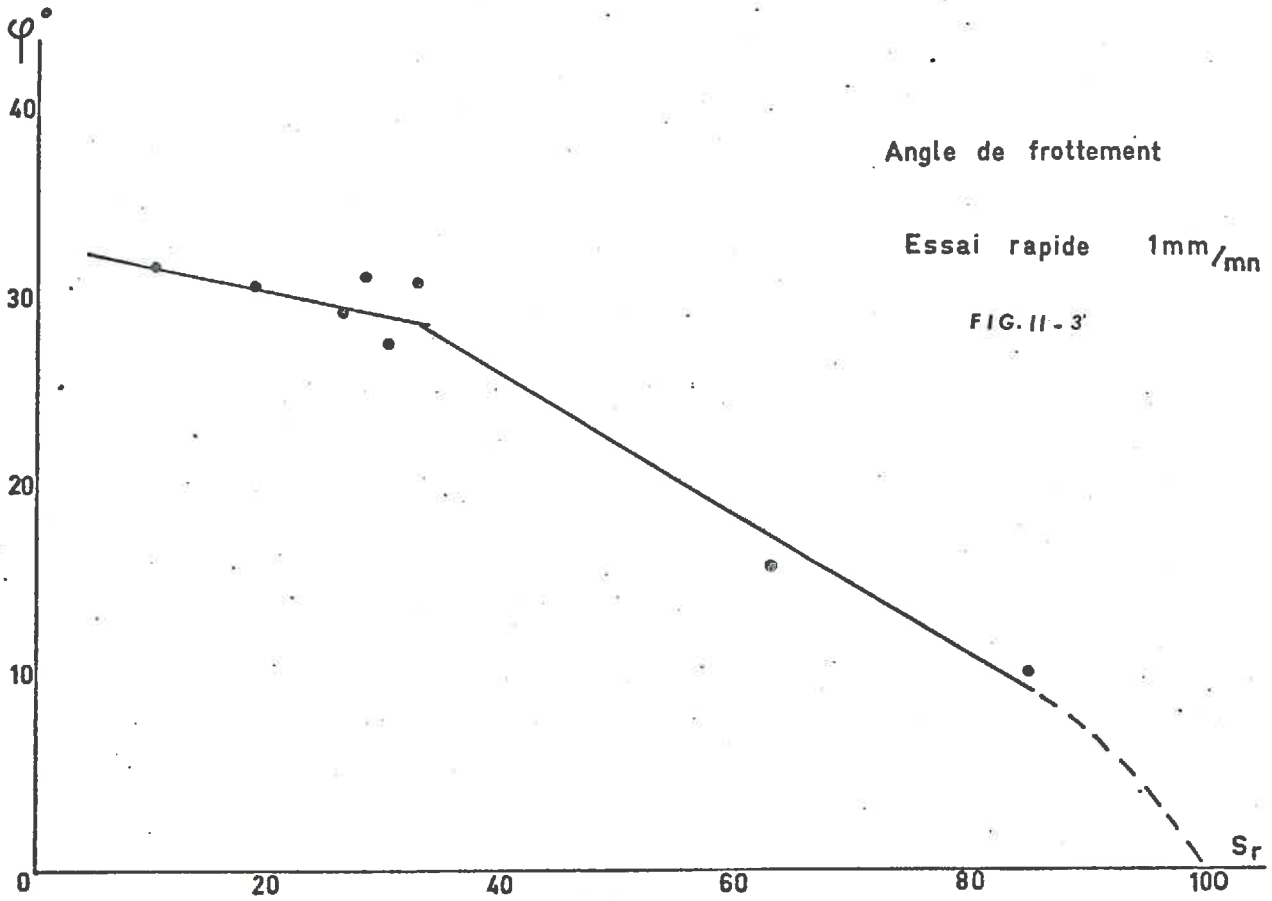
FIG. 10



Variations de φ et c de FK31
en fonction de la teneur en eau w



Variations de φ et c de FK31
en fonction du taux de saturation S_r



la compréhension du mécanisme du tassement des sols dépend d'une bonne connaissance des propriétés mécaniques de la phase argileuse.

I.1.3. Influence de l'énergie de compactage.

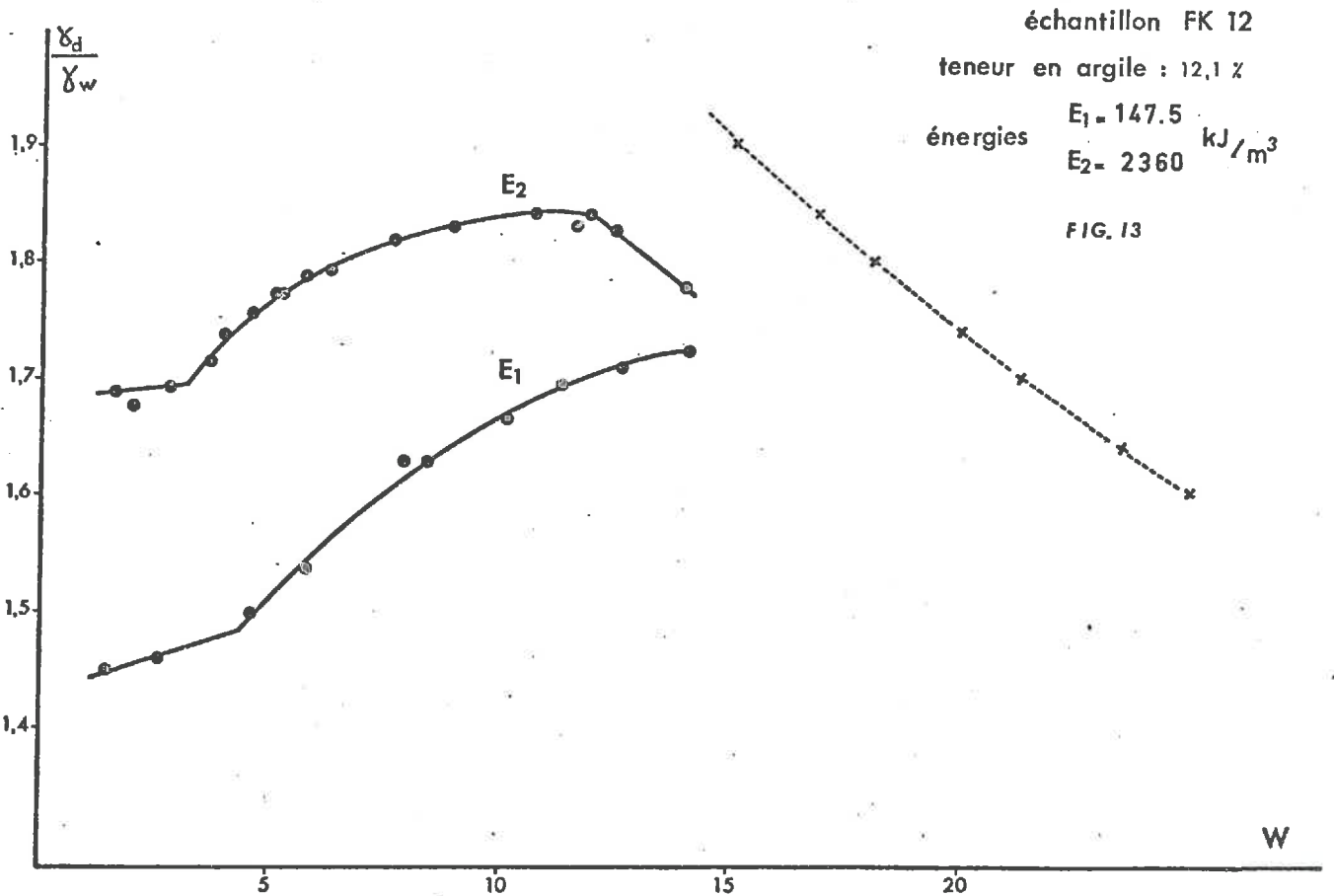
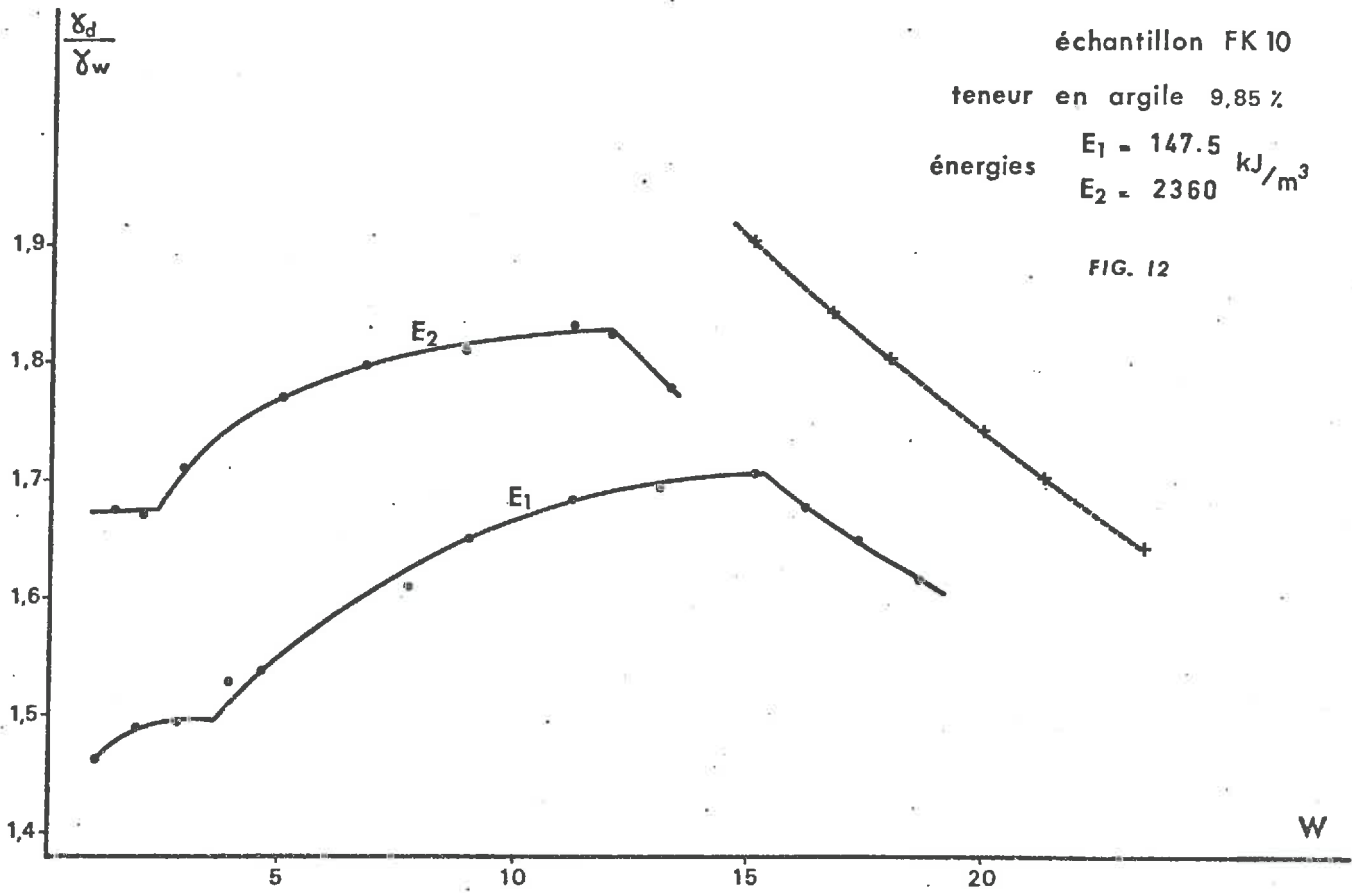
La valeur $w^a = 32 \%$ caractérise la teneur en eau de la kaolinite pour laquelle un mélange de sable et de cette argile atteint le seuil de sensibilité au compactage à l'énergie E_0 . Exceptées les dimensions du moule et de la dame de compactage, le seul paramètre, pour une argile donnée, pouvant agir sur la valeur de w^a est la nature et la grandeur de l'énergie utilisée.

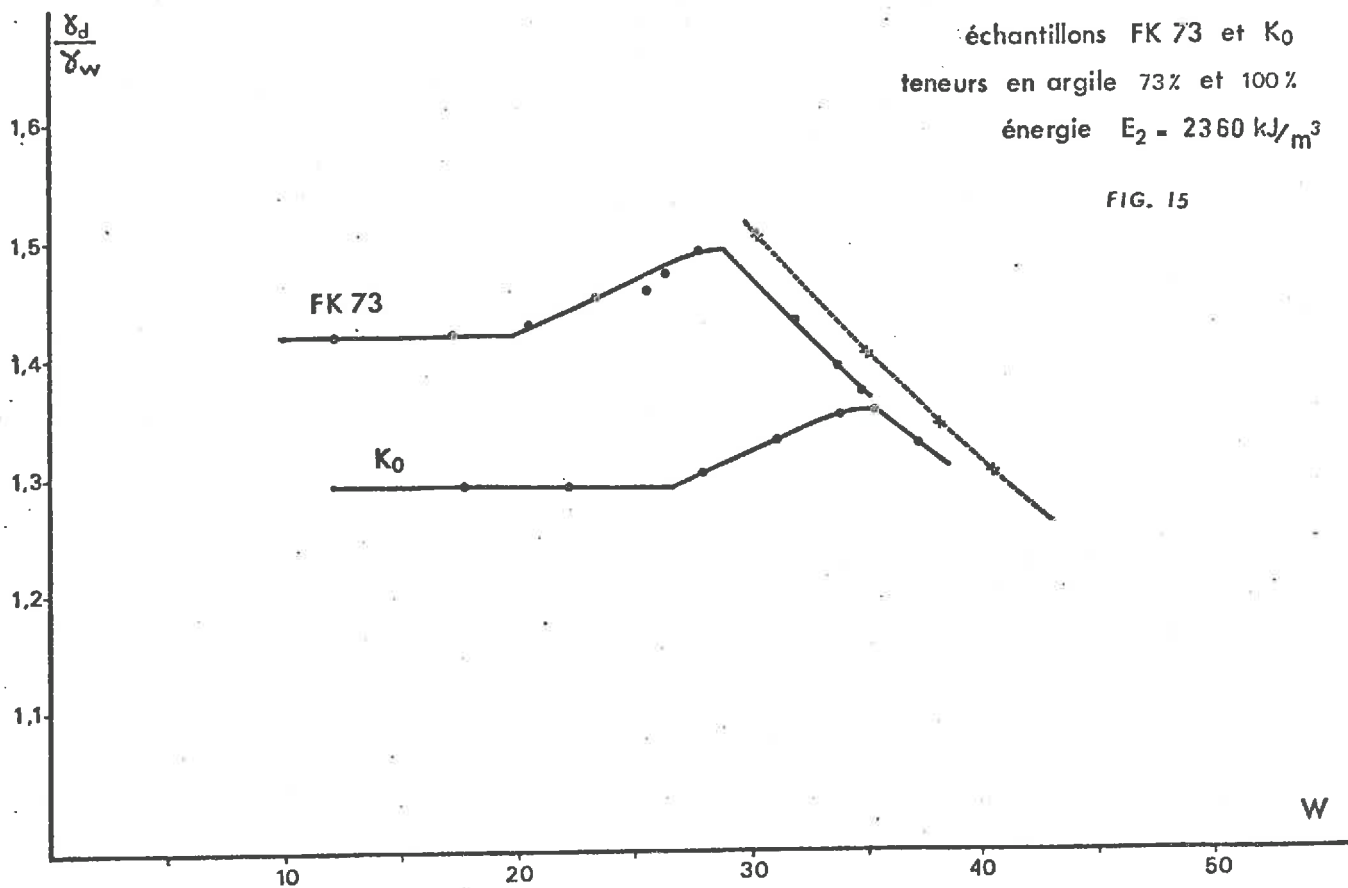
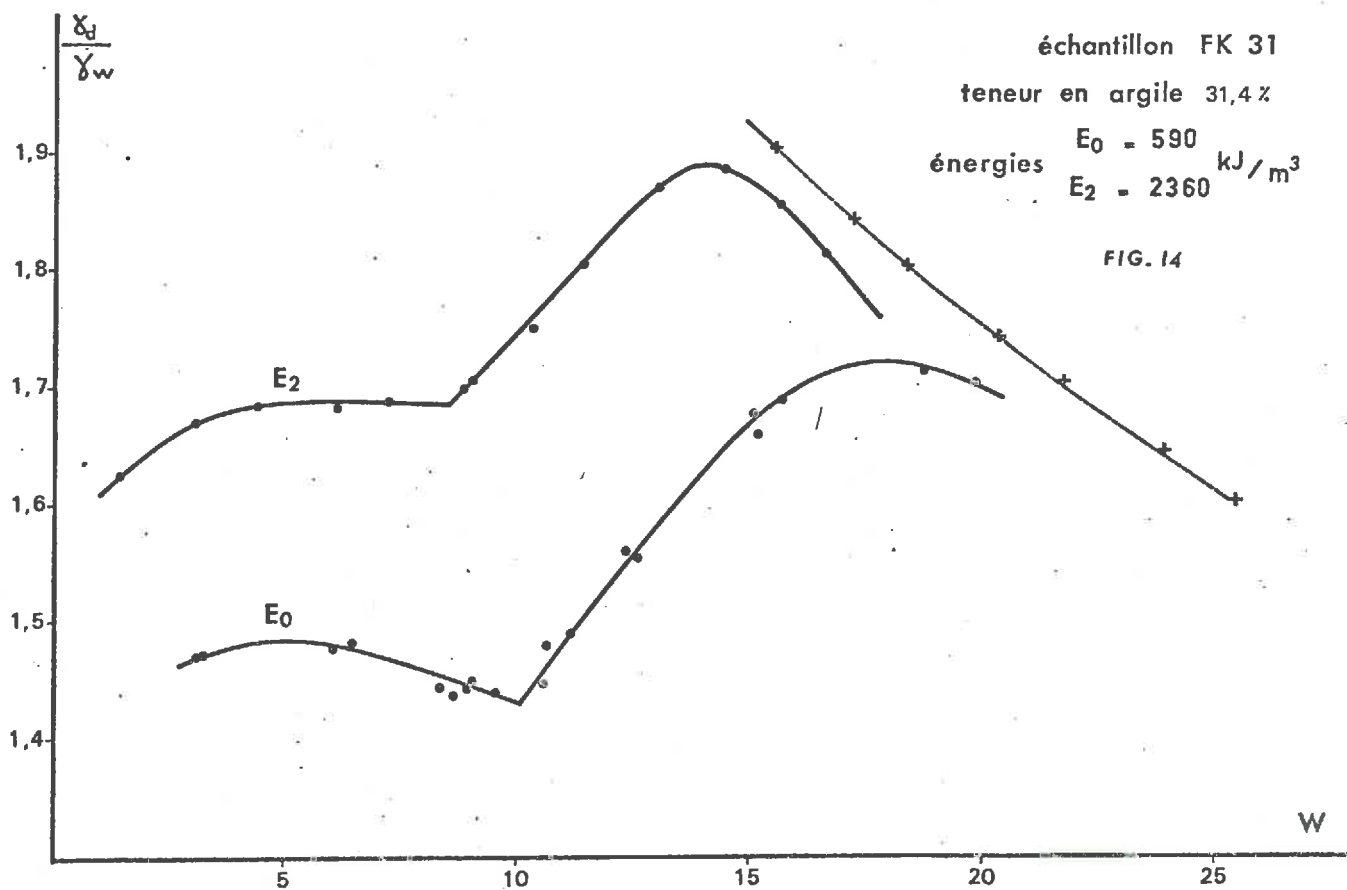
Une première approche de l'étude de l'influence de l'énergie sur le seuil de sensibilité au compactage des mélanges a été faite en considérant deux autres énergies E_1 et E_2 en accord avec les règles énoncées en introduction du chapitre I. Les coefficients de proportionnalité ont pour valeur $k_1 = 0.5$ et $k_2 = 2$ respectivement, ainsi E_1 est quatre fois plus petite que E_0 et E_2 quatre fois plus grande. Le tableau VII résume et compare les caractéristiques de ces deux énergies à celle de référence.

Ces énergies ont été utilisées pour compacter cinq mélanges différents. Les résultats sont qualitativement identiques à ceux obtenus après compactage à l'énergie E_0 : les seuils de sensibilité apparaissent aussi fortement marqués (fig. 12 à 15) mais à des niveaux hydriques différents. Les valeurs correspondantes de w^a sont les suivantes :

Energie totale kJ/m^3	E_1	E_0	E_2
	147,5	590	2360
$w^a \%$	39	32	27

Dans l'intervalle de variations de l'énergie considéré, les variations de w^a semblent suivre approximativement une loi logarithmique. Cette loi empirique reliant une caractéristique hydrique du matériau au logarithme de l'énergie, dans un intervalle donné, n'a pas grande signification en elle-même. Nous remarquerons seulement l'analogie de cette variation avec celle de la teneur en eau à l'Optimum Proctor en fonction de l'énergie que de nombreux Auteurs ont mis en évidence (WILSON 1950, Mc RAE et RUT LEDGE 1952).





Remarque.

Les règles que nous avons choisies, en introduction de ce chapitre I, pour nous permettre de modifier l'énergie de compactage, sont arbitraires, mais un choix était nécessaire pour éviter que les variations des paramètres caractérisant l'énergie soient incontrôlables. De nombreux Auteurs en effet, dont SOWERS G.G. et KENNEDY C.M. (1954), ont montré de quelle façon la compacité d'une argile est tributaire du mode de fractionnement de l'énergie totale de compactage (fig. 16). Il est évident que nous aurions pu choisir une autre règle de variation de cette énergie "dynamique" aussi bien que choisir des énergies de types totalement différents comme le pétrissage, le compactage statique ou l'essai Porter, comme l'ont fait SEED, LUNDGREN et CHAN (1954), WILSON S.D. (1950), GIULIANI F. et ROBLEDO R.S. (1963), CLEGG B. et PAUL M.J. (1967), ALBERRO J.A. (1967), PIKE D.C. (1972).

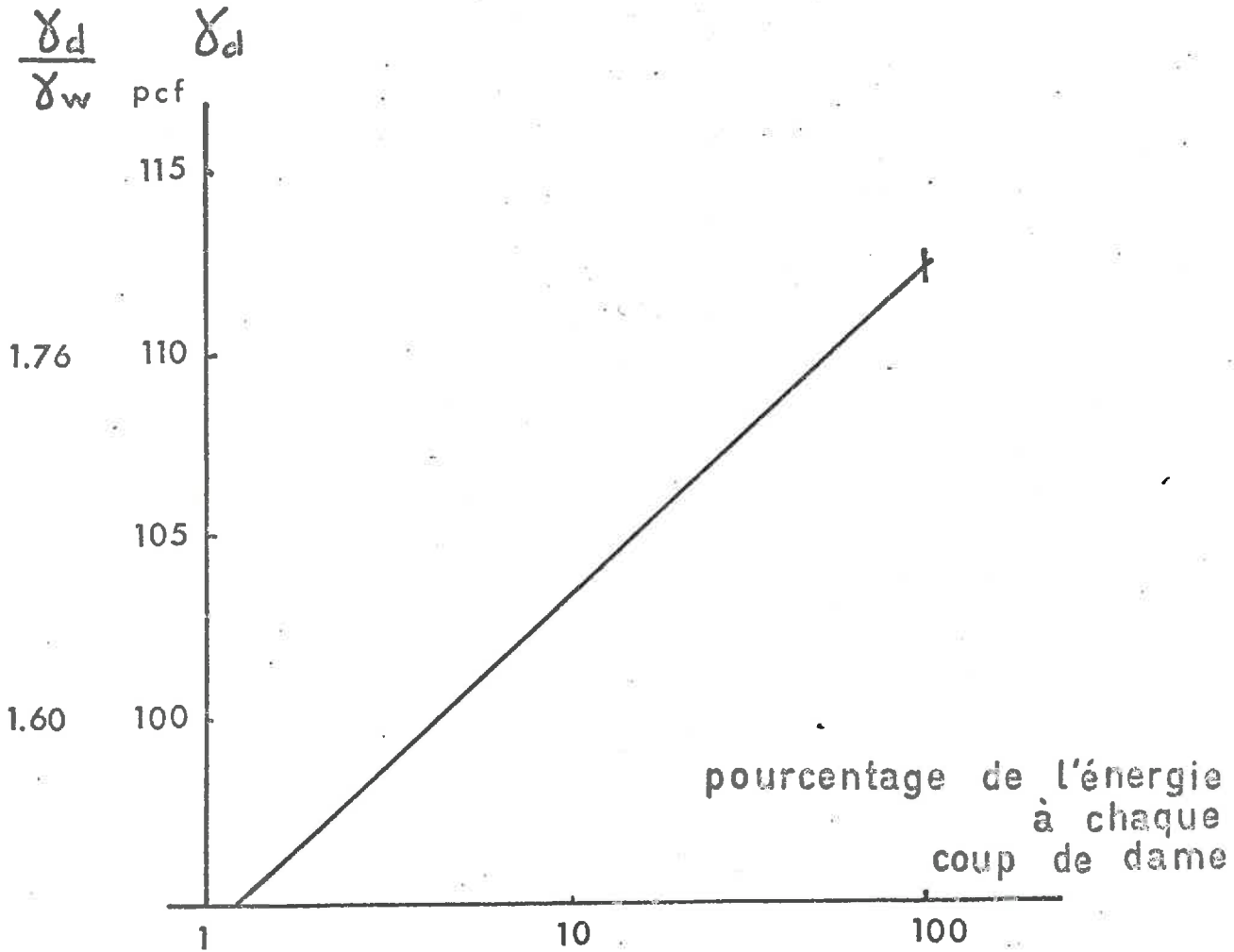
Cependant sous ces différents types d'énergies un même matériau a des comportements qualitativement identiques. C'est de tenter d'expliquer cette identité de comportements qu'est l'objet de ce travail.

I.1.4. Influence de la nature de l'argile.

Les résultats précédents ont logiquement conduit à changer de nature d'argile : 16 échantillons obtenus par mélanges d'une montmorillonite calcaïque avec l'un ou l'autre des deux sables utilisés avec la kaolinite ont été préparés selon le même processus et compactés à l'énergie E_0 . Les figures 17 et 18 représentent les variations de la compacité de certains d'entre eux. Il est facile de constater l'analogie de ces figures avec celles relatives aux mélanges contenant la kaolinite. Toutefois, fig. 18, le point singulier visible aux faibles teneurs en argile a tendance à disparaître au delà de 50 % d'argile, simultanément à une atténuation de l'augmentation de compacité (FM 54) jusqu'à disparition complète du maximum habituellement constaté (M_0). Contrairement à la kaolinite K_0 , la montmorillonite M_0 compactée seule présente une décroissance continue de sa compacité.

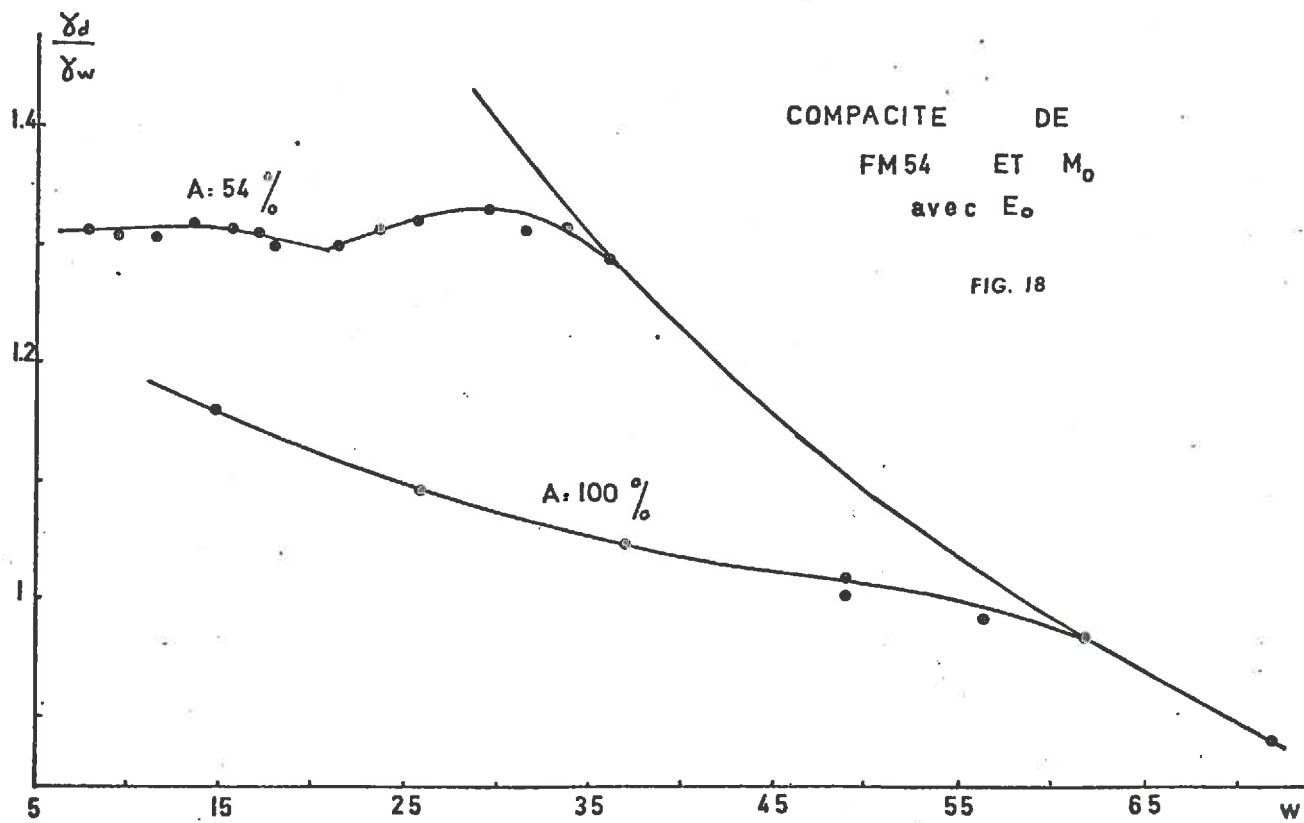
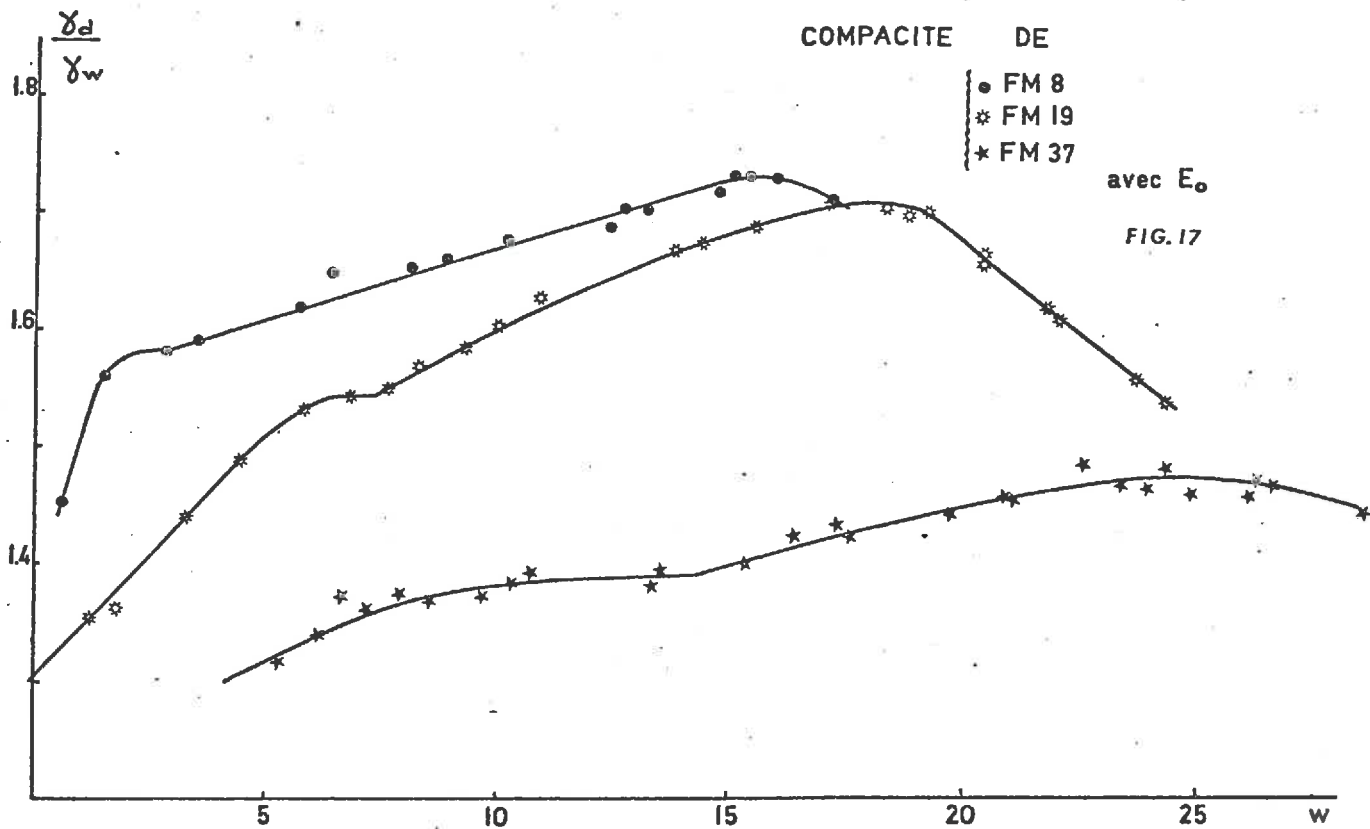
Le tableau VIII présente les teneurs en eau w^c au point singulier des mélanges dont les teneurs en argile varient entre 5 et 54 %. Ces résultats donnent au rapport $\frac{w^c}{A} = w^a$ la valeur moyenne de 0.38, supérieure à la valeur obtenue précédemment, qui généralise cependant les conclusions énoncées à propos des mélanges sable-kaolinite.

COMPACTITE d'une ARGILE en FONCTION du FRACTIONNEMENT de L'ENERGIE



Nota: la plus forte compacité est obtenue par l'utilisation de toute l'énergie de compactage en un coup

FIG. 16 (SOWERS et KENNEDY 1954)



La convergence de ces résultats nous fera admettre par continuité que la montmorillonite M_0 a également un point singulier, à 38 % de teneur en eau pour l'énergie E_0 , pour lequel elle acquiert une densité sèche de 1.040.

I.1.5. Conclusion.

En comparant les résultats obtenus à ceux des auteurs cités, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- 1) Le seuil de sensibilité au compactage d'un mélange dépend d'une part de la grandeur et du mode d'application de l'énergie, d'autre part de la nature de l'argile.
- 2) A ce seuil, et pour une énergie donnée, l'argile est toujours à la même teneur en eau indépendamment de la constitution granulométrique du mélange. Ainsi l'énergie limite-t-elle le gonflement de l'argile qui atteint à ce seuil le même indice des vides quel que soit le mélange.
- 3) A des teneurs en eau inférieures à la teneur en eau du seuil, l'argile, dans le mélange, a un indice des vides inférieur à celui qu'elle a au seuil. L'angle de frottement propre aux particules d'argile, et conséquemment le frottement au contact sable-argile, confère au mélange une résistance au compactage supérieure à l'énergie développée.
- 4) A des teneurs en eau supérieures à la teneur en eau du seuil, l'angle de frottement de l'argile est inférieur à sa valeur critique. L'argile entre alors en plasticité permettant ainsi un déplacement mutuel des grains de sable avec de moins en moins de résistance. Il est alors possible, comme HORN et DEERE (1962) et FAURE (1971) de parler de pouvoir lubrifiant de l'argile ou potentiel de lubrification.
- 5) L'argile ne devient donc plastique, c'est-à-dire lubrifiante, qu'au delà d'un seuil hydrique imposé par la grandeur et le mode d'application de l'énergie.

Quelle différence y a-t-il alors entre Plasticité au sens de Loi de Comportement et Plasticité au sens des Limites d'Atterberg ?

En définissant la Limite de Plasticité, ATTERBERG fait intervenir une énergie de très faible grandeur -difficile à quantifier- et d'une autre qualité que celles utilisées couramment pour compacter. Au cours de ce test,

le matériau subit un allongement longitudinal et non un tassement, mais il y a rupture de l'échantillon lorsque l'angle de frottement est suffisamment faible par rapport à l'énergie mise en jeu. Cependant le phénomène qui se produit à la rupture et le seuil de sensibilité au compactage ont les mêmes causes à des énergies de niveaux et de modes d'application différents.

Cette limite de Plasticité d'Atterberg (w_p) est donc une teneur en eau qui donne à l'argile un indice des vides "de seuil" par rapport à l'énergie mise en jeu au cours de l'essai : il y a donc identité des deux notions de Plasticité.

En outre la limite de Plasticité devient une notion généralisable à condition de définir le niveau d'énergie correspondant. Cette généralisation a pour avantage considérable d'ôter l'aspect arbitraire qu'a ce test d'ATTERBERG en le reliant à des données fondamentales : indice des vides de l'argile et énergie.

Ces premières conclusions imposent la nécessité d'approfondir l'étude du comportement de l'argile en tant que lubrifiant. L'exploitation, au cours de la deuxième partie, des résultats obtenus par un autre mode de compactage appliqué à l'argile seule apporte un certain nombre de notions nouvelles. Ces notions permettent, au cours de la troisième partie, de proposer une explication de l'allure des courbes généralement obtenues au cours du compactage des matériaux.

Il convient, au préalable, de mettre en évidence les conséquences, sur la compacité des mélanges, du rôle lubrifiant qu'assume l'argile lorsqu'elle est à son indice des vides de seuil, c'est-à-dire lorsqu'elle est à la Limite de Plasticité correspondant à l'énergie de compactage utilisée.

I.2. CONSEQUENCES SUR LA COMPACITE DES MELANGES SABLE-ARGILE.

Quelles que soient la nature et la grandeur de l'énergie utilisée la réaction au compactage d'un mélange de sable et d'argile ne peut être considérée comme la résultante additive des propriétés de chacun des constituants. En effet, lorsque le pourcentage des constituants varie, leur disposition réciproque, ou la porosité des mélanges, ne varie pas selon des lois simples.

Les facteurs régissant ces variations sont de deux essences différentes :

- géométrique : Formes et dimensions relatives des particules donnant aux mélanges autant d'assemblages architecturaux (structures) différents.

- mécanique : Particules gonflantes (argiles) ou non gonflantes (limons ou sables) ayant des réactivités mécaniques totalement différentes.

De nombreux auteurs -GRATON L.C. et FRASER H.J. (1935), YERAZUNIS S. et al. (1962) et (1965), FIES J.C. (1971) et STAPLE W.J. (1975)- ont étudié la théorie des modes d'arrangements de grains de tailles différentes. Ces auteurs ont considéré deux populations de grains sphériques S_1 et S_2 chacune d'entre elles étant caractérisée par les diamètres D_1 et D_2 des sphères isodimensionnelles qu'elle contient, (nous supposons que D_1 est très inférieur à D_2). La présence dans un réseau de grains de S_1 d'un certain nombre de grains de S_2 n'aura pas les mêmes conséquences selon les valeurs relatives des diamètres et selon le nombre de grains n'appartenant pas au réseau initial. L'étude détaillée de tous les cas possibles n'a pas d'objet dans le cadre de ce que nous nous sommes proposés. Cependant les trois lois d'arrangement établies sur des bases géométriques sont une référence pour tenter d'expliquer l'arrangement de deux populations de grains dont les réactions mécaniques sont différentes. Aussi avons-nous estimé nécessaire d'évoquer brièvement ces trois lois fondamentales.

I.2.1. Lois d'arrangement théorique des grains.

I.2.1.1. Notations générales et définitions.

Soient V_{S1}^o et V_{S2}^o les volumes de la phase solide des populations S_1 et S_2 respectivement, de volumes totaux V_1 et V_2 , avant mélange. Les porosités de chacun des matériaux sont donc respectivement :

$$n_1^o = 1 - \frac{V_{S1}^o}{V_1} \quad \text{et} \quad n_2^o = 1 - \frac{V_{S2}^o}{V_2}$$

Nous noterons :

$$b_1^o = \frac{V_{S1}^o}{V_1} \quad \text{et} \quad b_2^o = \frac{V_{S2}^o}{V_2}$$

les volumes relatifs avant mélange des deux phases solides des matériaux S_1 et S_2 .

Soient V_{S1} et V_{S2} les volumes des phases solides de chaque population dans leur mélange en proportions choisies. Ce mélange a pour volume total V et pour porosité

$$n = 1 - \frac{V_{S1} + V_{S2}}{V}$$

et nous noterons

$$b_1 = \frac{V_{S1}}{V} \quad \text{et} \quad b_2 = \frac{V_{S2}}{V}$$

les volumes relatifs des phases solides des deux matériaux dans le mélange.

Il vient alors :

$$n = 1 - b_1 - b_2 \quad (1)$$

Ces définitions étant posées, nous nous proposons d'établir les relations entre volumes relatifs dans les divers cas de mélanges proposés par FIES (1971).

I.2.1.2. Loi de Substitution parfaite.

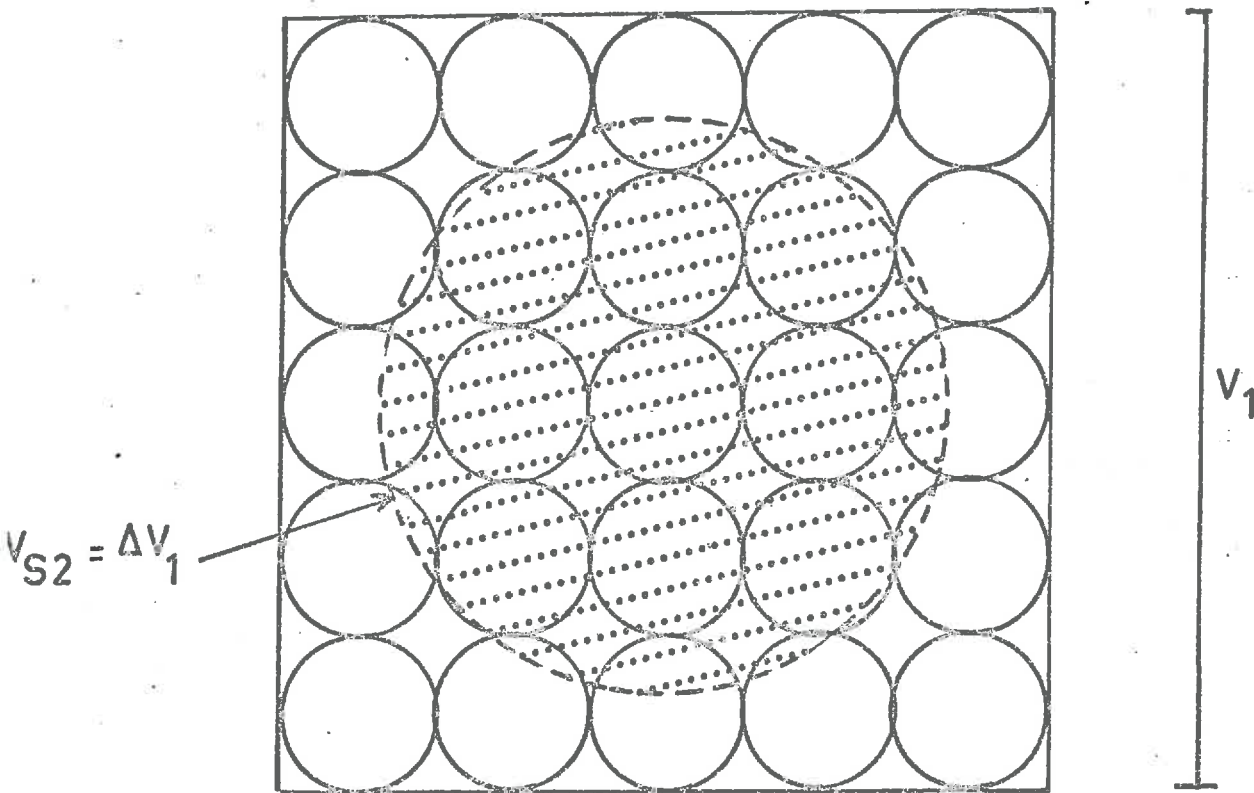
L'Auteur considère en premier lieu un mélange en proportions pondérales connues de m_1 % de grains de diamètre D_1 et m_2 % de grains de diamètre D_2 tel que m_2 soit suffisamment petit pour qu'il soit possible de considérer que l'arrangement des grains de diamètre D_1 ne soit pas entièrement détruit par la présence de grains de l'autre population.

La Loi de Substitution parfaite est basée sur l'hypothèse que cet arrangement de grains S_1 n'est perturbé que par la substitution à volumes égaux d'un volume ΔV_1 de matériau S_1 par un volume de la phase solide V_{S2} de grains S_2 (fig. 19).

Le matériau S_1 de volume V_1 a une porosité n_1^o telle que :

$$n_1^o = 1 - \frac{V_{S1}^o}{V_1} = 1 - b_1^o \quad (2 - 0)$$

Nous nous proposons donc dans un volume ΔV_1 de ce matériau de remplacer l'arrangement des grains S_1 par des grains S_2 individualisés, c'est-à-dire sans volume de vide associé.



V_1 = volume de matériau S_1

ΔV_1 = volume de matériau S_1 remplacé par un volume V_{S2} de la phase solide de S_2

SCHEMA de la LOI de SUBSTITUTION

FIG. 19

Par conséquent :

$$v_{S2} = \Delta v_1 \quad (2 - 1)$$

Initialement à Δv_1 correspond un volume de la phase solide Δv_{S1}^o tel que :

$$n_1^o = 1 - \frac{\Delta v_{S1}^o}{\Delta v_1}$$

compte tenu des équations (2 - 0) et (2 - 1), il vient :

$$\Delta v_{S1}^o = b_1^o \cdot v_{S2}$$

Dans le mélange, le volume relatif b_1 a pour valeur :

$$b_1 = \frac{v_{S1}^o - \Delta v_{S1}^o}{v_1} = b_1^o - b_1^o \frac{v_{S2}}{v_1}$$

or $\frac{v_{S2}}{v_1}$ représente le volume relatif b_2 d'occupation des grains de S_2 dans le mélange, d'où l'équation de la Loi de Substitution parfaite :

$$b_1 = b_1^o (1 - b_2) \quad (2 - 2)$$

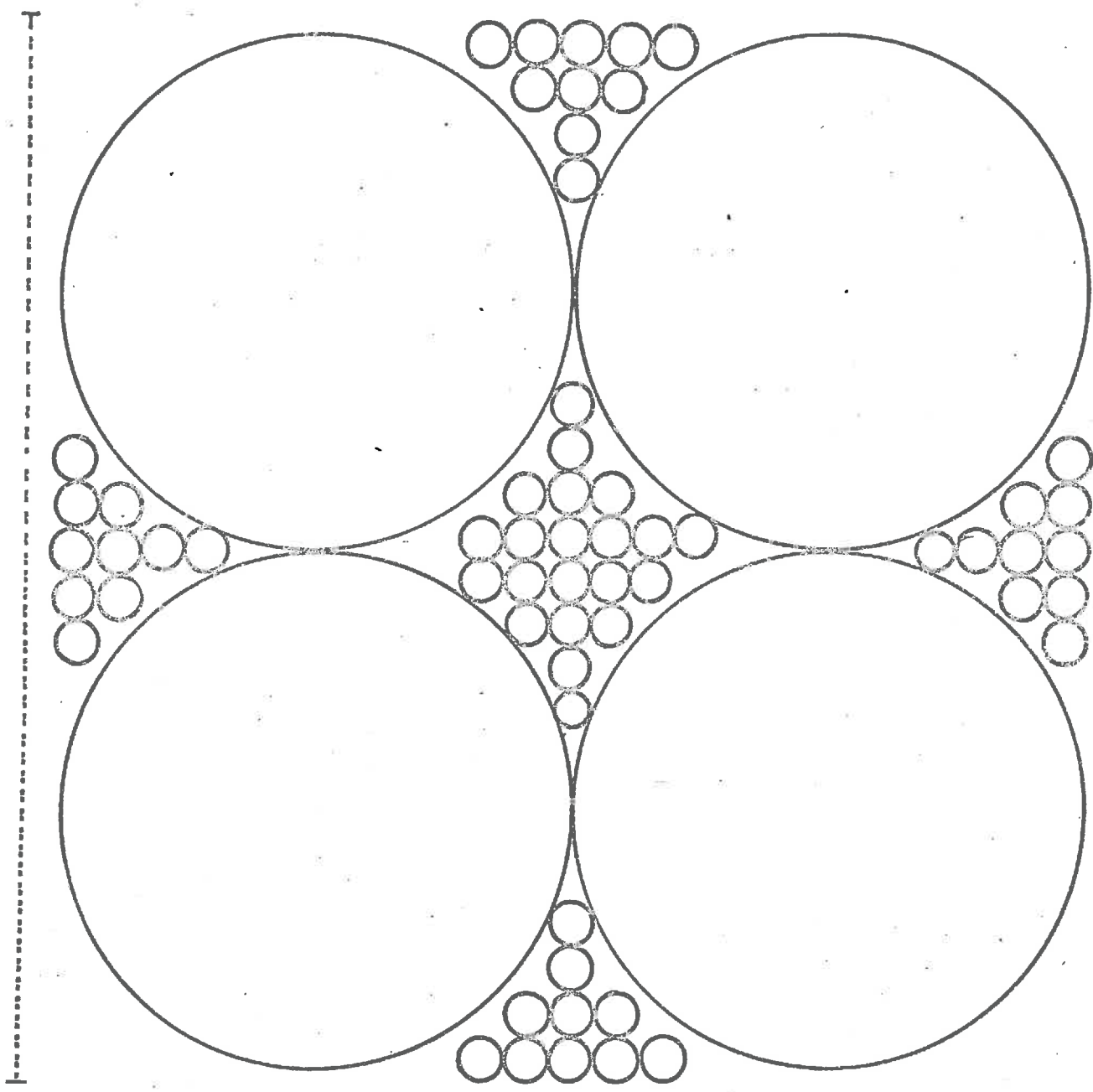
L'expression générale de la porosité du mélange est (équation 1) $n = 1 - b_1 - b_2$, dans le cas particulier de la Loi de Substitution, en remplaçant b_1 par son expression (2 - 2), il vient :

$$n = (1 - b_1^o) \cdot (1 - b_2) \quad (2 - 3)$$

I.2.1.3. Loi de Remplissage parfait.

L'Auteur considère également le cas où m_2 est suffisamment grand par rapport à m_1 pour que l'arrangement des grains de S_2 ne soit pas perturbé par la présence dans leur espace poral de grains de S_1 (fig. 20). Ainsi, dans un volume V_2 de matériau S_2 la présence de grains de S_1 laisse invariant le volume relatif b_2 , donc l'équation de la Loi de Remplissage parfait est :

$$b_2 = b_2^o \quad (2 - 4)$$



V_2 = volume de matériau S_2

FIG. 20

SCHEMA de la LOI de REMPLISSAGE

La porosité du mélange obtenu a pour expression dans ce cas particulier

$$n = 1 - b_1 - b_2^0 \quad (2 - 5)$$

La formulation des hypothèses initiales et la comparaison des deux équations (2 - 3) et (2 - 5) définissent les intervalles de validité des deux lois de la façon suivante :

$$b_2 < b_2^0 \quad \text{avec} \quad b_1 = b_1^0 \cdot (1 - b_2) \quad \text{Loi de Substitution}$$

$$b_2 = b_2^0 \quad \text{avec} \quad b_1 < b_1^0 \cdot (1 - b_2) \quad \text{Loi de Remplissage}$$

Limite commune de validité : cas où les hypothèses sont identiques, alors $b_2 = b_2^0$ et $b_1 = b_1^0 \cdot (1 - b_2)$ sont simultanément vérifiées ce qui donne à la porosité d'un tel mélange, l'expression :

$$n = (1 - b_1^0) \cdot (1 - b_2^0) = n_1^0 \cdot n_2^0$$

produit des deux porosités initiales des matériaux S_1 et S_2 avant leur mélange.

I.2.1.4. Loi d'Additivité

L'Auteur établit cette Loi en supposant que le mélange des deux populations de grains ne perturbe pas les arrangements initiaux respectifs de chacune d'elles, chaque population conserve donc dans le mélange sa propre porosité (fig. 21).

Cette hypothèse a pour conséquence que le volume de matériau V après mélange est égal à la somme des volumes de matériaux respectifs V_1 et V_2 des deux constituants.

Il vient :

$$n_1^0 = 1 - \frac{V_{S1}^0}{V_1} = 1 - b_1^0 \quad (3 - 1)$$

et

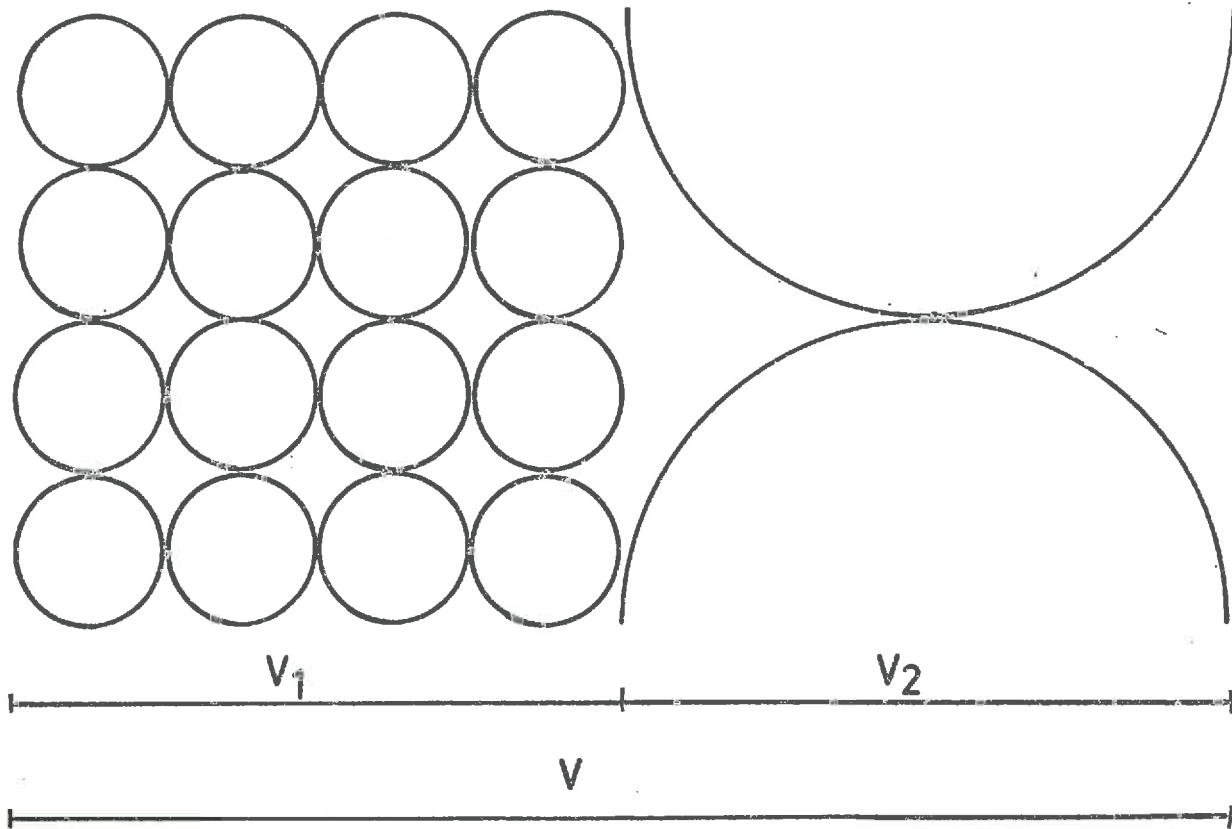
$$n_2^0 = 1 - \frac{V_{S2}^0}{V_2} = 1 - b_2^0 \quad (3 - 2)$$

avec par hypothèse

$$V_1 + V_2 = V \quad (3 - 3)$$

Les équations (3 - 1) et (3 - 2) donnent :

$$\frac{V_{S1}}{V_1} = b_1^0 \quad \text{et} \quad \frac{V_{S2}}{V_2} = b_2^0$$



V_1 = volume de matériau S₁

V_2 = volume de matériau S₂

V = volume de matériau du mélange

SCHEMA de la LOI d'ADDITIVITE

FIG. 21

remplaçant V_1 et V_2 par leur valeur dans l'équation (3 - 3) et sachant que, par définition, (I.2.1.1.) les volumes relatifs dans le mélange sont :

$$b_1 = \frac{V_{S1}}{V} \quad \text{et} \quad b_2 = \frac{V_{S2}}{V}$$

l'équation (3 - 3) devient :

$$\frac{b_1}{b_1^o} + \frac{b_2}{b_2^o} = 1 \quad (3 - 4)$$

La porosité d'un tel mélange, $n = 1 - b_1 - b_2$, s'écrit :

$$n = \frac{b_1}{b_1^o} + \frac{b_2}{b_2^o} - b_1 - b_2$$

soit, tous calculs faits :

$$n = \frac{b_1}{b_1^o} \cdot n_1^o + \frac{b_2}{b_2^o} \cdot n_2^o \quad (3 - 5)$$

Comme $\frac{b_1}{b_1^o} = \frac{V_1}{V}$ et $\frac{b_2}{b_2^o} = \frac{V_2}{V}$ l'équation (3 - 5)

exprime que la porosité du mélange est proportionnelle aux volumes de matériaux respectifs de chacun des constituants. Le mélange n'est pas un mélange au sens strict du terme, il n'est qu'une juxtaposition de matériaux indépendants l'un de l'autre bien qu'occupant un volume donné V . Il est évident que cette Loi n'a pas de sens physique pour des matériaux granuleux.

I.2.1.5. Conclusion

Si certaines de ces lois ne semblent pas avoir de réalité physique pour les mélanges de deux populations de grains, nous verrons cependant qu'il est possible d'obtenir un comportement équivalent au cours du compactage pour des valeurs particulières de l'énergie. En outre, les deux premières Lois, appelées Lois d'interaction simple par FIES J.C., HENIN S. et MONNIER G. (1972), sont la base d'une recherche permettant d'expliquer l'évolution continue des arrangements lors de la variation des pourcentages

pondéraux des constituants. Les Auteurs constatent que les résultats expérimentaux sont très éloignés de ces Lois théoriques lorsque le rapport des diamètres D_2 / D_1 est voisin de l'unité. Par contre, dès que ce rapport est égal ou supérieur à 100 (aucun des constituants n'étant de l'argile), les résultats expérimentaux sont en relation très étroite avec la théorie et d'autant mieux que le rapport est grand.

De façon générale, les représentations graphiques de ces Lois théoriques dans les axes b_1 et b_2 (fig. 22) apparaissent comme des limites définissant une aire à l'intérieur de laquelle se situent tous les résultats expérimentaux.

Nous avons donc choisi de prendre ces Lois comme référence dans le cas des mélanges que nous avons étudiés, le rapport des diamètres des constituants étant de l'ordre de 500 à 1.000.

I.2.2. Résultats expérimentaux au seuil de sensibilité au compactage

Nous savons (HAINES 1923, PELTIER 1959) que des teneurs en eau supérieures à la Limite de Retrait confèrent à l'argile saturée des gonflements qui leur sont directement proportionnels. Il est donc possible de considérer qu'à l'une de ces teneurs en eau, les mélanges sont constitués non pas de sable, d'argile et d'eau mais de sable et d'argile gonflée et saturée.

I.2.2.1. Notations

Les volumes relatifs b_1^0 , b_2^0 et b_1 , b_2 définis en I.2.1.1. concernent dorénavant les phases argile saturée (contenant w^a % d'eau), notée avec l'indice 1, et sable, notée avec l'indice 2. Comme nous disposons de deux argiles (Kaolinite et Montmorillonite) et de deux sables (Fontainebleau et Brou), les volumes relatifs b_1^0 et b_2^0 seront éventuellement notés b_1^K et b_1^M et b_2^F , b_2^B lorsque la différenciation entre argiles ou entre sables est indispensable.

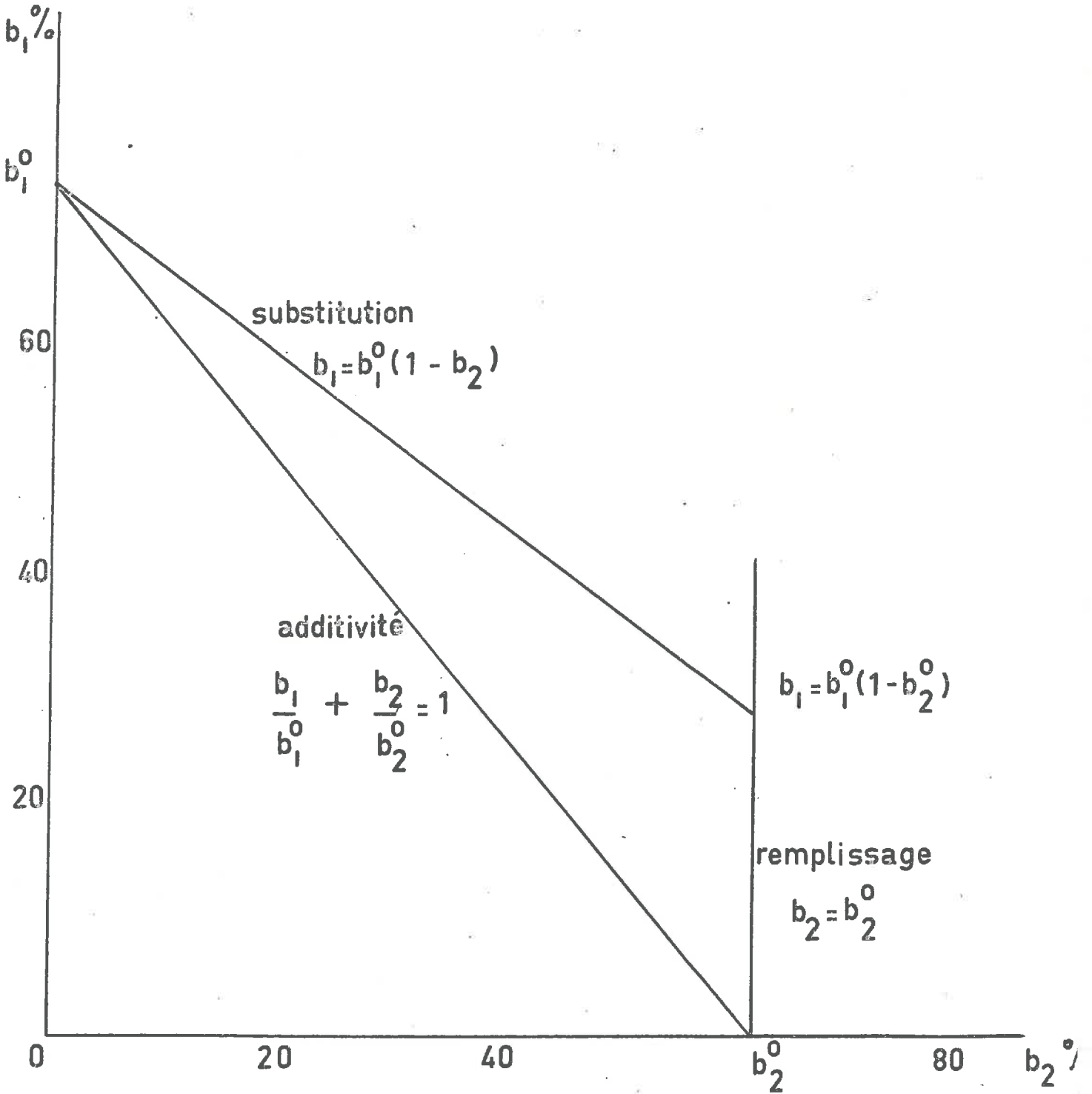
Les volumes relatifs concernant le point particulier que représente le seuil de sensibilité au compactage seront notés b_1^{0c} , b_2^{0c} , b_1^c et b_2^c . Bien évidemment au seuil de sensibilité au compactage, nous aurons éventuellement les notations b_1^{Kc} , b_1^{Mc} , b_2^{Fc} , et b_2^{Bc}

Nous nous proposons de calculer, pour chaque mélange étudié, les volumes relatifs b_1^0 et b_2^0 des constituants, sachant qu'en ce point de la

REPRESENTATION des LOIS THEORIQUES

d' ARRANGEMENT

FIG. 22



courbe, le mélange a un poids volumique sec $\gamma_d = \gamma_d^c$ et une teneur en eau $w = w^c$ (I.1.1.).

Soit :

M_s la masse de la phase solide

M_s^a la masse de la phase solide de l'argile

M_s^s la masse de la phase solide du sable

$$M_s^a + M_s^s = M_s$$

M_w la masse d'eau contenue dans le matériau

$$A = \frac{M_s^a}{M_s} \text{ la teneur en argile}$$

$$S = \frac{M_s^s}{M_s} \text{ la teneur en sable}$$

V le volume de matériau

V_w le volume d'eau

V_s^a le volume de la phase solide de l'argile

V_s^s le volume de la phase solide du sable

V_g le volume de la phase gaz

$$\text{avec } V_w + V_s^a + V_s^s + V_g = V$$

$$\gamma_s^a \text{ le poids volumique de la phase solide de l'argile} = \frac{M_s^a}{V_s^a} \cdot g$$

$$\gamma_s^s \text{ le poids volumique de la phase solide du sable} = \frac{M_s^s}{V_s^s} \cdot g$$

Par définition (I.2.1.1.) $b_1 = \frac{V_{S1}}{V} = \frac{V_s^a + V_w}{V}$ puisque toute l'eau

est affectée à l'argile considérée comme saturée et représentant l'argile 1.

$$b_2 = \frac{V_{S2}}{V} = \frac{V_s^s}{V} \text{ puisque le sable représente la phase 2.}$$

$$\text{Or : } \frac{V_s^a}{V} = \frac{V_s^a}{g \cdot M_s^a} \cdot \frac{M_s^a}{M_s} \cdot \frac{M_s \cdot g}{V} = \frac{1}{\gamma_s^a} \cdot A \cdot \gamma_d$$

$$\frac{V_w}{V} = \frac{V_w}{g \cdot M_w} = \frac{M_w}{M_s} \cdot \frac{M_s \cdot g}{V} = \frac{1}{\gamma_w} \cdot w \cdot \gamma_d$$

$$\frac{V_s^s}{V} = \frac{V_s^s}{g \cdot M_s^s} \cdot \frac{M_s^s}{M_s} \cdot \frac{M_s \cdot g}{V} = \frac{1}{\gamma_s^s} \cdot S \cdot \gamma_d$$

Au seuil de sensibilité au compactage, il vient :

$$b_1^c = \frac{1}{\gamma_a} \cdot A \cdot \gamma_d^c + \frac{1}{\gamma_w} \cdot w^c \cdot \gamma_d^c$$

soit
$$b_1^c = \left(\frac{1}{\gamma_a} + \frac{w^a}{\gamma_w} \right) \cdot A \cdot \gamma_d^c \quad (4 - 1)$$

puisque (I.1.2.1.) nous savons que $\frac{w^c}{A} = w^a$

avec
$$b_2^c = \frac{1}{\gamma_s} \cdot S \cdot \gamma_d^c \quad (4 - 2)$$

I.2.2.2. Présentation des résultats

Remarque préliminaire

Le lecteur pourrait s'étonner que sur les figures et tableaux qui vont suivre, le volume relatif b_1 ne soit jamais égal à l'unité, même dans le cas des argiles K_0 et M_0 . C'est pourquoi, nous rappelons que b_1 est le volume relatif de la phase argile + eau qui ne prend pas en compte les vides dus à l'arrangement des particules d'argile entre elles.

Dans le cas des argiles K_0 et M_0 , il est évident que les échantillons compactés ne sont pas globalement saturés : les résultats expérimentaux, en effet, ne sont pas sur l'hyperbole de saturation et c'est seulement sur cette hyperbole que b_1 est égal à l'unité (ou à 100 %).

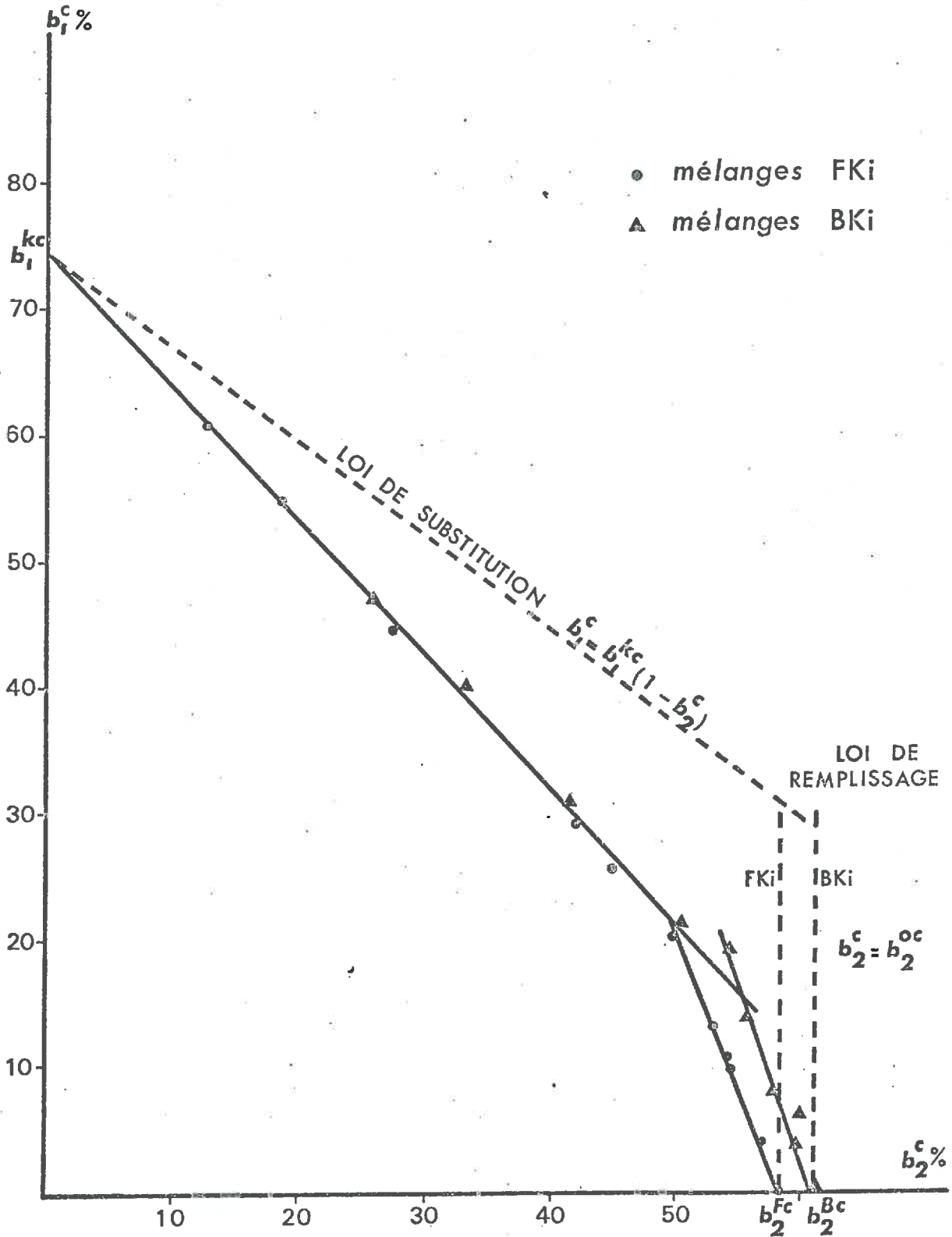
Ces résultats, obtenus aux énergies de compactage E_0 , E_1 et E_2 et présentés sur les fig. 23, 24 et 25 et le Tableau IX, permettent de constater :

1) Que les Lois de Substitution et de Remplissage parfaits ne sont jamais strictement vérifiées, sauf peut-être pour les mélanges BM_1 sableux. L'analyse purement géométrique du mode d'assemblage ne suffit donc pas pour expliquer le comportement des matériaux.

VOLUMES RELATIFS EXPERIMENTAUX des PHASES SOLIDES au SEUIL de SENSIBILITE

FIG. 23

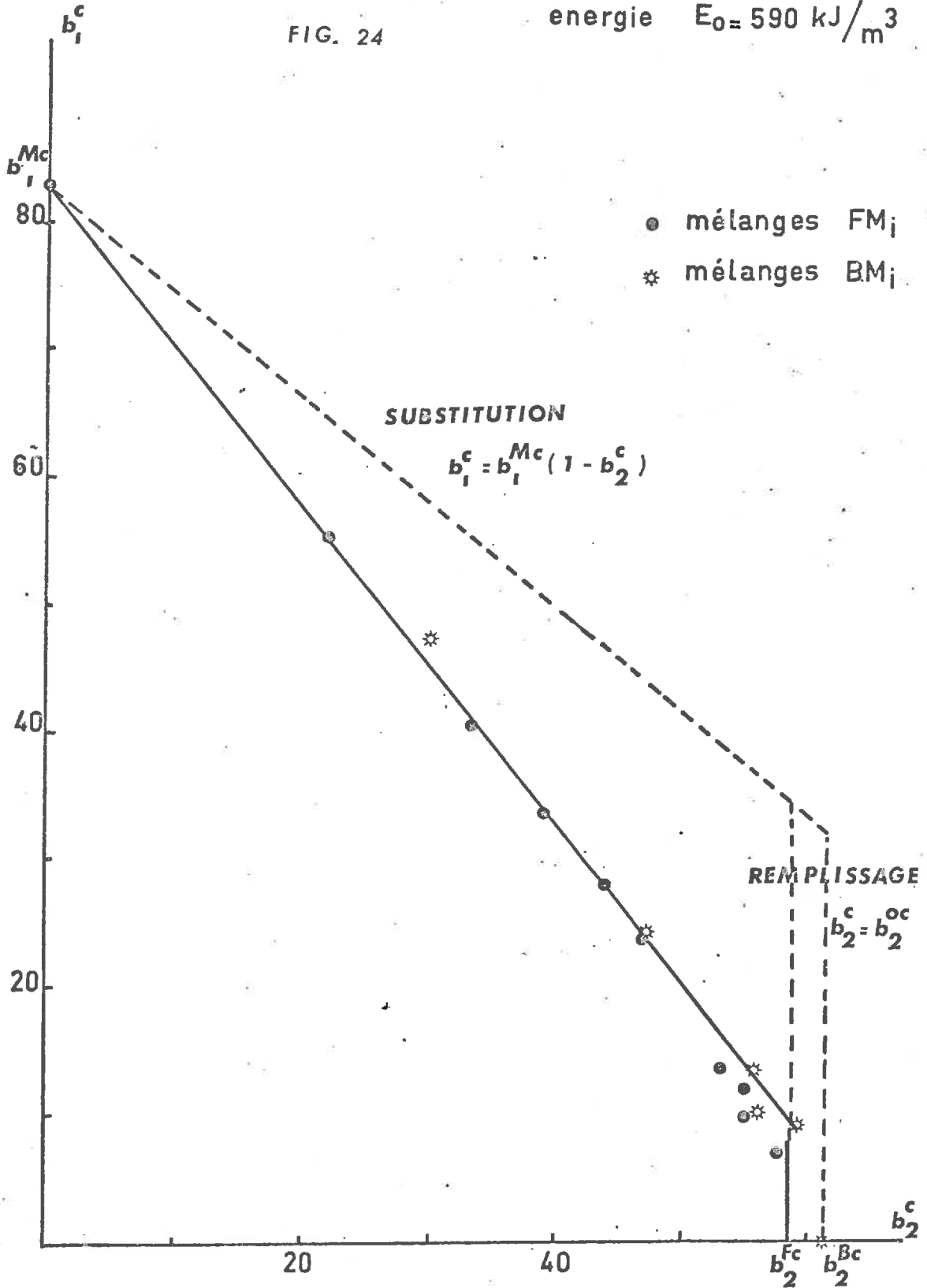
énergie $E_0 = 590 \text{ kJ/m}^3$



VOLUMES RELATIFS EXPERIMENTAUX des PHASES SOLIDES au SEUIL de SENSIBILITE

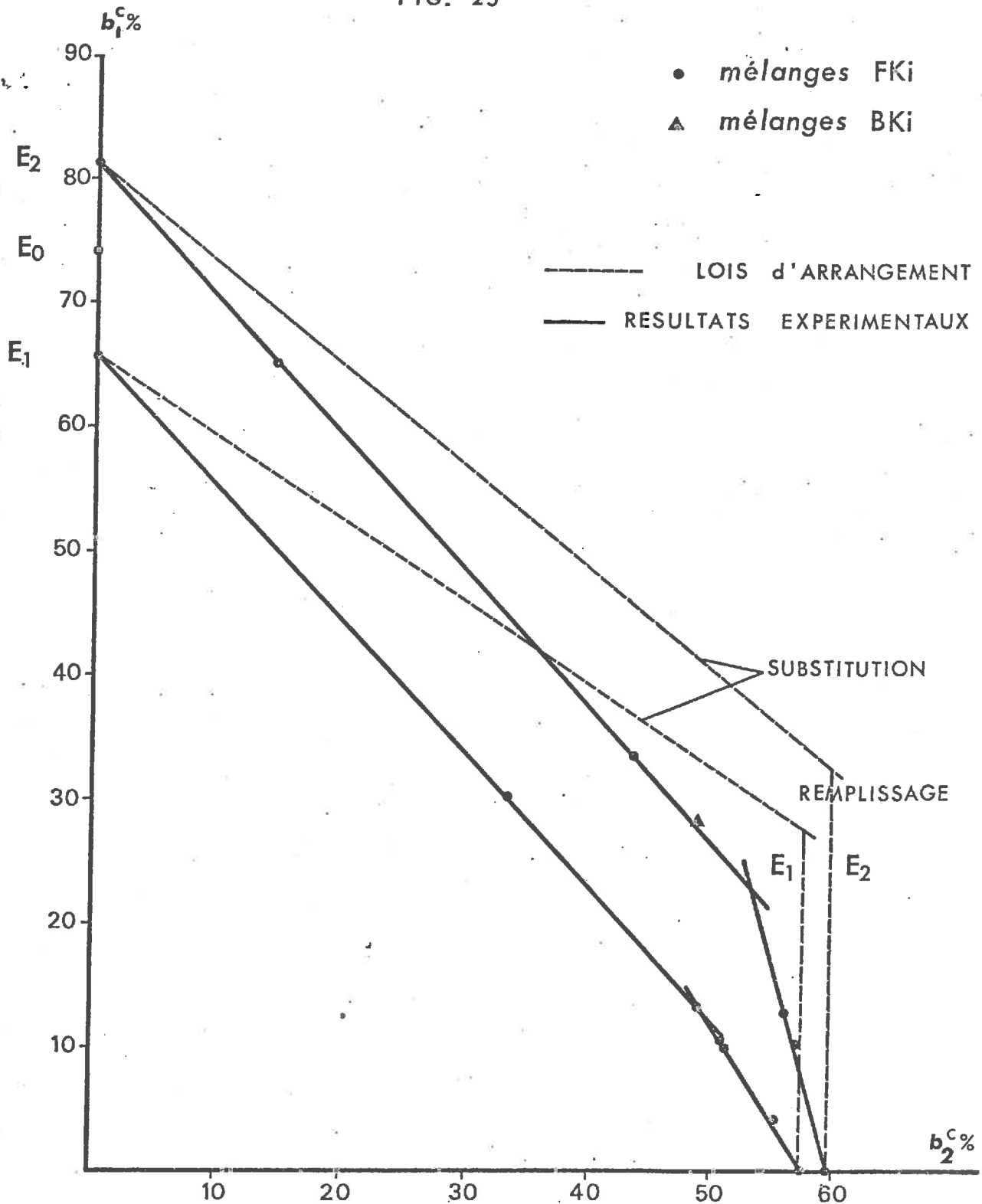
energie $E_0 = 590 \text{ kJ/m}^3$

FIG. 24



VOLUMES RELATIFS EXPERIMENTAUX des
PHASES SOLIDES au SEUIL de SENSIBILITE
énergies E_1 et E_2

FIG. 25



- 2) Qu'une augmentation de l'énergie de compactage donne des résultats expérimentaux plus proches de ces deux Lois.
- 3) Que les mélanges contenant de la montmorillonite sont plus éloignés de la Loi de Substitution parfaite.
- 4) Qu'il existe cependant une discontinuité dans les variations de b_1^c en fonction de b_2^c , éventuellement deux pour les mélanges FM_1 . Il y a donc bien deux classes de mélanges définies par des comportements qualitativement différents. Nous avons donc ainsi :
 - a) les mélanges à "comportement sableux" caractérisés par une loi de variations présentant éventuellement un écart avec la Loi de Remplissage parfait.
 - b) les mélanges à "comportement non sableux", caractérisés par une loi de variations présentant un écart avec la Loi de Substitution parfaite ou un écart, faible semble-t-il, par rapport à la Loi d'Additivité.

Ces appellations sont justifiées par le fait que dans le premier cas les proportions pondérales de sable sont plus importantes que dans le second cas. Nous verrons s'il est possible de choisir une autre appellation pour les mélanges "non sableux".

I.2.2.3. Etude des mélanges à comportement non sableux.

Indépendamment des qualités intrinsèques de la phase argile, les caractéristiques de formes des surfaces qu'elle recouvre (rugosité, sphéricité, etc ...) sont des facteurs qui assujettissent son efficacité. Or, les deux squelettes sableux utilisés ont des origines naturelles différentes et leurs grains, de formes dissemblables et irrégulières, ne sont certainement pas comparables à des sphères. De plus, ces sables ont des étalements granulométriques tels que, même en première approximation, il est impossible de les considérer comme étant constitués de populations isodimensionnelles de particules.

Ces deux remarques se traduisent dans les faits par des assemblages de grains différents pour chaque population, c'est-à-dire par des valeurs différentes des volumes relatifs des phases solides des sables ($b_2^{Fc} \neq b_2^{Bc}$), lorsqu'ils sont compactés seuls (Tableau IX).

Analyser et comparer entre elles les conséquences du comportement mécanique de la phase "argile saturée" dans des mélanges ayant des squelettes sableux différents impose donc la nécessité de supprimer ces "effets de forme". C'est à cette fin que nous avons modifié l'expression des précédents résultats expérimentaux en considérant les valeurs du rapport b_2^c / b_2^{oc} , rapport qui supprime les coefficients implicites caractérisant la forme des grains. Pour rendre plus homogènes entre elles les grandeurs expérimentales étudiées et, de ce fait, raisonner sur des grandeurs sans dimensions exprimées en pour cent, nous avons également considéré les valeurs du rapport b_1^c / b_1^{oc} .

Ainsi présentés (Tableau X et fig. 26), les résultats permettent de constater :

- que la relation entre b_2^c / b_2^{oc} et b_1^c / b_1^{oc} semble être linéaire,
- que le coefficient de cette relation ne semble pas affecté par la nature de l'argile mais uniquement par la valeur de l'énergie de compactage : l'écart par rapport à la Loi d'Additivité semble être d'autant plus important que la valeur de l'énergie est grande, rapprochant ainsi la loi expérimentale de la Loi de Substitution.

Nous avons testé la signification statistique de ces résultats expérimentaux pour confirmer ces deux constatations :

A l'énergie $E_0 = 590 \text{ kJ/m}^3$

- pour les dix couples de valeurs correspondant aux échantillons FK_i et BK_i , il vient :

$$\frac{b_1^c}{b_1^{Kc}} \% = - 0.859 \frac{b_2^c}{b_2^{oc}} \% + 100.3$$

avec un coefficient de corrélation égal à - 0.999

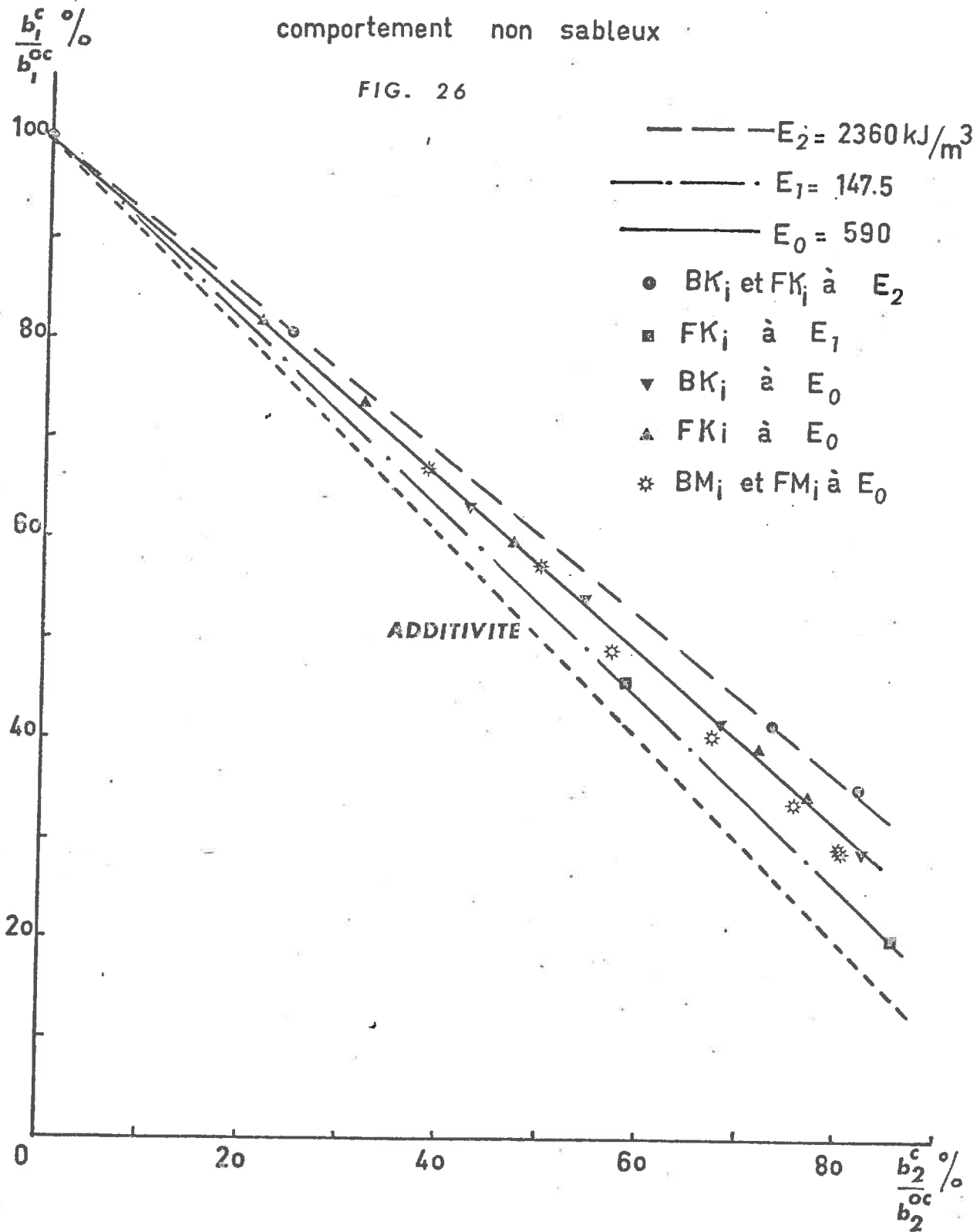
- pour les huit couples de valeurs correspondant aux échantillons FM_i et BM_i , il vient :

$$\frac{b_1^c}{b_1^{Mc}} \% = - 0.892 \frac{b_2^c}{b_2^{oc}} \% + 100.5$$

avec un coefficient de corrélation égal à - 0.999

VOLUMES RELATIFS EXPERIMENTAUX des
PHASES SOLIDES au SEUIL de SENSIBILITE
comportement non sableux

FIG. 26



- pour l'ensemble des 18 couples de valeurs, il vient :

$$\frac{b_1^c}{b_1^{oc}} \% = - 0.878 \frac{b_2^c}{b_2^{oc}} \% + 100.6$$

soit

$$\frac{b_1^c}{b_1^{oc}} \% = - c \cdot \frac{b_2^c}{b_2^{oc}} \% + 100.6 \quad (5)$$

avec un coefficient de corrélation égal à - 0.999

Cette dernière relation tend à prouver que la nature de l'argile n'intervient pas dans le mode d'arrangement des particules dans les mélanges à comportement non sableux. Le coefficient de proportionnalité c, différent de + 1, traduit la perturbation par rapport à la Loi d'Additivité due à l'action de l'énergie de compactage.

A l'énergie E_1 le coefficient c est égal à 0.934 contre 0.798 à l'énergie E_2 (Tableau XI). Bien que le petit nombre de résultats à ces deux énergies ne donne pas une certitude absolue à ces valeurs, le sens de variations de ce coefficient c permet d'affirmer que l'écart par rapport à la Loi d'Additivité est d'autant plus important que l'énergie est grande.

Ces résultats conduisent aux conclusions suivantes :

- 1) Le comportement de ces mélanges est indépendant de la nature de l'argile.
- 2) La perturbation par rapport à la Loi d'Additivité n'est liée qu'à l'intensité de l'énergie. Ainsi, pour des énergies croissantes, la Loi expérimentale, s'éloignant de l'additivité parfaite, semble se rapprocher de la Loi de Substitution qui, dans la représentation choisie, s'écrit :

$$\frac{b_1^c}{b_1^{oc}} \% = - b_2^{oc} \cdot \frac{b_2^c}{b_2^{oc}} \% + 100 \quad (6)$$

- 3) Contrairement à la perturbation par rapport à la Loi d'Additivité, l'écart par rapport à la Loi de Substitution dépend de la nature du support sableux : les échantillons contenant le sable de Brou sont, à une énergie donnée, plus proches de la Substitution que les mélanges contenant le sable de Fontainebleau, ($c > b_2^{Bc} > b_2^{Fc}$).

Interprétation

Les résultats précédents ont montré que le coefficient c (équation 5 et Tableau XI) est une caractéristique de l'énergie de compactage : il quantifie le comportement, intermédiaire entre l'additivité et la substitution, des mélanges étudiés car :

$$b_2^{oc} \leq c \leq 1$$

Nous nous proposons de comparer les résultats expérimentaux - équation (5) - aux équations traduisant les Lois théoriques de Substitution et d'Additivité - équations (2 - 2) et (3 - 4) - considérées comme lois limites des mélanges à comportement non sableux. Cette comparaison conduira à mettre en évidence quelques propriétés géométriques reliant les droites représentatives de ces lois (fig. 27) et de mieux définir la position des résultats expérimentaux par rapport à ces lois limites.

Par adjonction d'un indice convenable (e, a ou s) à l'écriture des volumes relatifs des phases argile saturée et sable dans les mélanges, l'expression de la loi expérimentale et des Lois d'Additivité et de Substitution respectivement devient :

$$\text{Loi expérimentale} \quad \frac{b_{1e}^c}{b_1^{oc}} + c \cdot \frac{b_{2e}^c}{b_2^{oc}} = 1 \quad (7)$$

$$\text{Additivité} \quad \frac{b_{1a}^c}{b_1^{oc}} + \frac{b_{2a}^c}{b_2^{oc}} = 1 \quad (8)$$

$$\text{Substitution} \quad \frac{b_{1s}^c}{b_1^{oc}} + b_2^{oc} \cdot \frac{b_{2s}^c}{b_2^{oc}} = 1 \quad (9)$$

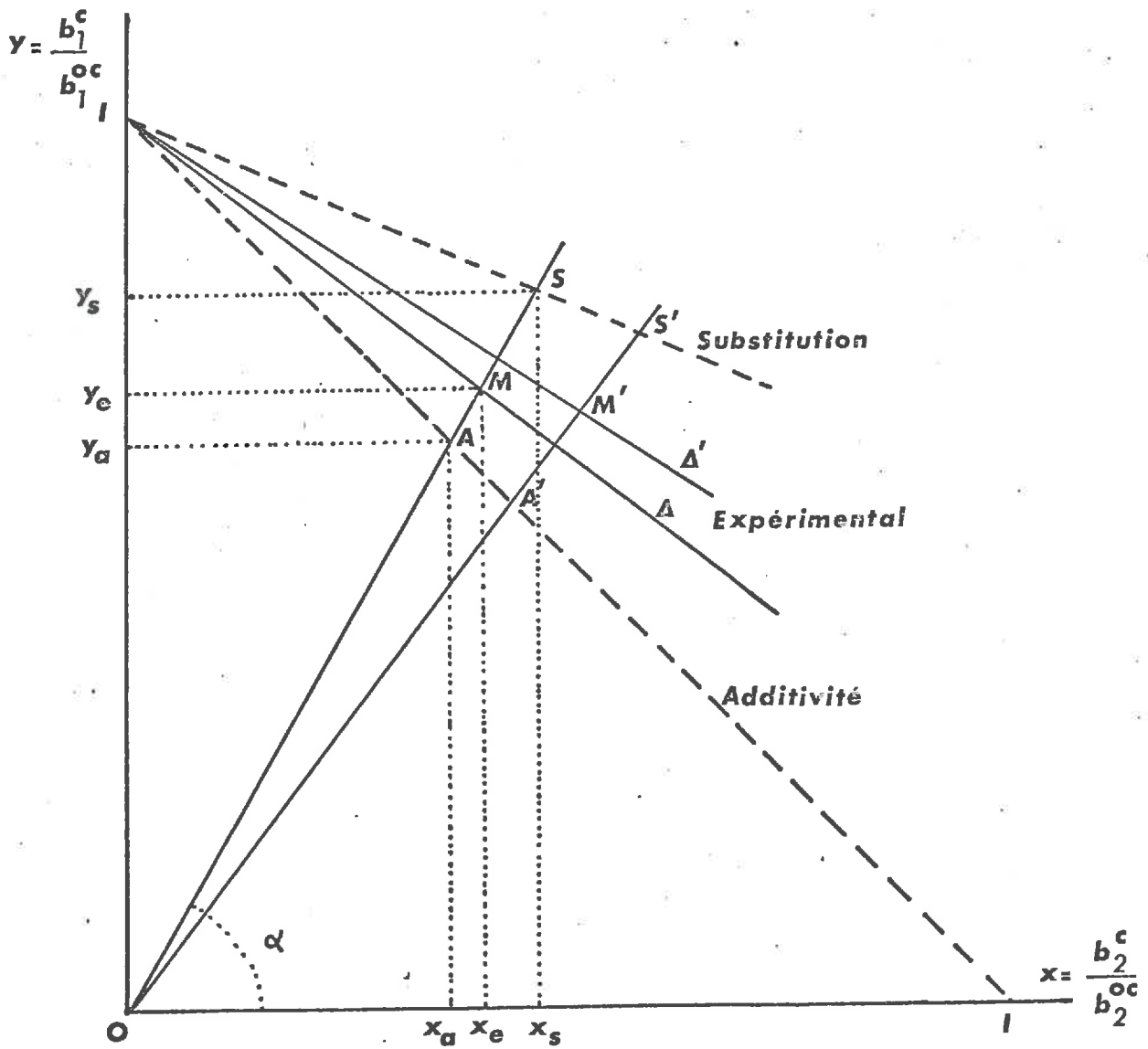
Il apparaît ainsi clairement que pour une énergie donnée :

- si $c = b_2^{oc}$ les mélanges suivent la Loi de Substitution (dans le cas d'une très grande énergie)
- si $c = 1$ les mélanges suivent la Loi d'Additivité (dans le cas d'une très faible énergie qui ne perturbe aucun élément de chacune des deux phases).

MELANGES à COMPORTEMENT NON SABLEUX

Comparaison entre les Lois de comportement

FIG. 27



Cependant, quelle que soit la loi de comportement, les équations (4 - 1) et (4 - 2) donnent :

$$b_2^c = \frac{1}{\gamma_s} \cdot \frac{S}{A} \cdot \frac{b_1^c}{\frac{1}{\gamma_s^a} + \frac{w^a}{\gamma_w}}$$

En portant cette expression dans les équations (7) et (8), nous obtenons successivement :

$$\frac{1}{b_1^{oc}} + \frac{c}{b_2^{oc}} \cdot \frac{1}{\gamma_s} \cdot \frac{S}{A} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\gamma_s^a} + \frac{w^a}{\gamma_w}} = \frac{1}{b_{1e}^c}$$

$$\text{et } \frac{1}{b_1^{oc}} + \frac{1}{b_2^{oc}} \cdot \frac{1}{\gamma_s} \cdot \frac{S}{A} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\gamma_s^a} + \frac{w^a}{\gamma_w}} = \frac{1}{b_{1a}^c}$$

et par élimination du terme $\frac{1}{b_2^{oc}}$ il vient, tous calculs faits :

$$\frac{1}{b_{1e}^c} - \frac{c}{b_{1a}^c} = \frac{1}{b_1^{oc}} - \frac{c}{b_1^{oc}} \quad (10)$$

En posant $x = \frac{b_2^c}{b_2^{oc}}$ et $y = \frac{b_1^c}{b_1^{oc}}$ avec les indices correspondant

aux différentes lois, nous obtenons le système suivant :

$$\text{Loi expérimentale} \quad y_e + c \cdot x_e = 1 \quad (7 - 1)$$

$$\text{Additivité} \quad y_a + x_a = 1 \quad (8 - 1)$$

$$\text{Substitution} \quad y_s + b_2^{oc} \cdot x_s = 1 \quad (9 - 1)$$

$$\text{L'équation (10) devient} \quad \frac{1}{y_e} - \frac{c}{y_a} = 1 - c \quad (10 - 1)$$

$$\text{et son homologue pour } c = b_2^{oc} : \frac{1}{y_s} - \frac{b_2^{oc}}{y_a} = 1 - b_2^{oc} \quad (10 - 2)$$

L'élimination du coefficient c entre les équations (7 - 1) et (10 - 1), compte tenu de l'équation (8 - 1), conduit à l'égalité :

$$\frac{y_a}{x_a} = \frac{y_e}{x_e}$$

De même, l'élimination du coefficient b_2^{oc} entre les équations (9 - 1) et (10 - 2), compte tenu de l'équation (8 - 1), conduit à l'égalité :

$$\frac{y_a}{x_a} = \frac{y_s}{x_s}$$

Ainsi (fig. 27) les états de compacité expérimental et théoriques d'un mélange à comportement non sableux, obtenus à une même énergie, sont représentés par 3 points A, M et S alignés avec l'origine des coordonnées, le point M décrivant la droite Δ représentative de l'équation (7 - 1) lorsque la teneur en argile varie.

Le coefficient directeur de la droite O A M S est donc :

$$\text{tg } \alpha = \frac{y_a}{x_a} = \frac{y_e}{x_e} = \frac{y_s}{x_s}$$

Compte tenu des équations (4 - 1) et (4 - 2) il vient, tous calculs faits :

$$\text{tg } \alpha = \frac{A}{S} \cdot \frac{\gamma_{d2}^c}{\gamma_{d1}^c}$$

Cette équation montre qu'à une autre énergie, les trois états de compacité du même mélange sont représentés par les points A', M' et S' alignés avec l'origine mais sur une autre droite que les points A, M et S car $\text{tg } \alpha$ dépend du rapport des poids volumiques secs de l'argile compactée seule (γ_{d1}^c) et du sable, compacté seul également (γ_{d2}^c), dont les valeurs dépendent bien évidemment de l'intensité de l'énergie.

Cet alignement des points concernant les trois lois étant démontré, nous nous proposons de définir la position de M (point expérimental) par rapport à A (additif) et S (substitution). Or, l'Additivité est la Loi suivie par des mélanges dont l'arrangement des deux phases n'est pas perturbé.

Cette loi - équation (8) - apparaît comme étant le comportement limite des mélanges lorsque l'énergie tend vers 0 (alors c tend vers 1). En outre, la Substitution est la Loi suivie par des mélanges dont l'arrangement des deux phases entre elles se fait de la façon la plus serrée possible. Cette loi - équation (9) - apparaît comme étant le comportement limite des mélanges lorsque l'énergie devient de plus en plus grande (alors c tend vers b_2^{oc}).

C'est pourquoi, définir la position de M par rapport à A et S revient à exprimer les résultats expérimentaux obtenus à une énergie donnée (non nulle et non infinie) à l'aide de ces deux cas limites.

Considérons le rapport :

$$\zeta = \frac{1 - c}{1 - b_2^{oc}}$$

$\zeta = 0$ lorsque l'énergie est telle que les mélanges ont un comportement additif ($c = 1$)

$\zeta = 1$ lorsque l'énergie est telle que les mélanges ont un comportement de substitution ($c = b_2^{oc}$)

Il convient de remarquer également que ce rapport fait intervenir le volume relatif b_2^{oc} de la phase solide du sable compacté seul. Ce coefficient dépend donc de la granulométrie du sable utilisé pour faire les mélanges. Enfin, le Tableau XI donne les valeurs de ce rapport en fonction de l'énergie de compactage et des volumes b_2^{oc} des deux sables F_o et B_o .

A l'aide de ce rapport et des équations (10 - 1) et (10 - 2), nous obtenons :

$$\frac{1}{y_e} = \zeta \cdot \frac{1}{y_s} + \frac{1}{y_a} \cdot (c - \zeta \cdot b_2^{oc})$$

Cette équation représente la relation qui existe entre les ordonnées des trois points A, M et S en fonction du coefficient ζ que nous appellerons coefficient de réactivité au compactage, au point singulier des courbes Proctor, des mélanges à comportement non sableux.

Sur le plan pratique, ce coefficient permet également d'exprimer la relation qui existe entre les poids volumiques secs correspondant aux trois comportements représentés par les points A, M et S. Si les volumes relatifs b_1^c et b_2^c des équations (7), (8) et (9) sont remplacés par leurs expressions données par les équations (4 - 1) et (4 - 2) dans lesquelles γ_d^c est affecté des indices correspondant aux trois comportements, un calcul simple permet

d'établir la double inégalité :

$$\gamma_{da}^c \leq \gamma_{de}^c \leq \gamma_{ds}^c$$

et d'obtenir également :

$$\frac{1}{\gamma_{da}^c} - \frac{1}{\gamma_{de}^c} = \frac{1 - c}{1 - b_2^{oc}} \left(\frac{1}{\gamma_{da}^c} - \frac{1}{\gamma_{ds}^c} \right)$$

soit finalement :

$$\frac{1}{\gamma_{de}^c} = (1 - \zeta) \cdot \frac{1}{\gamma_{da}^c} + \zeta \cdot \frac{1}{\gamma_{ds}^c}$$

Lorsque ζ varie de 0 à 1, γ_{de}^c varie γ_{da}^c à γ_{ds}^c , les variations de ζ étant liées non seulement à l'intensité de l'énergie mais également à la nature de l'argile.

Pour une argile donnée, lorsque l'intensité de l'énergie augmente à partir d'une valeur très faible, la compacité d'un matériau à comportement non sableux contenant cette argile augmente également. La valeur initiale de cette compacité est celle qui est due à la non perturbation des arrangements des éléments constitutifs du matériau, la valeur finale correspond à l'arrangement le plus serré possible produit par une énergie dont l'intensité est infiniment grande.

Il est donc possible de considérer que l'argile est de plus en plus "efficace", lorsque l'énergie augmente, en ce sens que les grains de sable sont de plus en plus serrés et l'espace poral correspondant de plus en plus rempli par la phase argile saturée.

I.2.2.4. Les mélanges à comportement sableux

Contrairement aux mélanges à comportement "non sableux", ces mélanges ne peuvent être considérés comme étant constitués de particules de sable "noyées" dans l'argile. Avant compactage, ces grains sont donc uniquement enrobés d'argile et le compactage a pour effet de chasser cet enrobage, en tout ou partie, dans l'espace poral du squelette. La Loi de Remplissage parfait suppose que l'enrobage est chassé en totalité et, en conséquence, que les grains de sable se retrouvent au contact les uns des autres : le volume relatif de la fraction sable b_2^c est alors constant (égal à b_2^{oc}) quelle que soit la teneur en argile dans les limites géométriques de validité

de cette loi. Par les faits expérimentaux, nous savons qu'en réalité l'enrobement n'est chassé qu'en partie dans l'espace poral du squelette (sauf peut-être aux très faibles teneurs en montmorillonite) empêchant ainsi le contact entre grains. Cet écartement des grains donne à leur volume relatif une valeur b_2^c inférieure à b_2^{oc} .

Pour faciliter la comparaison entre les comportements sableux et non sableux, nous avons conservé le même mode de représentation des résultats en calculant les rapports :

$$\frac{b_2^c}{b_2^{oc}} \quad \text{et} \quad \frac{b_1^c}{b_1^{oc}}$$

ce qui permet également de mettre en évidence les écarts par rapport à la loi de Remplissage parfait, soit :

$$1 - \frac{b_2^c}{b_2^{oc}}$$

Ainsi présentés (Tableau XII et figures 28 et 29), les résultats permettent de constater :

- que les quantités $\frac{b_1^c}{b_1^{oc}}$ et $\frac{b_2^c}{b_2^{oc}}$ varient linéairement l'une en

fonction de l'autre avec un coefficient de proportionnalité différent selon l'énergie de compactage,

- que cette variation est influencée par la nature de l'argile :

Avec la kaolinite nous pouvons être certains (fig. 28) que les mélanges ne suivent jamais la Loi de Remplissage.

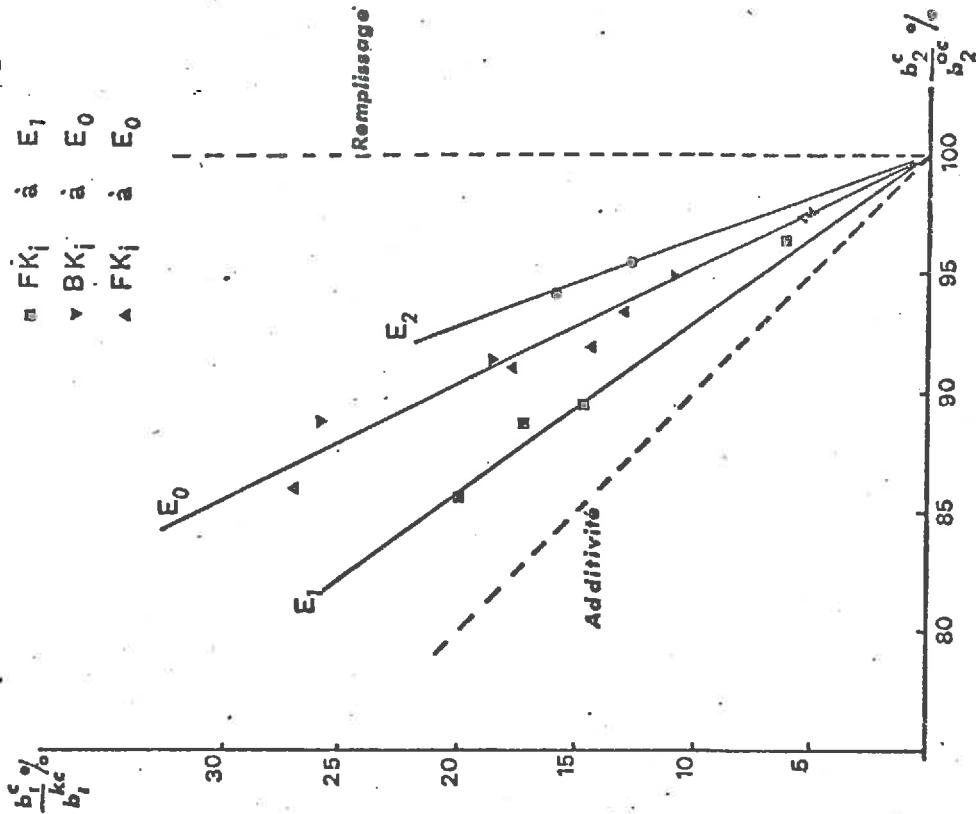
Avec la montmorillonite, bien que la plus faible teneur en argile dont nous disposons ne soit que 5 % avec FM5, il semble qu'il soit possible (fig. 29) de considérer que pour des teneurs en argile inférieures à 5 %, l'arrangement des grains de sable ne soit pas modifié par la présence d'argile et donc que la Loi de Remplissage soit suivie.

Nous avons testé la signification statistique de ces résultats expérimentaux : Pour 11 couples de valeurs numériques concernant les mélanges FK_1 et BK_1 (compactés à l'énergie E_0) la valeur du coefficient de corrél-

VOLUMES RELATIFS EXPERIMENTAUX des
PHASES SOLIDES au SEUIL de SENSIBILITE
comportement sableux

FIG. 28

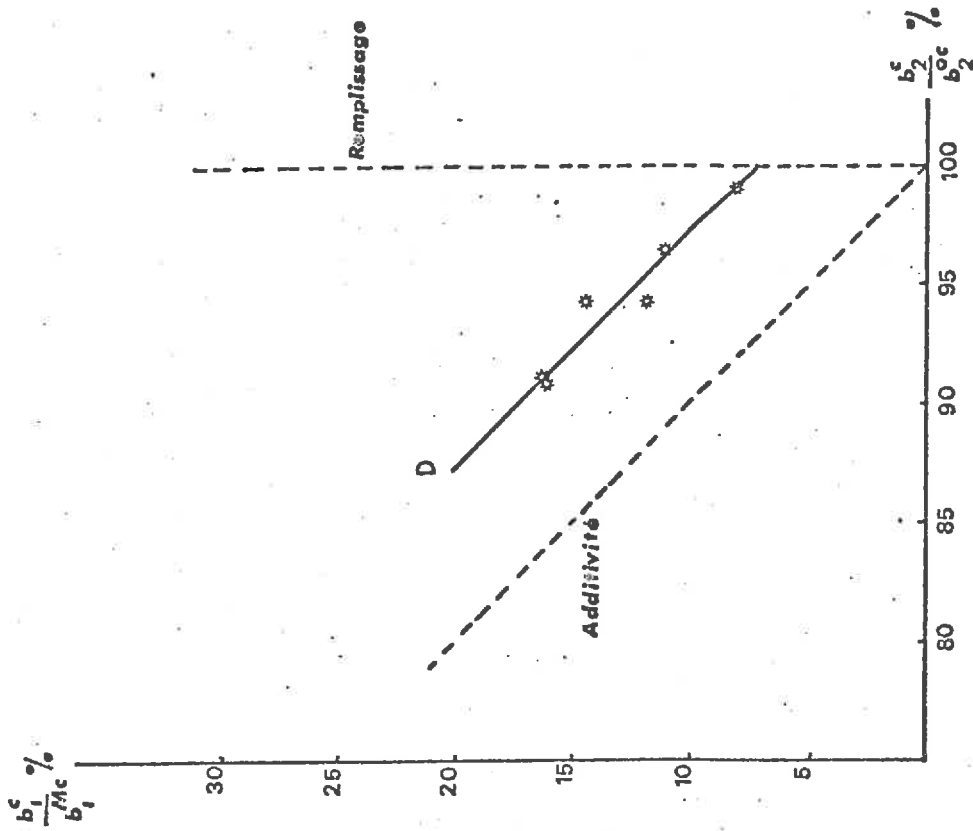
- BK_i et FK_i à E₂
- FK_i à E₁
- ▽ BK_i à E₀
- △ FK_i à E₀



VOLUMES RELATIFS EXPERIMENTAUX des
PHASES SOLIDES au SEUIL de SENSIBILITE
comportement sableux

FIG. 29

- * BM_i et FM_i à E₀



lation est de 0.994 donnant ainsi, pour un petit nombre de mesures, une bonne certitude des résultats. De ce fait, il vient :

$$\frac{b_1^c}{b_1^{Kc}} \% = - 2.077 \frac{b_2^c}{b_2^{oc}} \% + 207.8$$

ce qui donne une équation du type :

$$\frac{b_1^c}{b_1^{Kc}} = - c' \cdot \frac{b_2^c}{b_2^{oc}} + c'$$

Aux énergies E_1 et E_2 appliquées aux mêmes mélanges FK_i et BK_i ce coefficient prend respectivement les valeurs 1.365 et 2.739 (Tableau XIII) : comme dans le cas des mélanges à comportement non sableux, une augmentation de l'énergie de compactage éloigne les mélanges d'un comportement "additif" ($c' = 1$) pour les rapprocher de l'autre limite théorique, la Loi de Remplissage pour laquelle c' est infini (fig. 28).

Les résultats concernant les mélanges BM_i et FM_i (fig. 29) sont peu nombreux et la détermination du point singulier aux faibles teneurs en argile est très incertaine. Cependant, les six couples de valeurs obtenues (Tableau XII) à l'énergie E_0 donnent la relation :

$$\frac{b_1^c}{b_1^{Mc}} \% = - 1.002 \frac{b_2^c}{b_2^{oc}} \% + 107.43 \quad (11)$$

Cette relation conduit aux conclusions suivantes :

- 1) Aux très faibles teneurs en argile, les mélanges BM_i et FM_i semblent suivre la loi de remplissage parfait ($\frac{b_2^c}{b_2^{oc}} = 100 \%$). La teneur en argile maximale pour laquelle cette loi semble être vérifiée est donnée par l'intersection de la droite D (fig. 29) avec la droite représentative de la loi de remplissage, soit :

$$\frac{b_1^c}{b_1^{Mc}} = 7.4. \%$$

ce qui, tous calculs faits, donne $A \simeq 4.5 \%$ quel que soit le support sableux. Cette plage 0 - 5 % d'argile correspondrait aux mélanges sableux "vrais".

2) La valeur du coefficient c' , dans ce cas non significativement différente de 1, montre que les mélanges testés suivraient une loi parallèle à la loi d'additivité. Cette coïncidence entre les faits expérimentaux et les lois théoriques de remplissage et d'additivité pose la question de savoir s'il en est toujours ainsi quelle que soit l'intensité de l'énergie, malheureusement ces mélanges n'ont pu être repris à d'autres énergies une fois leur histoire effacée et nous ne disposons d'aucun élément de réponse.

Remarques (fig. 30)

1) Les résultats expérimentaux à l'énergie E_0 concernant les mélanges FM_i et BM_i ont donné au coefficient c' les valeurs 0.878 pour les mélanges à comportement non sableux (Tableau XI) et 1.00 pour les mélanges à comportement sableux (équation 11). Or, si nous testons l'ensemble de ces résultats en une seule corrélation, c' prend la valeur 0.938 avec un coefficient de corrélation de 0.998 pour les 14 couples de valeurs testées. Cette constatation doit rendre prudente, pour ces mélanges, la distinction faite entre les deux types de comportement à des teneurs en argile supérieures à 7 % .

2) Par contre, les résultats expérimentaux concernant les mélanges FK_i et BK_i rendent bien distincts l'un de l'autre les deux comportements. Ces mélanges ont un comportement sableux dans un intervalle plus large de teneur en argile, de 0 à 18 % à l'énergie E_0 .

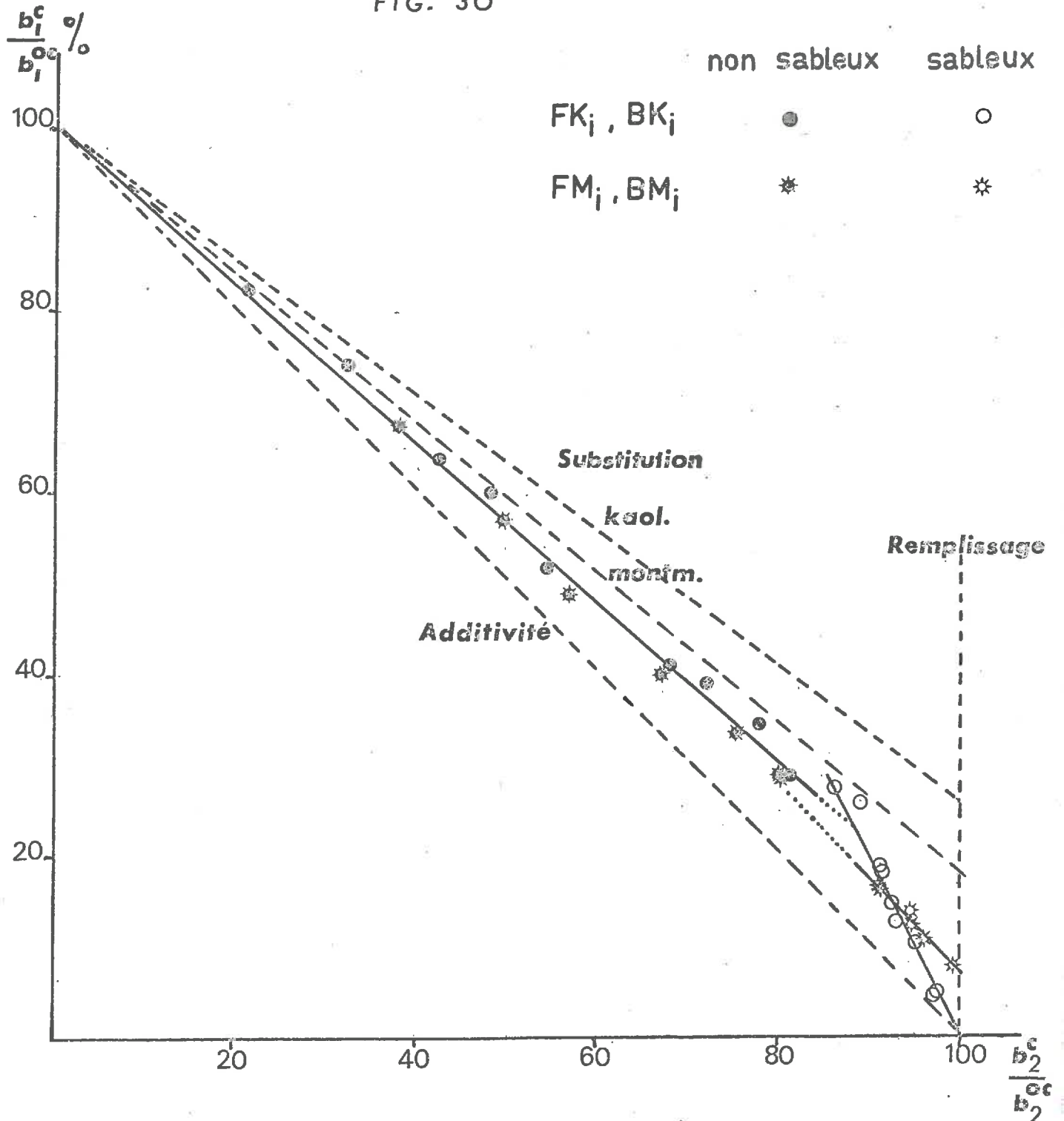
3) De 18 % à 100 %, le comportement non sableux des mélanges FK_i et BK_i obéit à la même loi expérimentale que les mélanges FM_i et BM_i .

4) Enfin, il est important de noter que la limite entre les deux comportements est liée à la valeur de l'énergie de compactage. Nous préciserons en I.3. les teneurs en argile correspondant à cette limite et nous en tirerons les conclusions qui s'imposent.

COMPARAISON des COMPORTEMENTS

$$E_0 = 590 \text{ kJ/m}^3$$

FIG. 30



Interprétation

Le Tableau XIII a montré que le coefficient c' est une caractéristique de l'argile et de l'énergie comme dans le cas du comportement non sableux. Nous considérons encore la Loi d'Additivité comme limite de comportement à très faible énergie et la Loi de Remplissage comme limite de comportement à très grande énergie. Nous nous proposons de comparer les résultats expérimentaux aux équations traduisant ces deux lois, comme nous l'avons fait pour les mélanges à comportement non sableux (I.2.2.3.).

L'expression de ces trois lois (avec les indices e, a et r correspondants) est :

$$\text{Loi expérimentale : } \frac{b_{1e}^c}{b_{1oc}^c} + c' \frac{b_{2e}^c}{b_{2oc}^c} = c' \quad (12)$$

$$\text{Remplissage : } \frac{b_{2r}^c}{b_{2oc}^c} = 1 \quad (13)$$

$$\text{Additivité : } \frac{b_{1a}^c}{b_{1oc}^c} + \frac{b_{2a}^c}{b_{2oc}^c} = 1 \quad (14)$$

Il apparaît ainsi clairement :

- que si c' tend vers l'infini (énergie infiniment grande), l'équation 12 est identique à 13 et traduit la Loi de Remplissage,

- que si $c' = 1$ (énergie très faible), l'équation 12 est identique à 14 et traduit la Loi d'Additivité.

Il est à noter que les équations (12) et (14) établissent explicitement des relations entre les volumes relatifs b_1^c et b_2^c alors que l'équation (13) semble indiquer une totale indépendance entre ces deux volumes. Or, il est bien évident que pour un mélange de granulométrie donnée constante, à un volume relatif b_2^c de sable correspond un et un seul volume d'argile saturée, pour chaque type de comportement théorique ou expérimental.

Tenter d'interpréter les résultats expérimentaux nécessite, au préalable, de relier entre eux les six volumes relatifs des phases solides b_1^c et b_2^c d'un mélange donné dans le cas des trois lois (12), (13) et (14).

En plus de ces équations, nous disposons, là encore, de la définition de b_1^c et b_2^c donnée par les équations (4 - 1) et (4 - 2).

Transposées à la Loi de Remplissage et à la Loi expérimentale ces expressions donnent respectivement :

$$b_{1r}^c = \gamma_s^s \cdot \left(\frac{1}{\gamma_a} + \frac{w^a}{\gamma_w} \right) \cdot \frac{A}{S} \cdot b_2^{oc}$$

et

$$\frac{1}{b_1^{oc}} + \frac{c'}{\gamma_s^s} \cdot \frac{S}{A} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\gamma_a} + \frac{w^a}{\gamma_w}} \cdot \frac{1}{b_2^{oc}} = \frac{c'}{b_{1e}^c}$$

par élimination, entre ces deux équations, de la quantité b_2^{oc} il vient, tous calculs faits :

$$\frac{1}{b_1^{oc}} + \frac{c'}{b_{1r}^c} = \frac{c'}{b_{1e}^c} \quad (15)$$

Cette équation exprime la relation qui existe entre le volume relatif de l'argile saturée, compactée seule, (b_1^{oc}) et les volumes relatifs de l'argile saturée, dans un mélange donné, dans le cas du Remplissage (b_{1r}^c) et dans le cas expérimental (b_{1e}^c).

Dans le cas de la Loi d'Additivité pour laquelle $c' = 1$, il vient :

$$\frac{1}{b_1^{oc}} + \frac{1}{b_{1r}^c} = \frac{1}{b_{1a}^c} \quad (16)$$

Ainsi présentées, les équations (12) et (16) peuvent s'écrire elles aussi en fonction des quantités :

$$x = \frac{b_2^c}{b_2^{oc}} \text{ et } y = \frac{b_1^c}{b_1^{oc}}$$

affectées des indices correspondant aux trois lois. Il vient :

Loi expérimentale $y_e + c' \cdot x_e = c'$ (12 - 1) et $c' \geq 1$

Remplissage $x_r = 1$ (13 - 1)

$$\text{Additivité} \quad y_a + x_a = 1 \quad (14 - 1)$$

$$\text{avec} \quad \frac{c'}{y_r} + 1 = \frac{c'}{y_e} \quad (15 - 1)$$

$$\frac{1}{y_r} + 1 = \frac{1}{y_a} \quad (16 - 1)$$

Par combinaison des couples (12 - 1) et (15 - 1) d'une part et (14 - 1) et (16 - 1) d'autre part, nous obtenons respectivement :

$$\frac{x_e}{y_e} = \frac{1}{y_r} \quad \text{et} \quad \frac{x_a}{y_a} = \frac{1}{y_r}$$

l'équation (13 - 1) donnant directement :

$$\frac{x_r}{y_r} = \frac{1}{y_r}$$

Ainsi, dans les axes choisis (fig. 31) les états de compacité expérimental et théoriques d'un mélange à comportement sableux, obtenus à même énergie, sont représentés par trois points A, M et R alignés avec l'origine des coordonnées sur une droite de coefficient directeur $\text{tg } \beta = y_r$, le point M décrivant la droite D représentative de l'équation (12 - 1) lorsque la teneur en argile varie. Il vient :

$$\text{tg } \beta = \frac{A}{S} \cdot \frac{\gamma_{d2}^c}{\gamma_{d1}^c}$$

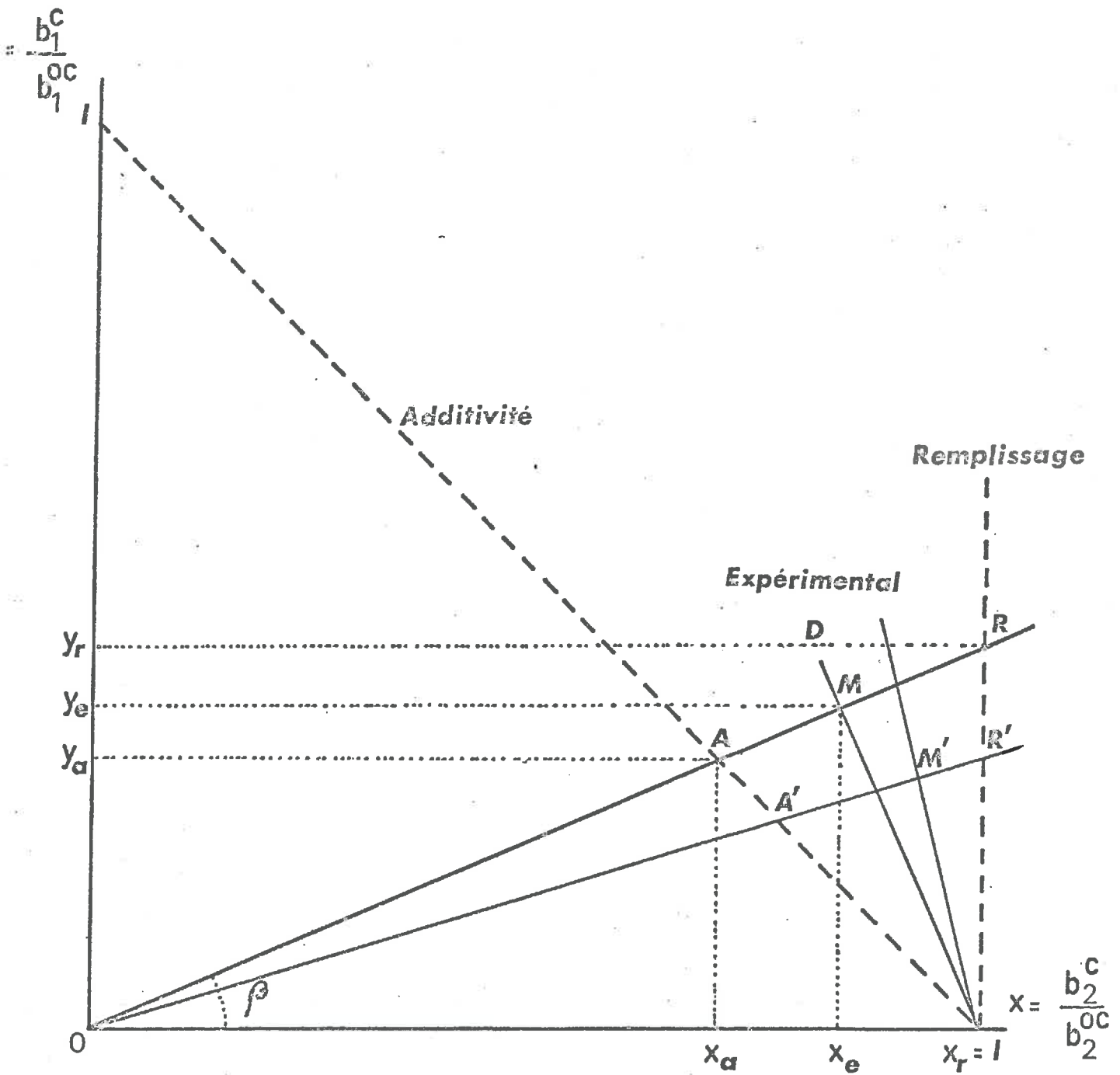
Cette équation montre également, et comme dans le cas des mélanges à comportement non sableux, qu'à une autre énergie les trois états de compacité du même mélange sont représentés par les points A', M' et R' alignés avec l'origine mais sur une autre droite que les points A, M et R.

Pour les mêmes raisons que dans le cas des mélanges à comportement non sableux, nous nous proposons de définir la position de M par rapport à A et R en exprimant les résultats expérimentaux à l'aide des deux cas limites ; la combinaison des équations (15 - 1) et (16 - 1) donne, tous calculs faits :

MELANGES à COMPORTEMENT SABLEUX

Comparaison entre les Lois de comportement

FIG. 31



$$\frac{1}{y_e} = \frac{1}{c'} \cdot \frac{1}{y_a} + \frac{1}{y_r} \cdot \left(1 - \frac{1}{c'}\right) \quad (17)$$

Nous poserons :

$$\mathcal{Z}' = 1 - \frac{1}{c'}$$

et l'équation (17) devient :

$$\frac{1}{y_e} = \frac{\mathcal{Z}'}{y_r} + \frac{1}{y_a} \cdot (1 - \mathcal{Z}')$$

relation entre les ordonnées des trois points A, R et M de la figure 31.

Lorsque l'énergie est telle que les mélanges ont un comportement additif $\mathcal{Z}' = 0$ car $c' = 1$ et lorsque l'énergie est telle que les mélanges ont un comportement de Remplissage $\mathcal{Z}' = 1$ car c' est infiniment grand. De même que \mathcal{Z} pour les mélanges à comportement non sableux, \mathcal{Z}' peut être considéré comme un coefficient de réactivité au compactage, au point singulier des courbes Proctor, pour les mélanges à comportement sableux. Mais contrairement à \mathcal{Z} , \mathcal{Z}' ne dépend pas du volume relatif b_2^{oc} de la phase solide du sable compacté seul.

En remplaçant dans les équations (12 - 1), (13 - 1) et (14 - 1) les valeurs des x et des y en fonction des poids volumiques secs (équations (4 - 1) et 4 - 2)), nous avons :

$$\begin{aligned} \text{d'une part} \quad \gamma_{da}^c &\leq \gamma_{de}^c \leq \gamma_{dr}^c \\ \text{et d'autre part} \quad \frac{1}{\gamma_{de}^c} &= (1 - \mathcal{Z}') \cdot \frac{1}{\gamma_{da}^c} + \frac{\mathcal{Z}'}{\gamma_{dr}^c} \end{aligned}$$

Le Tableau XIII donne les valeurs de \mathcal{Z}' en fonction de l'énergie pour les mélanges FK_i et BK_i .

Nous pouvons ainsi constater que lorsque l'énergie augmente la kaolinite contenue dans les mélanges devient de plus en plus "efficace" en ce sens que les grains de sable sont de plus en plus serrés, jusqu'à être aussi serrés que s'il n'y avait pas d'argile dans le mélange. Les résultats obtenus avec la montmorillonite et pour une seule valeur de l'énergie, dans la mesure

où ils sont fiables, auraient tendance à démontrer que cette argile a un coefficient ζ' très proche de 0 ce qui donne aux mélanges un comportement "parallèle" à la Loi d'Additivité avec un décalage (fig. 30) qu'il est difficile d'interpréter par manque d'information.

I.3. CONCLUSION

Les sols ne réagissent aux effets du compactage qu'au delà du seuil d'humidité caractéristique qui ne dépend que de la nature de l'argile (y compris la nature de la charge ionique) et de l'énergie développée.

A ce seuil, les matériaux ont un comportement différent selon leur granulométrie :

- Comportement "non sableux" à des teneurs en argile relativement importantes qui suit une loi intermédiaire entre la substitution parfaite et la loi de mélange de deux liquides (loi d'additivité),

- Comportement sableux à des teneurs en argile faibles qui suit une loi intermédiaire entre la loi d'additivité et le remplissage au sens de FIES, MONNIER et HENIN.

Ces positions intermédiaires sont dues à une certaine réactivité mécanique des mélanges, fonction dans les deux cas de la grandeur de la contrainte et éventuellement de la nature de l'argile (dans le deuxième cas seulement). De ce fait, aux très faibles énergies, ces comportements sont très voisins, l'assemblage équivalent des deux fractions dans le mélange se faisant sans perturbation de leur propre arrangement, mais à l'opposé, aux très fortes énergies, ces comportements sont de plus en plus distincts et se rapprochent des deux lois théoriques.

L'observation de l'évolution du comportement des mélanges fait apparaître que la limite entre les deux comportements sableux et non sableux dépend de la grandeur de l'énergie et de la nature de l'argile. En effet, la combinaison avec les équations (4) des équations (7) et (12) permet de calculer les teneurs en argile et en sable des mélanges à la limite commune des deux lois expérimentales. Il vient :

$$\frac{A}{S} = \frac{c' \cdot (1 - c)}{c' - 1} \cdot \frac{b_1^{oc}}{b_2^{oc}} \cdot \frac{1}{\gamma_s \left(\frac{1}{\gamma_a} + \frac{w}{\gamma_w} \right)} \quad \text{avec } S = 100 - A$$

Le Tableau XIV donne les valeurs numériques des teneurs pondérales en argile des mélanges à la limite commune des deux comportements : il apparaît que la teneur en argile limite est fonction de la grandeur de la contrainte. Ainsi la notion banale de "comportement sableux" ou de "comportement non sableux" se trouve-t-elle reliée à l'histoire énergétique du matériau. Cette constatation a pour conséquences que l'utilisation des divers triangles de texture pour la prévision du comportement d'un sol doit être faite avec précaution, car les pressions exercées par les engins de génie civil ou les machines agricoles sont dans une gamme beaucoup plus étendue que par le passé.

C H A P I T R E II

COMPORTEMENT DE L'ARGILE COMPACTEE SEULE

=====

Nous avons conclu en I.1.5. qu'au seuil de sensibilité relatif à une énergie donnée, l'argile acquiert un indice des vides minimal la plaçant à la limite de plasticité correspondante. Au cours de ce deuxième chapitre, nous nous proposons de tenter d'expliquer son comportement le long de la courbe avant et après cette limite, définie à chaque énergie de compactage.

Comme pour la plupart des matériaux terreux, ce comportement se traduit par un accroissement du poids volumique sec en fonction de la teneur en eau, dès le seuil de sensibilité franchi (bien que pour l'argile, en général, cet accroissement soit très faible). Cependant, lorsque l'échantillon est porté à des teneurs en eau de plus en plus grandes, la valeur de son poids volumique sec passe par une valeur maximale pour décroître ensuite de telle façon que l'échantillon soit au voisinage de la saturation.

Nous avons voulu, en premier lieu, nous assurer qu'un tel comportement n'est pas lié uniquement au type d'énergie utilisé, mais également à la nature de l'argile. Cette précaution montrera que selon qu'il s'agisse d'une kaolinite ou d'une montmorillonite, les effets du compactage peuvent être totalement opposés, alors que deux modes de compactage différents sur un même matériau ont des effets comparables. L'interprétation des résultats nous conduira à proposer, comme au premier chapitre pour la limite de plasticité, une définition plus générale des limites de retrait et de liquidité relatives à une énergie donnée.

Outre la méthode Proctor couramment utilisée pour compacter un matériau, nous avons appliqué sur des échantillons d'argile une pression statique à l'aide de l'oedomètre, suivant en cela l'exemple de BELLIER. J (1968) et LÊ. L (1968). Dans ce cas les échantillons, préparés à différentes teneurs en eau tout comme pour l'essai Proctor, n'étaient donc pas placés nécessairement dans des conditions saturantes. Nous verrons quelles sont les conséquences sur la compacité des possibilités de drainage éventuelles offertes par l'oedomètre.

Nous avons mis en évidence au premier chapitre et conclu en I.1.5. qu'au delà de la limite de plasticité relative à l'énergie Proctor considérée (c'est-à-dire pour des teneurs en eau supérieures à celle du seuil de sensibilité au compactage) l'angle de frottement de la kaolinite décroît lorsque la teneur en eau augmente. Ainsi, la première explication possible de l'allure des courbes de compactage par impacts peut se formuler de la façon suivante :

Lorsque la teneur en eau w augmente à partir du seuil de sensibilité au compactage, la variation de la compacité est la résultante de deux actions contraires,

- d'une part la diminution du frottement propre à l'argile (fig. 8 - 1) qui permet un meilleur arrangement des particules elles-mêmes au moment de l'application de l'énergie de compactage. Cette lubrification est l'élément favorable à l'augmentation de la valeur du poids volumique sec,

- d'autre part, l'augmentation de l'indice des vides de l'argile qui empêche les particules d'être aussi serrées que la lubrification le permettrait.

Ces hypothèses posées, il convient d'en tirer les conséquences immédiates qu'imposent les résultats expérimentaux.

II.1 NOTION D'ETAT PHYSIQUE FICTIF

L'allure en cloche de la courbe de variations de la compacité en fonction de la teneur en eau après compactage par la méthode Proctor (fig. 1 à 4, 7, 10, 12 à 15, 17 et 18) permet de dissocier deux parties :

- Dans une première partie, l'augmentation de la compacité avec la teneur en eau serait due à un pouvoir de lubrification de l'argile plus "efficace" que son pouvoir de gonflement.

- Dans une deuxième partie, la diminution de la compacité aux fortes teneurs en eau suggère qu'alors l'encombrement de l'argile gonflée et l'eau non absorbée ont un effet stérique plus important que la lubrification sur l'arrangement des grains.

Le maximum de compacité (maximum Proctor) trouverait son explication dans l'équilibre de ces deux actions antagonistes.

Ces hypothèses simples, basées sur les effets antagonistes de la lubrification et du gonflement de l'argile, nous ont imposé la nécessité de dissocier ces deux facteurs. Aussi avons-nous considéré un état de l'argile, que nous appellerons "état physique fictif", dans lequel l'argile conserve l'indice des vides acquis au seuil de sensibilité tout en ayant les propriétés mécaniques correspondant à son état d'hydratation réel (pouvoir lubrifiant). Par cet artifice de calcul, la teneur en eau de l'argile, dans cet état fictif, reste constamment égale à w^a % alors que réellement l'échantillon a une teneur en eau w supérieure à w^a . $A = w^c$

Cet état physique fictif présente donc l'avantage de mettre à notre disposition un matériau saturé avec w^a % d'eau et, de ce fait, dont l'indice des vides est constant. Seul l'arrangement des particules entre elles est modifié, au moment du compactage par leur propre action lubrifiante. Les caractéristiques physiques de ce matériau sont reliées à celles du matériau réel de façon simple. En effet, nous avons : $w = w^a + w'$ et nous appellerons "eau excédentaire" la quantité d'eau w' qui n'a pas été adsorbée par l'argile dans son état fictif. Dans l'échantillon, dont le poids volumique sec expérimental est γ_{de} , cette eau excédentaire occupe un volume V'_w . De ce fait, l'état physique fictif de l'échantillon est caractérisé par un poids volumique sec fictif γ_{df} défini par :

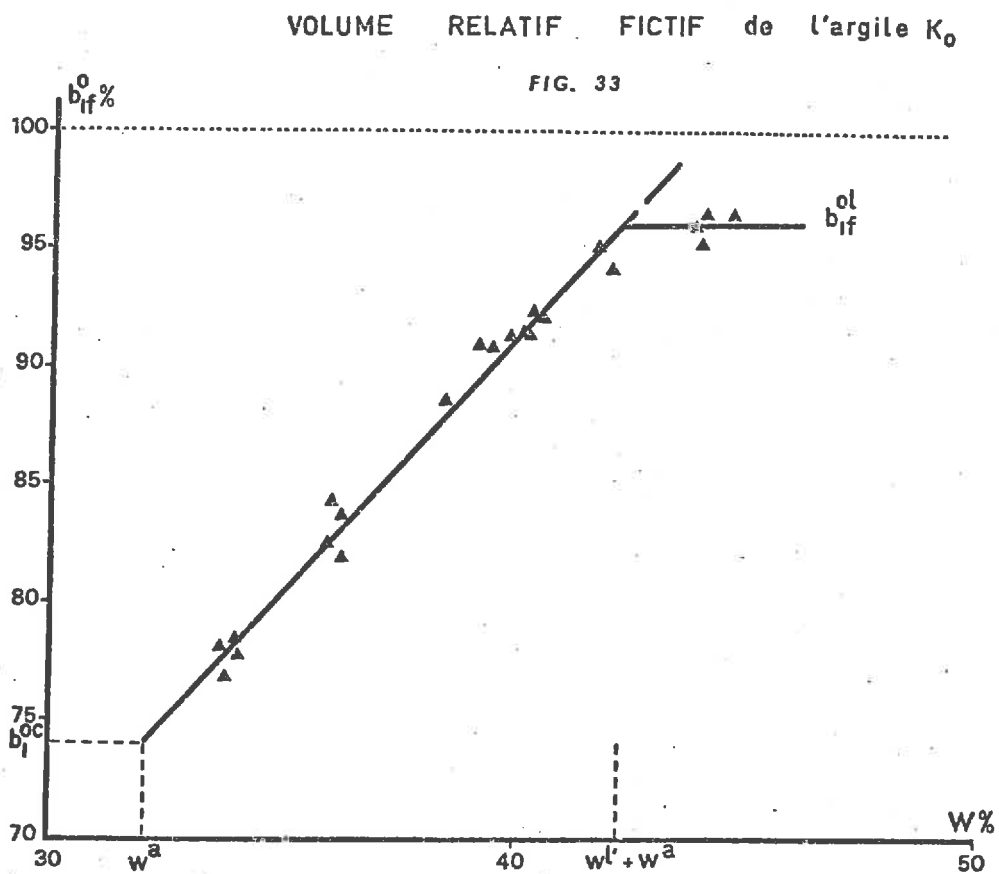
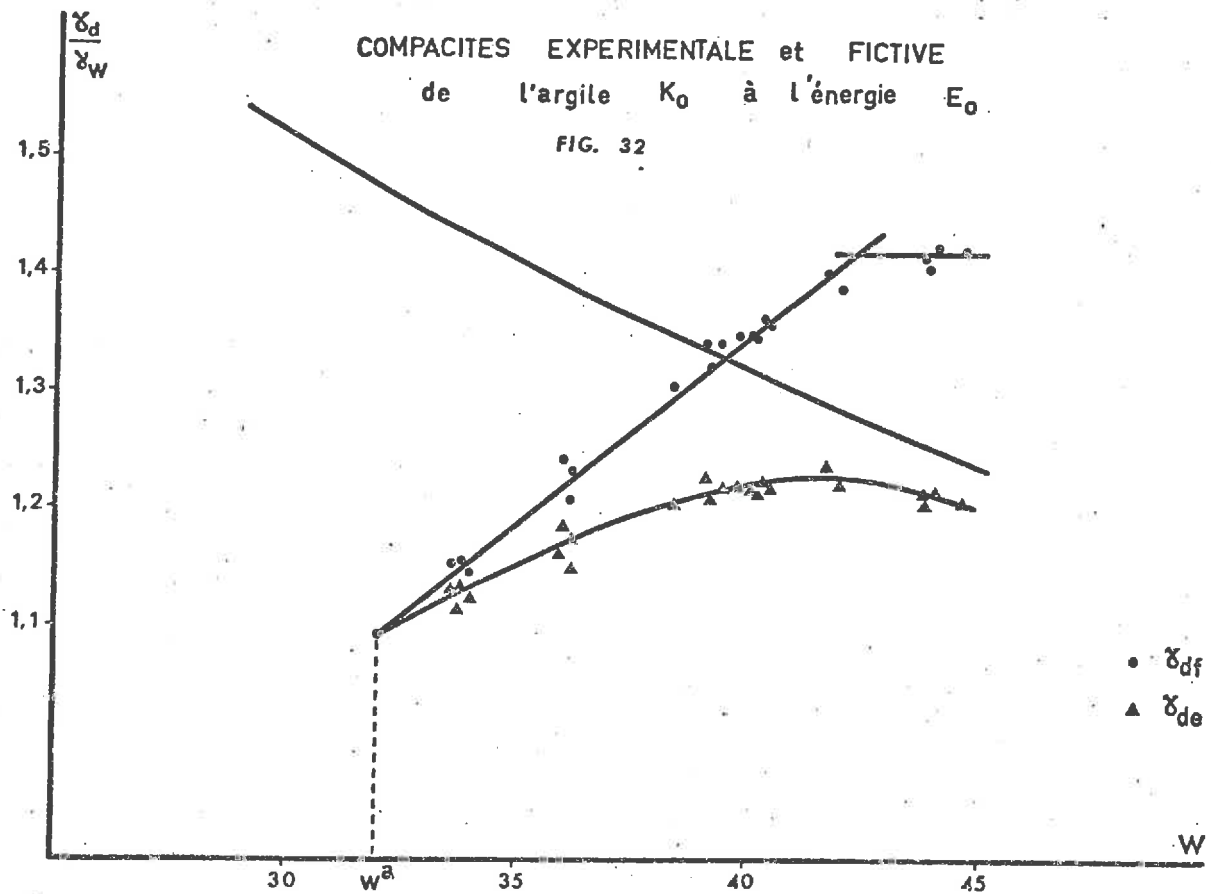
$$\gamma_{df} = \frac{M_s \cdot g}{V - V'_w} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{\gamma_{df}} = \frac{V}{M_s \cdot g} - \frac{V'_w}{M_s \cdot g}$$

$$\text{or} \quad \frac{V}{M_s \cdot g} = \frac{1}{\gamma_{de}} \quad \text{et} \quad \frac{V'_w}{M_s \cdot g} = \frac{w'}{\gamma_w}$$

d'où la relation :

$$\frac{1}{\gamma_{df}} = \frac{1}{\gamma_{de}} - \frac{w'}{\gamma_w}$$

La fig. 32 et le Tableau XV permettent de comparer entre elles les valeurs des densités sèches, expérimentale et fictive, de l'argile compactée à l'énergie E_0 de l'essai Proctor. Il apparaît qu'avec un tel mode de compac-



tage, la densité sèche fictive de l'argile a , en fonction de la teneur en eau en excès, une croissance plus rapide que la densité sèche expérimentale effectivement mesurée. Cette variation de la densité sèche fictive est la conséquence de la lubrification seule sans l'action antagoniste du gonflement.

Afin de mieux se représenter les conséquences de cette lubrification agissant seule, nous avons présenté sur la fig. 33 les variations du volume relatif b_{1f}^o de l'argile saturée à w^a % d'eau et de poids volumique sec γ_{df} . L'équation (4 - 1) appliquée à cet état fictif donne pour b_{1f}^o l'expression :

$$b_{1f}^o = \left(\frac{1}{\gamma_a} + \frac{w^a}{\gamma_w} \right) \cdot \gamma_{df} \quad (18)$$

Le palier b_{1f}^{o1} que présente ce volume relatif montre de façon simple qu'au delà de la teneur en eau en excès w^{11} (fig. 33) l'échantillon est à un degré de saturation constant différent de 100 %. Le volume relatif de gaz résiduel est $1 - b_{1f}^{o1}$, de l'ordre de 4 %. Nous avons cherché quelle signification physique pouvait avoir ce volume résiduel : si son existence est liée à la nature du matériau, il devrait apparaître lorsqu'un autre mode de compactage est utilisé.

II.2 COMPACTAGE A L'OEDOMETRE

Pour tenter de mieux comprendre le mécanisme régissant le processus d'arrangement des grains sous l'action d'une contrainte extérieure, il est nécessaire de pouvoir comparer les résultats obtenus sur un même matériau par des contraintes de natures différentes. Ainsi, l'évolution de la compacité a-t-elle été suivie lors de l'application d'une pression constante sur des échantillons de kaolinite préparés à différentes teneurs en eau. Notons cependant que de nombreux Auteurs ont présenté des études dans lesquelles sont comparés les effets des différents modes d'application de l'énergie de compactage.

JOHNSON et SALLBERG (1962), dans leur excellente publication collationnant les travaux effectués sur le compactage, ont montré expérimentale-

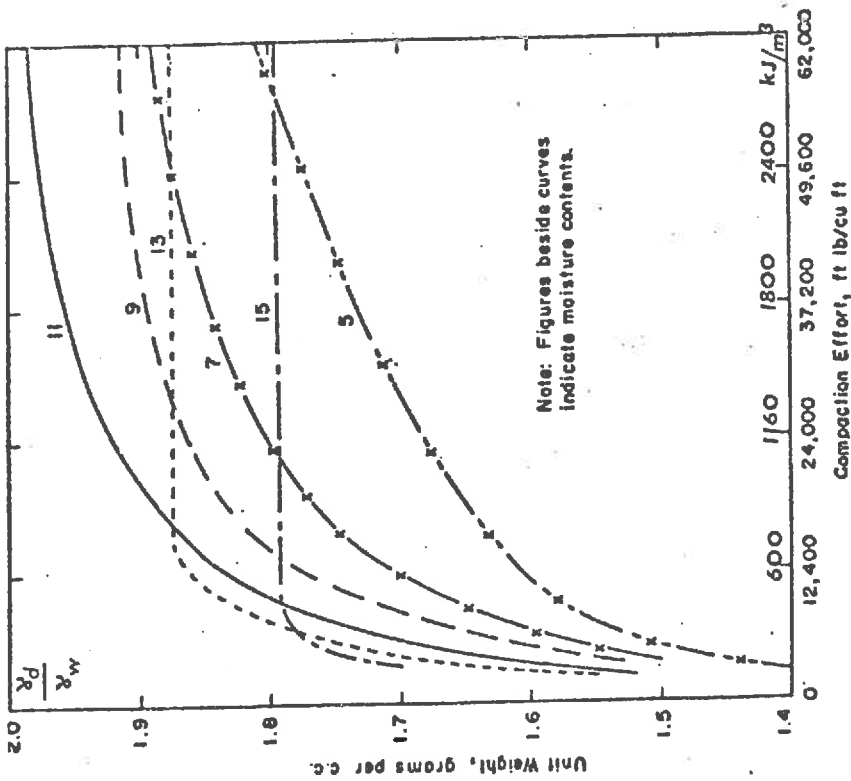
ment de quelle façon les dimensions du moule Proctor, la surface de la dame de compactage et surtout le rapport hauteur-diamètre du moule interviennent sur les résultats, pour une énergie donnée.

L'influence de la valeur de l'énergie, type Proctor, est mise en évidence par ces deux Auteurs. Nous n'avons retenu que deux exemples parmi les nombreux résultats cités : ceux de DHAWAN et BAHRI (1957) et de Mc DOWELL (1957) que nous reproduisons sur les fig. 34 et 35. Il est possible de constater sur ces figures que le maximum de compacité se déplace vers la droite et vers le bas lorsque l'énergie de compactage diminue. Ce phénomène se retrouve chez de nombreux Auteurs et chaque fois que le matériau étudié est compacté à des énergies différentes. Dans la mesure où l'état d'équilibre entre les actions antagonistes du gonflement et de la lubrification est réalisé à un degré de saturation élevé, pour des raisons d'ailleurs peu évidentes, le déplacement de ce maximum de compacité se fait nécessairement sur une courbe proche de l'hyperbole de saturation. Ce maximum a un comportement analogue à celui du seuil de sensibilité : la compacité de ces deux points caractéristiques diminue et leur teneur en eau augmente lorsque l'énergie de compactage diminue.

Les effets du pétrissage sont présentés à l'aide des travaux de SEED et MONISMITH (1954) et de Mc RAE et RUTLEDGE (1952) (fig. 36 et 37) : la pression exercée au cours du pétrissage apparaît comme un facteur important au même titre que le temps d'application de cette pression.

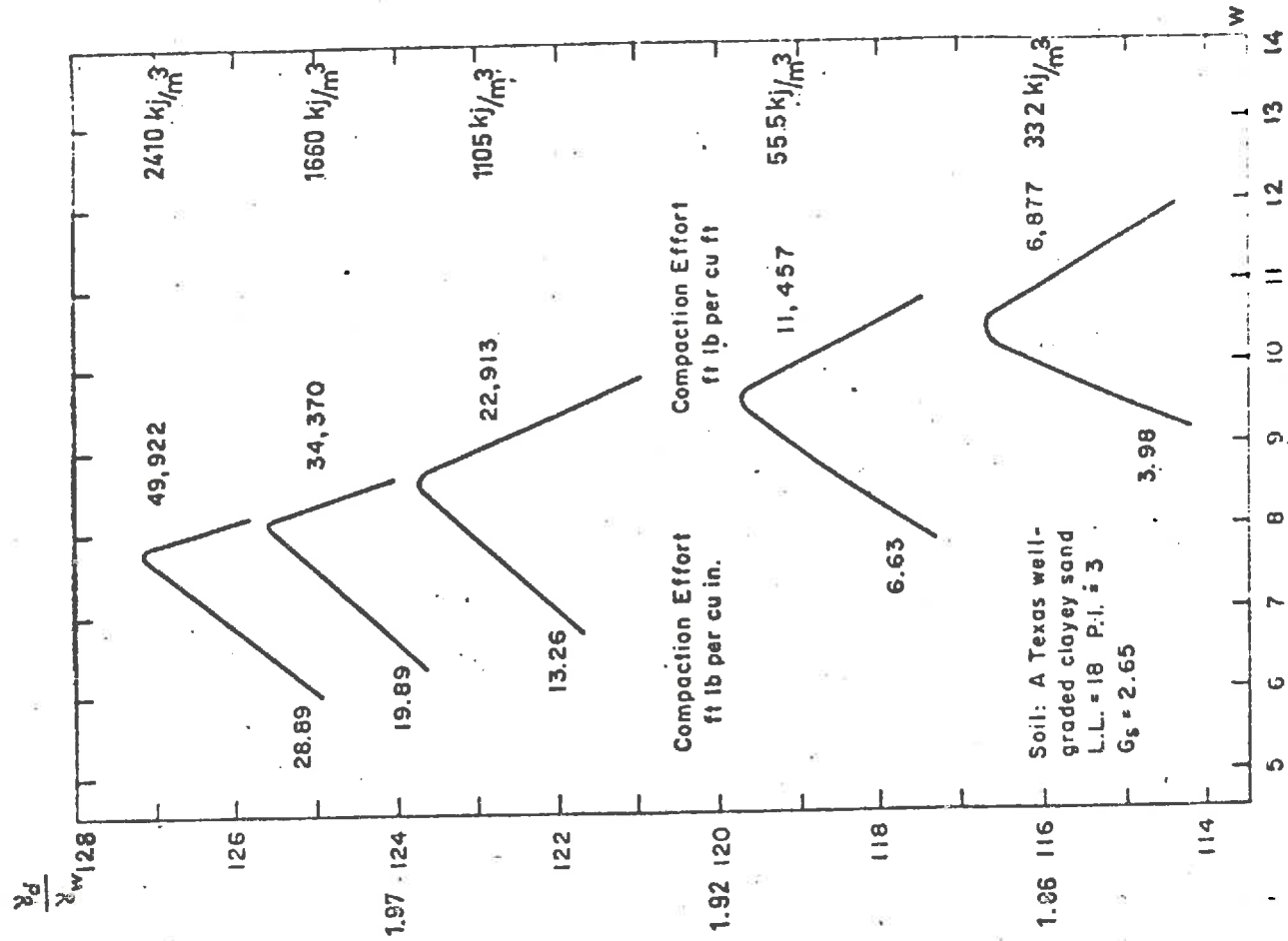
Les travaux de PRAKASH et GUPTA (1967) et de KOLMAYER (1970) notamment, établissent que l'efficacité du compactage par vibrations est liée à la fréquence, l'amplitude, l'accélération et au temps d'application des vibrations. Il est bien évident que l'amplitude de la contrainte appliquée au cours du test est également un facteur important. Les Auteurs en déduisent que ce mode de compactage est peu efficace pour les sols cohérents, mais donne de bons résultats en milieux pulvérulents.

Devant cette multiplicité des procédés de compactage, il est tentant de vouloir établir des équivalences entre les différents types d'énergies en se basant sur les caractéristiques de l'Optimum Proctor. Les résultats de SEED, LUNDGREN et CHAN (1954), fig. 38, de Mc RAE et RUTLEDGE (1952), fig. 39, et de WILSON (1950), fig. 40 et 41, notamment, cités par JOHNSON et SALLBERG (1962) au même titre que les travaux de ILKER (1969), fig. 42, ou de CLEGG et PAUL (1967), fig. 43, montrent l'importance accordée par les Auteurs à cette notion d'équivalence d'énergie.



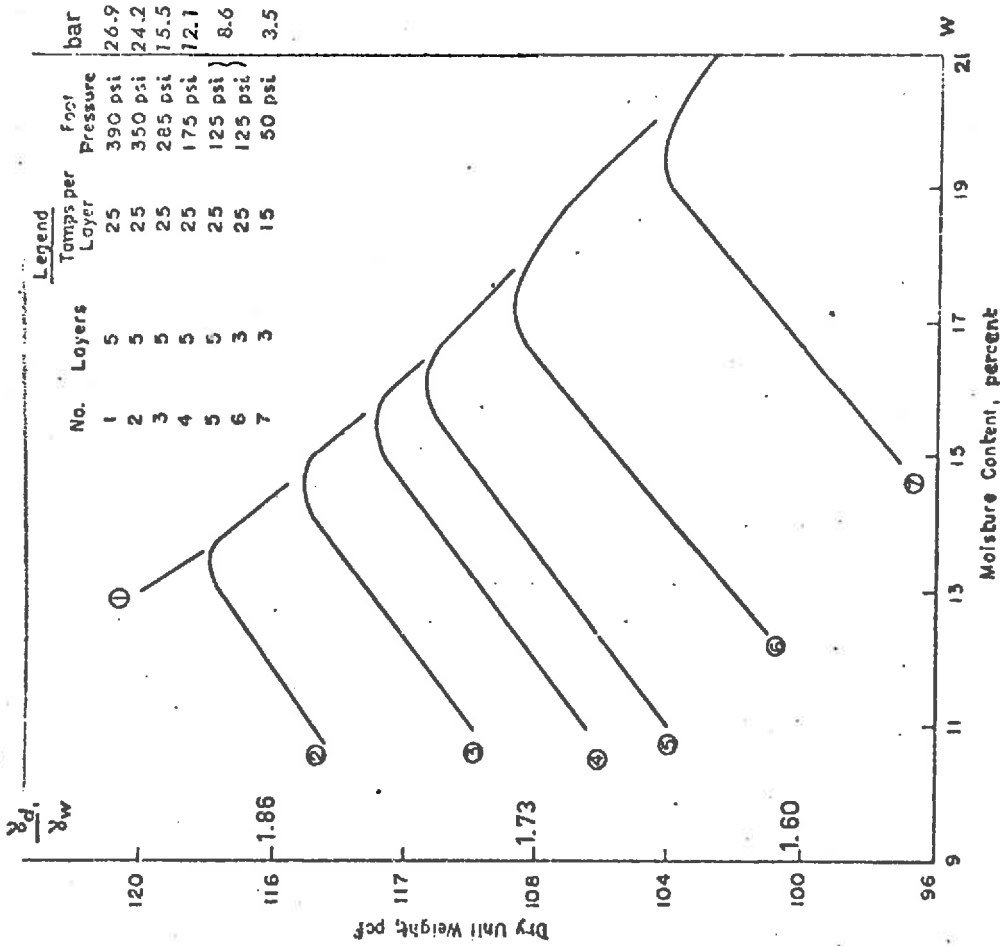
relation entre l'énergie de compactage et le poids volumique sec à différentes teneurs en eau

FIG. 34 d'après DHAWAN et BAHRI, 1957



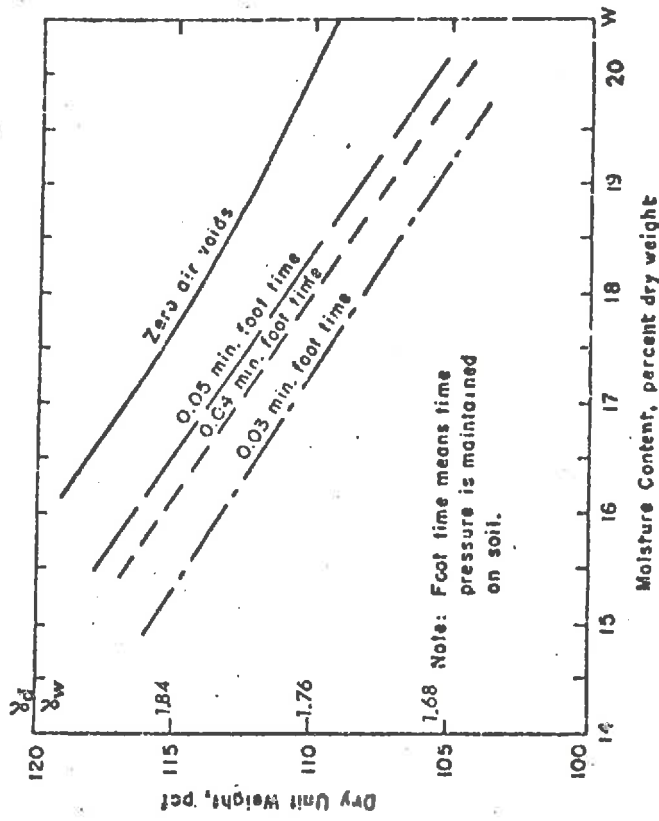
effet de l'énergie de compactage sur la compacité d'un sable argileux (d'après Mc DOWELL - 1957)

FIG 35



relation teneur en eau - poids volumique sec à différentes énergies de pétrissage (argile limoneuse)

FIG. 36 d'après SEED et MONISMITH 1954



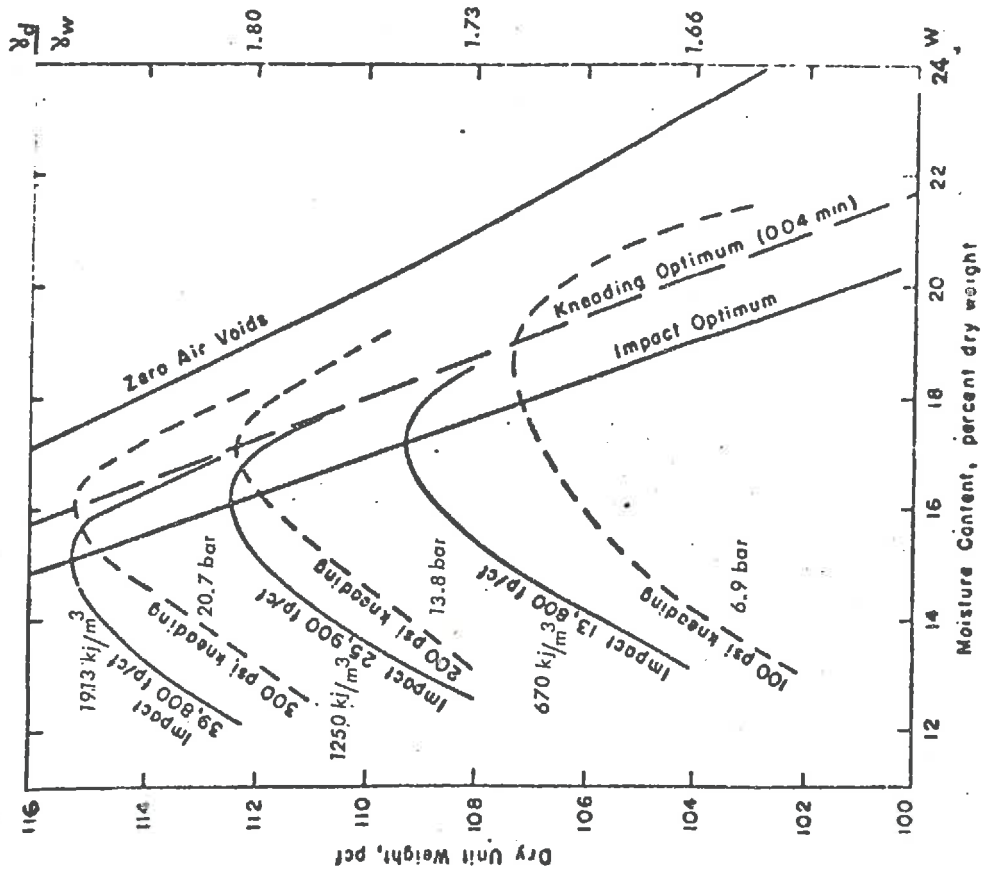
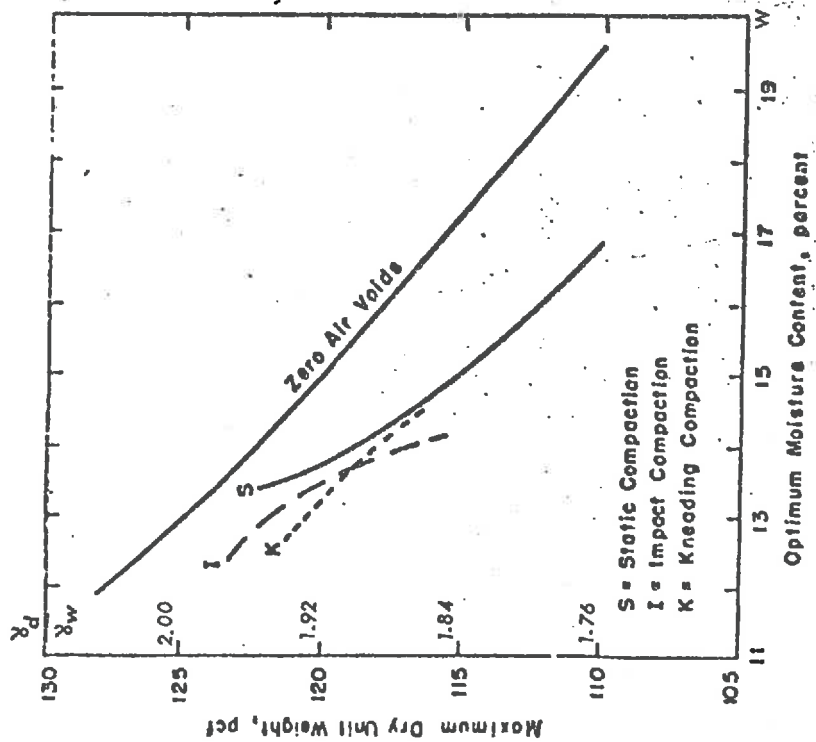
influence du temps d'application de la pression (pétrissage) sur la compacité maximale

FIG. 37

d'après Mc RAE et RUTLEDGE 1952

effet de la méthode de compactage sur la position du maximum d'une argile sableuse de Californie

FIG. 38 d'après SEED, LUNDGREN et CHAN - 1954

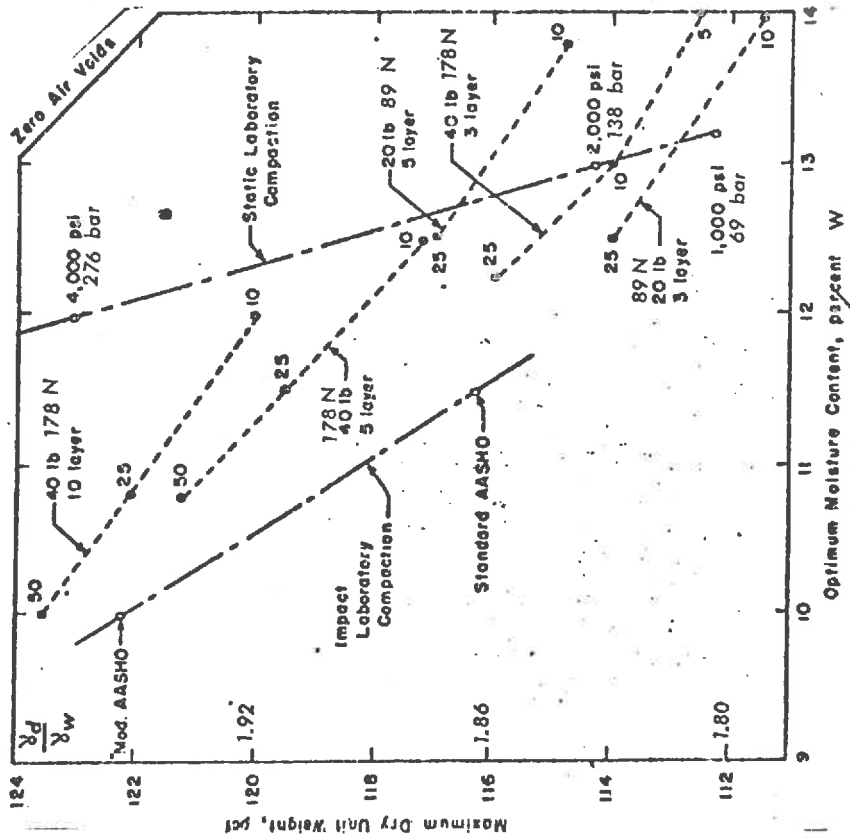
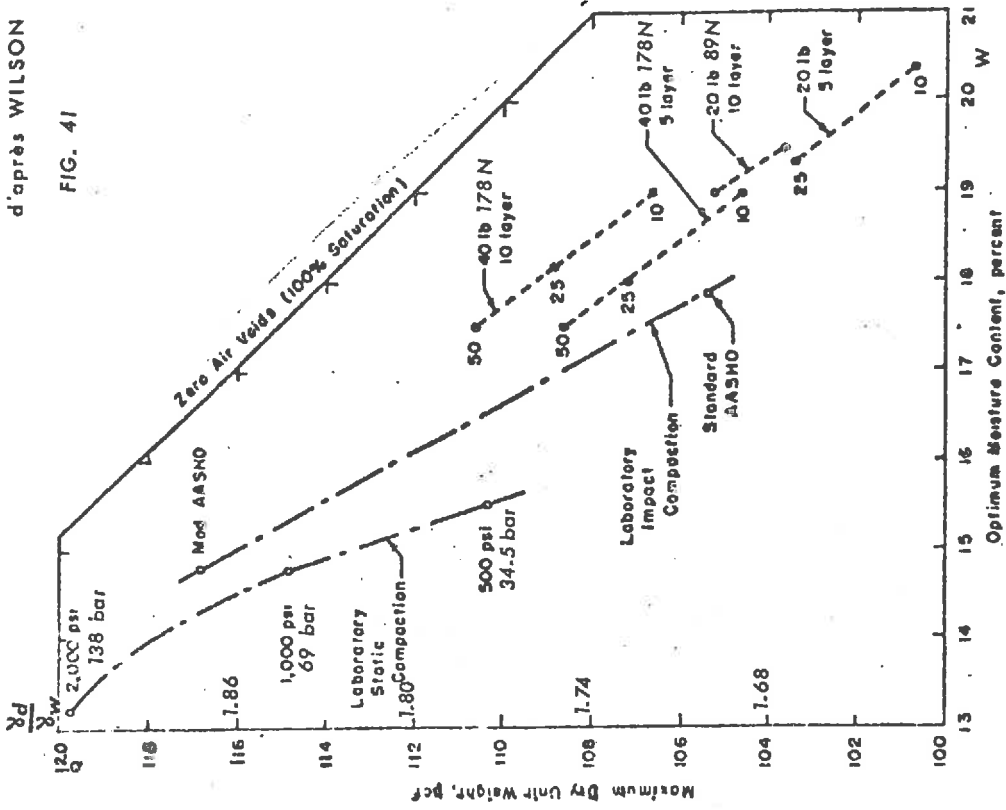


compactage dynamique et pétrissage d'une argile limoneuse

FIG. 39

d'après McRAE et RUTLEDGE - 1952

effet de la méthode de compactage sur la position du maximum de l'argile limoneuse de Vicksburg (LL-37, Pl-14) d'après WILSON 1950



effet de la méthode de compactage sur la position du maximum du sable argileux de Clinton (LL-18, Pl-2)

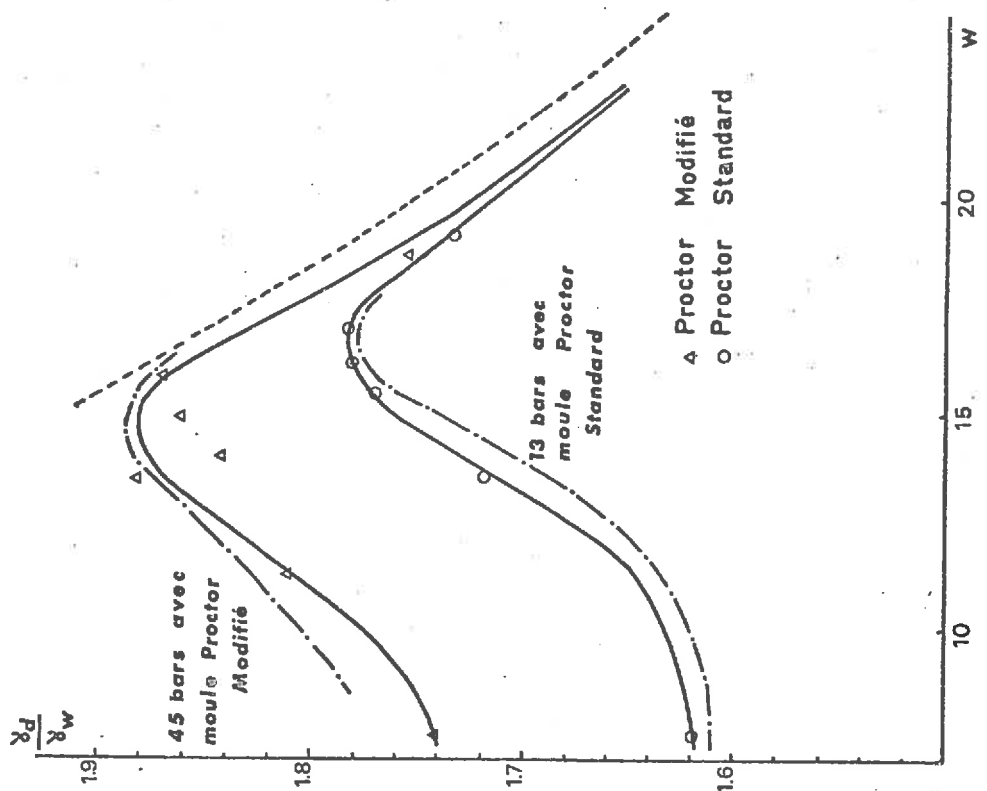
d'après WILSON 1950

CORRESPONDANCE entre COMPACTAGES STATIQUE et DYNAMIQUE

sur argile de N.D. de COMMIERS

d'après ILKER (1969)

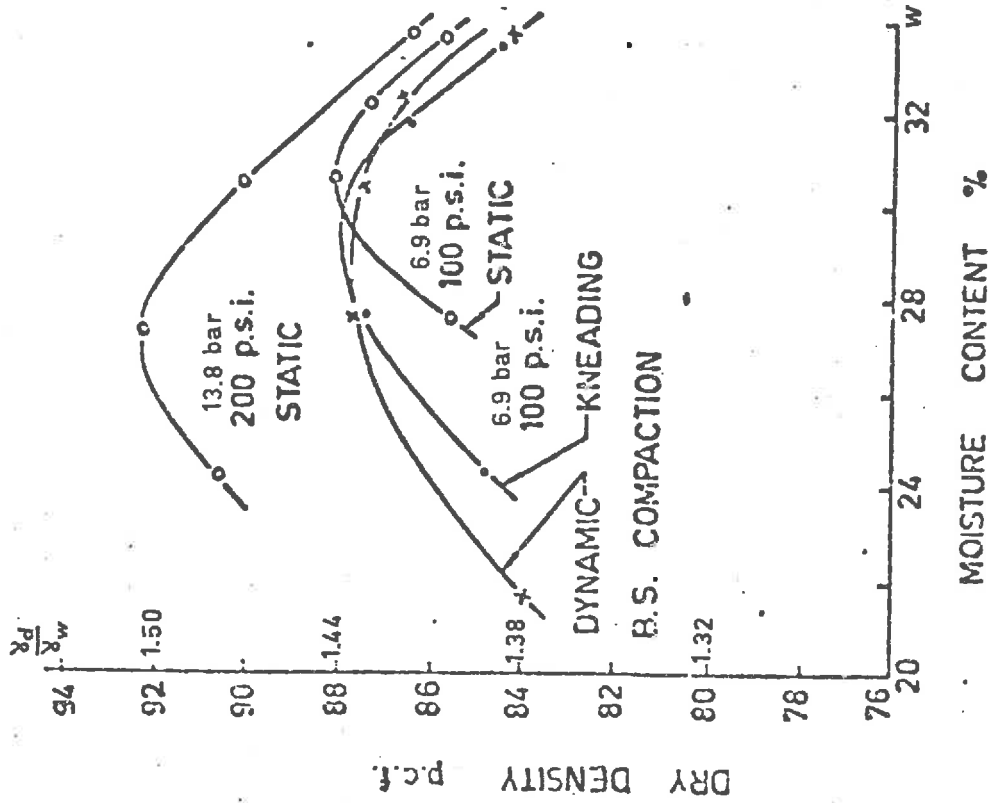
FIG. 42



comparaison entre les courbes de compactage obtenues par différentes méthodes sur une kaolinite

FIG. 43

d'après CLEGG et PAUL - 1967



MOISTURE CONTENT %

Cependant, tous ces travaux ont été rappelés pour bien montrer que le comportement du matériau est qualitativement le même quel que soit le mode de compactage utilisé : existence d'un maximum et mise en évidence par certains d'entre eux d'une discontinuité confortant nos hypothèses sur le seuil de sensibilité. Mais il n'est pas dans notre intention de comparer numériquement les résultats obtenus par l'une ou l'autre des méthodes, ni de chercher quelle valeur donner à l'énergie Proctor pour obtenir les mêmes résultats que ceux obtenus avec une pression de 10 bars par exemple à l'oedomètre.

Cette notion d'équivalence d'énergie, établie pour l'Optimum Proctor, n'est pas nécessairement vérifiée pour d'autres teneurs en eau du fait de l'évolution mécanique du matériau : le choix du critère de comparaison restant ambigu dans la mesure où la comparaison se porte sur le maximum de compacité seulement ou sur les coordonnées du point singulier mis en évidence au Premier Chapitre. D'autre part, une équivalence établie pour un type d'argile (et un mode d'écrouissage donné) ne serait pas nécessairement vérifiée pour un autre type et les résultats numériques obtenus ne présentent donc pas une valeur fondamentale (ILKER 1969).

Ce qu'il convient de remarquer c'est qu'il existe une certaine analogie dans les comportements de la kaolinite soumise aux deux modes de compactage statique et dynamique bien que l'oedomètre présente deux caractéristiques importantes qui les distinguent de l'essai Proctor :

- La contrainte appliquée est une pression constante et non une énergie de chocs "cumulés",

- Le moule de l'oedomètre, contrairement au moule Proctor, permet un éventuel drainage au cours du tassement de l'échantillon.

Malgré ces différences fondamentales, la courbe de variations de la compacité (fig. 44 et 45 et Tableau XVI) présente certaines analogies avec la courbe obtenue par compactage selon la méthode Proctor (fig. 7). Ces analogies apparaissent encore plus clairement lorsque le drainage est supprimé, comme le montre SUBBARAO (1972), fig. 46, ou ILKER (1969), fig. 42 :

- Aux faibles teneurs en eau (environ 14 % avec 41 bars, fig. 44) la compacité accuse un léger maximum (chapitre I.1.1. et I.1.3.),

COMPACTAGE STATIQUE de
l'argile K_0

FIG. 44

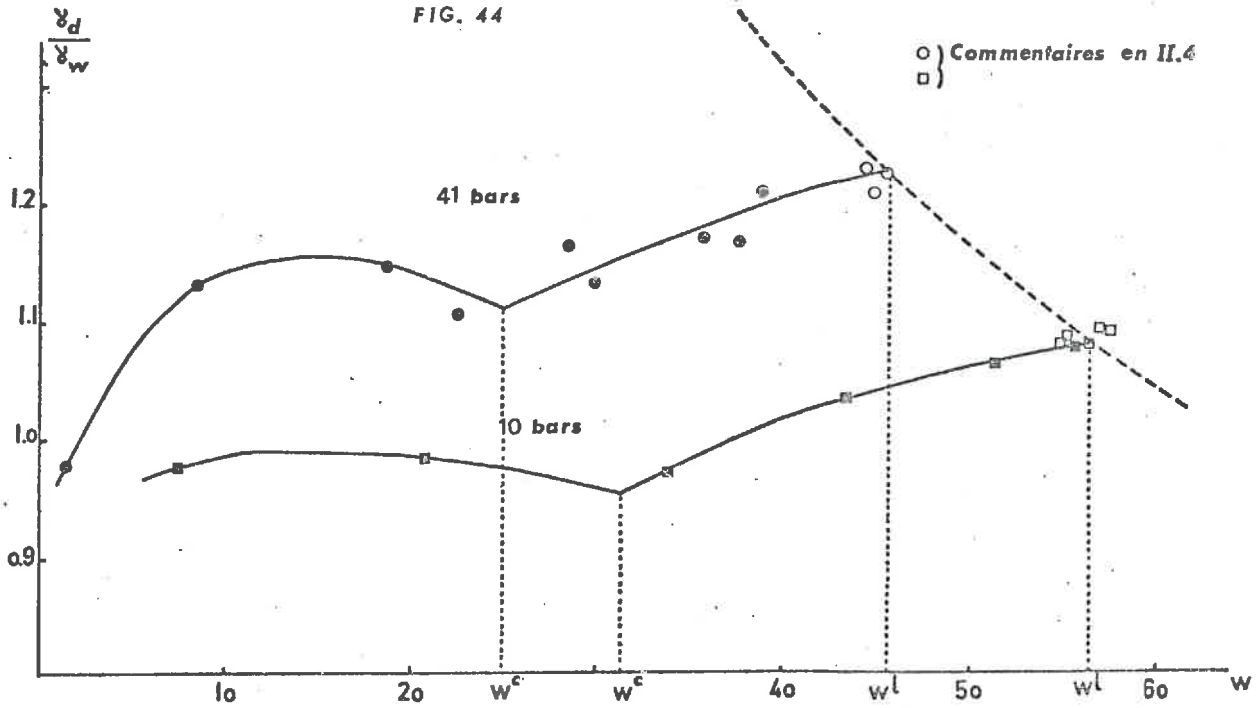
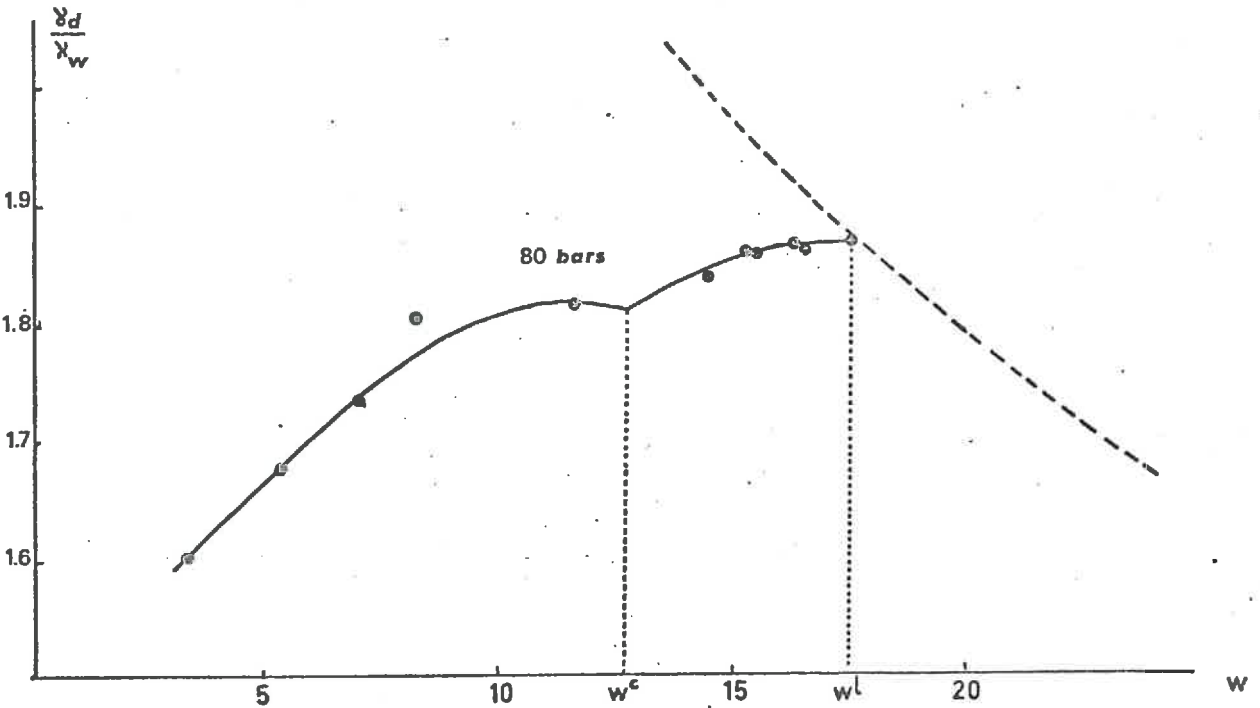


FIG. 45



Argile : NDC

Vitesse de la presse = 1 mm/mn

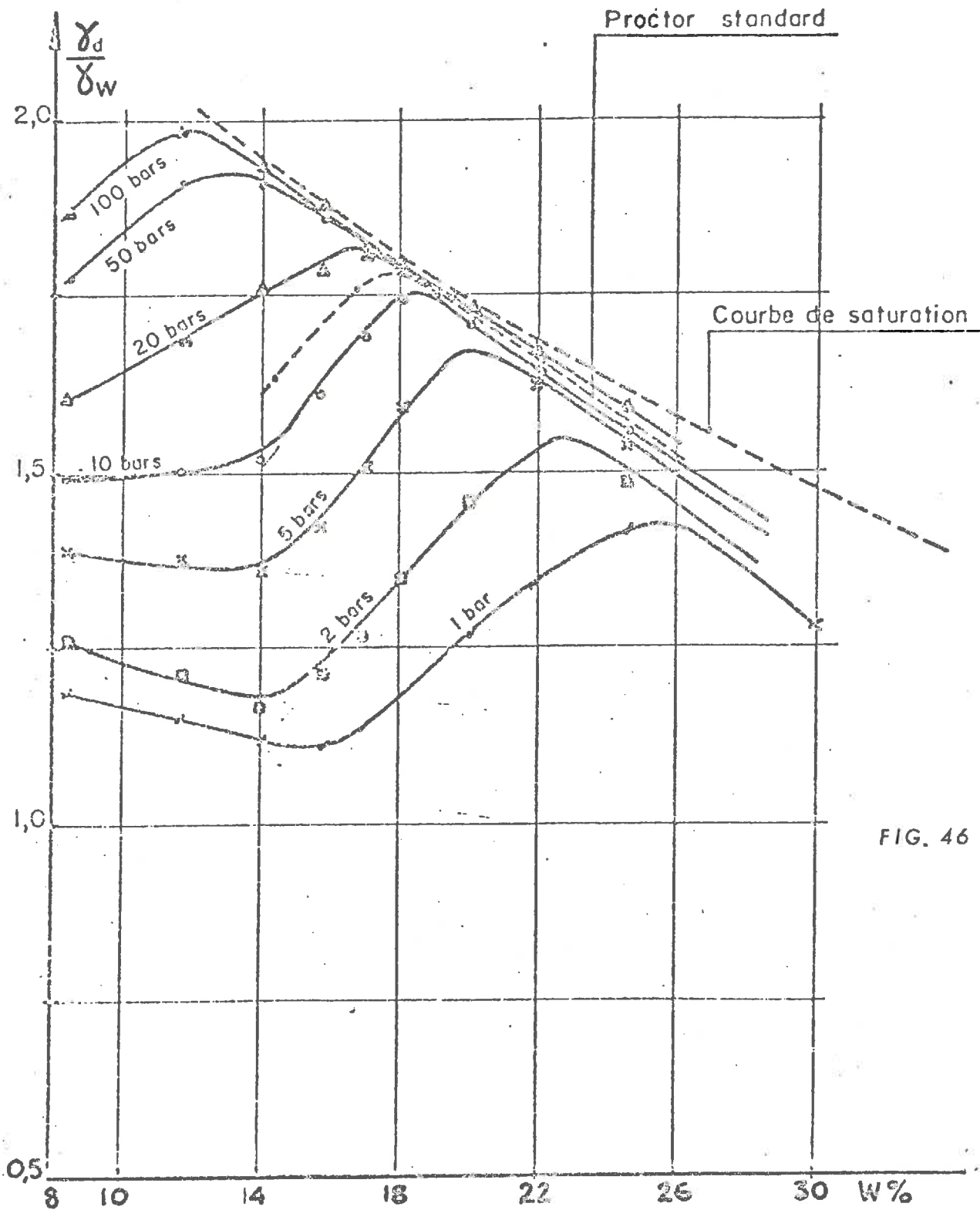


FIG. 46

chemin oedométrique non drainé (d'après SUBBARAO)

- L'existence d'un point singulier qui correspond au seuil de sensibilité au compactage, donc à la limite de plasticité de l'argile, correspondant à ce type de contrainte (chapitre I.1.2.),

- L'allure croissante de la variation de compacité au delà de cette limite de plasticité jusqu'à atteindre la courbe de saturation ($S_r = 100 \%$) à w^1 . Cette teneur en eau limite w^1 est de 56 % à la pression de 10 bars, 45 % à 41 bars (fig. 44) et 17.5 % à 80 bars (fig. 45). Cette allure croissante de la compacité met en évidence l'action lubrifiante de l'argile (chapitre I.2.2.). Nous verrons en II.4 que w^1 peut être considérée comme étant la limite de liquidité à l'énergie de compactage utilisée lorsque nous aurons généralisé cette notion en la reliant à l'intensité de l'énergie comme nous l'avons fait en I.1.2. pour la limite de plasticité.

Ces trois constatations avaient donc été faites précédemment au vu des résultats expérimentaux obtenus avec la méthode Proctor : elles apparaissent comme étant indépendantes du mode de compactage utilisé et non comme étant dues à des artefacts intrinsèques à l'une ou l'autre des méthodes. Nous verrons au chapitre II.5 de quelle façon la nature de l'argile peut modifier ce comportement.

Le seuil de sensibilité au compactage ayant déjà été étudié en détail au cours du premier chapitre, nous nous proposons d'aborder successivement les deux autres points importants de ces constatations : le premier maximum de compacité et la teneur en eau limite w^1 .

II.3 ETUDE DU PREMIER MAXIMUM. DEFINITION DE LA LIMITE DE RETRAIT DES AGREGATS

Au moment de sa préparation en vue d'un compactage en laboratoire, le matériau, séché à 105°; est en général broyé et tamisé. Dans le cas de cette étude, le tamis est à mailles rondes de 2 mm. Aussi, lorsqu'il est prêt à l'emploi, le matériau est formé d'agrégats* dont la résistance à l'écrasement est relativement grande, à sec. Or, cette résistance à l'écrasement diminue très rapidement dès que les agrégats contiennent quelques pour cent d'eau.(1) Ainsi, la distribution de la taille des agrégats au cours du compactage est

* Rappelons que la notion d'agrégat a été présentée au cours de l'introduction générale.

(1) Travaux de FIES non publiés.

évolutive tendant vers un étalement de plus en plus grand lorsque la teneur en eau croît. L'arrangement des agrégats se fait donc de plus en plus serré ce qui conduit à une augmentation de la compacité et une augmentation de la cohésion de leur arrangement (fig. 8 - 2).

Cette augmentation de compacité peut être constatée non seulement sur les fig. 44 et 45 pour la kaolinite seule, mais également pour tous les mélanges étudiés en première partie. Si, pour la plupart des mélanges, cette augmentation, pendant un court intervalle de variations de la teneur en eau, est suivie d'un palier rigoureusement constant jusqu'au seuil de sensibilité au compactage (limite de plasticité à cette énergie) il s'avère qu'il n'existe un maximum vrai que sur les courbes concernant les échantillons suffisamment riches en argile quel que soit le mode de compactage utilisé : l'existence de ce maximum à de faibles teneurs en eau est donc un trait de caractère propre à l'argile. La décroissance de compacité à des teneurs en eau supérieures à celle de ce maximum, que nous appellerons w^m , ne peut être attribuée qu'au gonflement des agrégats d'argile. Cette teneur en eau w^m est donc la limite de retrait des agrégats, limite liée elle aussi au type d'énergie utilisée.

Tout comme la Limite de plasticité, la Limite de retrait est une caractéristique hydrique de matériau définie relativement à un type et une intensité d'énergie. Sa première définition, donnée par HAINES (9123), est rigoureusement compatible avec celle que nous venons de donner, dans la mesure où l'on veut bien considérer que HAINES a utilisé une énergie particulière : l'énergie de succion, mesurée par des P_F . Si HAINES avait utilisé un autre type d'énergie, il aurait défini de la même façon la Limite de Retrait comme étant la teneur en eau en deçà de laquelle le volume du matériau reste constant, c'est-à-dire au delà de laquelle le gonflement en fait varier le volume, mais la valeur ainsi caractérisée de la teneur en eau aurait été différente de celle obtenue selon le protocole P_F ;

En outre, si la Limite de Retrait selon HAINES était une caractéristique hydrique indépendante du protocole d'application des contraintes, il serait physiquement impossible d'obtenir une éprouvette d'argile saturée de teneur en eau inférieure à la Limite de Retrait : c'est cependant le cas des argiles surconsolidées, in situ, ou le cas des résultats obtenus par LE L. (1968) par application de fortes pressions.

La Limite de Retrait selon HAINES est une teneur en eau séparant l'état saturé de l'état non saturé (fissuration) de l'échantillon dont les dimensions sont macroscopiques. L'état physique d'un tel échantillon est représenté par un point sur la courbe de saturation ($S_r = 1$) dans le diagramme (γ_d, w). Mais si nous considérons non plus un échantillon mais les agrégats qui le constituent, ces agrégats peuvent être saturés sans que l'échantillon le soit lui-même. L'état physique d'un tel échantillon est alors représenté par un point qui n'est pas sur la courbe de saturation $S_r = 1$. La teneur en eau w^m est une limite de retrait d'agrégats compactés selon un certain protocole d'application des contraintes, alors que la Limite de Retrait, selon HAINES, est celle de leur assemblage (l'échantillon) compacté selon un autre mode.

Les résultats que nous avons obtenus et présentés jusqu'ici (seuil de sensibilité, maximum de compacité différent de l'Optimum Proctor) nous ont conduits à généraliser les définitions de la Limite de Plasticité (Chapitre I) et de la Limite de Retrait (Chapitre II.3) en considérant qu'il existe une de ces limites pour chaque niveau d'énergie. Nous avons donc été amenés à nous demander si la Limite de Liquidité est également une notion généralisable dans les mêmes conditions. Ce sont, aux fortes teneurs en eau, les différences de comportements du matériau soumis aux essais Proctor et oedomètre qui permettent de situer cette troisième limite sur les courbes de variations de la compacité.

II.4 GENERALISATION DE LA DEFINITION DE LA LIMITE DE LIQUIDITE

Les essais ont montré que les conditions potentielles de drainage offertes par l'oedomètre commencent à se manifester au delà de w^1 (Tableau XVI dans lequel les résultats, pour une pression verticale donnée, sont présentés séparément selon que la teneur en eau de préparation est inférieure ou supérieure à w^1). Le comportement du matériau est différent de ce qu'il est lors d'un essai Proctor ou oedométrique non drainé (ILKER 1969, fig. 42). Alors que l'échantillon, dans ce dernier cas, présente au delà du maximum, une compacité décroissante en fonction de la teneur en eau, il acquiert à l'équilibre dans des conditions drainées les caractéristiques physiques du maximum quelle que soit sa teneur en eau initiale pourvu qu'elle soit supérieure à w^1 (Tableau XVI).

Dans les cas présentés sur la fig. 44 par exemple, tous les échantillons compactés à 10 bars avec une teneur en eau supérieure à 56 % ont, à l'équilibre, 56 % de teneur en eau et 1.085 environ de densité sèche. De même, tous les échantillons compactés à 41 bars avec une teneur en eau supérieure à 45 % ont, à l'équilibre, 45 % de teneur en eau et 1.220 de densité sèche. Ces valeurs, dans les deux cas, sont celles des coordonnées du point au maximum de la courbe. Cette teneur en eau w^1 est donc celle au delà de laquelle les conditions de drainage en cours d'essai montrent l'existence d'une eau libre, par rapport à l'énergie mise en jeu, ramenant le volume de l'argile à son état d'équilibre saturé défini par w^1 . Du fait que le drainage de cette eau "libre" n'est pas possible dans un moule Proctor, l'air piégé au cours du remplissage de celui-ci ne peut être éliminé par écoulement ou entraînement et la saturation de l'échantillon au delà du maximum de compacité ne peut être parfaite. Cette absence de drainage explique donc l'existence du volume de gaz résiduel mis en évidence précédemment (II.1). Ce volume se présente comme un artefact dû aux conditions de réalisation de l'essai Proctor et non à une différence de type d'énergie.

Il est à remarquer que, placés dans l'oedomètre avec une teneur en eau initiale inférieure à w^1 , les échantillons ne subissent pratiquement aucune perte d'eau au cours de l'essai. Si, une fois l'équilibre obtenu, ils sont maintenus sous contrainte et humectés par capillarité, libre de toute charge hydraulique, leur état physique évolue dans le sens d'une augmentation de compacité. Une fois le nouvel équilibre atteint, les échantillons devenus saturés ont une teneur en eau égale à w^1 avec le poids volumique sec correspondant au maximum de compacité (Tableau XVI, essai à 10 bars).

Cette limite w^1 représente donc l'état de saturation d'équilibre du matériau soumis à une pression donnée. A des teneurs en eau supérieures à w^1 l'argile est entièrement saturée aux deux niveaux d'organisation, agrégats et éprouvette, et il existe de l'eau libre par rapport à cette énergie conferrant à l'échantillon un comportement liquide : il devient non compactable. La courbe de saturation n'est en effet que l'expression d'un mélange binaire de deux matériaux de poids volumiques de solides différents (matériau sec et eau). Cette teneur en eau w^1 apparaît comme étant la limite de Liquidité de la kaolinite relative à l'énergie considérée. Cette nouvelle définition de la limite de liquidité doit être compatible avec la définition de cette limite selon ATTERBERG dont le test utilise, comme pour l'essai Proctor, une énergie cinétique cumulée (cf. chap. II.5).

La détermination de w^1 sur une courbe Proctor peut se faire en première approximation par suppression de l'artefact "air piégé" : w^1 est la valeur de la teneur en eau du point sur la courbe de saturation ayant pour ordonnée la valeur de la compacité maximale. A l'énergie E_0 par exemple, il vient $w^1 = 45 \%$ qui correspond à la teneur en eau pour laquelle l'angle de frottement s'annule (équation 1, chap. I), ce qui est une caractéristique mécanique du comportement liquide.

Sur la fig. 47 sont portés les points représentatifs des limites inférieures de plasticité et des limites théoriques de Liquidité de la kaolinite compactée aux énergies E_0 , E_1 et E_2 Proctor et aux pressions utilisées en oedométrie.

Les limites de liquidité ont évidemment le même lieu géométrique quel que soit le mode de compactage puisque, aux teneurs en eau correspondantes, l'échantillon est saturé (mais la courbe de saturation est paramétrée différemment selon la nature de l'énergie utilisée). Par contre, le lieu géométrique des limites inférieures de plasticité est tributaire de la nature de la contrainte appliquée : le gonflement minimal nécessaire pour que l'argile soit plastique a des conséquences différentes (orientation des particules) sur la valeur de la compacité selon la qualité de l'énergie (LAMBE 1958, SEED et CHAN 1959).

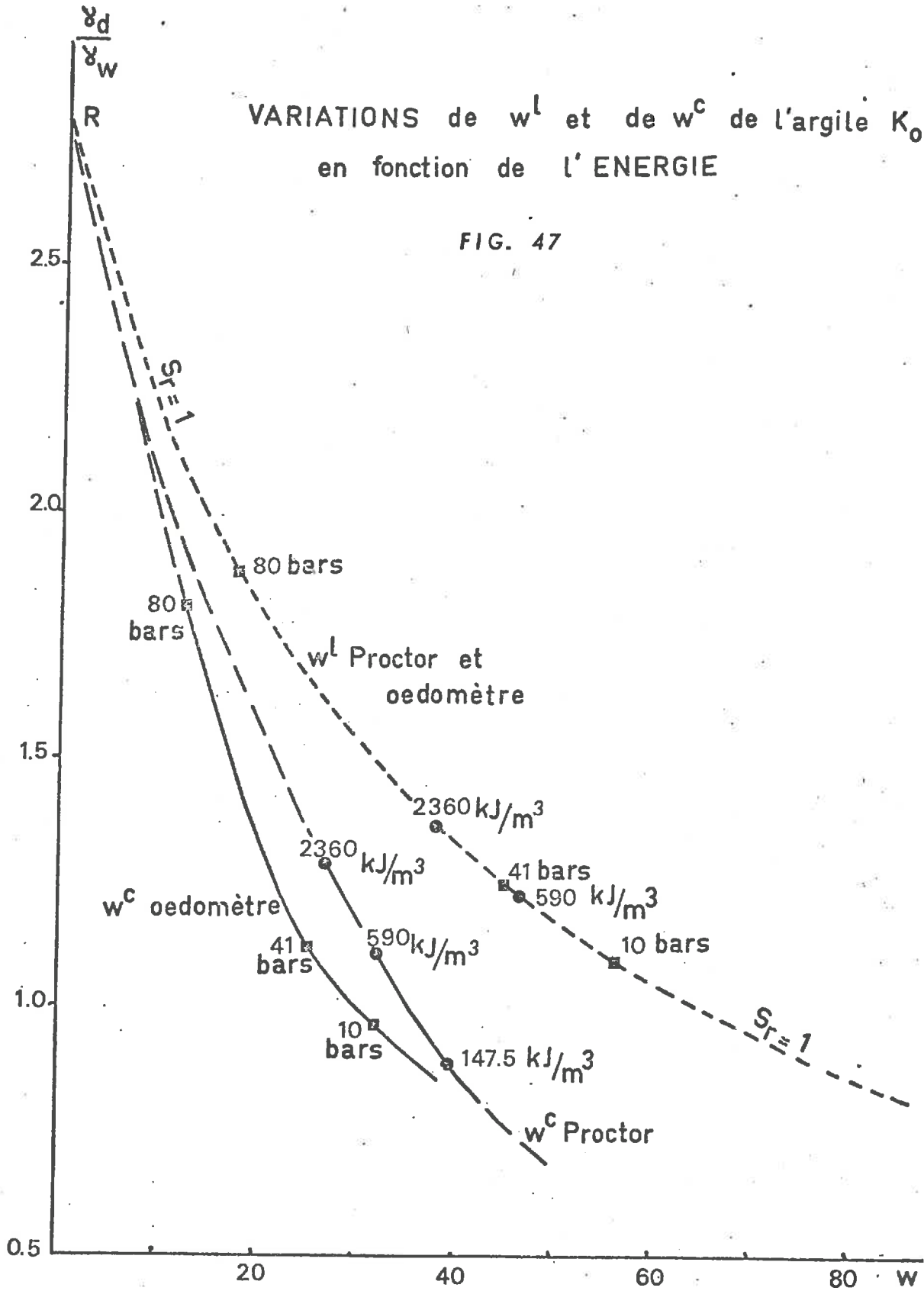
L'extrapolation aux faibles teneurs en eau des courbes représentatives de ces limites ne peut donner comme intersection avec l'hyperbole de saturation que le point R situé sur l'axe des ordonnées. En ce point, il n'y a évidemment plus de différence entre agrégats et éprouvette et l'un et l'autre ont le même poids volumique sec. Ce point R est représentatif des limites de Plasticité et de Liquidité à une énergie extrêmement grande, difficile à quantifier.

II.5 COMPACTAGE AVEC LA COUPELLE ATTERBERG

La coupelle Atterberg, utilisée pour le test conventionnel de liquidité peut également être considérée comme un appareil de compactage de petites quantités de matériau. Si p est le poids de matériau humide placé dans la coupelle, l'énergie mise en jeu au cours de l'essai est $E = \frac{p \cdot n \cdot h}{V}$ avec :

VARIATIONS de w^l et de w^c de l'argile K_0
en fonction de l'ENERGIE

FIG. 47



- n : nombre de chutes de la coupelle
- h : hauteur de chute de la coupelle, égale à 1 cm selon les normes internationales de l'essai
- V : volume total du matériau

Cette énergie est donc bien une énergie cinétique cumulée de même nature que l'énergie développée au cours de l'essai Proctor. C'est pourquoi nous avons procédé à deux types d'essais :

- Le premier type, strictement conforme aux normes internationales du test de liquidité, nous a permis de déterminer les caractéristiques habituelles des matériaux utilisés, dont l'activité, selon SKEMPTON, des argiles mises dans les mélanges,

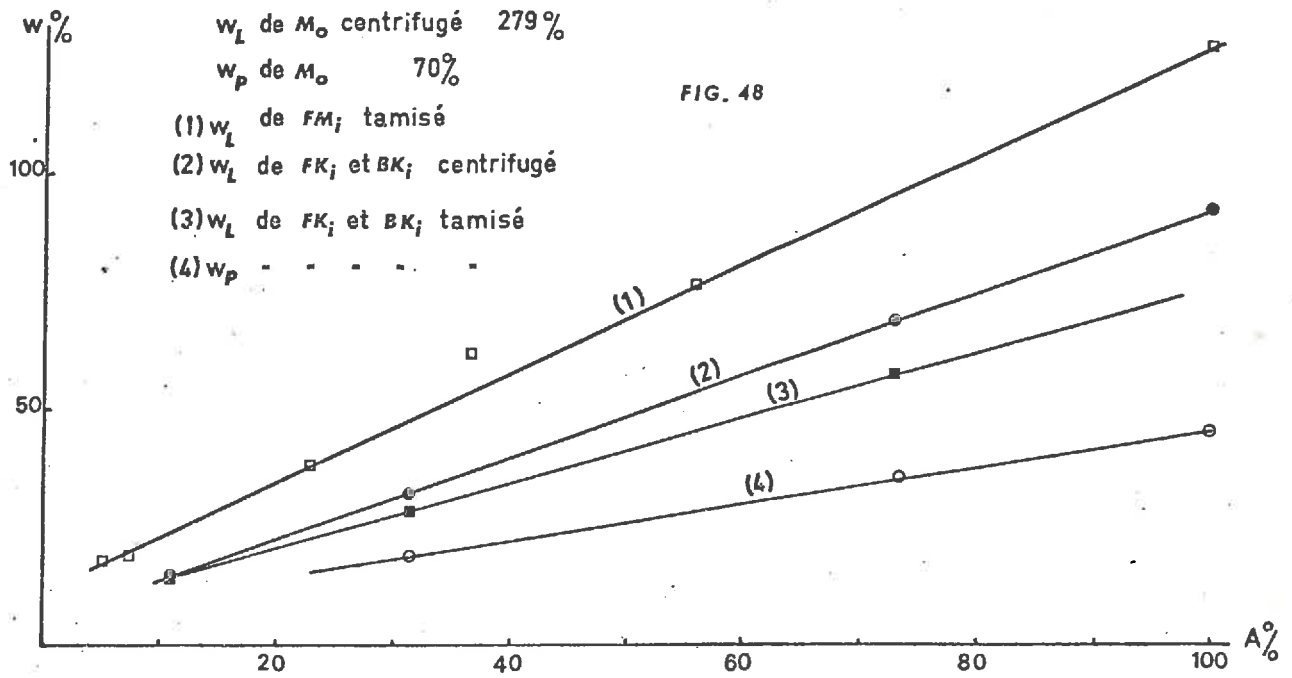
- Le deuxième type répond au souci d'opérer à l'énergie constante alors que pour le test d'Atterberg proprement dit, cette énergie est variable à chaque mesure du fait de la variation incontrôlée de p et de V, outre la variation repérée de n. Comme la Limite de Liquidité est définie par n = 25 coups, nous avons conservé cette valeur pour le nombre de chutes de la coupelle. Le poids de matériau humide p a été fixé à 1 newton dont le volume est de l'ordre de 125 cm³. Les variations de ce volume étant relativement faibles, l'incertitude sur la détermination de la valeur de l'énergie de compactage l'est également. Dans ces conditions, l'énergie développée a, approximativement, pour valeur :

$$E = \frac{1 \times 25 \times 10^{-2}}{125 \cdot 10^{-6}} = 2 \text{ kJ/m}^3$$

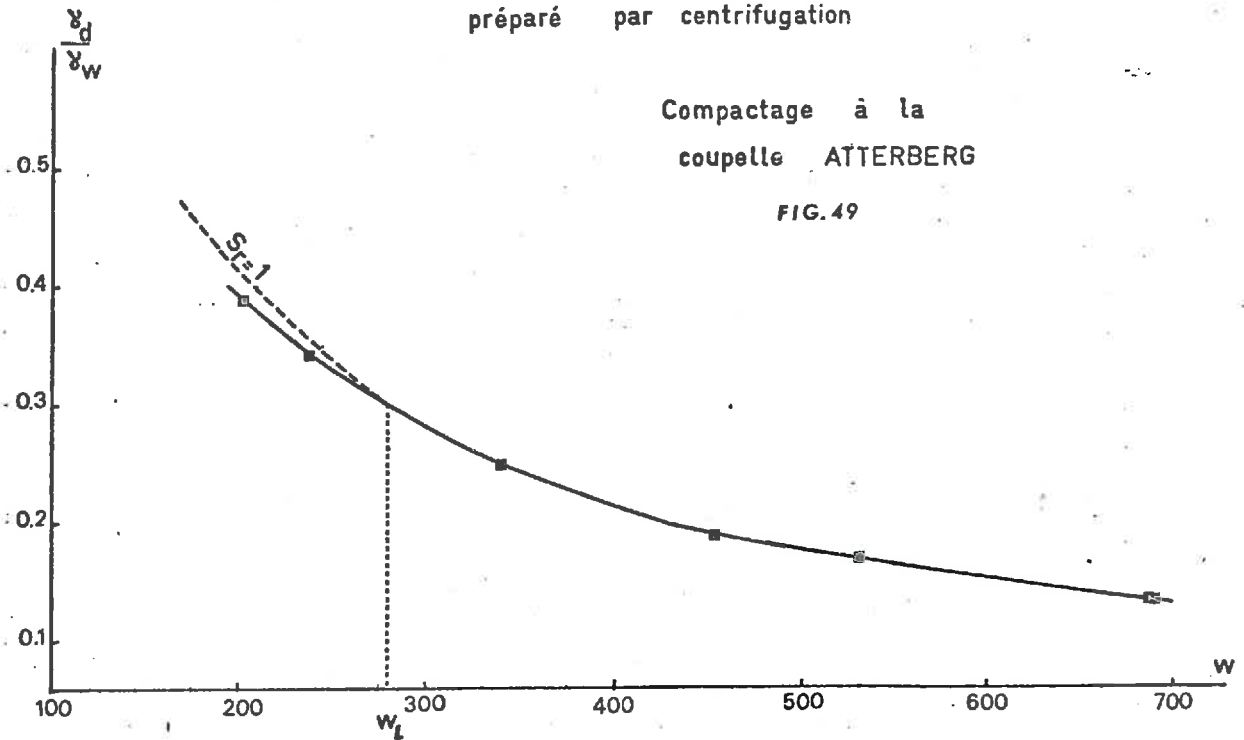
L'énergie standard de l'essai Proctor utilisée au premier chapitre est de 590 kJ/m³, soit 300 fois plus grande : il est bien évident que les résultats obtenus avec la coupelle se situeront dans une toute autre gamme de variations de teneurs en eau et de poids volumiques. Ces derniers ont été mesurés, après application de la contrainte, en utilisant des petits cylindres de volumes connus, enfoncés dans le matériau, ou en effectuant des densitométries au pétrole dans le cas des mesures sur agrégats.

A notre connaissance, les nombreux travaux sur les Limites Atterberg ne se sont orientés que vers la détermination de ces teneurs en eau remarquables en négligeant l'autre caractéristique de l'état physique du matériau

LIMITES ATTERBERG



VARIATIONS de la COMPACTITE de l'argile M_o
préparé par centrifugation



qu'est sa compacité.

SEED, WOODWARD et LUNDGREN (1964) admettent cependant que les matériaux sont saturés lorsqu'ils sont à leur Limite de Liquidité, excepté aux faibles teneurs en argile. En supposant que toute l'eau contenue dans l'échantillon est adsorbée par l'argile, comme nous l'avons fait en I.1.2.1. pour les seuils de sensibilité au compactage, ces Auteurs constatent que la linéarité de la variation de w_L en fonction de la teneur en argile n'est vérifiée que si les particules de sable "baignent" dans l'argile. Le seuil de teneur en argile correspondant est calculé en écrivant implicitement qu'il est la limite commune de la Loi de Substitution et de la Loi de Remplissage.

Ces Auteurs présentent également des résultats sur les limites de Plasticité dont le comportement, affirment-ils, est en tout point comparable à celui des Limites de Liquidité ce qui justifie et précise les théories de SKEMPTON et la notion d'activité des argiles.

Les essais du premier type que nous avons effectués sur quelques échantillons nous ont permis de retrouver les résultats expérimentaux que nous venons d'évoquer (fig. 48) avec, toutefois, la précision suivante :

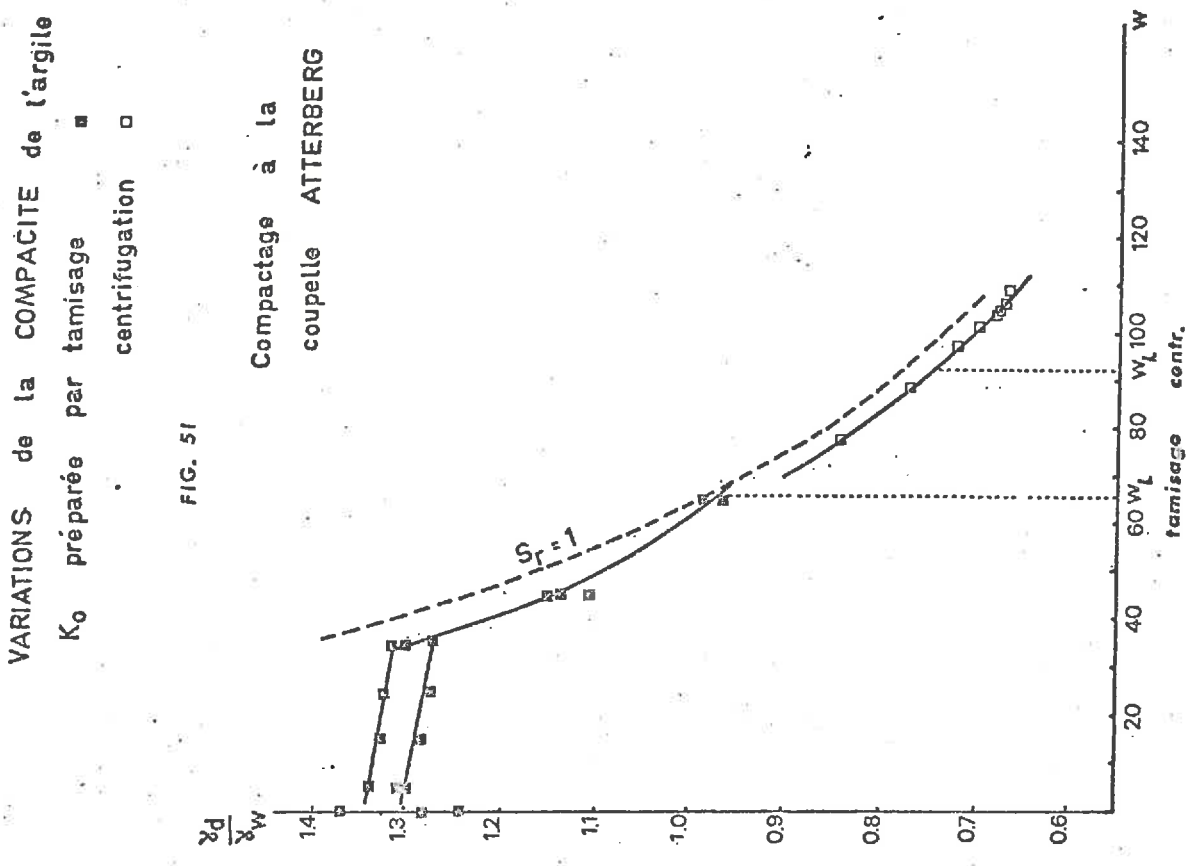
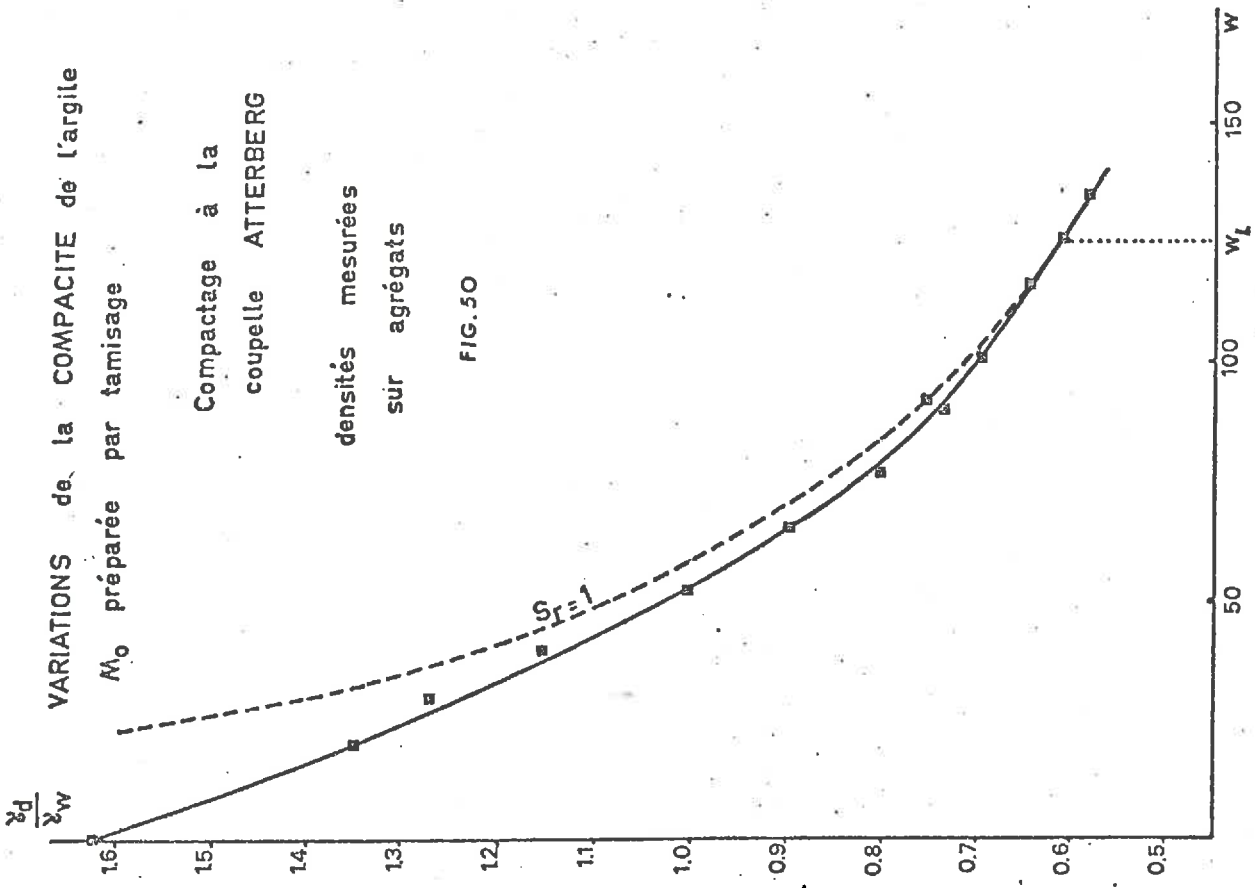
Selon le mode de préparation initiale du matériau avant essai (soit centrifugation suivie de dessiccation lente, soit tamisage à sec suivi d'humectation) les Limites de Liquidité ont des valeurs différentes, bien que proportionnelles à la teneur en argile. Il est vrai que l'activité de l'argile, au sens de SKEMPTON, est elle aussi liée à l'histoire hydrique du matériau.

Le test de Liquidité étant fait conventionnellement sur des pâtes en cours de dessiccation, l'activité standard de la montmorillonite M_0 est égale à 2.09, celle de la kaolinite K_0 est égale à 0.47, résultats conformes aux valeurs généralement obtenues pour ces deux types d'argile.

Les variations de la compacité de ces deux argiles ont été suivies en effectuant les essais du deuxième type à énergie constante. Les résultats sont les suivants :

- La montmorillonite préparée par centrifugation suivie de dessiccation (fig. 49) est saturée pour des valeurs de teneurs en eau supérieures ou égales à w_L et le matériau semble se désaturer aux teneurs en eau inférieures.

- La kaolinite préparée de la même façon donne des résultats moins probants (fig. 51) à cause des artefacts de la méthode de mesure du volume qui crée un remaniement désaturant lors de la détermination du poids volumique. Cependant, les résultats donnent 95 % de saturation lorsque l'argile est à



sa Limite de Liquidité.

- Les agrégats* de kaolinite comme ceux de montmorillonite (fig. 50 et 51) sont saturés aux teneurs en eau supérieures à leur Limite de Liquidité et non saturés aux teneurs en eau inférieures.

Les agrégats de kaolinite ont un poids volumique constant pour des teneurs en eau inférieures à 36 % environ, valeur qui représente donc la Limite de Retrait relative à l'histoire hydrique et énergétique de ce matériau. La Limite de Retrait des agrégats de montmorillonite n'est pas visible car même séchée à 105° cette argile contient encore de l'eau d'hydratation.

Bien qu'incomplet, cet ensemble de résultats converge vers ce que le compactage a suggéré : les Limites de Retrait, de Plasticité et de Liquidité, liées aux histoires hydriques et énergétiques de matériau, sont des "repères" qui se retrouvent sur les courbes de compactage, modifiant le comportement global du matériau que nous résumons ainsi :

Lorsqu'un matériau est compacté avec une énergie constante et à des teneurs en eau croissantes à partir de l'état sec son comportement évolue et passe par quatre étapes différentes.

1) Au faibles teneurs en eau (de 0 % à la limite de Retrait des agrégats) le compactage est en fait un concassage des agrégats, étalant leur répartition granulométrique. Cette modification entraîne évidemment un accroissement de compacité que l'on peut observer sur les courbes de résultats. Il y a concassage dans cet intervalle de teneurs en eau parce que les agrégats sont fragiles. Ce concassage est de plus en plus efficace quand la teneur en eau augmente, parce que la limite de Rupture des agrégats est de plus en plus basse. Cette décroissance de la limite de Rupture des agrégats entraînant un accroissement de la compacité du matériau a également pour conséquence d'entraîner un accroissement de sa cohésion "globale".

2) Au delà de cette Limite de Retrait des agrégats, le gonflement commence à se manifester, ce qui a pour effet de diminuer la compacité de leur arrangement. Ce phénomène est d'autant plus sensible que la quantité de matériau gonflant est importante, c'est pourquoi cette diminution de compacité est observable aux fortes teneurs en argile.

* Rappelons que la notion d'agrégat a été présentée au cours de l'introduction générale.

3) Cette évolution est arrêtée lorsque l'argile atteint sa limite de plasticité relative à l'énergie utilisée (seuil de sensibilité au compactage). Au delà de cette limite, la déformabilité de l'argile lui confert un rôle de lubrifiant sur les particules non argileuses, d'autant plus que son angle de frottement diminue lorsque la teneur en eau augmente. Cette lubrification a une action contraire au gonflement d'où l'accroissement résultant de la compacité.

4) Enfin, lorsque l'argile atteint sa limite de liquidité w^1 , (Limite de Liquidité "généralisée") dépendant elle aussi de la nature et de l'intensité de l'énergie, le matériau qui la contient est également saturé (sauf lorsque le pourcentage d'argile est très faible). Au delà de cette limite, le matériau est incompactable : il est devenu un mélange binaire de minéral et d'eau.

II.6 ETUDE ANALYTIQUE DU COMPORTEMENT DE L'ARGILE COMPACTEE SEULE

Nous avons montré en II.2 que le mode de compactage n'avait pas d'influence sur le comportement qualitatif de l'argile. Cette propriété nous a permis, en II.3 et II.4, de mieux exploiter et expliquer les différentes singularités des courbes de variation de la compacité en fonction de la teneur en eau.

De tous ces résultats, il ressort que c'est l'argile, seule ou dans le mélange, qui par son évolution en fonction de la teneur en eau modifie la réponse à l'action du compactage que l'on exerce sur le matériau. En reprenant les résultats présentés en II.1 (fig. 32 et 33, Tableau XV), nous nous proposons d'analyser le comportement de l'argile aux teneurs en eau supérieures à son seuil de sensibilité au compactage, w^{c*} . Cette analyse, intéressante en soi bien évidemment, nous permettra, au chapitre III, de mieux comprendre le comportement des mélanges contenant cette argile lorsqu'ils sont compactés à des teneurs en eau supérieures à leur seuil de sensibilité.

L'augmentation de volume relatif fictif $v_1^0 = b_{1f}^0 - b_1^{0c}$ de la kaolinite (fig. 33) apparaît comme étant proportionnelle à la quantité d'eau w^1 , dans l'intervalle (w^c, w^1). Cette constatation revient à dire que le supplément de volume d'argile saturée introduit dans un volume donné, au delà du seuil

* Rappelons que dans le cas de l'argile compactée seule, nous avons l'égalité $w^c = w^a$, par définition.

de sensibilité, est proportionnel à la quantité d'eau dite "en excès". La corrélation établie entre $b_{1f}^o - b_1^{oc}$ et w' sur les résultats numériques obtenus à l'énergie E_o , à l'aide de 20 couples de mesures, a un coefficient égal à 0.992 et donne l'équation :

$$v_1^o = b_{1f}^o - b_1^{oc} = 2.149 w' + 0.059$$

soit
$$v_1^o = b_{1f}^o - b_1^{oc} = \lambda \cdot w' \quad (19)$$

avec
$$\lambda = 2.149$$

Le coefficient sans dimension λ est tributaire de l'énergie de compactage et prend les valeurs 2.308 et 1.775 pour les énergies E_1 (147.5 kJ/m³) et E_2 (2360 kJ/m³) respectivement, Tableau XVI.

Cette équation (19) est l'expression du comportement au compactage de la compacité fictive de l'argile saturée avec w^a % de teneur en eau, et pour des teneurs en eau expérimentales variant entre w^a et w^1 , c'est-à-dire dans l'intervalle caractérisé par l'indice de plasticité I_P^E relatif à l'énergie utilisée.

De façon générale, l'équation (19) peut s'écrire :

$$v_1^o = b_{1f}^o - b_1^{oc} = \lambda (w - w^a)$$

mais dans le cas particulier où l'échantillon est à la teneur en eau w^1 , il vient :

$$v_1^{o1} = b_{1f}^{o1} - b_1^{oc} = \lambda (w^1 - w^a) \quad (20)$$

Or, nous avons montré (II.4) qu'aux artefacts près dus à l'essai Proctor lui-même, la valeur limite b_{1f}^{o1} est égale à 1 (saturation complète de l'échantillon d'argile). En outre, le volume relatif de gaz au seuil de sensibilité au compactage est $v_1^{oc} = 1 - b_1^{oc}$. Ainsi, l'équation (20) devient, tous calculs faits :

$$\lambda = \frac{v_1^{oc}}{I_P^E}$$

Présenté sous cette forme, le coefficient λ traduit le fait que la compacité fictive de la kaolinite saturée est d'autant plus sensible au compactage pour une énergie donnée que son indice de plasticité est faible

ou que son volume relatif de gaz au seuil de sensibilité est important.

L'augmentation de compacité de cette argile saturée peut donc se mettre sous la forme :

$$v_1^o = b_{1f}^o - b_1^{oc} = \frac{\lambda^{oc}}{I_P^E} \cdot (w - w^c) = \lambda_1^{oc} \cdot I_L^E \quad (21)$$

I_L^E étant l'indice de Liquidité au sens de CASAGRANDE, relié toutefois aux conditions énergétiques de l'essai.

A la teneur en eau w , le volume relatif de gaz prend la valeur $\lambda_1^o = 1 - b_{1f}^o$, donc cette équation (21) peut s'écrire successivement :

$$- 1 + b_{1f}^o + 1 - b_1^{oc} = \lambda_1^{oc} \cdot I_L^E$$

$$- \lambda_1^o + \lambda_1^{oc} = \lambda_1^{oc} \cdot I_L^E$$

$$\lambda_1^o = \lambda_1^{oc} \cdot (1 - I_L^E)$$

et enfin

$$\frac{\lambda_1^o}{\lambda_1^{oc}} = I_C^E = \frac{w^1 - w}{w^1 - w^c}$$

I_C^E étant l'indice de consistance relatif à l'énergie E , égal à zéro à la limite de liquidité et égal à l'unité à la limite de plasticité.

Une telle représentation des résultats expérimentaux a pour conséquences de pouvoir considérer que les indices de consistance et de liquidité ne caractérisent pas seulement un état hydrique de l'argile saturée mais également une compacité relative, donc également une sensibilité au compactage dans un jeu de contraintes donné : le nom même de ces indices impliquait la nécessité de les relier à des notions de compacité ou de sensibilité au compactage.

Dans la pratique cependant, cette notion de volume fictif n'est pas d'utilité courante. Alors que le coefficient λ est, par sa nature, toujours positif, donnant à l'argile (dans son état fictif saturé à w^a % d'eau) une sensibilité au compactage plus ou moins grande, on peut se demander dans quelle mesure ce coefficient a un sens pour caractériser la sensibilité de l'état physique réel du matériau. En d'autres termes, alors que, quelle que

soit sa nature une argile saturée (dans son état fictif) est toujours sensible au compactage lorsque sa teneur en eau varie de w^c à w^1 , il n'est pas certain qu'il en soit de même pour le matériau dans son état réel. Pour s'en assurer, il convient d'exprimer γ_{de} en fonction des résultats expérimentaux de l'équation (20) avec, rappelons-le :

$$b_{lf}^o = \left(\frac{1}{\gamma_s^a} + \frac{w^a}{\gamma_w} \right) \cdot \gamma_{df} \quad , \quad b_l^{oc} = \left(\frac{1}{\gamma_s^a} + \frac{w^a}{\gamma_w} \right) \cdot \gamma_d^c$$

et

$$\frac{1}{\gamma_{df}} = \frac{1}{\gamma_{de}} - \frac{w - w^c}{\gamma_w}$$

Par éliminations successives dans (20) de b_{lf}^o , b_l^{oc} et γ_{df} nous obtenons l'équation :

$$\left(\frac{1}{\gamma_s^a} + \frac{w^a}{\gamma_w} \right) \cdot \left(1 + \gamma_d^c \cdot \frac{w - w^c}{\gamma_w} \right) + \frac{\lambda}{\gamma_w} \cdot (w - w^c)^2 = \frac{1}{\gamma_{de}} \cdot \left(\lambda (w - w^c) + \gamma_d^c \cdot \left(\frac{1}{\gamma_s^a} + \frac{w^a}{\gamma_w} \right) \right)$$

Pour simplifier les écritures, posons provisoirement :

$$z = \frac{1}{\gamma_{de}} \quad a = \frac{1}{\gamma_s^a} + \frac{w^a}{\gamma_w} \quad \text{avec } w' = w - w^c$$

il vient :

$$z = \frac{a}{\lambda \cdot w' + a \cdot \gamma_d^c} + \frac{w'}{\gamma_w} \quad (22 - 1)$$

et nous savons que w' a un sens physique quand il est positif ou nul.

Cette équation (22 - 1) est celle de la courbe de compactage de la kaolinite K_0 entre w^c et w^1 . Dans la mesure où cette expression peut représenter le comportement de différentes argiles, l'étude du signe de la dérivée de z doit donner les valeurs des caractéristiques physiques qui rendent l'argile sensible ou non sensible. Il vient :

$$\frac{dz}{dw'} = \frac{1}{\gamma_w} - \frac{a \cdot \lambda}{(\lambda \cdot w' + a \cdot \gamma_d^c)^2} \quad (22 - 2)$$

Cette expression s'annule pour :

$$w' = \frac{1}{\lambda} \cdot \left(- a \cdot \gamma_d^c \pm \sqrt{a \cdot \lambda \cdot \gamma_w} \right)$$

mais seule la valeur $w'_1 = \frac{1}{\lambda} \cdot (\sqrt{a \cdot \lambda \cdot \gamma_w} - a \cdot \gamma_d^c)$ est à retenir pour la discussion, l'autre valeur étant toujours négative. Rappelons que les paramètres a , λ et γ_d^c sont des données expérimentales définies à chaque énergie e pour chaque matériau.

1) Si w'_1 est positif la dérivée $\frac{dz}{dw'}$ est négative entre 0 et w'_1 , donc z est une fonction décroissante dans cet intervalle. Alors γ_{de} croît et le matériau est sensible au compactage,

2) Si w'_1 est négatif ou nul (donc peut ne pas avoir de sens physique), la dérivée $\frac{dz}{dw'}$ est positive et γ_{de} décroît pour les valeurs de w' supérieures à 0 : le matériau (la montmorillonite, fig. 18) diminue de compacité au delà de sa limite de plasticité jusqu'à ce qu'il atteigne sa limite de liquidité sur la courbe de saturation.

Or, w'_1 est positif, nul ou négatif selon les caractéristiques du matériau : en effet, le signe de w'_1 dépend du rapport sans dimension

$$\beta_o = \frac{\gamma_w}{\gamma_d^c} \cdot \frac{\lambda}{a \cdot \gamma_d^c}$$

w'_1 est positif, nul ou négatif selon que β_o est supérieur, égal ou inférieur à l'unité.

Ainsi, l'évolution de la compacité d'une argile soumise au compactage n'est pas nécessairement dans le sens d'une augmentation lorsque sa teneur en eau croît à partir de w^c .

A l'aide des équations (22 - 1) et (22 - 2), il est possible de calculer l'expression du coefficient directeur de la tangente à la courbe de compactage à droite du point singulier. Il vient, tous calculs faits :

$$\delta_o = \frac{(\gamma_d^c)^2}{\gamma_w} \cdot (\beta_o - 1)$$

L'accroissement de compacité au delà du seuil de sensibilité au compactage est donc d'autant plus important, pour une variation de teneur en eau donnée, que δ_o est grand et positif. Ce coefficient δ_o , dont le signe

indique l'existence ou la non existence d'une sensibilité au compactage et dont la valeur quantifie l'amplitude de la variation de compacité, sera appelé Indice de sensibilité au compactage de l'argile.

Les valeurs de β_0 et δ_0 ont été calculées pour la kaolinite K_0 compactée aux trois énergies Proctor E_1 , E_0 et E_2 (Tableau XVII). Le sens de variations de la valeur de ces coefficients est conforme à la logique : plus le concassage initial a été important, c'est-à-dire plus la valeur du poids volumique sec au seuil, γ_d^c , est grande, moins le matériau est sensible au compactage à des teneurs en eau supérieures à w^c . Avec la Montmorillonite M_0 , nous avons déjà constaté au Chapitre I.1.4 (fig. 17 et 18) que la courbe de compactage présente des "anomalies" par rapport aux courbes habituellement rencontrées :

- Difficulté de placer le seuil de sensibilité sans l'aide des résultats obtenus avec les mélanges FM_i et BM_i ,

- Disparition du maximum de compacité, la courbe n'accusant pas le moindre accroissement de poids volumique,

- Disparition du défaut de la méthode Proctor, ce qui donne des échantillons parfaitement saturés à des teneurs en eau suffisamment élevées.

En outre, la dispersion relativement plus grande des résultats rend incertaine la précision du tracé de la courbe au delà de 35 % de teneur en eau, d'autant plus qu'il serait tentant de maintenir positive sa concavité, contrairement à l'allure générale de toutes les courbes de compactage.

A l'aide des hypothèses faites sur l'existence par continuité du seuil de sensibilité à 38 % de teneur en eau (I.1.4.) avec l'énergie E_0 , nous avons calculé le volume relatif de cette argile dans son état fictif (b_{1f}^0) et présenté les résultats au Tableau XVIII et fig. 52.

La corrélation établie dans les deux cas de compactage entre b_{1f}^0 et $w' = w - w^c$ est relativement bonne et donne respectivement :

$$b_{1f}^0 = 0.670 \cdot w' + 79.21 \quad \text{avec le moule } \emptyset = 35 \text{ mm}$$

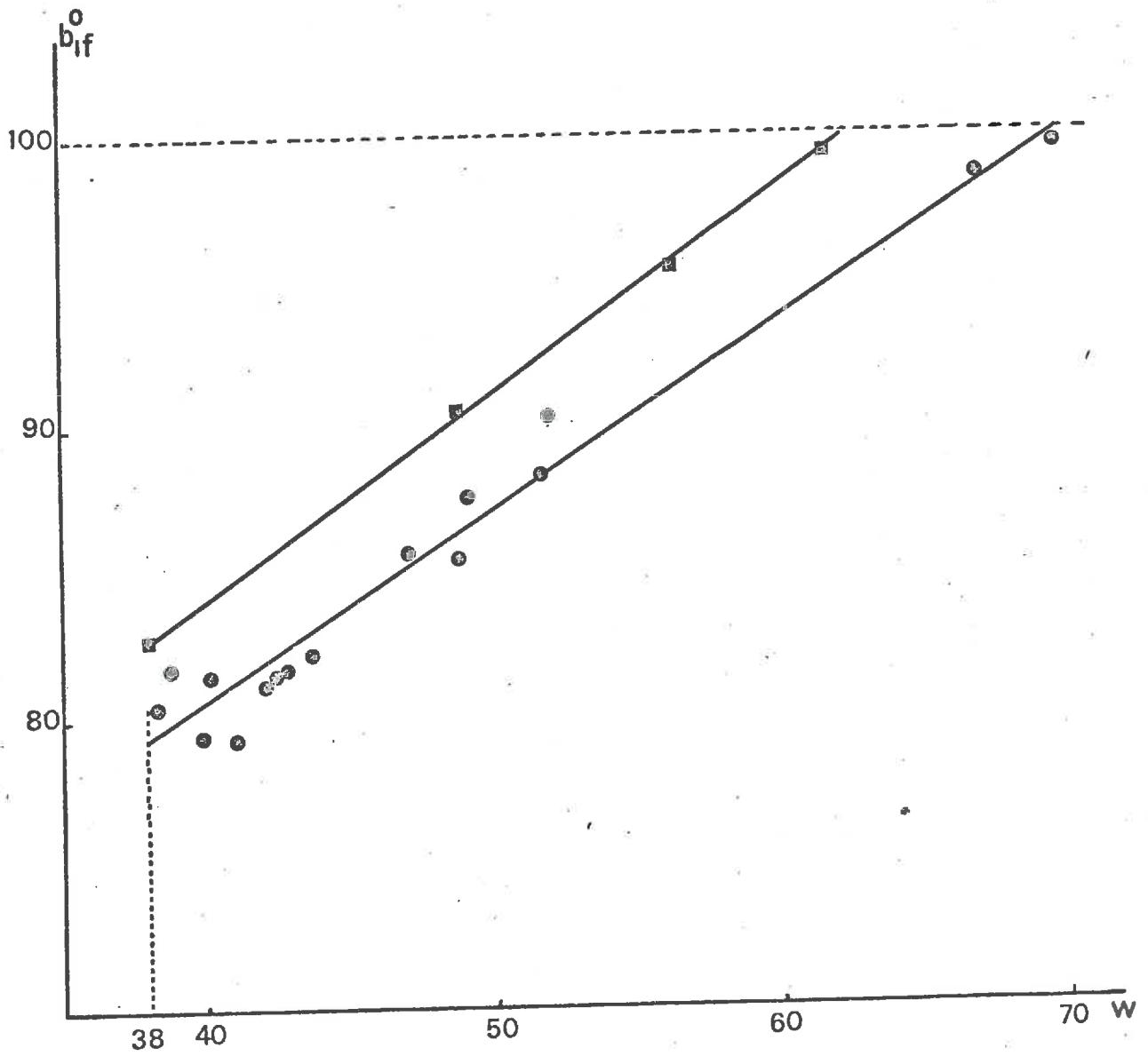
$$b_{1f}^0 = 0.698 \cdot w' + 82.78 \quad \text{avec le moule } \emptyset = 70 \text{ mm}$$

VOLUME RELATIF FICTIF de l'argile M_0

- moule ϕ 70mm
- moule ϕ 35mm

Energie E_0

FIG. 52



Du premier résultat, il est possible de déduire $b_{1f}^{oc} = 79.21$, soit

$$\frac{\gamma_d^c}{\gamma_w} = 0.995, \text{ résultat que le tracé de la courbe (fig. 18) ne permettait}$$

pas d'obtenir avec une précision suffisante.

Le coefficient λ (0.670 en 35 mm et 0.698 en 70 mm) est faible, donnant à β_o les valeurs 0.850 et 0.810 inférieures à l'unité. Cette montmorillonite entre bien dans la catégorie des matériaux non sensibles au compactage, comme l'allure de sa courbe de variations de compacité le faisait supposer. Le tracé point par point de cette courbe à partir des valeurs numériques de β_o , δ_o et λ confirme que sa concavité est négative au même titre que toutes les courbes de compactage, assurant ainsi une certaine continuité de l'évolution du comportement des matériaux en n'en modifiant pas la loi générale.

II.7 CONCLUSION

L'analyse des courbes de compactage des argiles K_o et M_o a nécessité un artifice de calcul introduisant le concept d'état physique fictif de l'argile saturée avec w^a % d'eau. C'est ce concept qui donne des bases plus fondamentales aux Limites de comportement (Plasticité, Liquidité ou Retrait) en les liant à la nature et à l'intensité des contraintes que subissent le matériau. Les Utilisateurs de ces Limites, Agronomes ou Mécaniciens du Sol, ont sans doute parfois tendance à oublier qu'elles sont établies à l'aide de tests mettant en jeu des énergies de compactage faibles (Liquidité) ou fortes (Retrait) ou encore mal définies (Plasticité).

C'est par l'intermédiaire de cet état physique fictif que les indices de Liquidité et de Consistance de CASAGRANDE ne sont pas uniquement des caractéristiques hydriques du matériau, mais deviennent des caractéristiques du couple teneur en eau (w) - compacité (évaluée par un poids volumique ou par un volume relatif de la phase solide).

Enfin ont pu être mises en évidence deux grandeurs λ , γ_w et b_1^{oc} . γ_d^c dont les valeurs relatives de l'une par rapport à l'autre permettent d'apprécier le caractère sensible ou non sensible au compactage du matériau ;

la première, $\lambda \cdot \gamma_w$ peut être considérée comme un indice du pouvoir lubrifiant de l'argile, la seconde, $b_1^{oc} \cdot \gamma_d^c$ comme un indice du pouvoir de gonflement. Il est alors possible d'apprécier si une argile est "plus lubrifiante que gonflante" comme K_0 , donc sensible au compactage et si une argile est "plus gonflante que lubrifiante" comme M_0 , donc non sensible.

Il convient maintenant de déterminer l'influence de ces paramètres sur le comportement au compactage des matériaux fabriqués par mélanges de sable et de ces argiles : FK_i , BK_i , FM_i et BM_i .

CHAPITRE III

COMPORTEMENT DES MELANGES AU DELA DU SEUIL DE SENSIBILITE

=====

Le Chapitre II a mis en évidence l'action lubrifiante de l'argile sur elle-même. L'objet de cette troisième partie est de tenter de tirer les conséquences que cette action peut avoir lors du compactage d'un mélange dont l'argile est l'un des constituants.

Les variations du poids volumique sec des différents matériaux sont qualitativement comparables, au delà du seuil de sensibilité (fig. 1 à 4, 7, 10, 12 à 15, 18, 18, 32, 42 à 46) : il existe en général un maximum de compacité à une teneur en eau w^M dont la valeur est liée notamment à la composition granulométrique du matériau et à un processus de compactage. Cependant, dans le cas des mélanges FM_i , BM_i , FK_i et BK_i , lorsque la teneur en eau varie de w^c à w^M l'amplitude de la variation du poids volumique sec est très faible pour les mélanges sableux. Cette amplitude de variations augmente lorsque le mélange est plus riche en argile, elle passe par un maximum pour les mélanges contenant environ 20 % d'argile et décroît continuellement lorsque les teneurs en argile passent de 25 % à 100 %.

Compte tenu des hypothèses faites sur l'antagonisme de la lubrification et du gonflement de l'argile, nous avons été amenés à utiliser le même artifice de calcul qu'au Chapitre II. Nous avons déterminé, à l'aide des résultats expérimentaux, les volumes relatifs de la phase solide de l'argile et du sable dans l'état fictif du mélange considéré comme étant obtenu avec la seule action de la lubrification.

En utilisant les formules 4 - 1 et 4 - 2 qui définissent ces volumes relatifs et en nous plaçant non plus au seuil de sensibilité mais en un point quelconque de la courbe de variation de compacité, nous obtenons :

$$b_{1f} = a.A. \gamma_{df} \quad \text{et} \quad b_{2f} = \frac{S}{\gamma_s} \cdot \gamma_{df} \quad (23)$$

$$\text{avec } a = \frac{1}{\gamma_s^a} + \frac{w^a}{\gamma_w}$$

Rappelons que la définition de γ_{df} , poids volumique fictif, est donnée au Chapitre II.1.

La quantité d'eau contenue dans l'échantillon étant disponible pour l'argile uniquement, nous pouvons écrire :

$$\frac{w}{A} = \frac{w^c}{A} + \frac{w'}{A} \quad \text{soit} \quad \frac{w}{A} = w^a + \frac{w'}{A}$$

w' ayant la même signification qu'au Chapitre II.1.

Ce concept d'état physique fictif permet d'étudier et de comparer entre eux des échantillons dont l'argile est constamment dans le même état hydrique (saturée avec w^a % d'eau). D'autre part, la comparaison des comportements de deux mélanges différents, de teneur en argile A_1 et A_2 et compactés à des teneurs en eau w_1 et w_2 respectivement, peut se faire en choisissant w_1 et w_2 de telle sorte que l'argile de ces deux mélanges dispose de la même quantité d'eau, c'est-à-dire telle que :

$$\frac{w_1}{A_1} = \frac{w_2}{A_2} \quad \text{qui entraîne} \quad \frac{w'_1}{A_1} = \frac{w'_2}{A_2}$$

III.1 RESULTATS GENERAUX

Comme nous ne nous intéressons, dans ce Chapitre III, qu'au comportement des mélanges au delà du seuil de sensibilité au compactage défini par $w^c / A = w^a$, nous utiliserons comme variable le rapport w' , teneur en eau excédentaire dont dispose l'argile et parfois par commodité graphique, nous utiliserons le rapport w' / A .

Dans une première présentation, nous avons choisi de représenter la compacité fictive des mélanges par la somme des volumes relatifs $b_{1f} + b_{2f}$. A une énergie donnée, les variations de cette compacité fictive sont de trois types différents selon la valeur de la teneur en argile du mélange.

- 1) Teneur en argile inférieure ou égale à 12 % environ (fig. 53). La quantité $b_{1f} + b_{2f}$ ne varie pas linéairement et lorsque w' / A augmente indéfiniment, les valeurs de la compacité fictive semblent tendre vers une valeur limite fonction de la granulométrie du mélange.
- 2) Teneur en argile supérieure à 20 % environ (fig. 54). La quantité $b_{1f} + b_{2f}$ semble varier linéairement en fonction de w' / A , pour atteindre une valeur limite de 96 % commune à tous les mélanges. Nous savons que cette valeur limite de 96 % est particulière aux conditions du compactage Proctor (Chapitre II.1) car un autre procédé peut donner une valeur limite correspondant à la saturation complète. Les 4 % d'écart obtenus sont dus uniquement aux défauts de la méthode (effets de parois du moule, répartition hétérogène des impacts, discontinuité entre les couches de compactage, etc ...)
- 3) Une plage de teneurs en argile comprise entre 12 % et 20 % (fig. 55) dans laquelle le comportement des mélanges est transitoire, sans spécificité bien marquée.

Ce mode de représentation des résultats présente l'avantage de faire apparaître nettement les différences de comportement des mélanges en fonction de leur granulométrie mais elle est insuffisante pour permettre une tentative d'interprétation. C'est la raison pour laquelle nous avons été amenés à chercher des représentations mieux adaptées à chacune des classes granulométriques, tout en conservant comme référence commune l'état physique du matériau au seuil de sensibilité au compactage.

III.2 LES MELANGES A COMPORTEMENT NON SABLEUX

Les mélanges à comportement non sableux, déjà définis au Chapitre I, correspondent à des teneurs en argile supérieures à 20 % environ. Ces mélanges sont évidemment influencés dans leur comportement par l'argile qu'ils contiennent. Nous nous proposons d'étudier en premier lieu le comportement des mélanges à kaolinite. Les conclusions obtenues nous serviront alors pour les mélanges contenant la montmorillonite.

VARIATION des VOLUMES FICTIFS des PHASES SOLIDES

teneurs en eau supérieures au seuil

Energie E_0

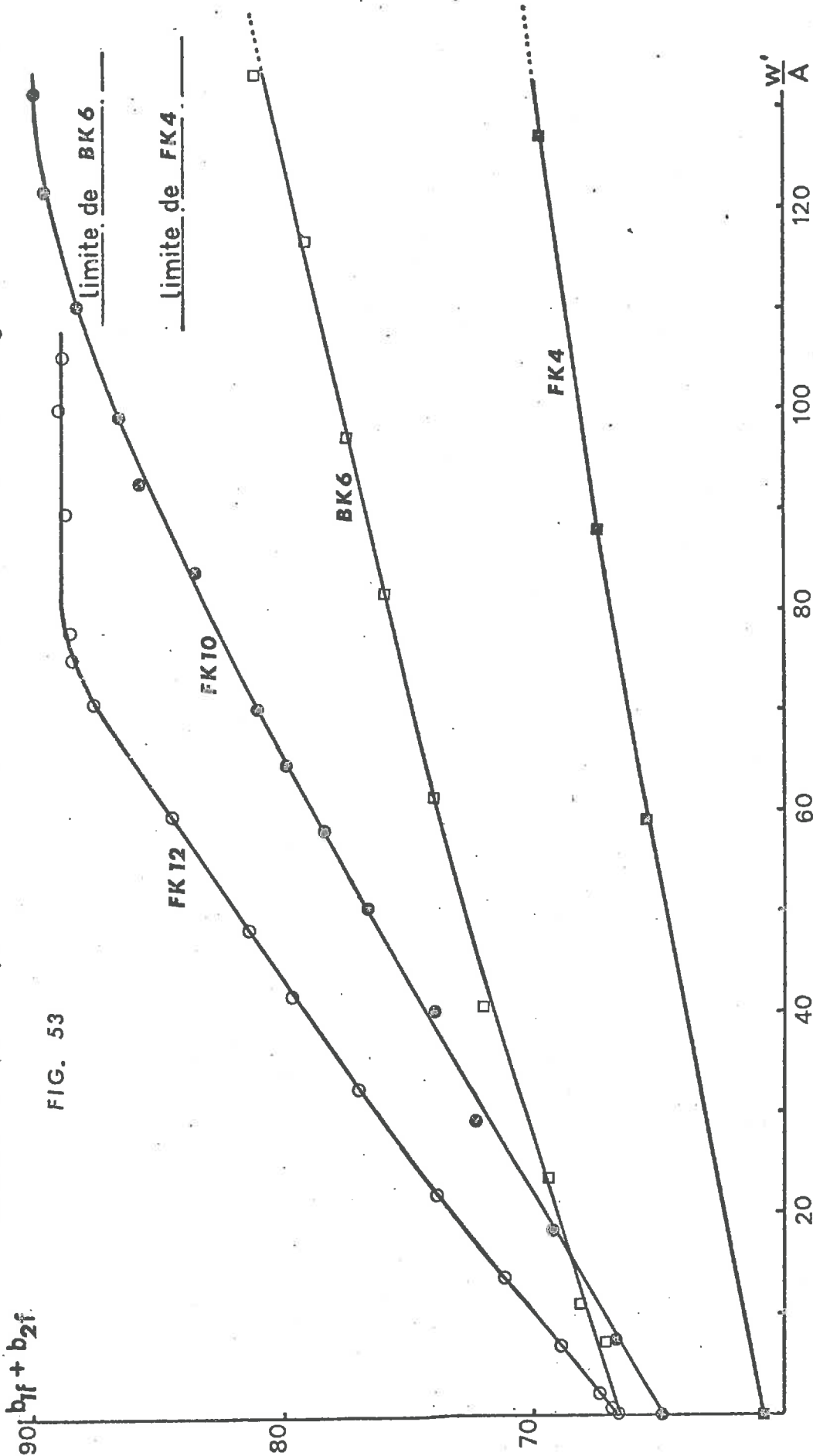


FIG. 53

VARIATION des VOLUMES FICTIFS
des PHASES SOLIDES Energie E_0
teneurs en eau supérieures au seuil

FIG. 54

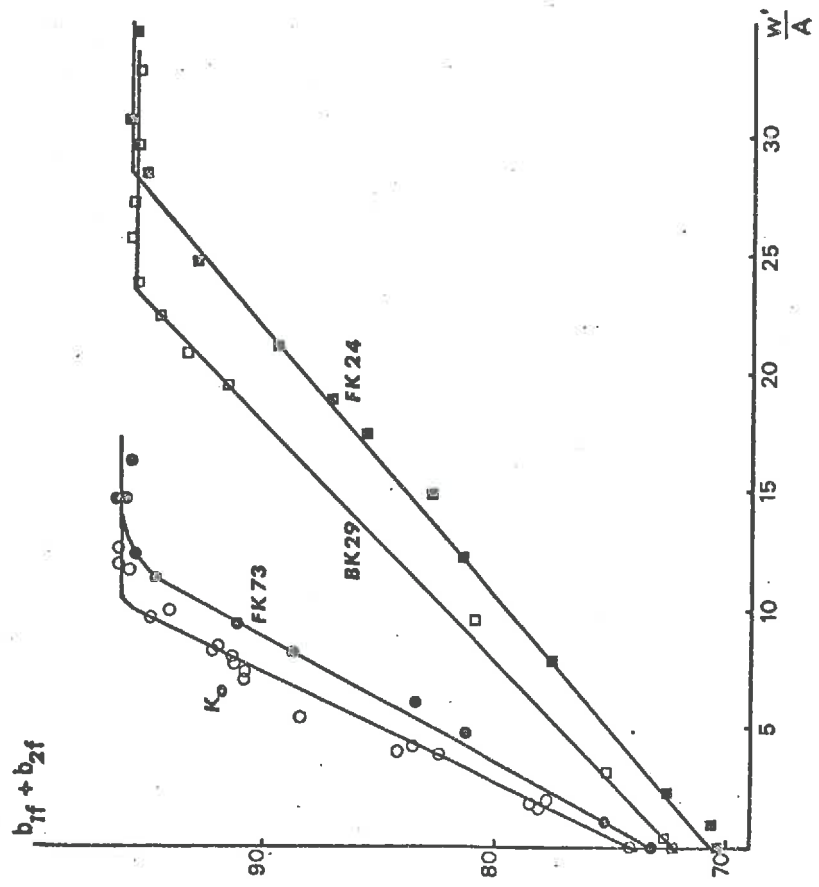
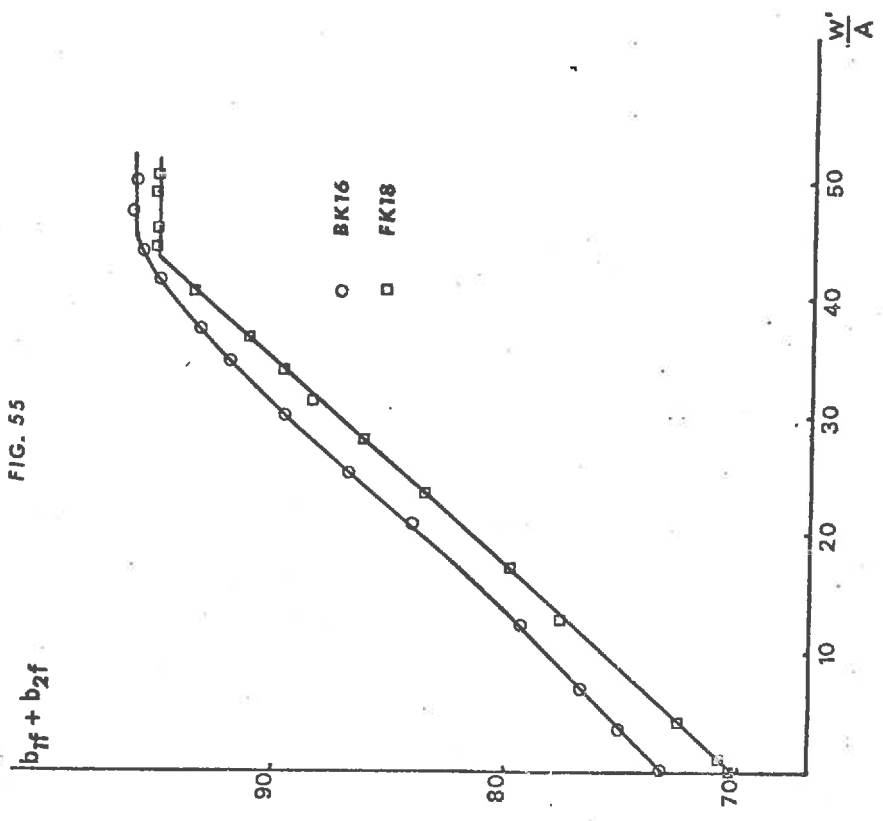
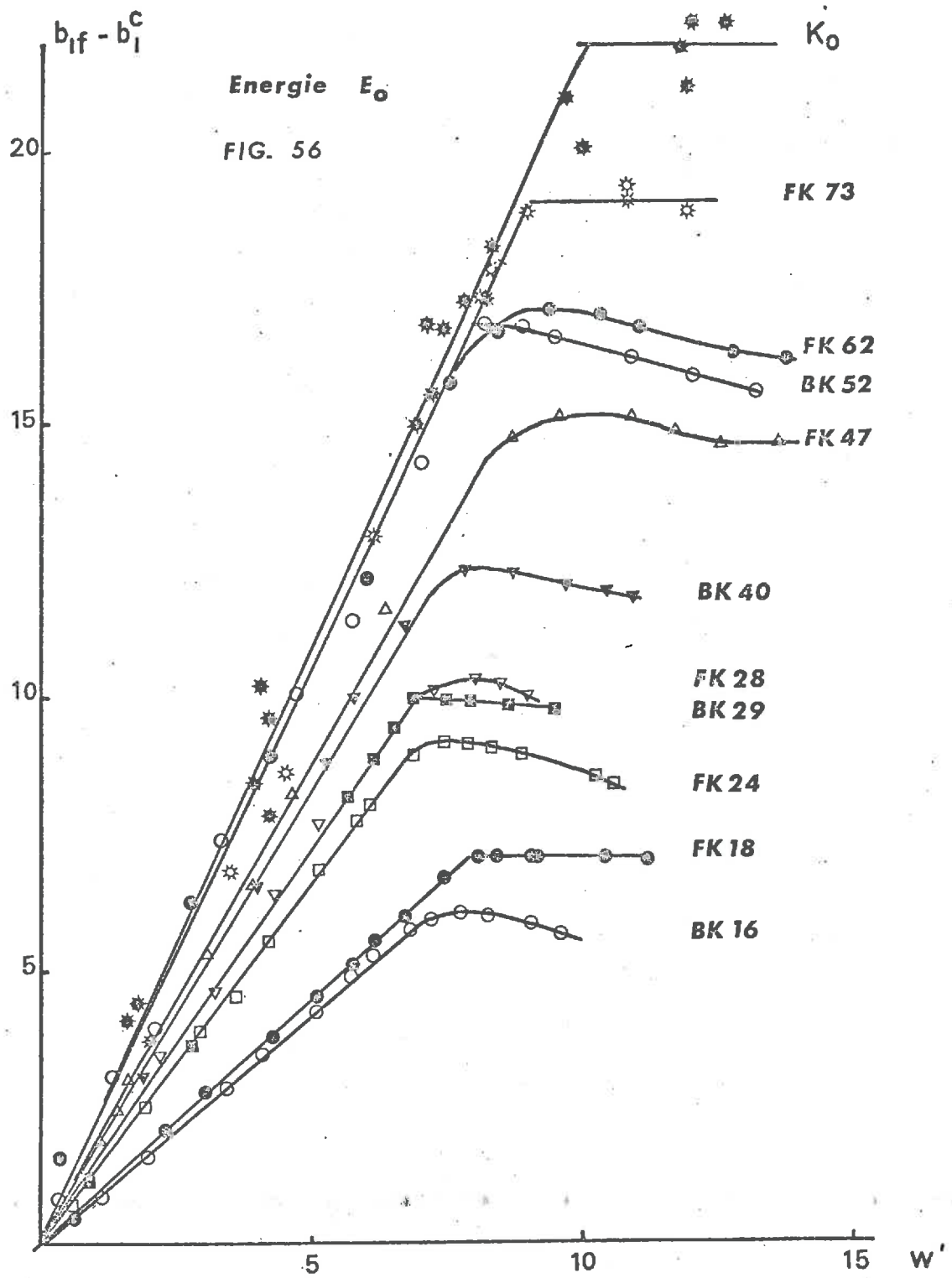


FIG. 55



VOLUMES FICTIFS de l'ARGILE dans
les MELANGES à COMPORTEMENT
NON SABLEUX au delà du SEUIL



III.2.1. Mélanges avec kaolinite

Pour de tels mélanges, nous avons choisi de prendre comme base d'étude les variations du volume relatif b_{1f} de l'argile. Les variations du volume b_{2f} du sable s'en déduisent immédiatement à l'aide des formules (23).

Ce choix de paramètre permet d'utiliser comme référence les résultats connus par le Chapitre II concernant le comportement de la kaolinite compactée seule. La présentation des valeurs numériques est faite au Tableau XIX et les courbes qui en sont déduites sont tracées sur la fig. 56.

Nous constatons que, pour une teneur en eau w' donnée, l'écart $b_{1f} - b_1^c$ est en général d'autant plus important que la teneur en argile est grande. L'observation des courbes permet toutefois de remarquer que cet écart semble indépendant de la texture aux fortes teneurs en argile : échantillons FK62, FK73 et K_o .

L'ensemble de ces mélanges à comportement non sableux peut donc être partagé en deux catégories que nous appellerons mélanges argileux et mélanges argilo-sableux. Nous nous proposons de les étudier séparément pour mieux faire apparaître ensuite les similitudes qui peuvent exister dans leur comportement.

III.2.1.1. Les mélanges argileux

Nous avons testé la similitude de comportement des mélanges FK62, FK73 et K_o à l'aide des résultats présentés aux Tableaux XV (pour K_o) et XIX (pour FK62 et FK73). Nous avons cherché la corrélation qui peut exister entre les valeurs de l'écart $b_{1f} - b_1^c$ et w' . Avec les 34 couples de valeurs expérimentales obtenues à l'énergie E_o de 590 kJ/m^3 , nous avons obtenu :

$$v_1 = b_{1f} - b_1^c = 2.143 w' + 0.02$$

avec un coefficient de corrélation égal à 0.995

Or, au Chapitre II.5 (équation 19), nous avons testé la relation entre les mêmes grandeurs mais concernant la kaolinite seule. Rappelons que sur les 20 couples de valeurs expérimentales, nous avons obtenu :

$$v_1^o = b_{1f}^o - b_1^{oc} = 2.149 w' + 0.06$$

avec un coefficient de corrélation égal à 0.992

Nous constatons que dans le cas des trois mélanges, les résultats ont une meilleure corrélation tout en donnant la même valeur numérique au coefficient λ défini en II.5.

Ainsi, des teneurs en argile supérieures à 55 - 60 % confèrent aux mélanges des comportements mécaniques non significativement différents : nous retrouvons la classe des matériaux dits argileux mentionnés dans les triangles de texture et nous avons également confirmation du bien fondé de cette séparation que nous avons faite au seul vu des courbes de variations (fig. 56).

Pour ces matériaux, l'action lubrifiante de l'argile sur elle-même n'est pas perturbée par la présence de grains de nature différente. Le comportement de ces mélanges est régi par la même équation que la kaolinite seule, soit :

$$v_1^o = b_{1f} - b_1^c = \lambda \cdot (w - w^c) \quad (24)$$

avec $\lambda = 2.149$

III.2.1.2. Les mélanges argilo-sableux

Dans la gamme des teneurs en argile comprises dans l'intervalle 20 - 50 %, la quantité $b_{1f} - b_1^c$ est étroitement liée aux proportions pondérales des constituants. Le comportement de ces mélanges est lié aux propriétés de l'argile mais la quantité de sable en modifie quantitativement l'amplitude : nous retrouvons ainsi justifiée l'appellation "argilo-sableux" donnée par de nombreux Auteurs à ces matériaux.

Cette constatation suggère que la relation linéaire entre les grandeurs $b_{1f} - b_1^c$ et w' ait un coefficient de proportionnalité lié à la granulométrie du mélange de telle façon qu'aux fortes teneurs en argile elle traduise le comportement argileux pur exprimé par l'équation (24).

Nous avons testé l'équation :

$$v_1 = b_{1f} - b_1^c = \left(\lambda - \mu \cdot \frac{S}{A} \right) \cdot w' \quad (25)$$

où v_1 représente la différence $b_{1f} - b_1^c$ pour les mélanges argilo-sableux.

A l'énergie E_0 le test a porté sur les 70 couples de données expérimentales provenant des mélanges BK52, FK47, BK40, BK29, FK28, FK24, FK18 et BK16 (fig. 56), Tableau XIX.

- A l'énergie E_2 le test a porté sur les 18 couples provenant des mélanges FK73, FK31 et BK26 (fig. 57) Tableau XIX.

Avec des coefficients de corrélation égaux respectivement à 0.993 et 0.986, les valeurs du terme correcteur μ sont égales à 0.265 et 0.171. Remarquons que les mélanges BK16 et FK18 ont été retenus dans la recherche de la première corrélation, alors que leur teneur en argile les situe dans la phase transitoire mise précédemment en évidence. Nous verrons qu'ils seront également retenus pour établir les relations traduisant le comportement des mélanges contenant moins de 20 % d'argile.

Cette équation (25) présente l'intérêt de pouvoir comparer les mélanges argilo-sableux aux mélanges argileux en se plaçant à une même teneur en eau w' . En effet, pour une teneur en eau w' donnée, les équation (24) et (25) donnent :

$$v_1 = v_1^0 \cdot \left(1 - \frac{\mu}{\lambda} \cdot \frac{S}{A}\right) \quad (26)$$

par élimination de w' entre ces deux équations.

Les valeurs du rapport $\frac{\mu}{\lambda}$ (Tableau XX) dépendent de l'intensité de l'énergie.

Cette évolution entraîne les constatations suivantes :

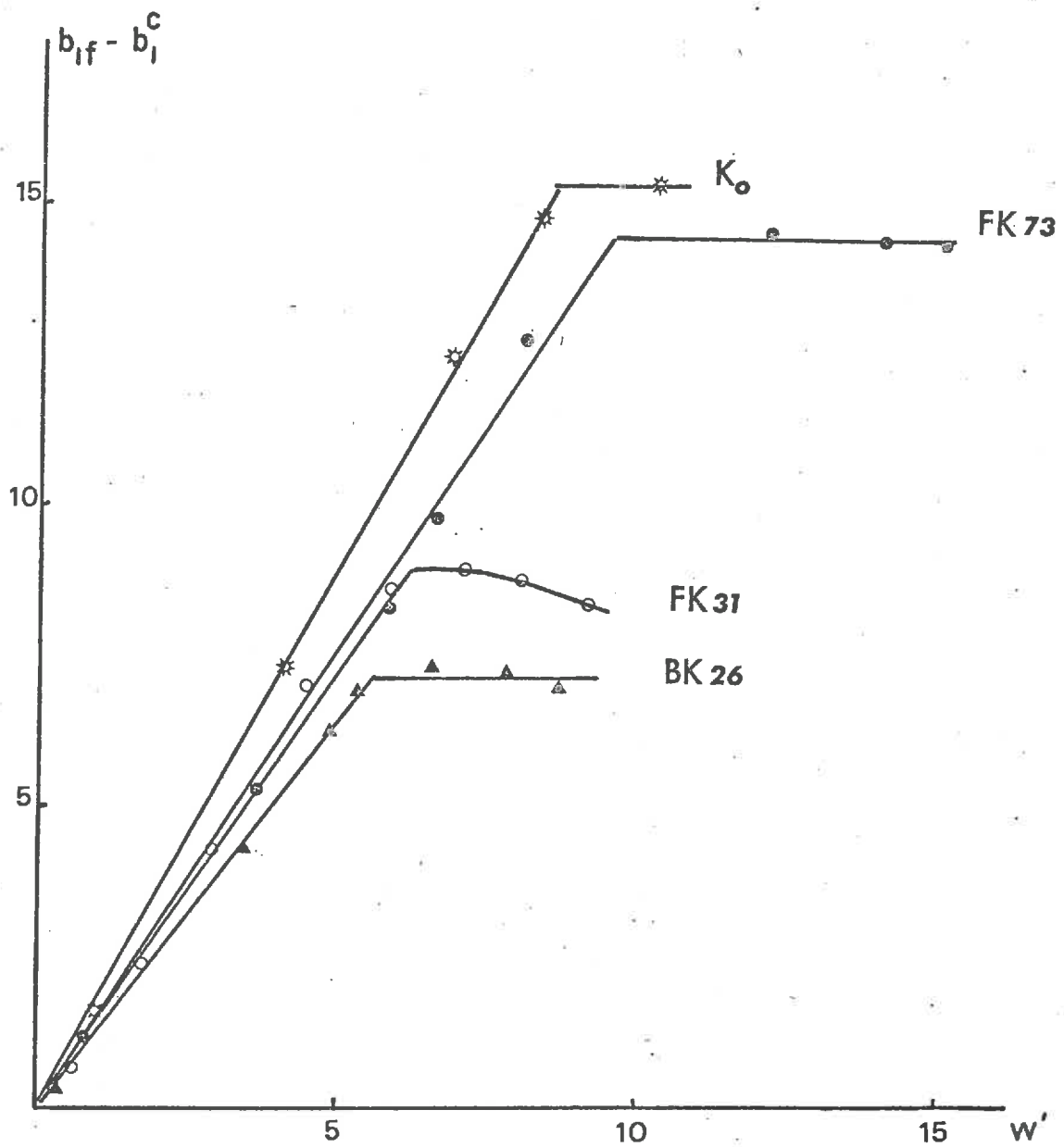
- Lorsque le rapport $\frac{S}{A}$ est suffisamment petit, la quantité $\frac{\mu}{\lambda} \cdot \frac{S}{A}$ est elle-même très petite de telle sorte que les quantités v_1 et v_1^0 ne sont pas significativement différentes. Ainsi, il est possible de considérer les mélanges argileux et argilo-sableux comme étant gérés de fait par la même loi de comportement traduite par l'équation (26).

- La valeur du rapport $\frac{\mu}{\lambda}$ diminue lorsque l'énergie de compactage augmente. Donc, pour une même approximation des résultats, qui permettrait de considérer v_1 comme égal à v_1^0 , le rapport $\frac{S}{A}$ prend des valeurs croissantes en fonction de l'énergie. Nous retrouvons ce qui était déjà apparu au Chapitre I. : les limites granulométriques de comportements mécaniques sont fonction de l'énergie utilisée.

VOLUMES FICTIFS de l'ARGILE dans
les MELANGES à COMPORTEMENT
NON SABLEUX au delà du SEUIL

Energie E_2

FIG. 57



Nous allons tenter de déduire des formules (23) et (26) une loi de comportement de ces matériaux argilo-sableux en considérant que l'état initial est l'état du matériau au seuil de sensibilité au compactage.

A l'aide des équations (23), nous obtenons :

$$\frac{b_{2f}}{b_{1f}} = \frac{S}{A} \cdot \frac{1}{a \cdot \gamma_s^s}$$

rapport indépendant de γ_{df} et de w' . Nous avons donc la suite de rapports suivants :

$$\frac{b_{2f}}{b_{1f}} = \frac{b_2^c}{b_1^c} = \frac{b_{2f} - b_2^c}{b_{1f} - b_1^c} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{S}{a \cdot A} \cdot \frac{1}{\gamma_s^s}$$

d'où
$$\frac{S}{A} = a \cdot \gamma_s^s \cdot \frac{v_2}{v_1}$$

Si nous remplaçons le rapport $\frac{S}{A}$ par cette expression dans l'équation (26), nous obtenons :

$$v_1 = v_1^o \cdot \left(1 - \frac{\mu}{\lambda} \cdot a \cdot \gamma_s^s \cdot \frac{v_2}{v_1} \right) \quad (27)$$

Or, le Tableau XX permet de constater que les valeurs numériques de la quantité sans dimension $\frac{\mu}{\lambda} \cdot a \cdot \gamma_s^s$ restent proportionnelles aux valeurs numériques de γ_1^{oc} aux différentes énergies. Rappelons que γ_1^{oc} est le volume relatif de gaz au seuil de sensibilité de l'argile K_o , il représente donc le volume susceptible d'être rempli par la phase solide de l'argile lorsqu'elle est compactée seule.

Soit p ce coefficient de proportionnalité, donc :

$$p = \gamma_1^{oc} / \frac{\mu}{\lambda} \cdot a \cdot \gamma_s^s$$

(Tableau XX).

Par ailleurs, équation (21), nous savons que :

$$\gamma_1^{oc} = \frac{v_1^o}{L_E}$$

donc nous avons : $\frac{\mu}{\lambda} \cdot a \cdot \gamma_s^s = \frac{1}{p} \cdot \frac{v_1^o}{I_L^E}$ et l'équation (27)

devient : $v_1 = v_1^o \cdot \left(1 - \frac{1}{p} \cdot \frac{v_1^o}{v_1} \cdot \frac{v_2}{I_L^E}\right)$

soit finalement : $v_2 = p \cdot I_L^E \cdot \frac{v_1}{v_1^o} \cdot \left(1 - \frac{v_1}{v_1^o}\right)$ (28)

Cette équation (28) établit une relation entre les accroissements au delà du seuil de sensibilité, des volumes relatifs dans les mélanges argilo-sableux des phases solides du sable (v_2) et de l'argile (v_1). Interviennent, comme paramètres, des caractéristiques du lubrifiant (l'argile) :

- l'accroissement de son volume relatif v_1^o lorsqu'elle est compactée seule à la même énergie et à la même teneur en eau,

- Son indice de liquidité I_L^E relatif à cette énergie de compactage.

Le coefficient p est un coefficient sans dimension dont il resterait à définir plus précisément le sens physique. Le produit $p \cdot I_L^E$ présente quelques analogies avec le coefficient U que FIES, HENIN et MONNIER (1972) ont appelé coefficient de perturbation. Nous considérons que ce produit caractérise le pouvoir lubrifiant de l'argile dans les mélanges argileux et argilo-sableux, pouvoir qui varie en fonction de l'indice de liquidité, donc en fonction de la teneur en eau du matériau.

Avant de tirer des conclusions plus approfondies, nous allons présenter les résultats expérimentaux obtenus avec les mélanges contenant la montmorillonite. Il nous sera possible alors de mieux définir les limites de validités de cette équation (28).

III.2.2. Mélanges avec la montmorillonite

Nous utilisons évidemment le même mode de représentation que précédemment en $v_1 = b_{1f} - b_1^c$ et w' (Tableau XXI et fig. 58). Mais les limites gra-

culométriques des mélanges à comportement non sableux sont différentes selon qu'il s'agit de kaolinite (environ 20 %) ou de montmorillonite (environ 6%) Chap. I.2.2.3. et I.2.2.4. C'est pourquoi sur le Tableau XXI sont également donnés les résultats concernant les mélanges FM9, FM11 et FM19. Précisons que pour assurer une meilleure lecture, les points expérimentaux n'ont pas été portés sur la fig. 58, seules ont été tracées les droites sur lesquelles ils se situent.

La comparaison de ces résultats à ceux obtenus avec les mélanges FK_i et BK_i , à même énergie (fig. 56), conduit aux constatations suivantes :

- Le comportement des mélanges FM_i , comparable à celui des mélanges FK_i et BK_i , est régi par une équation du type :

$$v_i = b_{if} - b_i^c = g(A) \cdot w' \quad (29)$$

où $g(A)$ est lié à la granulométrie du mélange.

- L'amplitude des variations des volumes relatifs fictifs des mélanges FM_i est moins importante que ceux de FK_i à une teneur en eau w' égale et pour une même teneur en argile.

- Le coefficient directeur $g(A)$ des droites obtenues est d'autant plus grand que la teneur en argile est grande, sans pour autant qu'il lui soit proportionnel, comme pour les mélanges avec de la kaolinite.

- Alors que K_0 (fig. 56) obéit à la loi générale des mélanges FK_i et BK_i , la montmorillonite M_0 a un comportement apparemment aberrant :

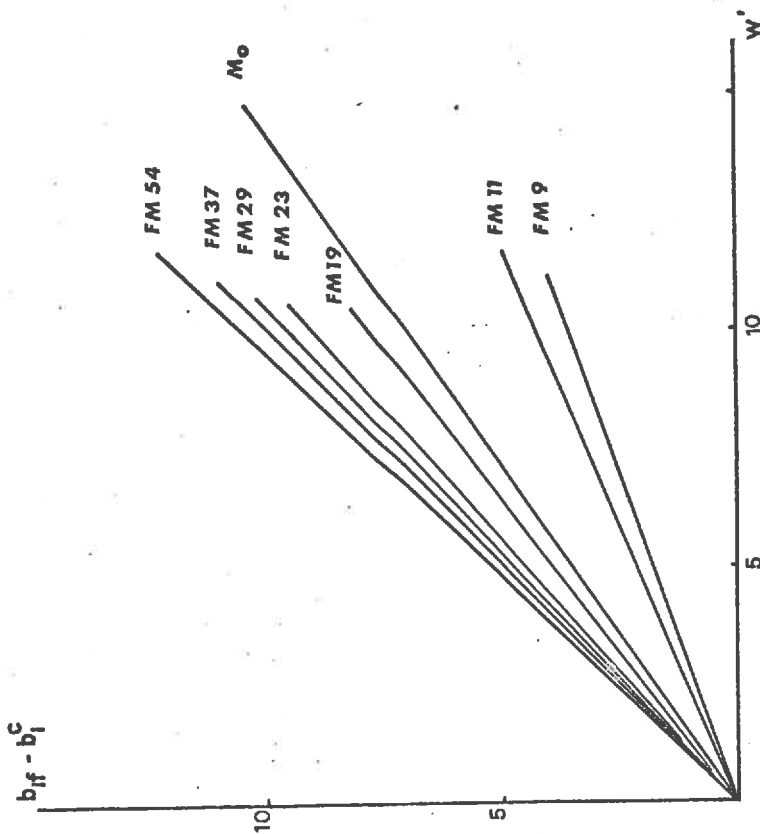
L'existence de cette singularité ne peut trouver son explication que dans la possibilité de l'insuffisance des lavages lors de la préparation au laboratoire de ce matériau. Cette argile est issue d'une bentonite industrielle et M_0 a été préparé après un renouvellement de stock de bentonite, ce qui a pu conduire à une argile légèrement différente de celle des mélanges FM_i et BM_i .

Nous avons obtenu un matériau M_0 dont le comportement au seuil de sensibilité ne se différencie pas fondamentalement de ceux des mélanges FM_i

VOLUMES FICTIFS de l'ARGILE dans
 les MELANGES à COMPORTEMENT
 NON SABLEUX au delà du SEUIL

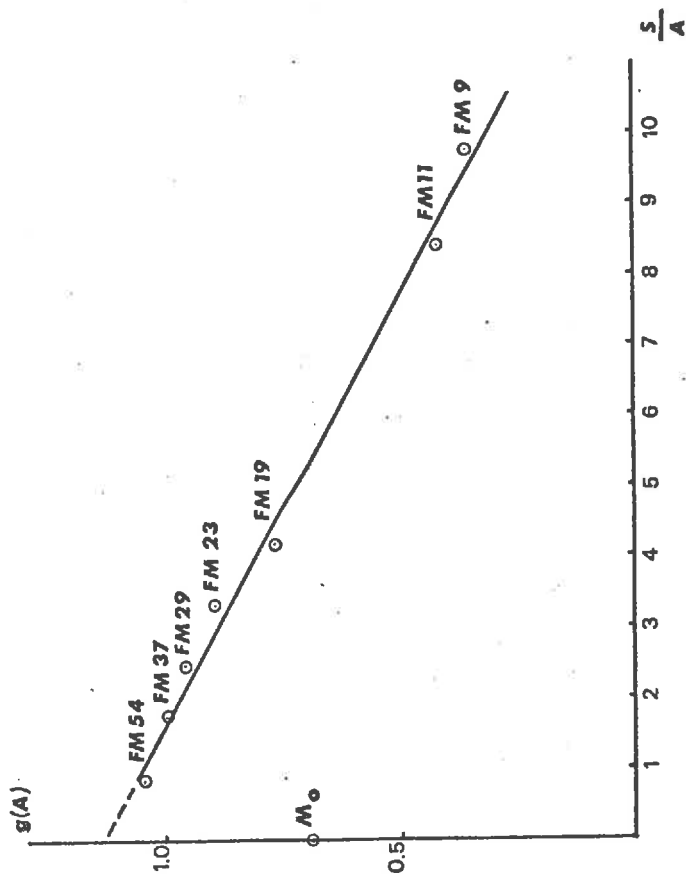
Energie E_0

FIG. 58



VARIATIONS du COEFFICIENT
 $g(A)$ pour les mélanges
 FM_i

FIG. 59



et BM_1 (Chap. I). Cette argile nous a permis de montrer, au Chap. II, qu'il existe des matériaux non sensibles au compactage comme le calcul en établissait la possibilité théorique. Mais au delà du seuil de sensibilité, il nous est impossible de considérer M_0 comme étant de la même famille que les mélanges FM_1 : supposer le contraire revient à admettre qu'il y a un effet texture important avec la montmorillonite à une teneur en argile supérieure à 54 % (fig. 58) ce qui est peu vraisemblable.

Ne pouvant alors conduire les calculs comme dans le cas des mélanges FK_1 et BK_1 (équations 25 à 29), nous avons considéré les valeurs du coefficient directeur $g(A)$ en fonction du rapport S/A (fig. 59 et Tableau XXII) nous inspirant des résultats obtenus avec les mélanges contenant la kaolinite. Grâce aux 7 couples de valeurs disponibles, autres que $g(100) = 0.698$ de la montmorillonite M_0 , nous obtenons une relation linéaire dont l'équation est :

$$g(A) = 1.140 - 0.082 \frac{S}{A} \quad (30)$$

En comparant entre elles les équations (25) et (30), nous obtenons :

$$\text{soit} \quad \lambda = 1.140 \quad \mu = 0.082$$

$$\frac{\mu}{\lambda} = 0.072 \quad \text{et} \quad \frac{\mu}{\lambda} \cdot a \cdot \gamma_s^s = 0.152$$

(Tableau XX) alors qu'avec la kaolinite, à la même énergie E_0 , nous avons $\frac{\mu}{\lambda} \cdot a \cdot \gamma_s^s = 0.229$. Ainsi, pour une même valeur du rapport S/A , les mélanges contenant de la montmorillonite sont plus proches du comportement argileux que ne le sont les mélanges contenant la kaolinite. C'est ce qui explique le déplacement vers les faibles teneurs en argile de la limite du comportement non sableux pour ces matériaux.

III.2.3. Conclusion

La référence commune à tous les échantillons étant leur état de compacité au seuil de sensibilité au compactage, la loi traduite par l'expression (28) est vérifiée quel que soit le type d'argile bien que la limite inférieure de validité de cette loi en dépende.

Cette loi n'est pas une loi simple comparable aux lois théoriques qui nous servent de référence. Elle n'est pas sans rappeler l'expression de ce

que FIES, HENIN et MONNIER (1972) ont appelé le volume relatif dû à l'interaction des matériaux. Cette expression a été établie par ces Auteurs à l'aide de données expérimentales concernant les mélanges de deux populations de sphères de tailles différentes.

Cependant, cette loi traduit le fait que l'augmentation du volume relatif v_2 de la phase solide au delà du seuil de sensibilité est fonction :

- De la "porosité matricielle" $(1 - \frac{v_1}{v_0})$ de la phase argile saturée à w^a % d'eau, c'est-à-dire de ce qui peut être considérée comme la place disponible pour loger les grains de sable. Cette grandeur est liée aux propriétés gonflantes de l'argile,

- De la quantité de lubrifiant disponible dans le mélange au moment du compactage. Cette grandeur est liée à la teneur en argile,

- Des caractéristiques lubrifiantes de cette argile. Ces grandeurs sont liées aux indices fondamentaux de Liquidité, Plasticité.

L'équation (28) tient compte de l'antagonisme qui peut exister entre ces paramètres : une argile peu gonflante mais peu lubrifiante peut donner les mêmes conséquences sur les mélanges qu'une argile très gonflante mais très lubrifiante.

Un résultat demeure troublant et inexplicé dans le cadre de ce travail nous ne pouvons que constater (Tableau XX) la constance du rapport p aux erreurs expérimentales près due, sans doute, au seul paramètre commun à tous les résultats présentés, la charge ionique (Ca^{++}) des deux argiles utilisées qui leur est donnée au moment de leur préparation. Ne disposant pas d'autres données, nous ne pouvons qu'émettre cette supposition qui demanderait confirmation. Vraisemblablement, nous aurions alors la possibilité de mieux définir le sens physique et mécanique de ce coefficient p .

III.3 LES MELANGES A COMPORTEMENT SABLEUX

Les résultats généraux du paragraphe III.1 ont montré que la variation de la compacité fictive $b_{1f} + b_{2f}$ des mélanges à comportement sableux n'est pas linéaire en fonction de la teneur en eau rapportée à l'argile et que ce comportement est bien typé pour les mélanges ayant moins de 12 % de kaolinite environ.

Etant donné que les faibles teneurs en argile de ces mélanges leur confèrent de faibles volumes relatifs d'argile, l'étude des variations de $b_{1f} - b_1^c$ risquait d'être entachée d'une incertitude relative importante sur les mesures et pouvait conduire à des conclusions erronées. Aussi avons-nous préféré comparer entre elles les variations des volumes relatifs b_{2f} de la fraction sable, représentées sur les fig. 60 à 63 en fonction de $\frac{w'}{A}$ (Tableau XXIII). Ces figures permettent les constatations suivantes :

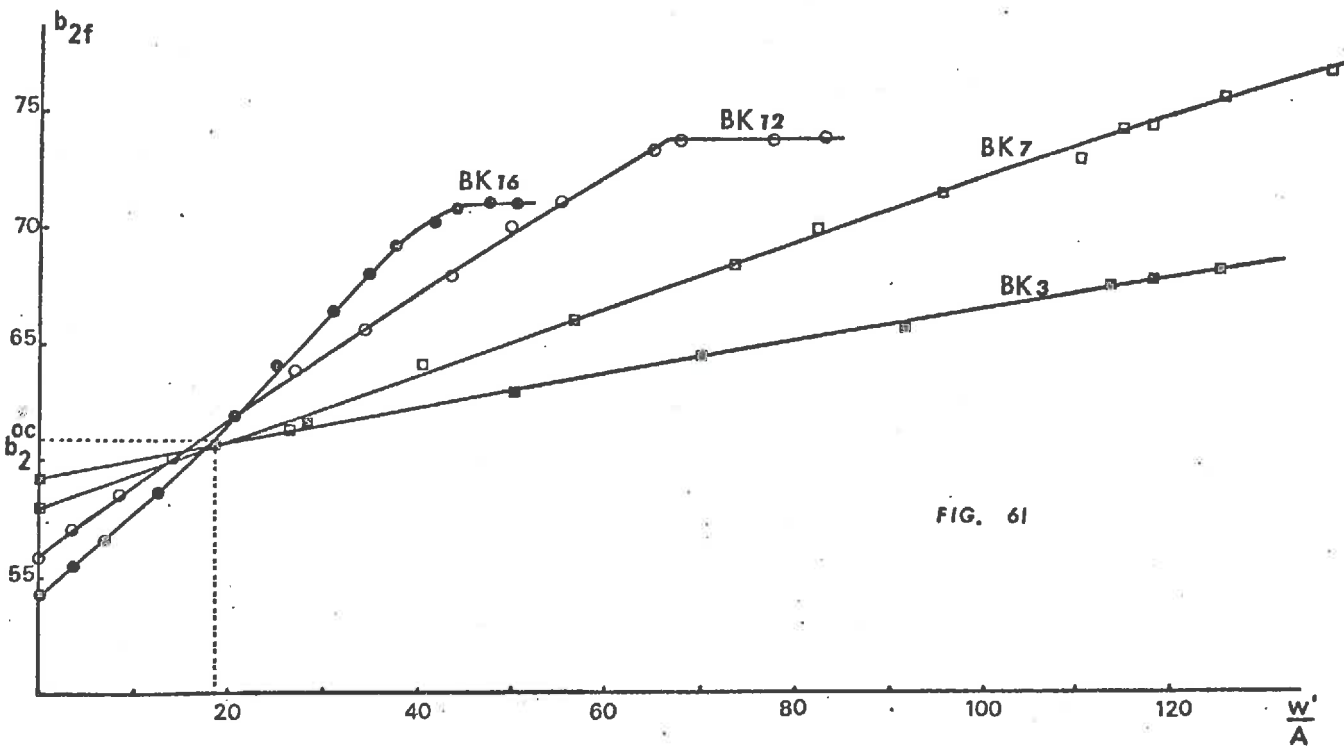
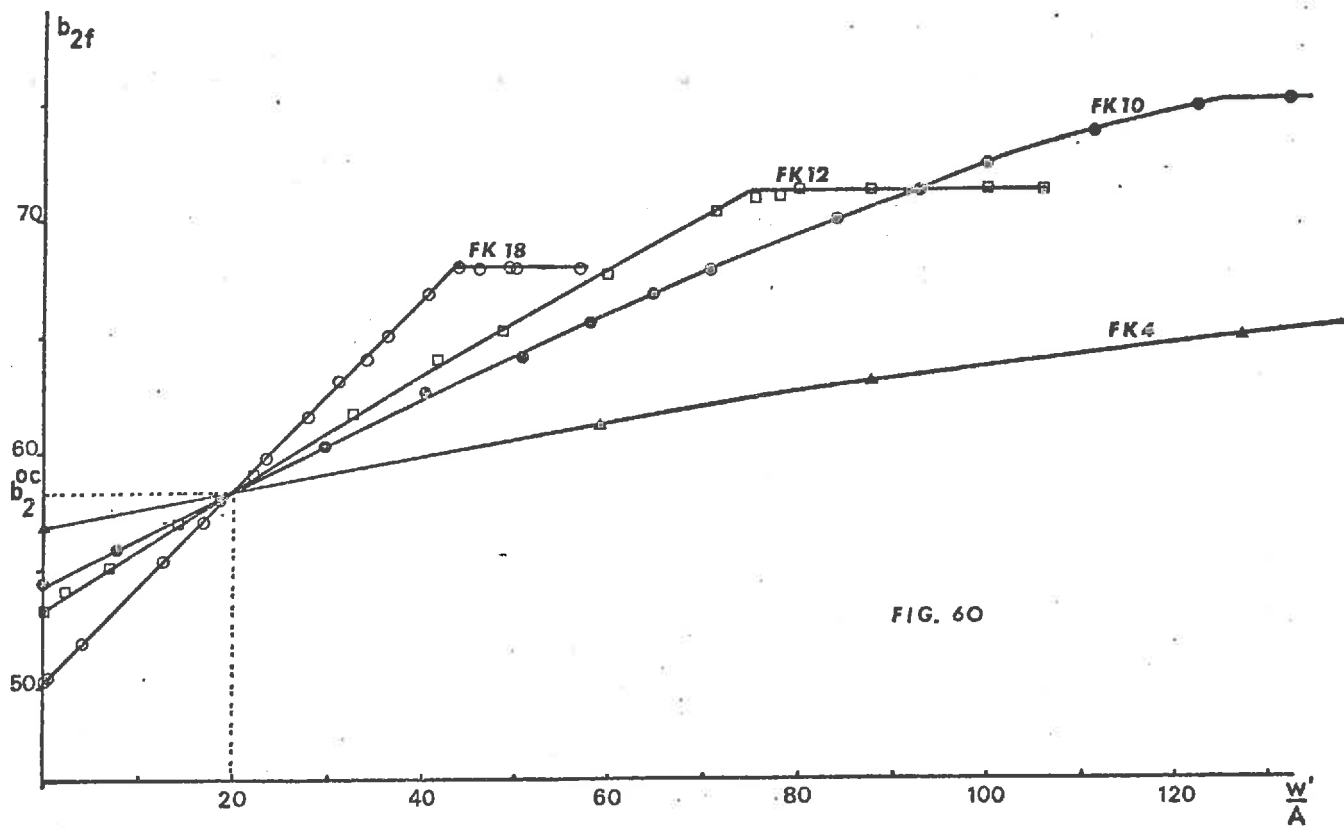
- 1) A des valeurs relativement grandes de w' / A le volume de sable des échantillons à très faibles teneurs en argile semble tendre asymptotiquement vers une limite paramétrée par A .
- 2) Le volume b_{2f} des autres échantillons présente un palier au delà d'une teneur en eau déterminée.
- 3) A chaque énergie de compactage, toutes les courbes d'une même famille ont un point commun dont l'ordonnée a pour valeur b_2^{oc} volume relatif du sable lorsqu'il est compacté seul. Ainsi, il existe une teneur en eau particulière pour laquelle la Loi de Remplissage est rigoureusement suivie par tous les mélanges à comportement sableux. Il apparaît que lorsque la "composante" gonflement est supprimée, l'action lubrifiante de l'argile, qui croît avec la teneur en eau disponible, devient telle qu'à un moment donné, les particules du squelette sableux sont à nouveau en contact entre elles, l'argile ayant glissé dans l'espace poral. Si la teneur en eau continue d'augmenter, l'argile devient de plus en plus efficace dans sa lubrification, donnant aux particules sableuses un arrangement plus serré que lorsqu'elles sont compactées seules.

Ces premières constatations étant faites, nous avons voulu établir une corrélation entre deux grandeurs déduites des résultats expérimentaux qui pourrait traduire un comportement mécanique plausible. Le choix de ces grandeurs s'est appuyé sur les considérations suivantes :

- A l'instar des mélanges à comportement non sableux, nous avons choisi, comme référence, l'état de compacité et d'humidité au seuil de sensibilité au compactage,

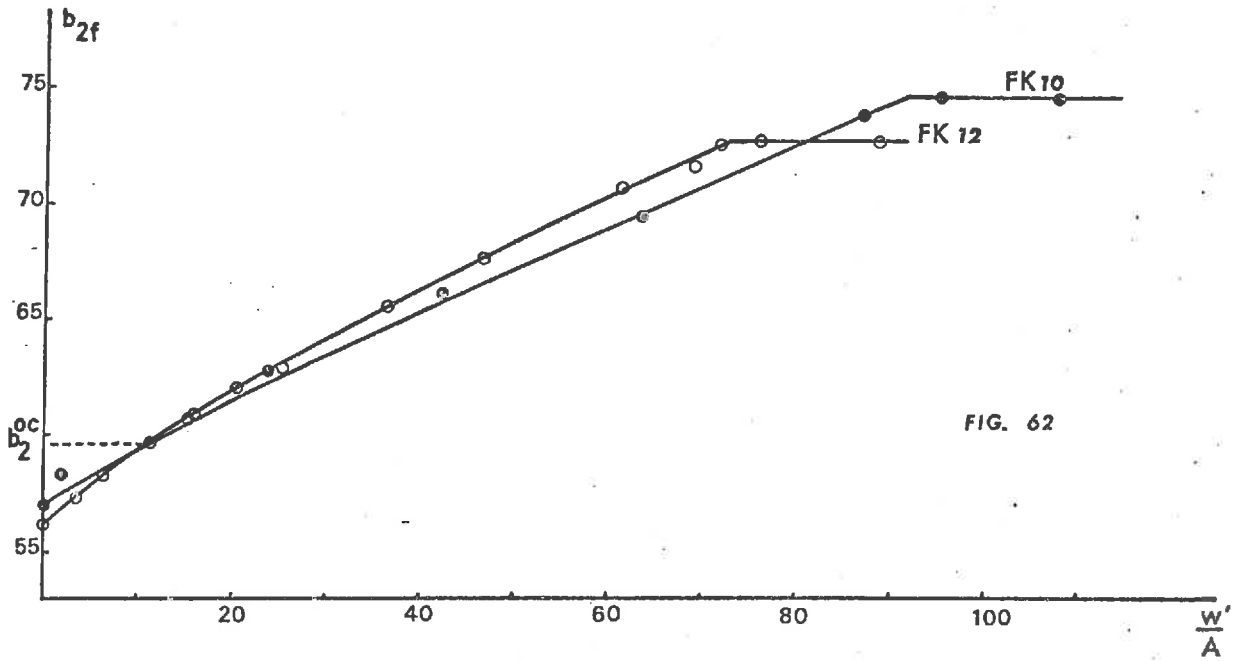
VOLUMES FICTIFS du SABLE dans les
MELANGES à COMPORTEMENT SABLEUX

Energie E_0

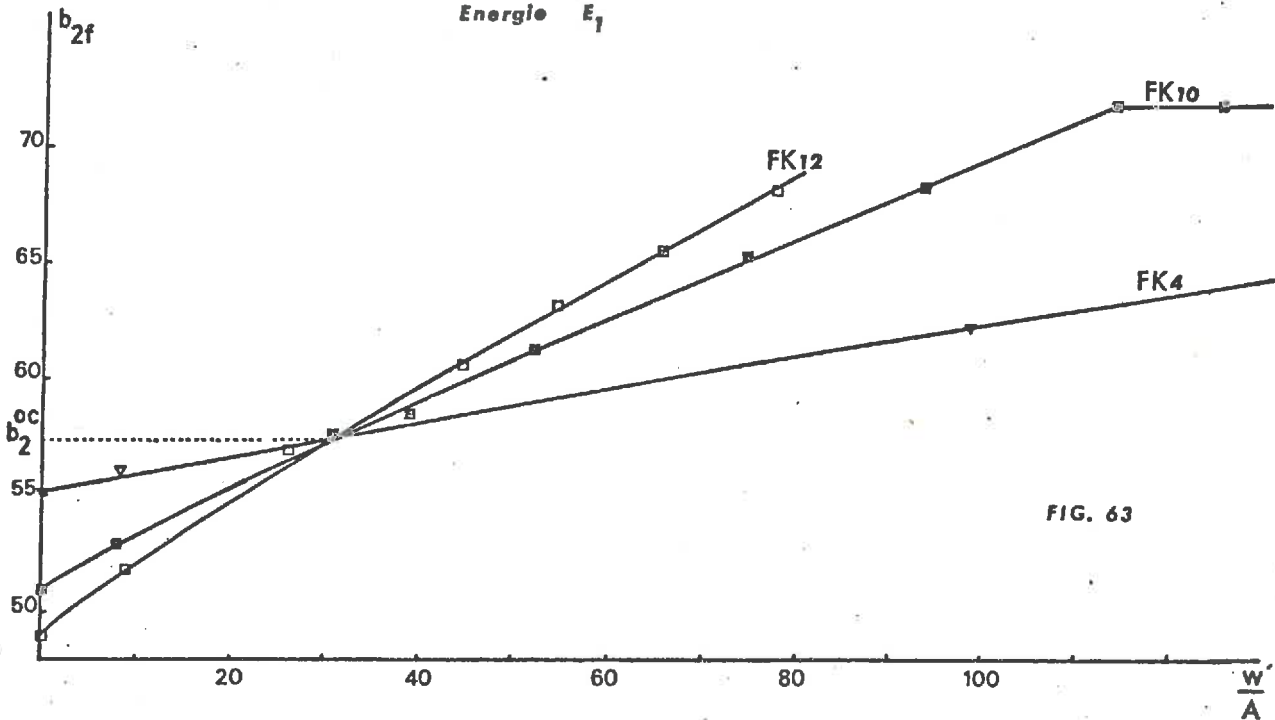


VOLUMES FICTIFS du SABLE dans les
MELANGES à COMPORTEMENT SABLEUX

Energie E_2



Energie E_1



- Nous avons voulu dissocier entre elles les actions de l'eau et de l'argile saturée à w^a % d'eau sur le sable.

C'est pourquoi, à l'aide des données expérimentales, nous avons calculé le volume relatif de sable par gramme d'argile en fonction de la quantité d'eau w' / A . Ce volume est exprimé par le rapport :

$$\frac{b_{2f}^a - b_2^c}{A}$$

qui est, à un facteur près (a), le volume relatif de sable par unité de volume d'argile saturée.

Nous avons porté sur les figures 64 et 65, pour le compactage à l'énergie E_0 et sur la figure 66 pour les énergies E_1 et E_2 , les variations de $u = \frac{b_{2f}^a - b_2^c}{A}$ en fonction de $t = w' / A$. Il apparaît que les mélanges ayant même support sableux ont des points expérimentaux sur une même courbe, mais que les valeurs maximales de u sont tributaires de la granulométrie du mélange. Ce résultat permet de constater que pour une quantité d'eau donnée t l'argile saturée avec w^a % d'eau a toujours la même action lubrifiante, c'est-à-dire qu'un même volume d'argile permet "d'introduire" le même volume de sable quelle que soit la proportion des constituants dans le mélange.

L'allure parabolique bien marquée de ces courbes (fig. 64, 65 et 66) nous a conduit à tester une corrélation de la forme :

$$t = c_1 \cdot u + c_2 \cdot u^2 \quad (31)$$

expression qui a l'avantage d'expliquer de façon plausible le comportement mécanique des mélanges au cours de leur compactage. En effet, l'équation différentielle de cette équation est de la forme :

$$dt = c_1 \cdot du + 2 \cdot c_2 \cdot u \cdot du$$

qui peut exprimer que l'apport d'un volume d'eau dt disponible par l'argile entraîne non seulement une variation proportionnelle du volume relatif de sable mais encore un réarrangement du sable précédemment "introduit" dans un volume donné.

Nous avons testé l'équation 31 sur les résultats obtenus à l'énergie E_0 .

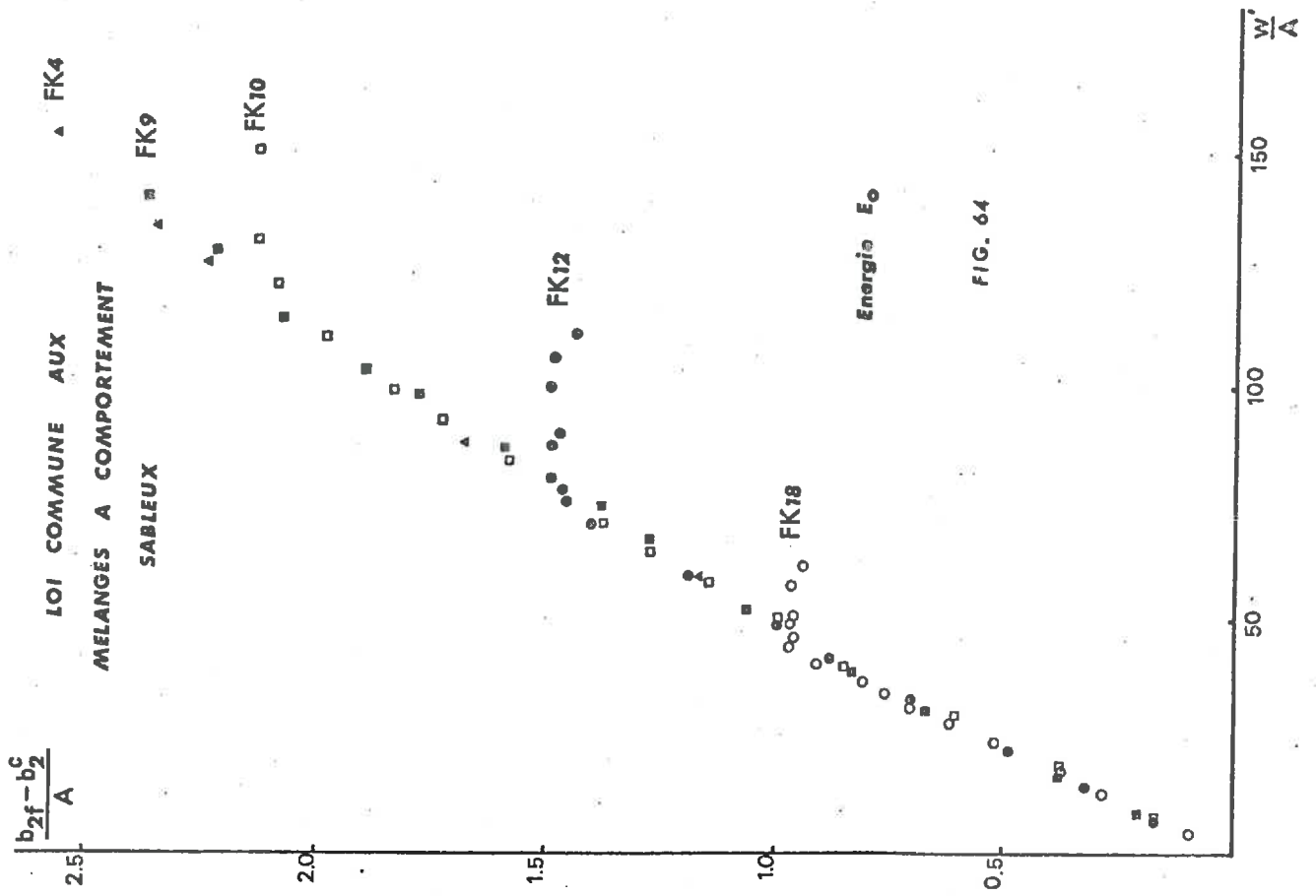


FIG. 64

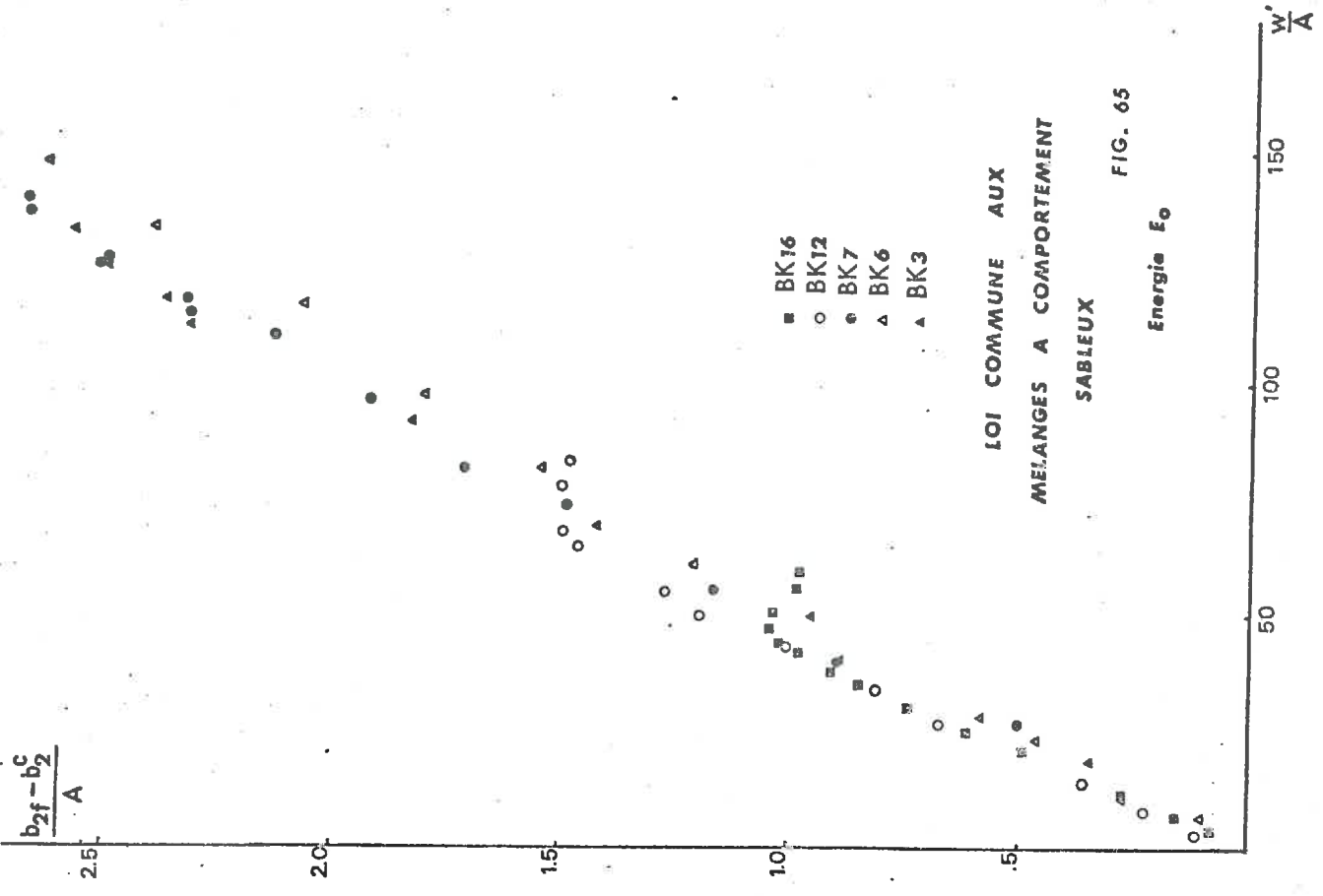


FIG. 65

LOI COMMUNE AUX
MELANGES A COMPORTEMENT
SABLEUX

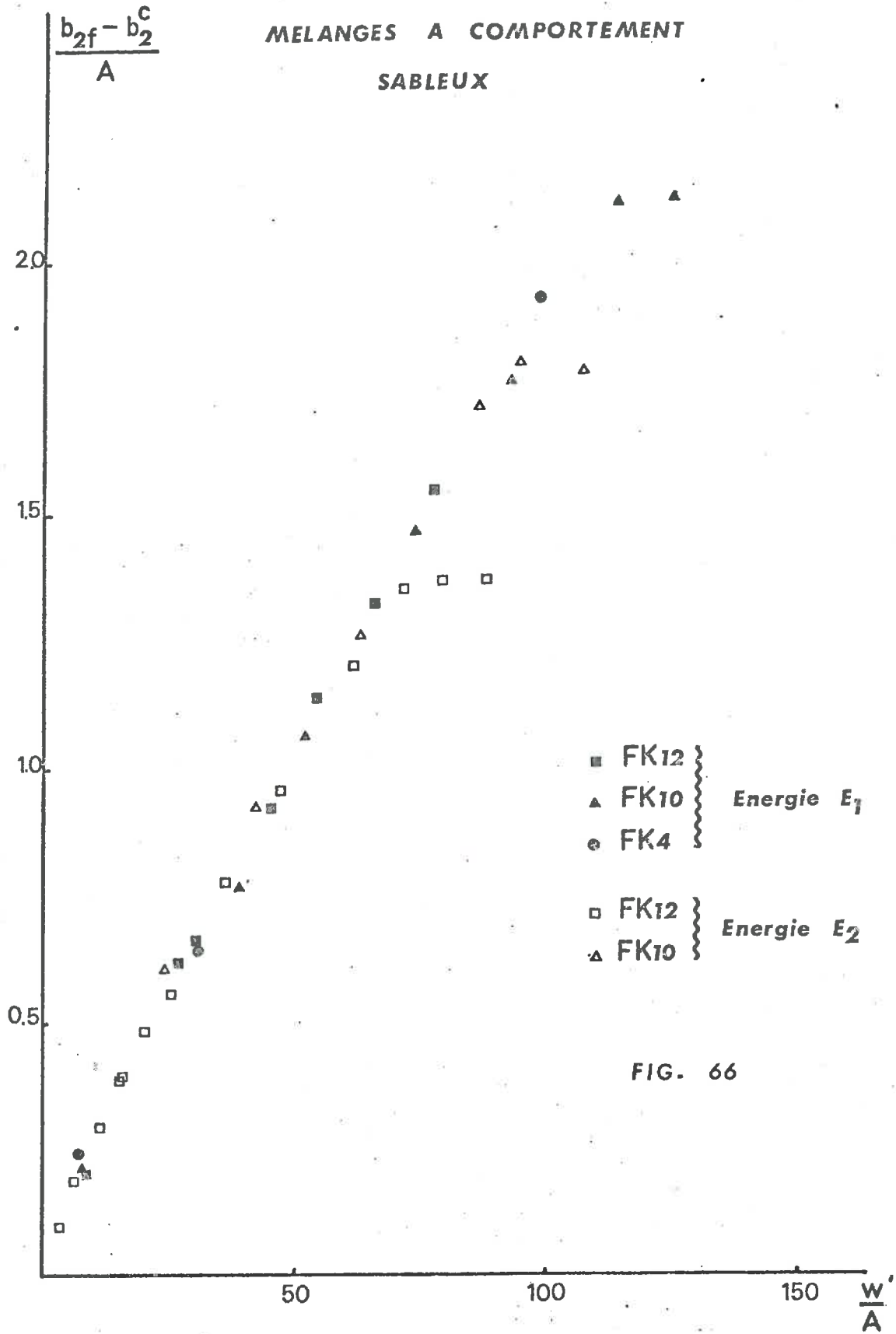


FIG. 66

Avec 66 et 68 couples de valeurs expérimentales pour les familles FK_i et BK_i respectivement, nous avons obtenu :

$$0.154 t = 6.580 u + u^2 \quad \text{avec } FK_i$$

(31 - 1)

$$0.206 t = 8.300 u + u^2 \quad \text{avec } BK_i$$

Les coefficients de corrélation respectifs étant de 0.999 et 0.998.

Ce premier résultat étant acquis, nous avons testé l'équation (31) sur les résultats des mélanges FK_i compactés aux énergies E_1 et E_2 (Tableau XXIV). Avec 21 et 18 couples de valeurs expérimentales, les deux coefficients de corrélation obtenus sont de même ordre que précédemment et confirment la valeur du coefficient 0.154 pour la même valeur du coefficient de u (6.580). Cette équation semble donc indépendante de l'énergie développée, dans la gamme utilisée : elle est l'expression intrinsèque du comportement des mélanges à faibles teneurs en argile contenant un type d'argile et un type de sable bien déterminés.

Les corrélations précédentes ont été établies en ne prenant pas en compte les résultats expérimentaux définissant les paliers atteints par chaque mélange. D'autre part, il a été nécessaire d'éliminer également les résultats obtenus pour des valeurs de $\frac{w'}{A}$ supérieures ou égales à 300 % environ : cas des mélanges FK_4 et BK_3 : les conditions de compactage de ces mélanges très sableux à de telles teneurs en eau ramenées au taux d'argile ôtent toute signification aux hypothèses formulées. Cependant, aux teneurs en eau inférieures à 300 %, la valeur du coefficient de corrélation permet de considérer comme très satisfaisantes les hypothèses qui ont conduit à la formulation de l'équation (31) :

L'accroissement, par rapport au seuil de sensibilité au compactage, du volume relatif de sable par unité de volume d'argile est dû à l'action mécanique de la quantité d'eau $\frac{w'}{A}$. Cette quantité d'eau rend l'argile de plus en plus lubrifiante par diminution de son angle de frottement interne (Chap. I).

Dans le choix des échantillons testés pour établir cette équation (31) sont inclus les mélanges BK_{16} et FK_{18} qui avaient été précédemment retenus au cours de l'étude des échantillons à comportement non sableux. Ils font partie de la plage des teneurs en argile que nous avons considérée comme

définissant une zone de transition. Ainsi, l'évolution du comportement mécanique des échantillons se fait de façon continue lorsque la teneur en argile varie. Cependant, au cours de cette variation, il est possible de classer les matériaux en différents types, la zone de transition étant elle-même une classe particulière, que nous appellerons sablo-argileuse.

III.4 LE TRIANGLE DE TEXTURE

L'étude réalisée au premier chapitre au sujet du seuil de sensibilité au compactage a montré que les mélanges ont deux comportements bien distincts selon leur granulométrie. Nous avons été amenés à définir les mélanges à comportement sableux et les mélanges à comportement non sableux, la limite granulométrique entre ces deux comportements étant fonction de la nature de l'argile principalement et du niveau d'énergie (16 % avec la kaolinite à l'énergie E_0). Le Chapitre III.2 a apporté quelques précisions sur les mélanges à comportement non sableux en montrant qu'au delà de 60 % d'argile environ, le comportement des mélanges est quantitativement identique à celui de l'argile seule, séparant par cette limite les mélanges argileux "vrais" des mélanges argilo-sableux compris entre 16 et 60 %.

Dans le même esprit, nous avons estimé nécessaire de vérifier la continuité du comportement des mélanges en cherchant les conditions granulométriques qui rendent peu différentes l'une de l'autre les corrélations traduites par les équations (25) et (31), dans la zone sablo-argileuse.

L'équation (25) exprime une relation linéaire entre les variations de $b_{1f} - b_1^c$ et w' pour les mélanges à comportement non sableux. De l'équation (31) il est possible d'exprimer également une relation entre $b_{1f} - b_1^c$ et w' pour les mélanges à comportement sableux, mais celle-ci est du second degré. Aussi, nous considérerons ces deux relations comme peu différentes lorsque, au voisinage du seuil de sensibilité, les coefficients directeurs de leur courbe représentative sont égaux. Nous nous proposons donc de calculer ces deux coefficients directeurs et de chercher les valeurs de la teneur en argile qui les rendent peu différents l'un de l'autre.

La dérivée de l'équation (25) est :

$$\frac{d}{dw'} (b_{1f} - b_1^c) = \lambda - \mu \cdot \frac{S}{A} \quad (32)$$

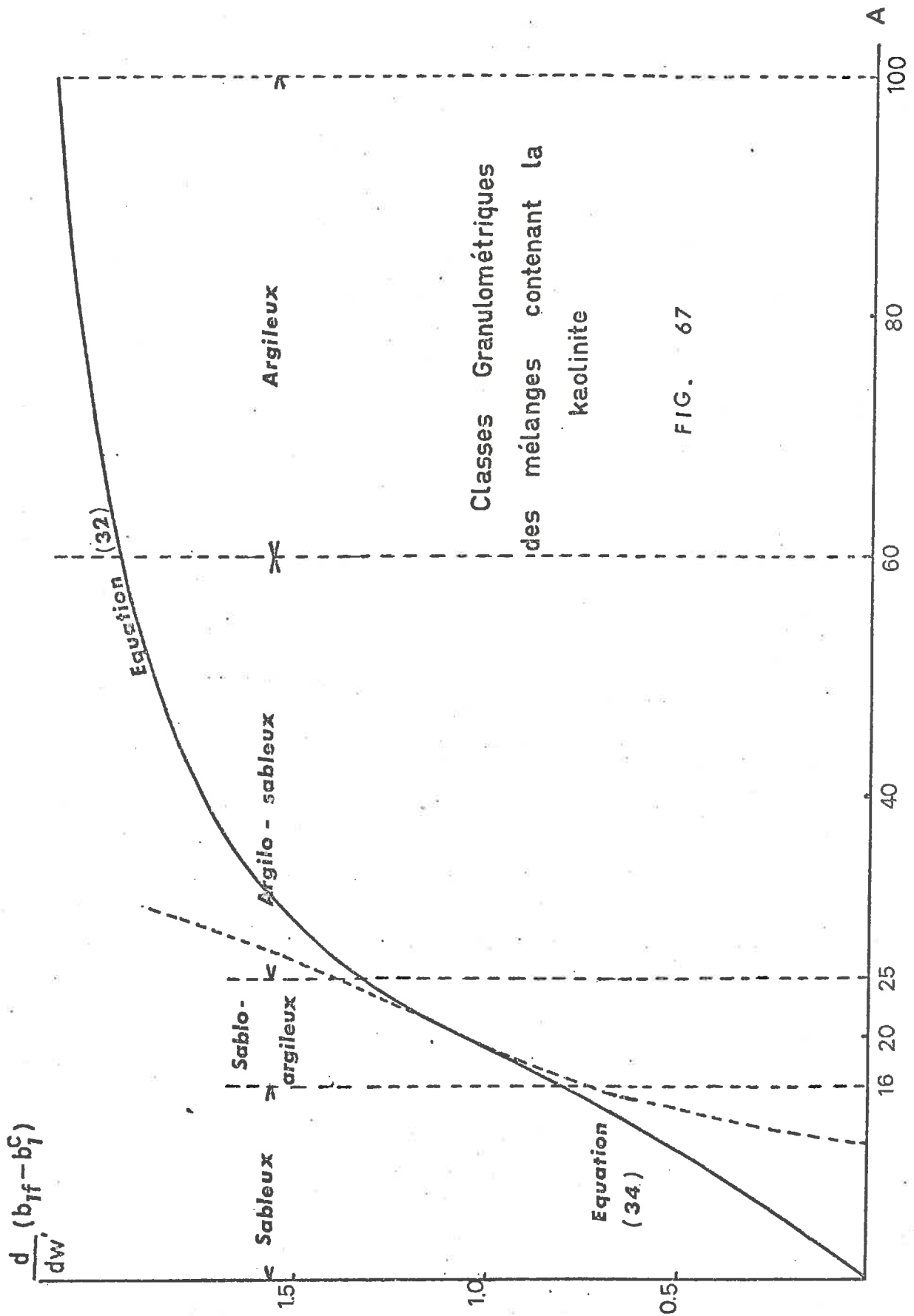


FIG. 67

Par ailleurs (équations 23) l'expression de $b_{1f} - b_1^c$ en fonction de $b_{2f} - b_2^c$ s'écrit :

$$\begin{aligned} b_{1f} - b_1^c &= \gamma_s \cdot a \cdot \frac{A}{S} \cdot (b_{2f} - b_2^c) \quad \text{ou} \\ &= \gamma_s \cdot a \cdot \frac{A^2}{S} \cdot u \end{aligned}$$

dont la dérivée par rapport à w' a pour expression :

$$\frac{d}{dw'} (b_{1f} - b_1^c) = \gamma_s \cdot a \cdot \frac{A^2}{S} \cdot \frac{du}{dw'} \quad (33)$$

Pour les mélanges à comportement sableux, l'équation (31) donne :

$$\frac{dw'}{du} = A \cdot (c_1 + 2c_2 \cdot u)$$

qui à droite du seuil de sensibilité, pour lequel $u = 0$, devient $\frac{dw'}{du} = A \cdot c_1$ donc en ce point l'équation (33) s'écrit :

$$\frac{d}{dw'} (b_{1f} - b_1^c) = \gamma_s \cdot a \cdot \frac{A}{S} \cdot \frac{1}{c_1} \quad (34)$$

Les comportements non sableux et sableux sont peu différents selon nos hypothèses de travail lorsque les équations (32) et (34) sont identiques. Cette identité est obtenue pour $A = 20\%$ mais le tableau ci-dessous permet de constater que les valeurs des coefficients directeurs sont peu différentes dans un intervalle dont les limites sont approximativement 16 et 25 % de kaolinite (fig. 67) :

A	12	14	16	18	20	22	24	26
(32)	0.147	0.471	0.714	0.903	<u>1.054</u>	1.178	1.281	1.368
(34)	0.575	0.686	0.803	0.925	<u>1.054</u>	1.189	1.331	1.481

Ainsi, le comportement mécanique des échantillons au cours de leur compactage permet de définir quatre classes granulométriques en bonne concordance avec les classes des triangles de texture habituels. Il vient :

Teneurs en argile	Type textural	Comportement mécanique
0 % - 16 %	sableux	Equation 31
16 % - 25 %	sablo-argileux	Equations 25 et 31
25 % - 60 %	argilo-sableux	Equation 25
60 % - 100 %	argileux	Equation 24

Nous avons observé que la limite entre les matériaux sableux et les autres matériaux est variable en fonction de l'énergie. Comme l'équation (31) est la même aux différentes énergies et que seule l'équation (25) a des coefficients différents lorsque l'énergie change, les limites entre les quatre classes granulométriques sont elles aussi liées à l'énergie. Ce déplacement des limites se faisant dans une fourchette relativement étroite dans les gammes usuelles d'énergies, le triangle de texture est une approximation suffisante permettant de lier une texture donnée à un type de comportement mécanique caractéristique.

CONCLUSION

=====

L'ensemble des résultats présentés dans ce mémoire est la conséquence d'une simple question : comment varie la compacité d'un matériau lorsqu'il est compacté à des teneurs en eau différentes de celle de l'Optimum Proctor ?

Cette question n'est pas qu'une simple curiosité intellectuelle que de nombreux Auteurs ont assouvie en partie, elle correspond également à une préoccupation constante des praticiens de l'Agriculture, car le sol est à une teneur en eau dont l'exploitant n'est pas maître à chaque période correspondant à un type d'intervention donnée : labour, herbage, roulage, etc ... Il est évident que pour la même opération, avec les mêmes réglages de l'outil, les résultats ne seront pas les mêmes pour deux états physiques différents. Il fallait donc tenter de mieux connaître les relations entre la compacité, la teneur en eau et l'énergie développée dans les milieux non saturés. C'est ainsi que nous avons cherché à obtenir des courbes complètes de variations de la compacité qui ont révélé, dès le début, l'existence et l'importance du seuil de sensibilité au compactage dont l'étude est l'objet du premier chapitre.

Jusqu'à présent, ce seuil n'avait jamais été l'objet des préoccupations des praticiens du Génie Civil dont le souci principal est de déterminer et le Maximum de compacité et la teneur en eau correspondante. Or, la mise en évidence de l'existence de ce seuil et l'étude des propriétés du matériau en ce point apportent des éléments nouveaux dans la compréhension du comportement des sols au compactage. Il en résulte, en plus, la possibilité de formuler des hypothèses plausibles expliquant l'existence du Maximum de compacité.

Nous avons montré que ce seuil hydrique est la limite de plasticité de la phase argile au niveau d'énergie de l'essai : ainsi, se trouve généralisée la notion de Limite de Plasticité d'Atterberg, devenue une fonction

de l'énergie et levant toute ambiguïté sur les notions de comportement plastique et d'état plastique.

L'existence du seuil de sensibilité a été montrée et étudiée sur des mélanges de sable et d'argile. Nous avons également montré, mais de façon succincte, que cette notion de seuil de sensibilité n'était pas remise en cause avec des matériaux de provenances naturelles. Mais la seule prise en compte de la teneur en argile n'a jamais suffi pour prévoir les différentes caractéristiques de la courbe de compactage d'un matériau. Nous avons montré de quelle façon la nature de l'argile intervient dans le comportement des matériaux. Nous avons entendu, par "nature de l'argile", sa constitution minéralogique bien évidemment, mais aussi sa charge ionique et son pouvoir de gonflement, ce qui nous a amenés à définir un certain nombre de paramètres pour caractériser cette nature d'argile, tels les Indices de Plasticité, de Liquidité et de Consistance relatifs à l'énergie de l'essai.

Il est apparu que la nature de l'argile peut également être modifiée par le taux de matières organiques. Nous touchons alors l'une des spécificités des préoccupations de la Recherche en Mécanique des Sols appliquée à l'Agriculture. FAURE et GUERIF (publication à paraître) ont montré que la présence de matières organiques augmente la teneur en eau de ce seuil, augmente également la teneur en eau du Maximum de compacité mais abaisse la valeur de ce maximum. Les corrélations obtenues sont très étroites, elles tiennent compte non seulement du taux de matière organique par rapport à la quantité d'argile, mais également de la teneur en argile elle-même. Ces corrélations rejettent cependant une part des hypothèses formulées par FAURE (1971) sur le mécanisme de la lubrification sans en remettre en cause le principe. Ces résultats sont une approche quantitative qui permet de mieux prévoir l'action mécanique des matières organiques et le rôle protecteur qu'elles assument sur les terrains agricoles vis à vis du tassement. Il n'en demeure pas moins qu'il reste à trouver et justifier un schéma théorique satisfaisant de l'action des matières organiques : en effet, les corrélations obtenues ne permettent pas de séparer les actions de la matière organique dite libre (débris végétaux) de celles de la matière organique dite liée (fixée aux particules d'argile).

Les résultats obtenus et présentés dans ce mémoire concernent également la physique du sol proprement dite, c'est-à-dire l'étude des propriétés physiques dont la compacité ne rend qu'imparfaitement compte. Les lois théori-

ques de FIES (1971), encadrant ses propres résultats expérimentaux, apparaissent comme des limites inférieures et supérieures du comportement des matériaux soumis au compactage. Nos résultats expérimentaux, s'intercalant également entre ces lois théoriques, confirment la nécessité de considérer qu'il existe deux comportements bien typés, de part et d'autre d'une teneur en argile limite, fonction de la valeur de l'énergie.

Une analyse plus fine des résultats du compactage a montré que si le seuil hydrique de sensibilité est une caractéristique du matériau à une énergie donnée, le niveau de compacité atteint à ce seuil dépend de la préparation du matériau, c'est-à-dire de la taille initiale des agrégats. S'inspirant de nos résultats, BODAERT (1976) et GRIMALDI (1977), dans le cadre de leurs travaux effectués sur un matériau argileux d'une part et limoneux d'autre part, ont montré que la compacité au seuil est d'autant plus élevée que les agrégats ont initialement une "granulométrie" étalée. Ces résultats rejoignent ce qui a été montré par de nombreux auteurs sur l'arrangement, dans les mélanges binaires, de populations isodimensionnelles de grains.

Par contre, BODAERT et GRIMALDI ont chacun constaté que la distribution initiale des tailles d'agrégats a une influence de plus en plus faible dans la partie ascendante de la courbe de compactage, pour disparaître totalement au maximum de compacité. Ce phénomène corrobore nos hypothèses de lubrification des grains du squelette (sable et limons) par l'argile.

Sur le plan agricole, ces résultats sont importants car ils précisent et justifient la nécessité ressentie par les praticiens de "bien préparer" l'état structural de leur sol, état dont le rôle est primordial pour la plante.

Des essais de compactage par application d'une pression constante, et non d'une énergie de chocs, ont donné l'occasion de montrer un des défauts de la méthode Proctor. D'un point de vue théorique, il s'avère en effet que le maximum de compacité doit se situer sur la courbe de saturation. Il s'en suit qu'aux teneurs en eau supérieures à celle de ce maximum, les compacités obtenues au cours du compactage, sans drainage possible comme c'est le cas du Proctor, doivent correspondre à des états de saturation du matériau. C'est ce qui nous a permis de conclure que le maximum de compacité correspond à la limite de liquidité du matériau relative à l'énergie mise en jeu.

Ainsi, se trouvent visibles sur une même courbe de compactage la limite de plasticité (seuil de sensibilité) et la limite de liquidité (maximum à l'intersection avec la courbe de saturation) et ces deux limites sont obtenues avec le même niveau d'énergie, contrairement aux Limites normalisées d'Atterberg. Ces Limites normalisées ne sont donc plus seulement des tests et nous proposons des relations dans lesquelles les indices de Consistance et de Liquidité de Casagrande sont fonction à la fois de l'énergie et de la compacité du matériau.

Aux teneurs en eau supérieures au seuil de sensibilité au compactage, la notion de volume fictif, qui permet de raisonner en faisant abstraction du gonflement de l'argile, permet également de préciser les paramètres qui, liés à l'énergie de compactage, font qu'une argile est ou n'est pas sensible au compactage. Cette propriété est visible sur les courbes par le fait que la compacité de l'argile augmente ou diminue lorsque la teneur en eau augmente de la limite de plasticité à la limite de liquidité. On peut penser que c'est à l'aide de ces paramètres qu'il serait possible de rendre quantitatives, autrement que par des limites de rupture en compression simple, les notions de raideur, duraté ou mollesse des argiles, couramment employées en Génie Civil.

Enfin, c'est grâce à l'utilisation de ces volumes relatifs fictifs des phases constitutives d'un matériau qu'ont pu être établies des relations continues entre la compacité, la teneur en eau et la granulométrie, compte tenu de la nature de l'argile, au sens défini précédemment.

Nous avons donc tenté d'expliquer les relations mises en évidence entre les coordonnées du seuil de sensibilité et du maximum de compacité d'une part et les caractéristiques physiques des matériaux d'autre part. Ces caractéristiques sont non seulement la granulométrie, plus exactement la teneur en phyllite, mais également le pouvoir de gonflement de l'argile (lié à sa nature minéralogique et à sa charge ionique). Cependant, nous avons montré que ce pouvoir de gonflement est lui-même affecté par la teneur en matière organique liée, implicitement incluse dans la teneur en matière organique totale dont nous avons pu mettre en évidence le rôle protecteur. Or, tous les sols ne répondent pas à ces lois générales, car il est apparu que la présence de calcaire dans les sols pouvait, dans certaines conditions, modifier leur comportement d'une façon apparemment aberrante : ces sols sont l'objet d'une

étude conduite par N. SOUTY et al.* qui tentent de trouver les raisons de l'existence de ces aberrations. La première raison semble être que dans la fraction granulométrique inférieure à 2μ se trouve du calcaire en proportions variables. Il convient alors de faire la part de cette fraction de calcaire fin par rapport à la phyllite proprement dite. Mais il est apparu que cette première correction est insuffisante. La deuxième raison semblerait se trouver dans l'interaction de ces deux fractions inférieures à 2μ et dans certaines caractéristiques encore mal définies du calcaire dit "grossier", supérieur à 2μ . Les premiers résultats tendent à montrer que le calcaire agit dans le même sens que la matière organique ; déplacement du seuil de sensibilité et du maximum de compacité vers des teneurs en eau plus grandes et diminution de la valeur du maximum de compacité. Cette similitude de résultats est sans doute trompeuse car les phénomènes mis en jeu n'ont certainement pas les mêmes bases théoriques et ne font pas intervenir les mêmes mécanismes.

Nous voyons que l'ouverture vers les sols calcaires des résultats présentés dans ce mémoire est également un approfondissement de l'étude de l'influence de la minéralogie des constituants qu'ils soient supérieurs ou inférieurs à 2μ . Il est bien évident que cette prise en compte du calcaire, et de la Matière organique d'ailleurs, n'a pas que des conséquences sur le plan agricole au sens strict. En effet, une meilleure connaissance des causes des effets de ces deux constituants est une nécessité dans le recensement des potentialités des sols. Ces deux constituants devront nécessairement apparaître comme paramètres caractéristiques des sols en cartographie pédologique ou thématique.

Nous avons ainsi tenté de clarifier un certain nombre de notions couramment employées tout en en proposant une généralisation à partir de bases théoriques. Ce mémoire donne également quelques aperçus d'ordre pratique, sans doute plus exploitables en Agriculture qu'en Génie Civil, mais les deux aspects qu'a voulu prendre ce travail le placent justement entre ces deux disciplines.

* Laboratoire de Science du Sol - I.N.R.A. Montfavet - Travaux en cours.

A N N E X E

- Figures 7-1 à 7-15
 9-1 à 9-8

- Tableaux I à XXIV

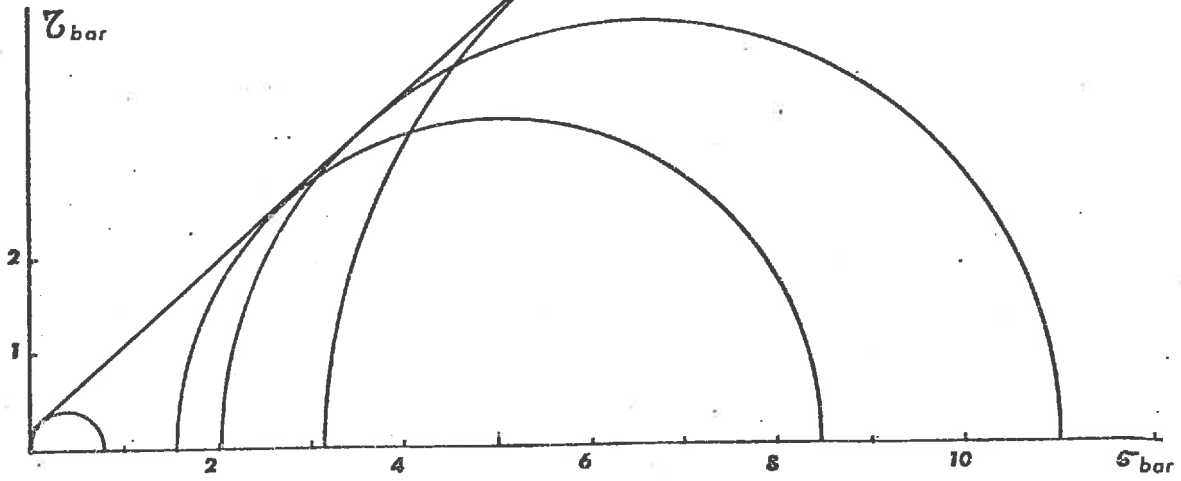
ECHANTILLON K_0 essai rapide

w: 3

$\varphi: 42^\circ$

c: 0.2 bar

FIG. 7-1

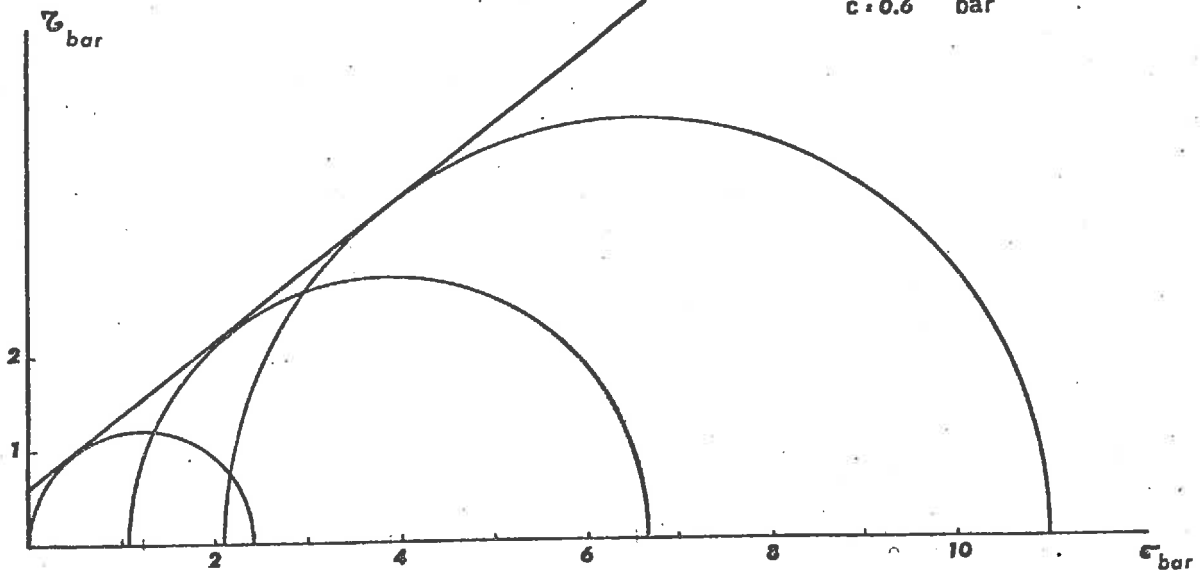


w: 10.7

$\varphi: 37.5^\circ$

c: 0.6 bar

FIG. 7-2



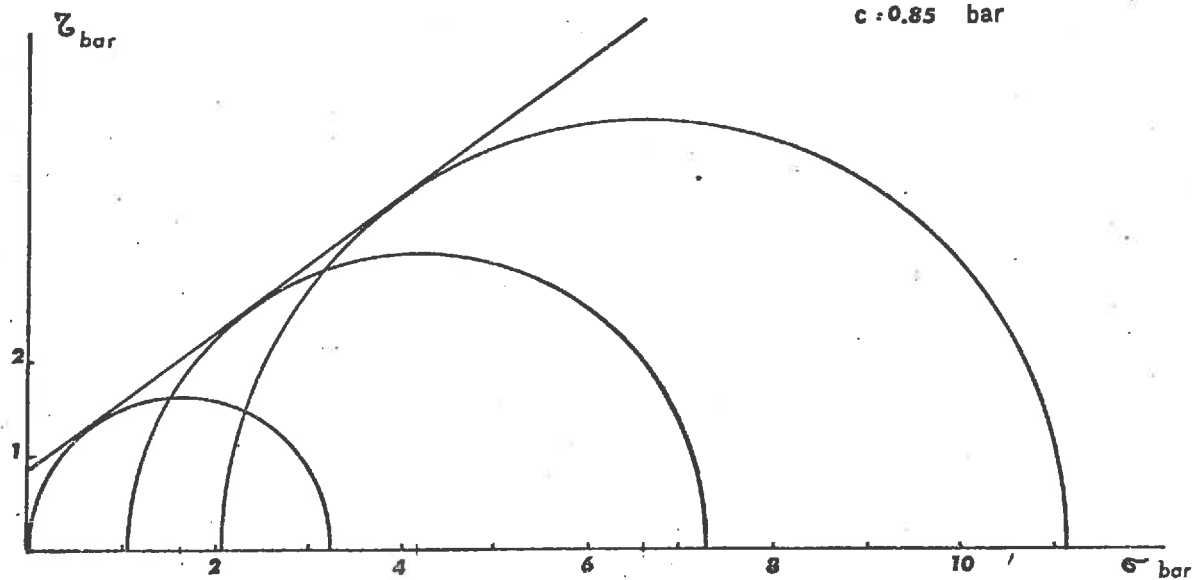
ECHANTILLON K_0 essai rapide

$w: 15.8$

$\varphi: 36^\circ$

$c: 0.85 \text{ bar}$

FIG. 7-3

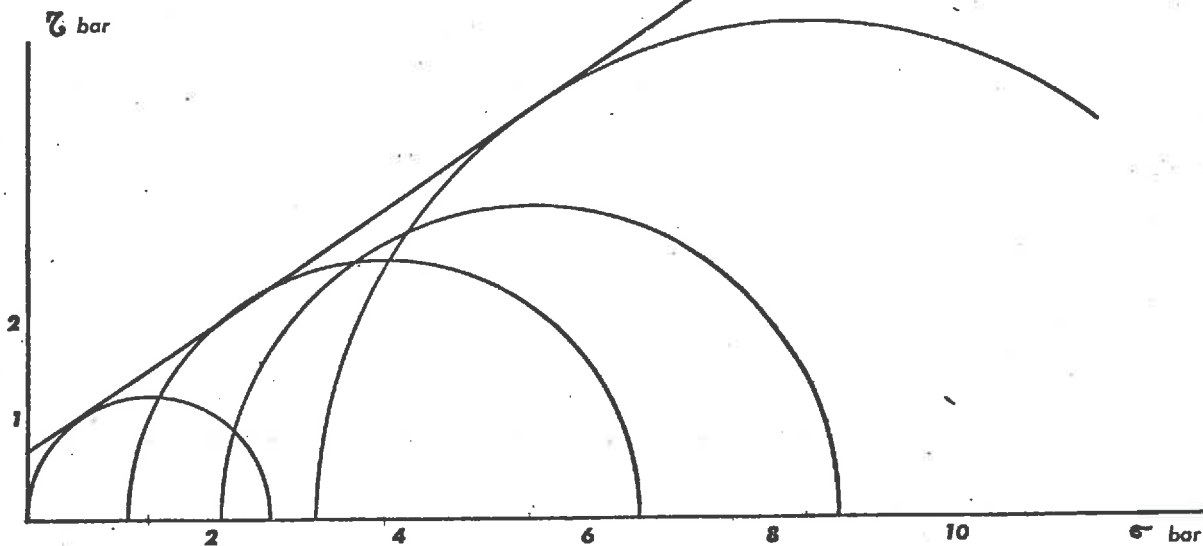


$w: 17.5$

$\varphi: 34^\circ$

$c: 0.75 \text{ bar}$

FIG. 7-4



ECHANTILLON K_0 essai rapide
w: 20.2
 $\varphi: 34^\circ$
c: 0.7 bar

FIG. 7-5

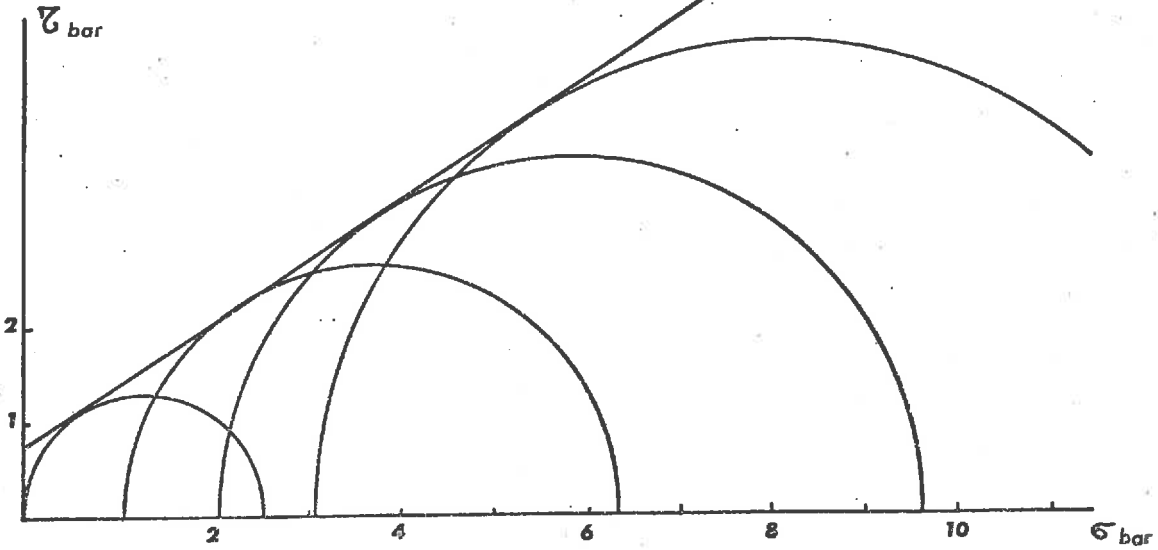
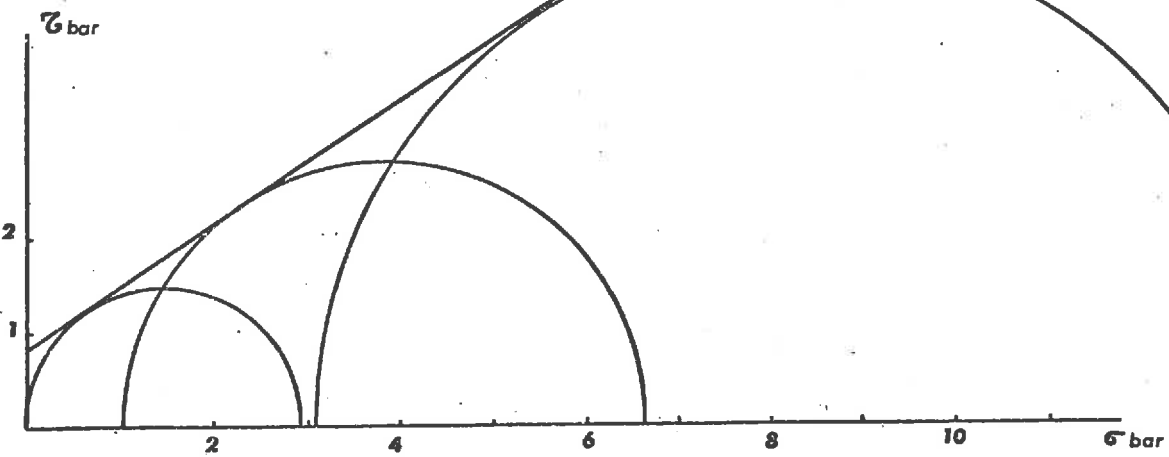


FIG. 7-6

w: 23
 $\varphi: 33^\circ$
c: 0.8 bar



ECHANTILLON K_0 essai rapide

FIG. 7-7

$w = 25.3$

$\varphi = 32^\circ$

$c = 0.8 \text{ bar}$

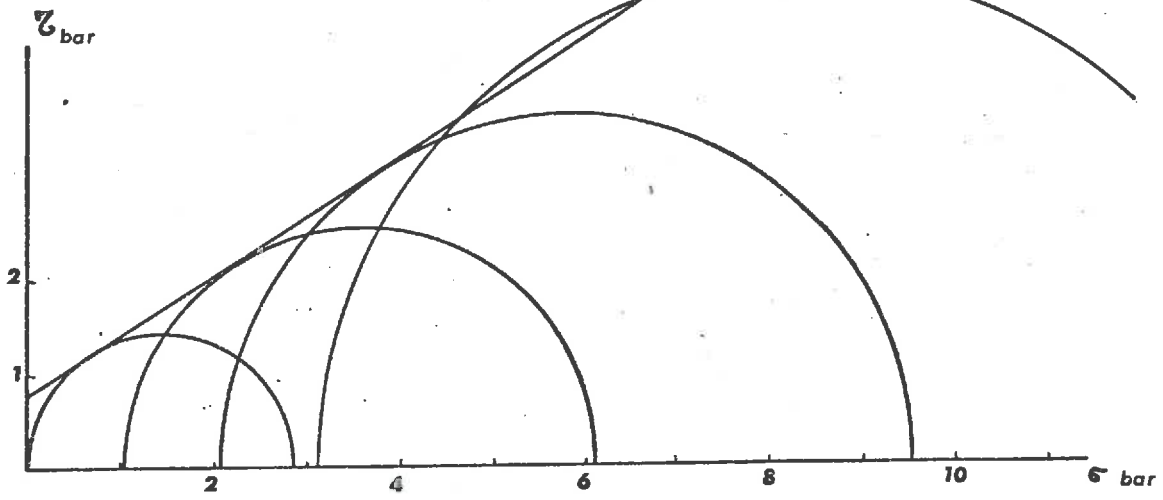
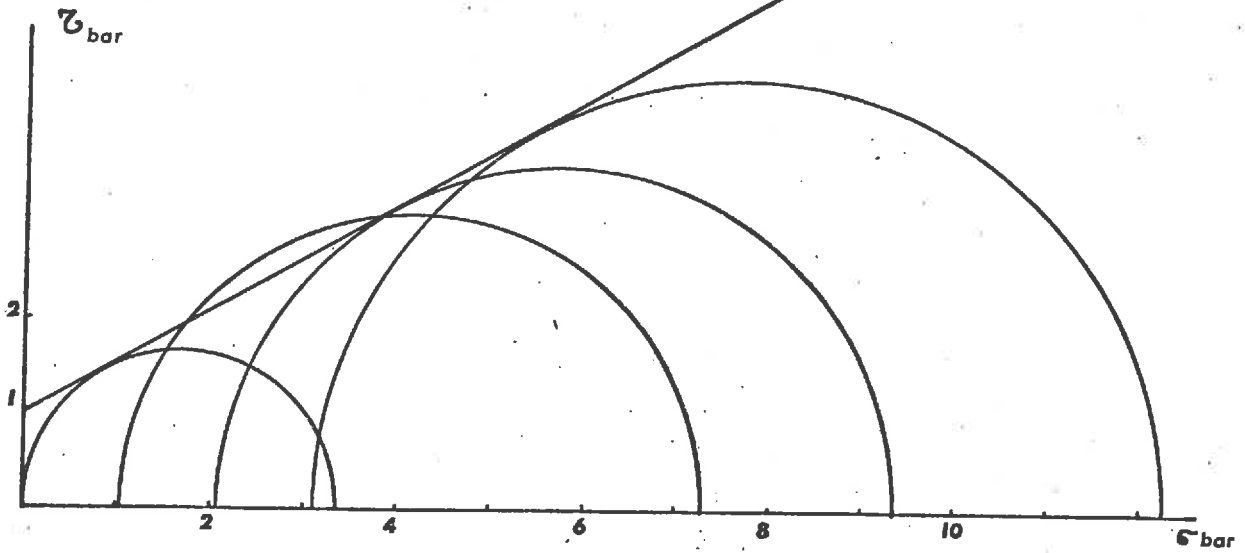


FIG. 7-8

$w = 28.9$

$\varphi = 29.5^\circ$

$c = 0.95 \text{ bar}$



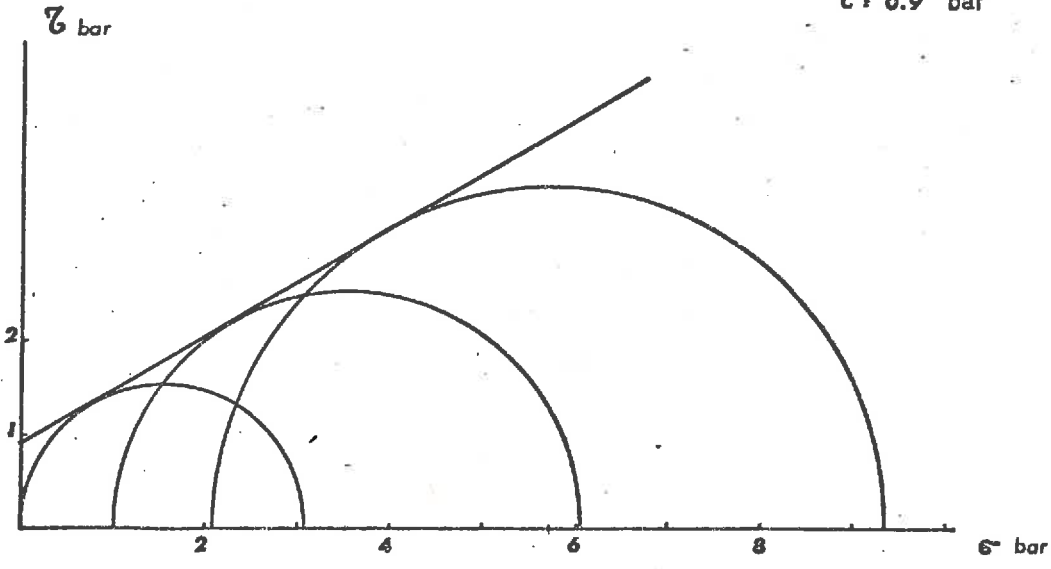
ECHANTILLON K_0 essai rapide

$w = 31$

$\varphi = 30^\circ$

$c = 0.9 \text{ bar}$

FIG. 7-9

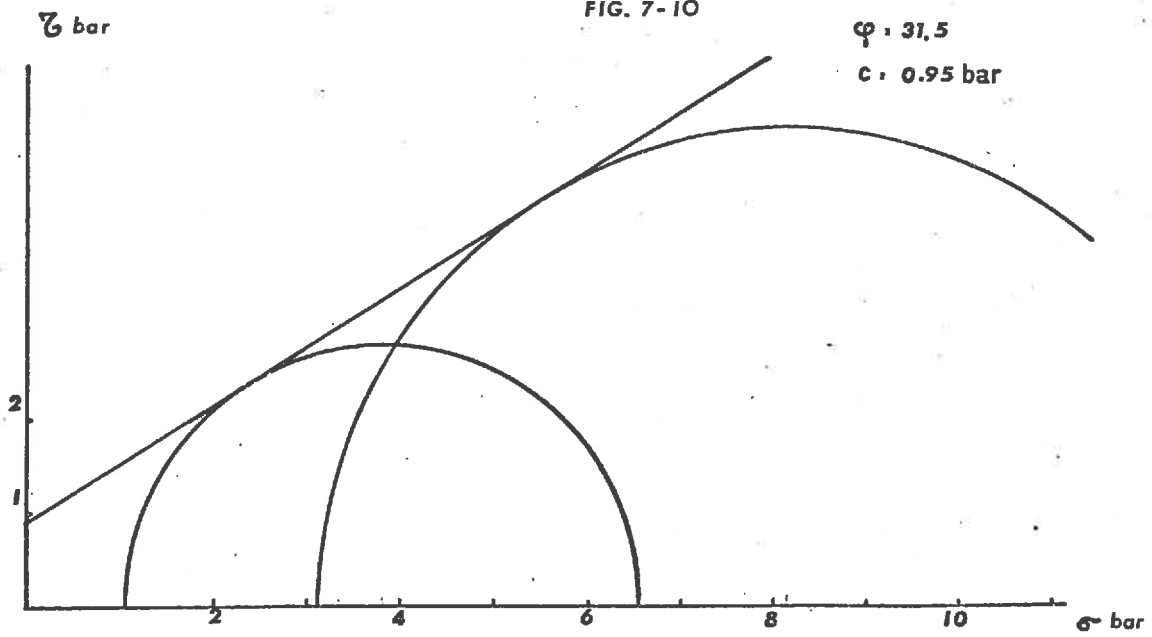


$w = 31.4^\circ$

$\varphi = 31.5^\circ$

$c = 0.95 \text{ bar}$

FIG. 7-10



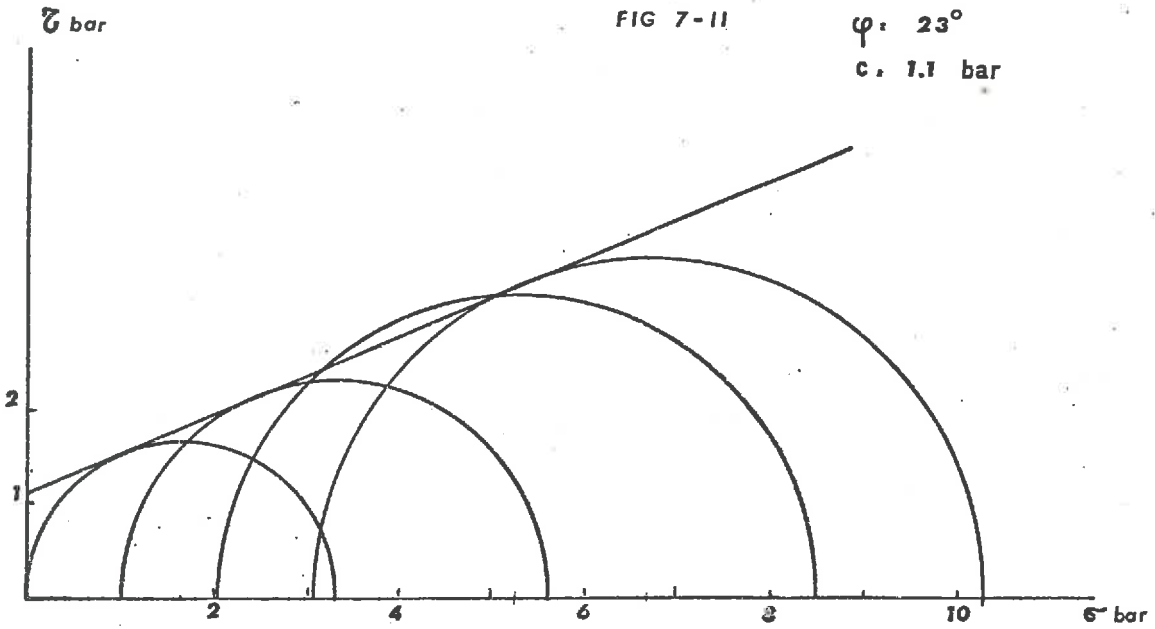
ECHANTILLON K_0 essai rapide

$w: 33.8$

$\varphi: 23^\circ$

$c: 1.1 \text{ bar}$

FIG 7-11

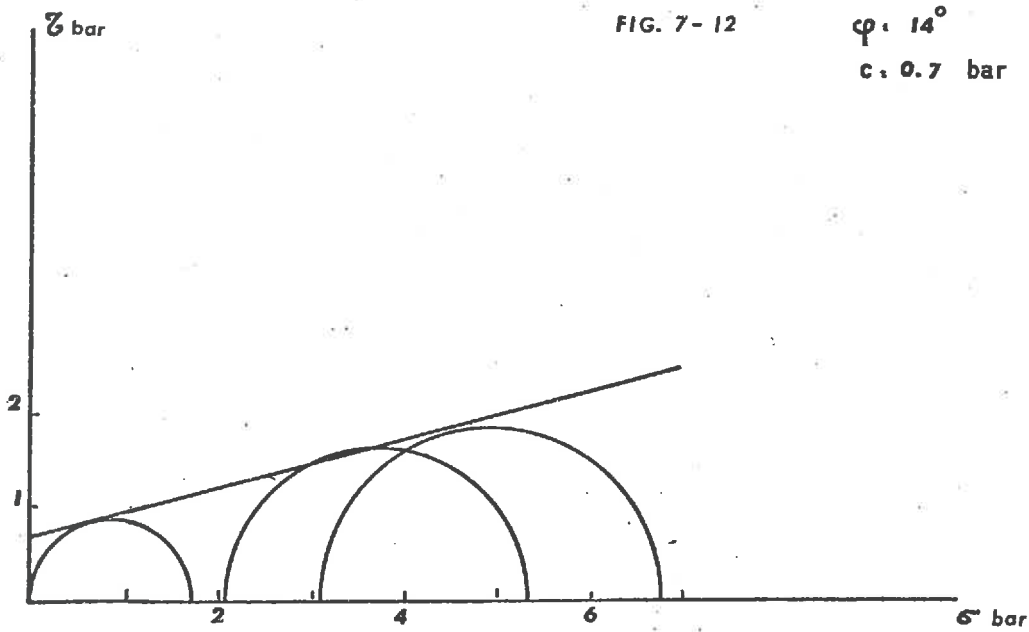


$w: 39.4$

$\varphi: 14^\circ$

$c: 0.7 \text{ bar}$

FIG. 7-12



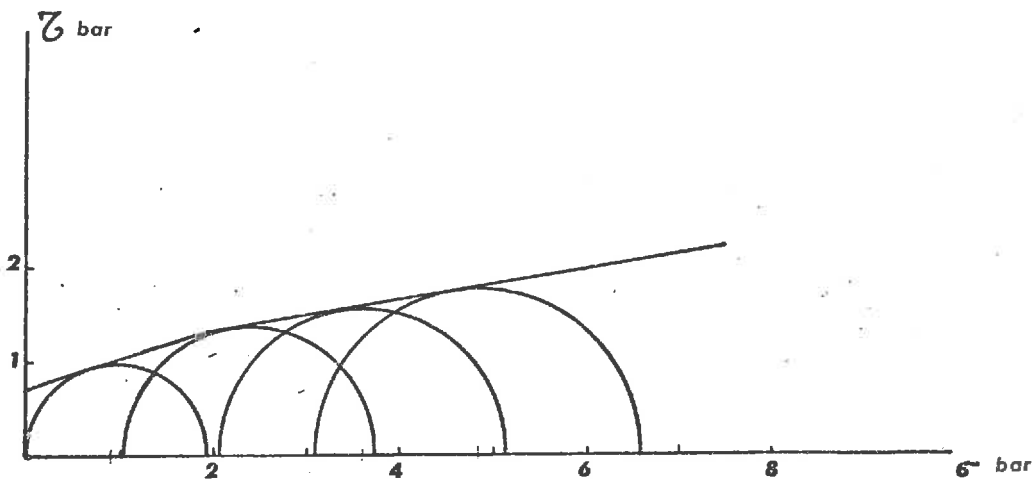
ECHANTILLON K_0 essai rapide

w. 40.4

FIG. 7-13

$\varphi = 9.5^\circ$

c. 0.7 bar



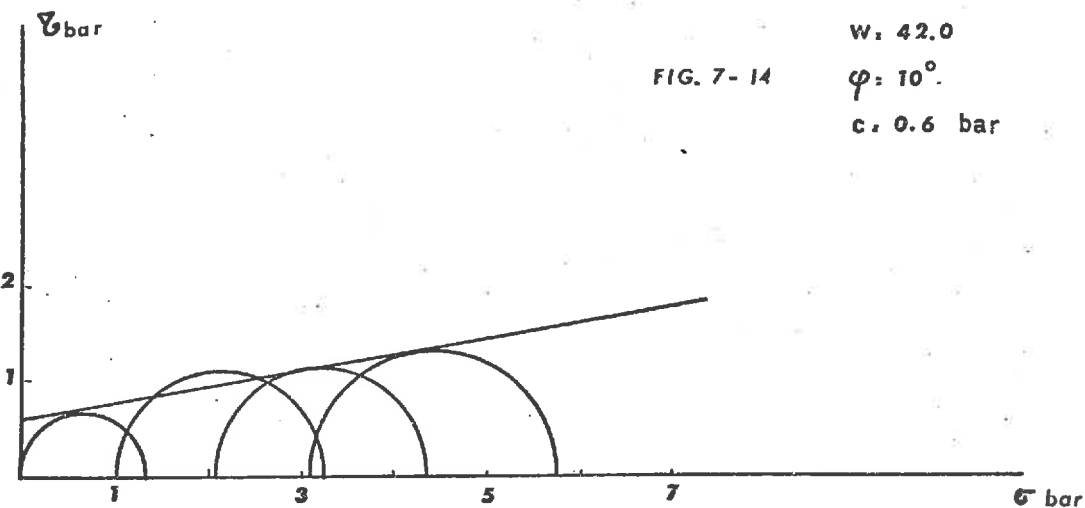
$\bar{\sigma}$ bar

w. 42.0

FIG. 7-14

$\varphi = 10^\circ$

c. 0.6 bar



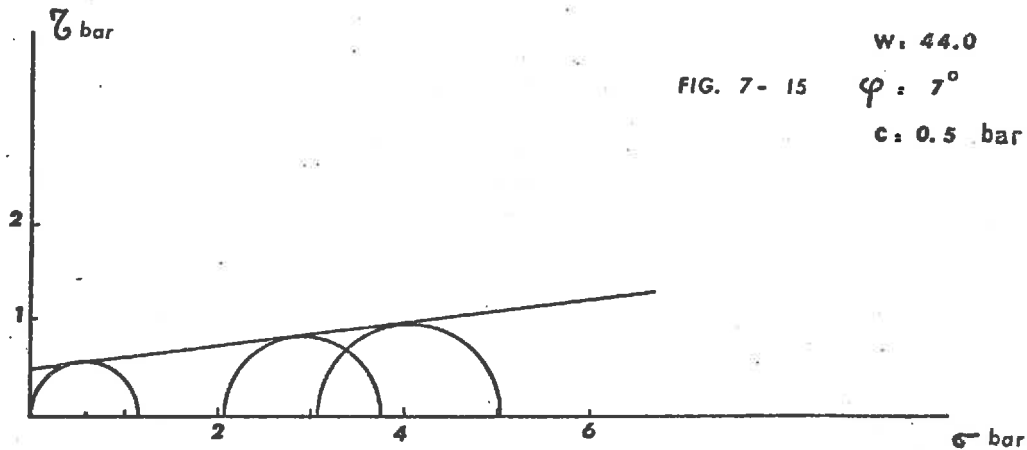
$\bar{\sigma}$ bar

w. 44.0

FIG. 7-15

$\varphi = 7^\circ$

c. 0.5 bar



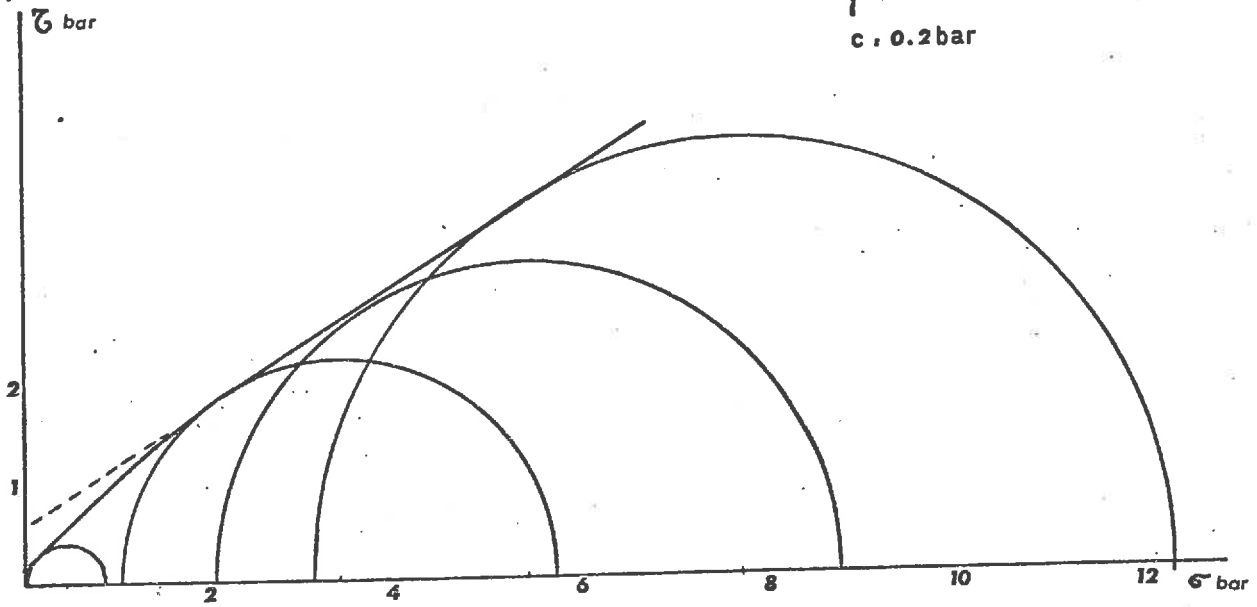
ECHANTILLON FK 31 essai rapide

w. 3.15

φ . 32

c. 0.2 bar

FIG. 9-1

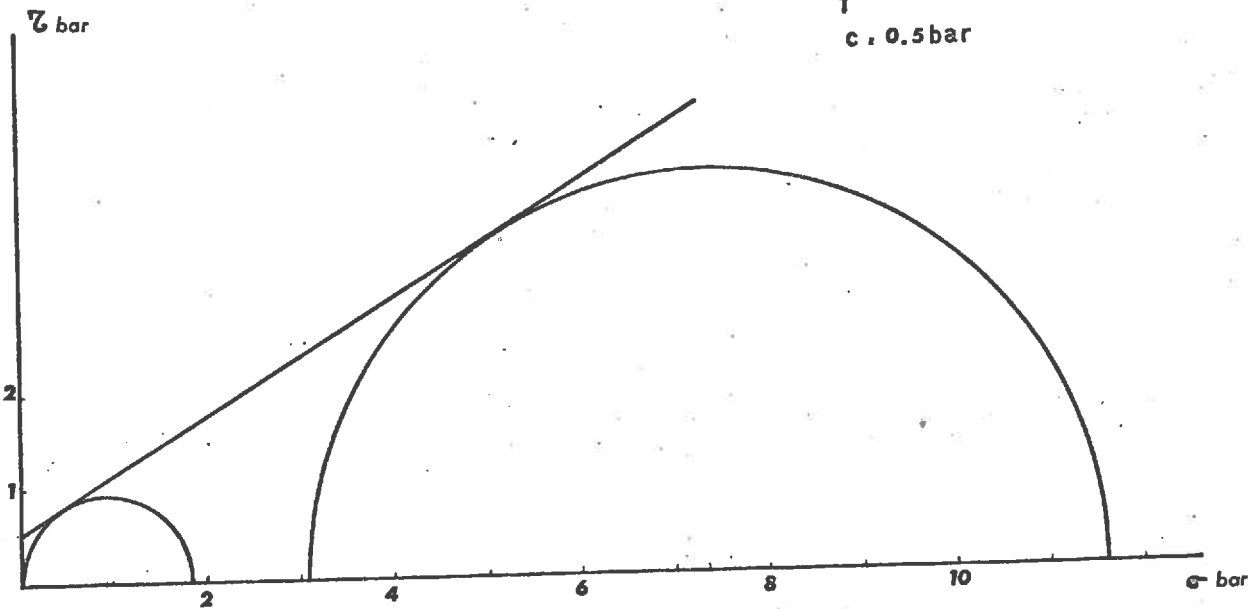


w. 5.8

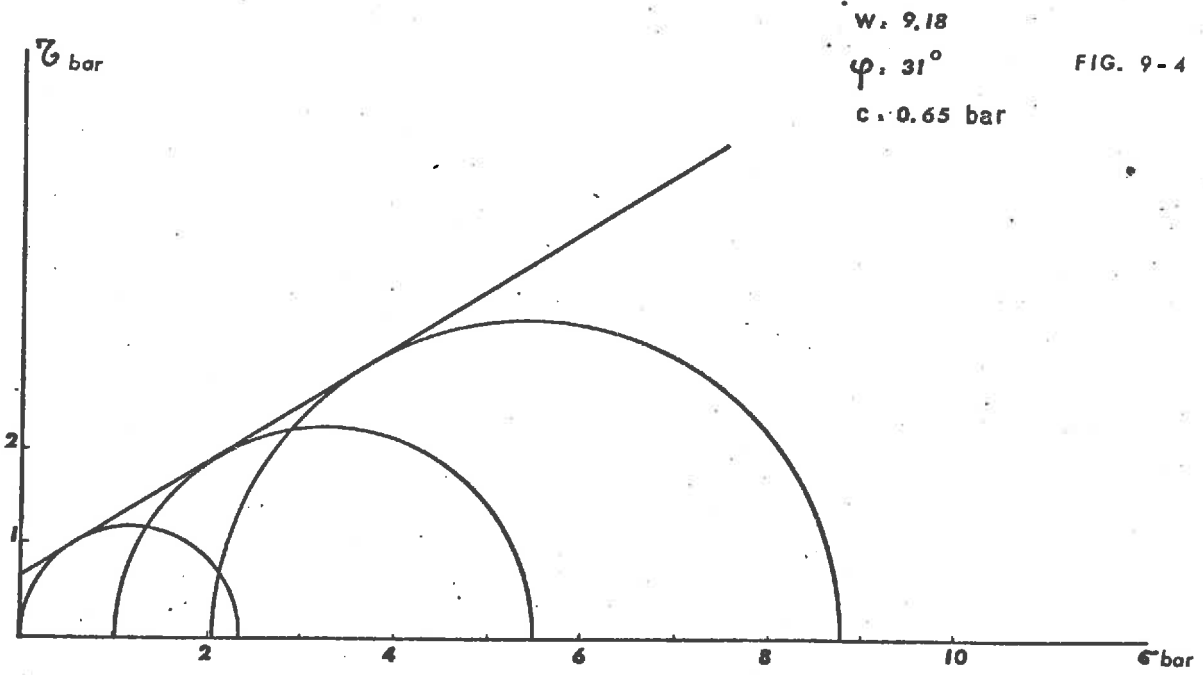
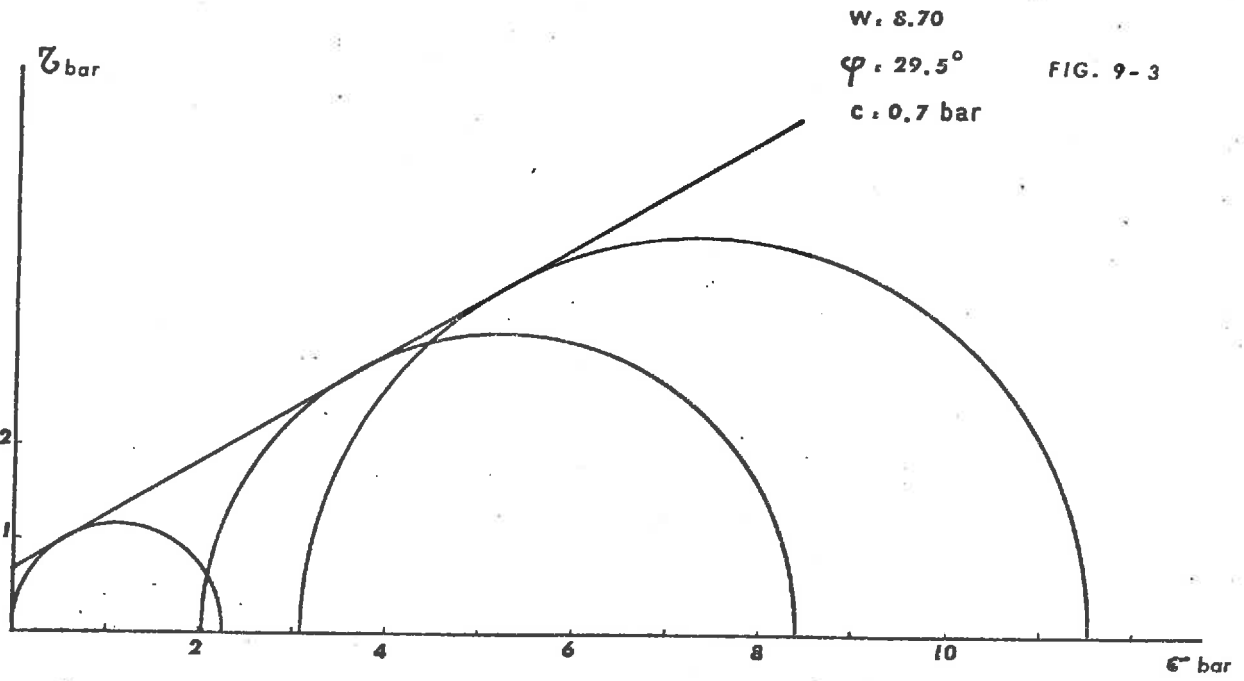
φ . 31°

c. 0.5 bar

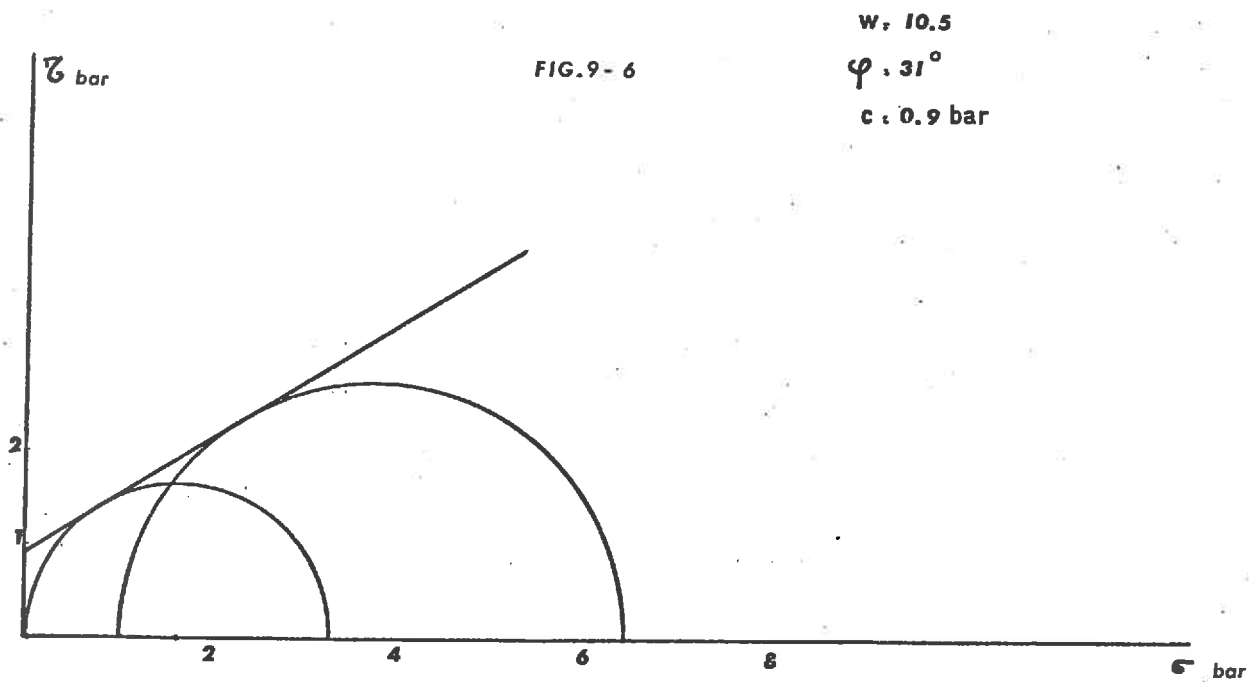
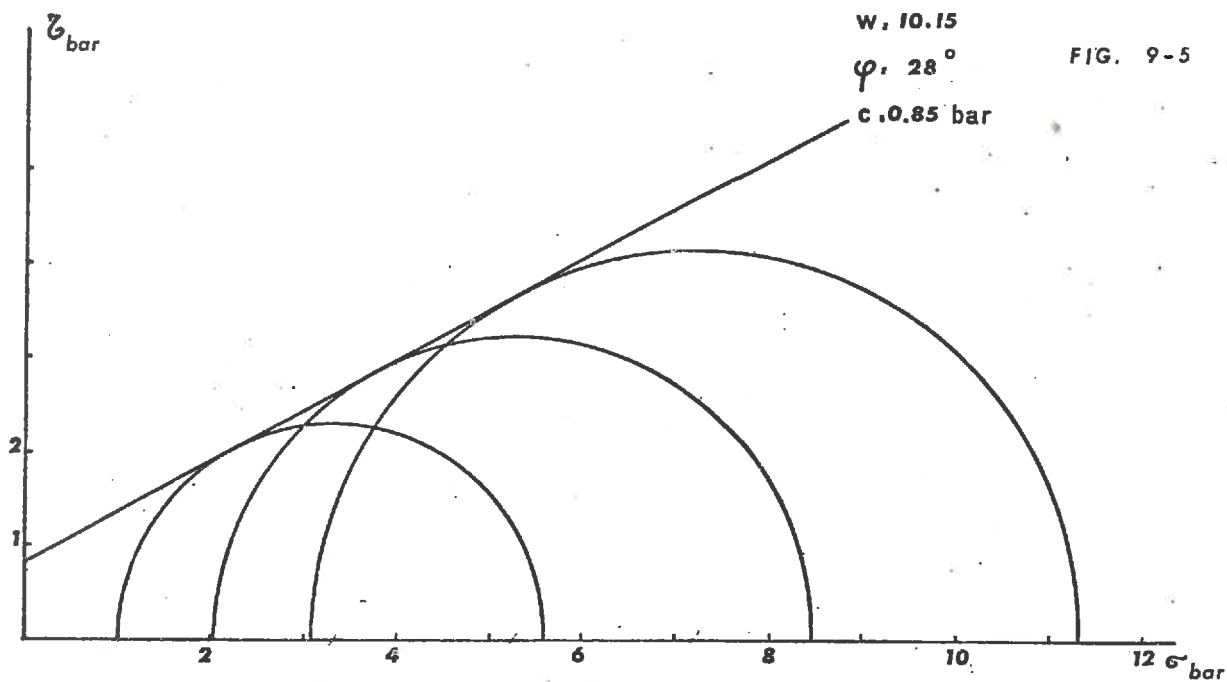
FIG. 9-2



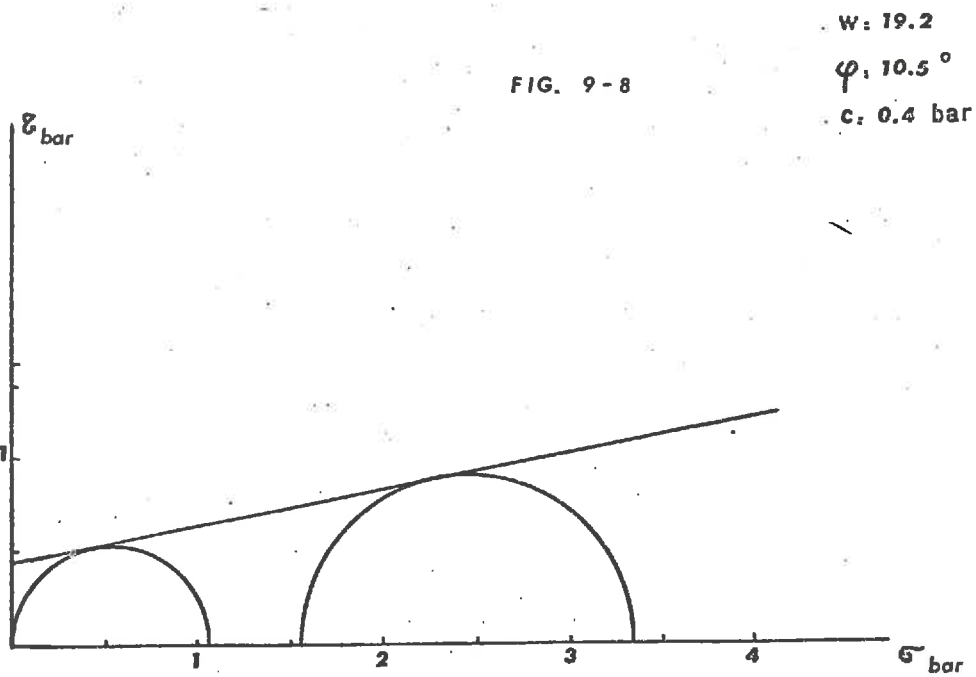
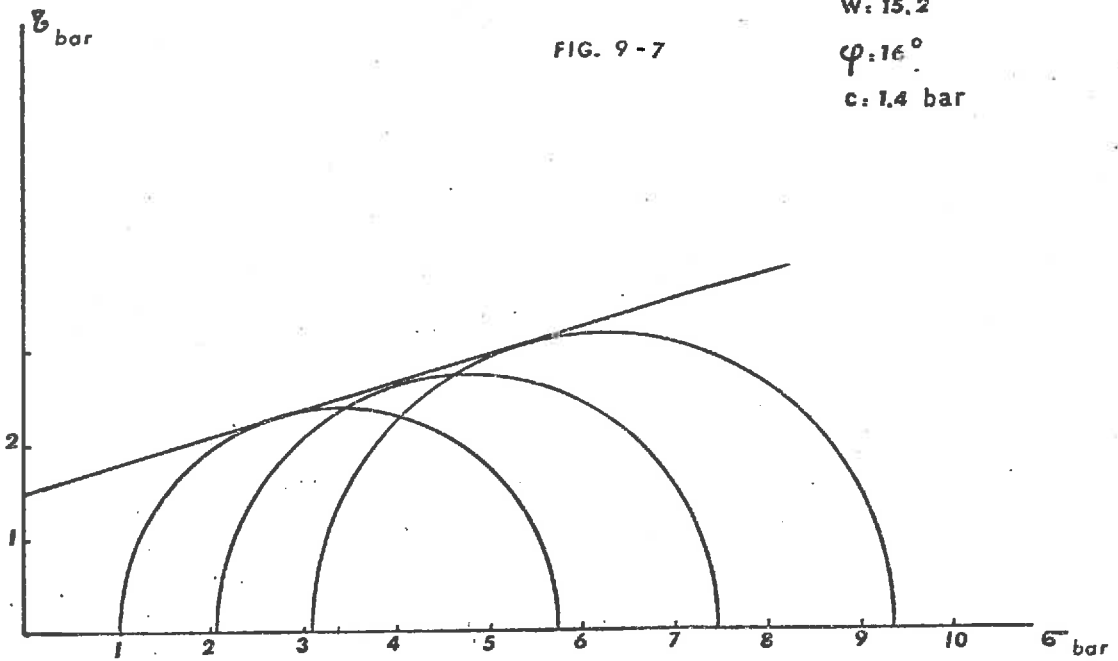
ECHANTILLON FK 31 essai rapide



ECHANTILLON FK 31 essai rapide



ECHANTILLON FX 31 essai rapide



T A B L E A U X

=====

TABLEAU I : Caractéristiques du Proctor Normal et du Proctor Réduit

	Normal	Réduit
Rapport surface dame - surface base	0.09	0.25
Volume du moule (m ³)	0.947 10 ⁻³	0.30 10 ⁻³
Hauteur de chute (m)	0.305	0.20
Masse de la dame (kg)	2.490	1
Nombre de coups par couche	25	30
Nombre de couches	3	3
Energie totale (kJ/m ³)	590	588

TABLEAU II : Caractéristiques granulométriques des supports sableux

	Fontainebleau	Brou
Limon fin (2 u - 20 u)	0	0.4
Limon grossier (20 u - 50 u)	0.15	2
Sable fin (50 u - 200 u)	65.6	9
Sable grossier (200 u - 2000 u)	34.1	89

TABLEAU III : Variations de la compacité en fonction de la teneur en eau pour deux mélanges.

FK 24	$w\%$	0.90	2.11	3.63	4.38	5.37	6.41	7.01	7.70	8.23	9.59	10.58
	γ_d	1.531	1.560	1.557	1.560	1.554	1.562	1.561	1.560	1.602	1.671	1.719
	$w\%$	12.21	12.75	13.44	13.63	14.53	15.06	15.62	15.96	16.61	17.85	18.28
	γ_d	1.781	1.810	1.829	1.843	1.853	1.845	1.825	1.809	1.779	1.725	1.706
FK 47	$w\%$	2.11	4.35	6.84	9.21	10.57	11.46	12.56	14.55	15.10	15.23	16.23
	γ_d	1.359	1.360	1.382	1.379	1.377	1.379	1.374	1.381	1.380	1.393	1.417
	$w\%$	18.23	21.41	23.84	24.69	25.87	26.83	27.64	28.70			
	γ_d	1.474	1.569	1.583	1.573	1.543	1.514	1.490	1.470			

TABLEAU IV : Variations du seuil hydrique en fonction de la teneur en kaolinite : Energie E_o

Ech.	BK 3	BK 4	BK 6	BK 7	BK 9	BK 10	BK 12	BK 12	BK 16	BK 18	BK 19	BK 24
A	3.4	3.7	5.5	7.1	8.9	9.85	12.0	12.1	16.3	18.2	18.7	24.0
w^c	1.3	1.2	2.1	2.5	2.8	3.1	3.8	4.0	5.2	5.8	6.1	7.6
Ech.	FK 28	BK 29	FK 37	BK40	FK 47	BK 52	FK 62	FK 73	K _o			
A	27.8	29.0	36.6	39.9	47.2	51.5	62.0	73.0	100			
w^c	8.9	9.3	12.5	12.7	15.0	16.2	19.8	23.3	32.0			

TABLEAU V : Caractéristiques mécaniques de la kaolinite k₀ en fonction de la teneur en eau.

Compactage en ϕ : 35 mm. Proctor Réduit avec et sans écrouissage.

w	3.0	10.2	10.7	15.1	15.5	15.8	17.5	20.2	20.6	23.0	25.3	26.5	28.4
γ^d / γ_w	1.220	1.168	1.210	1.193	1.210	1.225	1.160	1.152	1.170	1.160	1.140	1.125	1.150
S _r	6.4	20.3	22.6	31.2	32.8	34.1	34.4	39.3	41.1	45.2	48.3	49.5	55.0
ϕ_0	42.0	38.0	37.5	35.5	36.0	36.0	34.0	34.0	33.0	33.0	32.0	31.5	33.0
c	0.2	0.35	0.6	0.7	0.8	0.85	0.75	0.7	0.65	0.8	0.8	0.8	0.95
w	28.9	30.2	31.0	31.4	32.5	33.8	34.4	35.8	39.4	40.4	42.0	44.0	
γ^d / γ_w	1.130	1.140	1.120	1.165	1.190	1.130	1.210	1.170	1.220	1.250	1.218	1.202	
S _r	54.4	57.7	57.5	62.2	66.8	63.6	72.8	71.4	84.5	90.5	89.9	92.0	
ϕ_0	29.5	32.0	30.0	31.5	27.5	23.0	23.0	18.0	14.0	9.5	10.0	7.0	
c	0.95	1.0	0.9	0.95	1.3	1.1	1.15	1.05	0.7	0.7	0.6	0.5	

TABLEAU VI : Caractéristiques mécaniques de l'échantillon FK 31 en fonction de la teneur en eau

w	3.15	5.80	8.70	9.18	10.15	10.50	10.80	13.4	15.2	19.2
γ^d / γ_w	1.470	1.460	1.440	1.450	1.430	1.465	1.480	1.554	1.660	1.708
S _r	9.8	18.4	26.0	27.8	29.9	32.6	34.2	47.3	62.7	85.1
ϕ_0	32	31	29.5	31	28	31	/	/	16	10.5
c bar	0.2	0.5	0.7	0.65	0.85	0.9	/	1.4	1.4	0.4

TABEAU VII

Caractéristiques des énergies de compactage.

	E ₁	E ₂		m = km ₀ n = hn ₀ avec
		E ₀		
k = h	0.5	1	2	
Masse m(kg)	0.5	1	2	
Nombre de coups n	15	30	60	
Energie totale en kJ/m ³	147.5	590	2360	

TABEAU VIII

Variations du seuil hydrique en fonction de la teneur en Montmorillonite

ECH.	FM 2	FM 5	BM 7	FM 8	BM 8	FM 8	FM 9	BM 10	FM 11	FM 19	FM 23	FM 29	FM 37	BM 42	FM 54	M ₀
A %	2	5.25	6.8	7.75	7.80	9.3	10.1	10.65	19.3	23	28.8	36.5	42.2	54	100	
w ^c	/	2.3	2.8	3.0	3.0	3.6	3.9	4.0	7.5	8.8	11.3	14.0	16	21	?	

TABLEAU IX : Volumes relatifs des phases solides du sable et de l'argile saturée au seuil de sensibilité

Energie $E_0 = 590 \text{ kJ/m}^3$

Ech.	B ₀	BK 3	BK 6	BK 7	BK 12	BK 15	BK 19	BK 29	BK 40	BK 52	K ₀	F ₀
b ₂ ^c %	61.2	59.6	60.2	57.8	55.8	54.2	50.5	41.6	33.2	25.8	0	58.4
b ₁ ^c %	0	3.8	6.3	8.0	13.8	19.2	21.1	30.9	40.0	46.9	74.1	0
Ech.	FK 4	FK 9	FK 10	FK 12	FK 18	FK 24	FK 28	FK 47	FK 62	FK 73	FM 5	BM 7
b ₂ ^c %	56.9	54.5	54.2	53.2	50.3	45.0	42.0	27.5	18.6	12.5	57.87	58.98
b ₁ ^c %	3.9	9.6	10.7	13.2	20.1	25.6	29.1	44.2	54.7	60.7	6.77	9.16
Ech.	FM 8	FM 9	BM 10	FM 11	BM 19	FM 19	FM 23	FM 29	FM 37	BM 42	FM 54	M ₀
b ₂ ^c %	56.34	55.05	55.58	53.22	47.08	46.85	44.12	39.19	33.30	30.44	22.37	0
b ₁ ^c %	9.90	11.92	13.29	13.39	23.97	23.66	27.83	33.47	40.41	47.30	55.45	82.78

Energie $E_1 = 147.5 \text{ kJ/m}^3$

Ech.	F ₀	FK 4	FK 9	FK 10	FK 12	FK 31	K ₀
b ₂ ^c %	57.3	55.2	51.2	50.8	49.0	33.6	0
b ₁ ^c %	0	4.1	9.7	10.7	13.1	30.1	65.6

Energie $E_2 = 2360 \text{ kJ/m}^3$

Ech.	F ₀	FK 10	FK 12	BK 26	FK 31	FK 73	K ₀	B ₀
b ₂ ^c %	59.6	56.9	56.1	48.9	43.6	14.5	0	62.9
b ₁ ^c %	0	10.4	12.9	28.3	33.3	65.2	81.1	0

TABLEAU X : Mélanges à comportement non sableux.

Energie $E_0 = 590 \text{ kJ/m}^3$

Ech	BK 19	BK 29	BK 40	BK 52	FK 24	FK 28	FK 47	FK 62	FK 73	K_0
$b_1^c/b_1^{kc} \%$	28.45	41.67	53.96	63.32	34.57	39.33	59.69	73.86	81.94	100
$b_2^c/b_2^{oc} \%$	82.47	68.03	54.21	42.23	77.12	71.96	47.04	31.89	21.35	0
Ech	BM 19	FM 19	FM 23	FM 29	FM 37	BM 42	FM 54	M_0		
$b_1^c/b_1^{mc} \%$	28.95	28.58	33.62	40.43	48.82	57.13	66.98	100		
$b_2^c/b_2^{oc} \%$	79.93	80.23	75.55	67.11	57.02	49.73	38.31	0		

Energie $E_1 = 147.5 \text{ kJ/m}^3$

Ech.	FK 12	FK 31	K_0
$b_1^c/b_1^{kc} \%$	19.97	45.88	100
$b_2^c/b_2^{oc} \%$	85.51	58.64	0

Energie $E_2 = 2360 \text{ kJ/m}^3$

Ech	BK 26	FK 31	FK 73	K_0
$b_1^c/b_1^{kc} \%$	34.90	41.06	80.39	100
$b_2^c/b_2^{oc} \%$	82.05	73.15	24.33	0

TABLEAU XI : Coefficients directeurs expérimentaux et théoriques - Valeurs de γ_G .

Energie	c	b_2^{fc}/b_2^c	b_2^{Bc}/b_2^c	γ_G
147.5	0.934	0.573	-	0.155
590	0.878	0.584	-	0.293
590	0.878	-	0.612	0.314

Energie	c	b_2^{fc}/b_2^c	b_2^{Bc}/b_2^c	γ_G
2360	0.798	0.596	-	0.500
2360	0.798	-	0.629	0.544

TABLEAU XII : Mélanges à comportement sableux

Energie $E_0 = 590 \text{ kJ/m}^3$

Ech.	B_0	BK 3	BK 7	BK 12	BK 16	F_0	FK 4	FK 9	FK 10	FK 12	FK 18
$b_1^c/b_1^{kc} \%$	0	5.13	10.79	18.62	25.91	0	5.26	12.96	14.44	17.81	27.13
$b_2^c/b_2^{oc} \%$	100	97.49	94.77	91.28	88.66	100	97.29	93.33	92.83	91.08	86.02

Ech.	FM 5	BM 7	FM 8	FM 9	BM 10	FM 11
$b_1^c/b_1^{Mc} \%$	8.18	11.07	11.79	14.40	16.05	16.18
$b_2^c/b_2^{oc} \%$	99.09	96.37	94.21	94.26	90.82	91.13

Energie $E_1 = 147.5 \text{ kJ/m}^3$

Ech.	F_0	FK 4	FK 9	FK 10	FK 12
$b_1^c/b_1^{kc} \%$	0	6.25	14.79	16.31	19.97
$b_2^c/b_2^{fc} \%$	100	96.43	89.42	88.67	85.59

Energie $E_2 = 2360 \text{ kJ/m}^3$

Ech.	F_0	FK 10	FK 12
b_1^c/b_1^{kc}	0	12.82	15.91
b_2^c/b_2^{fc}	100	95.45	94.13

TABLEAU XIII : Mélanges à comportement sableux contenant de la kaolinite : valeurs de c et de ζ

Energie kJ/m^3	147.5	590	2360
c	1.365	2.077	2.739
ζ	0.268	0.518	0.635

TABLEAU XIV : Teneurs en argile aux limites des deux lois expérimentales

Energie kJ/m ³	147.5	590	2360
Mélanges FK _i	12.4	14	20.6
Mélanges BK _i	-	13.6	19.6
Mélanges FM _i et BM _i	-	5 à 6	-

TABLEAU XV : Compacités expérimentale et fictive de l'argile K₀ - Energie E₀

w %	33.6	33.7	33.8	34.0	35.9	36.0	36.2	36.2	36.2	38.4	39.1	39.2	39.4	39.8
γ_{de} / γ_w	1.131	1.110	1.133	1.121	1.160	1.183	1.171	1.147	1.147	1.202	1.223	1.205	1.217	1.217
γ_{df} / γ_w	1.152	1.132	1.157	1.146	1.215	1.242	1.206	1.232	1.232	1.303	1.339	1.320	1.338	1.344
b _{if} %	78.2	76.8	78.5	77.8	82.5	84.3	81.9	83.7	83.7	88.5	90.9	89.6	90.8	91.3
w %	40.1	40.2	40.3	40.5	41.7	42.0	43.8*	43.9*	44.0*	44.6*	44.6*	44.6*	44.6*	44.6*
γ_{de} / γ_w	1.214	1.210	1.221	1.215	1.233	1.218	1.211	1.202	1.213	1.204	1.204	1.204	1.204	1.204
γ_{df} / γ_w	1.347	1.344	1.360	1.355	1.400	1.386	1.412	1.402	1.420	1.420	1.420	1.420	1.420	1.420
b _{if} %	91.4	91.3	92.3	92.0	95.0	94.1	95.9	95.2	96.4	96.4	96.4	96.4	96.4	96.4
$w^c = 32 \%$ avec $\gamma_{de}^c / \gamma_w = 1.092$ $\gamma_{df}^c / \gamma_w = 1.092$ $b_{if}^{oc} = 74.1$														

* Non retenus dans les calculs de corrélation, la teneur en eau étant supérieure à w¹.

TABLEAU XVI : Variations de la compacité de l'argile K_0 sous charge constante.

Pression verticale = 10 bars

w initiale	7.59	20.69	34.91	43.46	51.21	55.60	60.89	61.52	66.18	83.19	84.30
w équil.	-	-	34.05	43.40	-	55.96	57.72	57.03	56.33	54.97	55.33
γ_d / γ_w équil.	0.974	0.983	0.970	1.032	1.061	1.077	1.090	1.092	1.079	1.082	1.087
w sat.	54.68	54.90	-	-	57.09	-	-	-	-	-	-
γ_d / γ_w sat.	1.096	1.099	-	-	1.063	-	-	-	-	-	-

Pression verticale = 41 bars

w initiale	1.63	8.90	18.63	22.63	28.48	30.05	36.29	39.54	46.88	46.98	57.87	58.10
w équil.	1.51	8.62	18.62	22.35	28.48	29.88	35.82	37.84	44.38	44.78	44.78	45.54
γ_d / γ_w équil.	0.978	1.129	1.146	1.105	1.161	1.130	1.168	1.164	1.218	1.207	1.221	1.223

Pression verticale = 80 bars

w initiale	3.18	5.43	6.76	8.55	14.38	14.71	16.22	16.48	21.09
w équil.	3.16	5.18	6.84	8.09	14.55	15.19	16.43	16.16	17.36
γ_d / γ_w équil.	1.597	1.676	1.726	1.802	1.840	1.860	1.858	1.862	1.867

TABLEAU XVII : Indice de sensibilité au tassement de l'argile k_0

Energie kJ/m^3	147.5	590	2360
λ	2.31	2.15	1.78
β_0	4	2.7	1.7
S_0	2.31	1.99	1.17

TABLEAU XVIII : Compacité expérimentale et volume relatif fictif de l'argile M_0 - Energie E_0

en $\phi = 35 \text{ mm}$

$w \%$	38.27	38.84	39.83	40.12	40.97	42.02	42.54	42.78	43.68	47.01	48.77	49.14	51.64	51.98	66.83	69.53
χ_{de}^0 / χ_w	1.009	1.019	0.982	1.002	0.969	0.980	0.980	0.979	0.975	0.982	0.963	0.981	0.963	0.979	0.912	0.897
$b_{1f}^0 \%$	80.54	81.81	79.60	81.49	79.42	81.21	81.64	81.75	82.16	85.75	85.53	87.67	88.25	90.29	98.49	99.56

en $\phi = 70 \text{ mm}$

$w \%$	38	48.71	56.27	61.47
χ_{de}^0 / χ_w	1.040	1.018	0.982	0.966
b_{1f}^0	82.78	90.45	95.26	99.44

TABLEAU XIX : Volumes fictifs de la kaolinite dans les mélanges à comportement non sableux. (Energie E₀)

FK 73

w	23.36	26.89	27.82	29.44	30.21	31.62	32.55	34.12	34.13	35.25*
w'	0	3.53	4.46	6.08	6.85	8.26	8.99	10.76	10.77	11.92
b _{1f}	60.72	67.54	69.35	73.66	75.67	78.53	79.32	80.05	79.75	79.47
b _{1f} ^{-b₁c}	0	6.82	8.63	12.94	14.95	17.81	18.80	19.33	19.03	18.75

FK 62

w	19.84	20.28	21.15	22.59	24.07	25.84	27.34	28.33	29.23	30.18	30.93	32.55*	33.53*
w'	0	0.44	1.31	2.75	4.23	6.00	7.50	8.49	9.39	10.34	11.09	12.71	13.69
b _{1f}	54.73	56.25	57.68	60.93	63.65	66.76	70.35	71.37	71.78	71.65	71.36	70.94	70.85
b _{1f} ^{-b₁c}	0	1.52	2.95	6.21	8.92	12.03	15.62	16.64	17.05	16.92	16.63	16.21	16.12

BK 52

w	16.20	16.47	17.48	18.35	19.53	20.87	21.97	23.22	24.37	25.05	25.65*	25.65*	27.14*	28.22*
w'	0	0.27	1.28	2.15	3.33	4.67	5.77	7.02	8.17	8.85	9.45	9.45	10.94	12.02
b _{1f}	46.92	47.78	45.95	50.86	54.27	56.92	58.20	61.15	63.68	63.64	63.40	63.33	63.15	62.73
b _{1f} ^{-b₁c}	0	0.86	3.03	3.94	7.35	10.00	11.28	14.23	16.76	16.72	16.48	16.41	16.23	15.81

FK 47

w	15.10	15.23	16.23	16.53	16.72	18.23	18.97	19.71	21.41	23.84*	24.69*	25.87*	26.83*	27.64*
w'	0	0.13	1.13	1.43	1.62	3.13	3.87	4.61	6.31	8.74	9.59	10.77	11.73	12.54
b _{1f}	44.23	44.72	46.15	46.68	47.25	49.52	50.78	52.42	55.81	58.88	59.37	59.31	59.00	58.73
b _{1f} ^{-b₁c}	0	0.50	1.92	2.46	3.02	5.30	6.55	8.20	11.58	14.65	15.14	15.08	14.77	14.50

* Résultats non retenus dans la corrélation, la teneur en eau étant supérieure à w¹

TABLEAU XIX (suite 1)

BK 40

w	12.77	13.62	13.82	15.00	16.80	17.99	18.47	19.45	20.58*	21.42*	21.44*	22.46*	23.13*	23.66*
w'	0	0.85	1.05	2.23	4.03	5.22	5.70	6.68	7.81	8.65	8.67	9.69	10.36	10.89
b _{1f}	39.99	41.28	41.94	43.44	46.52	48.76	50.01	51.27	52.28	52.22	52.28	51.95	51.88	51.74
b _{1f} -b ₁ ^c	0	1.29	1.95	3.45	6.53	8.77	10.02	11.28	12.29	12.23	12.29	11.96	11.89	11.75

BK 29

w	9.28	9.39	10.21	12.05	14.94	15.35	15.81	16.21	16.75*	17.20*	17.89*	18.79*
w'	0	0.11	0.93	2.77	5.66	6.07	6.53	6.93	7.47	7.92	8.61	9.51
b _{1f}	30.88	30.93	32.02	34.50	39.05	39.72	40.27	40.73	40.82	40.78	40.71	40.66
b _{1f} -b ₁ ^c	0	0.05	1.15	3.63	8.18	8.84	9.39	9.85	9.94	9.90	9.83	9.78

FK 28

w	8.90	9.75	10.81	12.07	13.18	13.99	16.10	16.93*	17.40*	17.95*
w'	0	0.85	1.91	3.17	4.28	5.09	7.20	8.03	8.50	9.05
b _{1f}	29.15	30.64	32.14	33.77	35.53	36.79	39.19	39.43	39.41	39.14
b _{1f} -b ₁ ^c	0	1.50	3.00	4.63	6.43	7.65	10.04	10.28	10.26	9.99

FK 24

w	7.68	8.23	9.59	10.58	11.29	11.90	12.21	12.75	13.44	13.63	14.53	15.06*	15.62*	15.96*	16.61*	17.85*
w'	0	0.55	1.91	2.90	3.61	4.22	4.53	5.07	5.76	5.95	6.85	7.38	7.94	8.28	8.93	10.17
b _{1f}	25.62	26.34	28.13	29.48	30.07	31.08	31.57	32.48	33.32	33.73	34.50	34.81	34.78	34.67	34.47	34.09
b _{1f} -b ₁ ^c	0	0.72	2.51	3.87	4.45	5.46	5.95	6.86	7.70	8.12	8.88	9.19	9.16	9.05	8.85	8.47

TABLEAU XIX (suite 2.)

FK 18

w	5.82	6.02	6.56	8.12	8.95	10.13	10.93	11.50	12.04	12.49	13.22	13.90	14.24	14.78	14.96	16.18
w'	0	0.20	0.74	2.30	3.13	4.31	5.11	5.68	6.22	6.67	7.40	8.08	8.42	8.96	9.14	10.36
b _{1f}	20.14	20.25	20.79	22.21	22.85	23.93	24.64	25.28	25.67	26.06	26.79	27.26	27.16	27.22	27.19	27.21
b _{1f} ^{-b₁c}	0	0.11	0.65	2.07	2.71	3.79	4.50	5.14	5.53	5.92	6.65	7.12	7.02	7.08	7.05	7.07

BK 16

w	5.22	5.82	6.32	7.24	8.64	9.30	10.26	10.89	11.32	11.99	12.39	12.95	13.40	14.31	14.79
w'	0	0.60	1.10	2.02	3.42	4.08	5.04	5.67	6.10	6.77	7.17	7.73	8.18	9.09	9.57
b _{1f}	19.17	19.66	20.05	20.73	21.97	22.68	23.43	24.04	24.43	24.84	25.04	25.16	25.10	24.82	24.75
b _{1f} ^{-b₁c}	0	0.49	0.89	1.56	2.80	3.51	4.26	4.87	5.26	5.67	5.87	5.99	5.93	5.65	5.58

TABEAU XIX : Volumes fictifs de la kaolinite dans les mélanges à comportement non sableux - Energie E₂

* Résultats non retenus dans la corrélation, la teneur en eau étant supérieure à w¹ (suite et fin)

w	27.00	27.97	31.18	35.91	35.39	37.25
w'	0	0.97	4.18	6.91	8.39	10.25
b _{1f}	81.14	82.75	88.44	93.57	95.84	96.44
b _{1f-b_{1c}}	0	1.61	7.30	12.43	14.70	15.30

FK 73

w	20.46	23.43	25.61	26.37	27.80	31.94	33.83	34.80
w'	0.75	3.72	5.90	6.66	8.09	12.23	14.12	15.09
b _{1f}	66.28	70.38	73.08	74.77	77.73	79.58	79.41	79.30
b _{1f-b_{1c}}	1.22	5.31	8.02	9.70	12.67	14.52	14.35	14.24

FK 31

w	8.48	8.76	9.03	10.28	11.40	13.02	14.41	15.60	16.60	17.70
w'	0	0.28	0.55	1.80	2.92	4.54	5.93	7.12	8.12	9.22
b _{1f}	33.26	33.68	33.97	33.65	37.57	40.31	41.89	42.16	41.96	41.55
b _{1f-b_{1c}}	0	0.42	0.71	2.39	4.31	7.05	8.63	8.90	8.70	8.29

BK 26

w	6.91	7.26	10.41	11.84	12.26	13.50	14.70	15.58
w'	0	0.35	3.50	4.93	5.35	6.59	7.79	8.67
b _{1f}	28.29	28.73	32.55	34.52	35.16	35.54	35.53	35.18
b _{1f-b_{1c}}	0	0.43	4.26	6.23	6.86	7.25	7.24	6.89

TABLEAU XX : Caractéristiques de lubrification des argiles K₀ et M₀

Energie kJ/m ³	Kaolinite			Montm.
	590	2360	590	590
147.5	0.138	0.127	0.096	0.072
$\frac{\mu}{\lambda}$	0.274	0.229	0.160	0.152
$\frac{\mu}{\lambda} \cdot a \cdot \gamma_s^s$	0.344	0.260	0.189	0.172
γ_1^{oc}	1.26	1.14	1.18	1.13
$p = \frac{\mu}{\lambda} \cdot a \cdot \gamma_s^s$				

TABLEAU XXI : Volumes fictifs de la Montmorillonite dans les mélanges à comportement non sableux - Energie E₀

M₀

				FM 54							
w	38.00	48.71	56.27	61.47	w	21.00	21.29	23.31	25.55	29.35	33.57
w'	0	10.71	18.27	23.37	w'	0	0.29	2.31	4.55	8.35	12.57
b _{1f}	82.78	90.95	95.26	99.44	b _{1f}	55.45	56.05	58.16	60.36	64.37	67.70
b _{1f} ^{-b₁c}	0	8.17	12.47	16.65	b _{1f} ^{-b₁c}	0	0.60	2.71	4.91	8.92	12.25

				FM 37									
w	14.00	15.05	15.42	16.39	17.29	17.59	19.73	20.87	21.11	22.47	23.34	23.87	24.30
w'	0	1.05	1.42	2.39	3.29	3.59	5.73	6.87	7.11	8.47	9.34	9.87	10.30
b _{1f}	40.41	41.43	41.47	42.80	43.66	43.54	45.57	47.04	47.15	49.31	49.35	49.76	50.77
b _{1f} ^{-b₁c}	0	1.02	1.06	2.39	3.25	3.13	5.16	6.63	6.74	8.91	8.94	9.35	10.36

				FM 29									
w	11.30	11.68	11.98	12.20	13.00	14.05	14.06	14.10	14.28	14.66	15.50	15.56	16.49
w'	0	0.38	0.68	0.90	1.70	2.75	2.75	2.80	2.98	3.36	4.20	4.26	5.19
b _{1f}	33.47	33.80	33.71	34.25	34.97	36.12	35.37	35.75	36.25	36.64	36.75	37.68	38.10
b _{1f} ^{-b₁c}	0	0.33	0.24	0.78	1.50	2.65	1.90	2.28	2.78	3.18	3.28	4.21	4.63

w	16.56	16.62	16.71	16.93	17.10	18.39	18.79	20.32	21.01	21.96
w'	5.26	5.32	5.41	5.63	5.80	7.09	7.49	9.02	9.71	10.66
b _{1f}	38.36	38.59	38.21	38.63	38.63	39.81	40.73	41.62	42.88	43.56
b _{1f} ^{-b₁c}	4.89	5.12	4.74	5.16	5.16	6.34	7.26	8.15	9.41	10.09

TABLEAU XXI (suite et fin)

FM 23

w	8.80	9.25	10.06	10.46	11.85	12.94	13.52	13.68	14.25	14.84	15.95	17.22	18.00	18.38	19.46	20.54
w'	0	0.45	1.26	1.66	3.05	4.14	4.72	4.88	5.45	6.04	7.15	8.42	9.20	9.58	10.66	11.74
b _{1f}	27.83	28.19	28.90	29.53	30.61	31.37	31.81	32.08	32.64	33.30	34.37	35.35	36.02	36.68	37.22	37.47
b _{1f} ^c -b ₁	0	0.36	1.08	1.70	2.78	3.54	3.98	4.25	4.81	5.47	6.54	7.52	8.19	8.85	9.39	9.64

FM 19

w	7.50	7.60	8.34	9.36	10.01	10.81	11.35	13.28	13.76	14.36	15.55	17.21	18.33	18.75	19.18
w'	0	0.10	0.84	1.86	2.51	3.35	3.85	5.78	6.26	6.86	8.05	9.71	10.83	11.25	11.68
b _{1f}	23.66	23.77	24.38	25.04	25.64	26.40	26.86	27.91	28.56	29.01	29.91	31.39	32.03	32.22	32.54
b _{1f} ^c -b ₁	0	0.11	0.72	1.38	1.98	2.74	3.20	4.25	4.90	5.36	6.25	7.73	8.37	8.56	8.88

FM 11

w	4.00	7.28	8.91	10.44	12.00	12.91	15.13	16.36	17.41	19.10
w'	0	3.28	4.91	6.44	8.00	8.91	11.13	12.36	13.41	15.10
b _{1f}	13.39	14.51	15.19	15.87	16.57	17.10	18.22	18.81	19.11	19.07
b _{1f} ^c -b ₁	0	1.12	1.80	2.48	3.18	3.71	4.83	5.42	5.72	5.68

FM 9

w	3.60	3.92	5.00	6.98	7.48	8.23	8.76	9.60	11.08	11.91	13.14	14.15
w'	0	0.32	1.40	3.38	3.83	4.63	5.16	6.00	7.48	8.31	9.54	10.55
b _{1f}	11.92	12.00	12.36	12.99	13.19	13.46	13.64	14.01	14.52	14.82	15.32	15.84
b _{1f} ^c -b ₁	0	0.08	0.44	1.07	1.27	1.54	1.72	2.09	2.60	2.90	3.40	3.92

TABEAU XXII

Mélanges FM_i : coefficient g(A) et rapport S/A.

Echantillons	FM 9	FM 11	FM 19	FM 23	FM 29	FM 37	FM 54	M ₀
S/A	9.75	8.39	4.18	3.35	2.47	1.74	0.85	0
g(A)	0.365	0.424	0.766	0.898	0.961	0.996	1.049	0.698

TABEAU XXIII

Volumes fictifs de la fraction sable dans les mélanges sableux, avec kaolinite

FK 18

w'/A	0	1.08	4.04	12.62	17.18	23.66	28.06	31.19	34.15	36.63	40.64	44.37	46.24	49.21	50.20
b _{2f}	50.27	50.54	51.86	55.43	57.03	59.71	61.51	63.10	64.04	65.04	66.85	68.02	67.79	67.94	67.86
$\frac{b_{2f} - b_{2c}}{A}$	0	0.015	0.088	0.284	0.371	0.519	0.618	0.705	0.757	0.812	0.911	0.975	0.963	0.971	0.967

FK 12

w'/A	56.90	61.41	0	0.73	2.13	6.76	13.87	14.28	22.22	32.63	41.64	48.60	59.84	71.16	75.55
b _{2f}	67.91	67.35	53.22	53.46	54.08	55.12	57.08	57.30	59.14	61.73	63.88	65.26	67.63	70.22	70.88
$\frac{b_{2f} - b_2}{A}$	0.969	0.939	0	0.020	0.071	0.157	0.319	0.338	0.490	0.703	0.881	0.995	1.191	1.405	1.460

TABLEAU XXIII (Suite)

FK 10

w'/A	78.18	80.17	87.52	90.17	100.41	106.45	111.16	0	7.39	18.46	29.52	40.18	50.54	58.15	64.55
b_{2f}^c	71.03	71.30	71.23	71.07	71.32	71.15	70.60	54.24	55.86	57.85	60.30	62.61	64.06	65.52	66.79
$\frac{b_{2f}^c - b_2}{A}$	1.472	1.494	1.489	1.475	1.496	1.482	1.437	0	0.164	0.366	0.614	0.850	0.996	1.145	1.274
								FK 4							
w'/A	70.54	84.14	93.07	99.78	111.15	122.32	131.86	0	59.19	88.11	127.03	134.86	155.68	177.84	223.51
b_{2f}^c	67.79	69.80	71.28	72.33	73.78	74.83	75.28	56.85	61.17	63.07	65.15	65.54	66.37	67.24	69.71
$\frac{b_{2f}^c - b_2}{A}$	1.375	1.580	1.730	1.836	1.984	2.090	2.135	0	1.168	1.679	2.243	2.347	2.571	2.806	3.474
											FK 9				
w'/A	228.65	245.14	281.9	298.3	302.6	310.2	326.9	356.4	379.6	424.5	0	8.65	16.74	30.90	38.76
b_{2f}^c	69.78	71.01	71.92	73.55	73.55	75.84	75.41	76.57	78.42	78.64	54.54	56.36	57.87	60.52	61.96
$\frac{b_{2f}^c - b_2}{A}$	3.493	3.827	4.072	4.514	4.514	5.132	5.014	3.328	5.828	5.887	0	0.205	0.374	0.674	0.834
											BK 16				
w'/A	52.25	67.19	74.05	87.42	98.43	103.7	114.9	115.7	129.9	140.9	0	3.71	6.77	12.42	21.00
b_{2f}^c	64.02	65.87	66.84	68.76	70.37	71.44	73.02	73.02	74.39	75.66	54.22	55.59	56.74	58.64	62.15
$\frac{b_{2f}^c - b_2}{A}$	1.065	1.274	1.382	1.598	1.779	1.899	2.076	2.076	2.231	2.373	0	0.084	0.155	0.271	0.486
											BK 12				
w'/A	25.06	30.95	34.81	37.45	41.56	44.00	47.42	50.18	55.77	58.71	0	3.17	8.33	13.92	26.67
b_{2f}^c	64.14	66.27	68.00	69.08	70.24	70.80	71.14	70.99	70.23	69.98	55.82	57.21	58.55	60.17	63.94
$\frac{b_{2f}^c - b_2}{A}$	0.609	0.740	0.845	0.912	0.983	1.017	1.038	1.029	0.982	0.967	0	0.116	0.228	0.363	0.677

TABLEAU XIII (suite et fin)

BK 7

w'/A	34.25	43.50	49.92	55.17	65.00	68.08	77.75	83.17	0	26.62	40.56	56.34	73.66	82.11	95.63
b_{2f}^C	65.59	67.88	70.18	71.10	73.33	73.75	73.73	73.44	57.77	61.27	64.09	65.97	68.31	69.91	71.38
$\frac{b_{2f}^C - b_2^C}{A}$	0.814	1.005	1.197	1.273	1.459	1.494	1.493	1.468	0	0.494	0.891	1.155	1.485	1.710	1.917
w'/A	96.76	110.3	114.8	117.7	125.6	126.9	137.3	139.4	153.1	159.3	161.0	178.7	BK 6	0	7.27
b_{2f}^C	71.27	72.90	74.20	74.29	75.64	75.49	76.73	76.78	77.72	78.27	77.56	77.79	60.19	60.71	61.69
$\frac{b_{2f}^C - b_2^C}{A}$	1.902	2.131	2.315	2.328	2.518	2.497	2.671	2.678	2.810	2.888	2.787	2.821	0	0.095	0.272
w'/A	23.45	40.72	61.27	81.64	117.1	133.5	147.7	159.1	183.3	197.1	BK 3	19.12	28.24	50.29	69.71
b_{2f}^C	62.72	65.06	66.85	68.67	71.55	71.55	73.35	74.67	75.36	77.98	59.61	60.77	61.58	62.87	64.43
$\frac{b_{2f}^C - b_2^C}{A}$	0.461	0.886	1.210	1.542	2.065	2.393	2.633	2.759	3.235	3.407	0	0.340	0.579	0.959	1.417
w'/A	91.18	113.5	117.9	125.3	132.9	148.2	166.5	181.5	201.2	213.5	228.8	246.5	268.8	189.7	302.1
b_{2f}^C	65.84	67.51	67.66	68.11	68.36	69.08	69.73	70.70	71.54	72.38	73.05	74.04	75.37	76.66	77.24
$\frac{b_{2f}^C - b_2^C}{A}$	1.833	2.324	2.368	2.499	2.572	2.785	2.976	3.260	3.509	3.755	3.951	4.424	4.633	5.013	5.184
w'/A	w'/A														
b_{2f}^C	b_{2f}^C														
$\frac{b_{2f}^C - b_2^C}{A}$	$\frac{b_{2f}^C - b_2^C}{A}$														

TABIEAU XXIV

Volumes fictifs de la fraction sable dans les mélanges sableux, avec kaolinite

Energie E₁

$\frac{w'/A}{b_{2f}^c}$	FK 4	8.11	30.81	98.65	215.1	257.6	315.4	331.6	FK 12	0	8.76	26.36	30.41	44.63	54.38	65.62
$\frac{b_{2f}^c}{b_{2f} - b_2}$		56.09	57.55	62.35	67.71	70.37	73.58	74.65		49.38	51.76	56.94	57.39	60.63	63.22	65.48
$\frac{b_{2f}^c}{A}$		0	0.635	1.932	3.381	4.099	4.967	5.258		0	0.197	0.625	0.662	0.929	1.144	1.331
					FK 12											
		$\frac{w'/A}{b_{2f}^c}$	77.77	77.77	0	8.12	39.09	51.98		74.52	93.60	114.1	125.1	136.4		
		$\frac{b_{2f}^c}{b_{2f} - b_2}$	68.15	68.15	50.80	52.92	58.37	61.29		65.26	68.18	71.68	71.78	71.99		
		$\frac{b_{2f}^c}{A}$	1.551	1.551	0	0.215	0.769	1.065		1.468	1.765	2.120	2.130	2.151		

Energie E₂

$\frac{w'/A}{b_{2f}^c}$	FK 10	23.96	42.34	63.25	86.80	94.82	107.5	107.5	FK 12	0	6.36	11.24	15.21	16.03	20.50	25.21
$\frac{b_{2f}^c}{b_{2f} - b_2}$		62.78	66.02	69.29	73.78	74.67	74.45	74.45		56.10	58.34	59.58	60.70	60.81	61.96	62.82
$\frac{b_{2f}^c}{A}$		0	0.926	1.258	1.714	1.804	1.782	1.782		0	0.185	0.288	0.380	0.389	0.484	0.555
		$\frac{w'/A}{b_{2f}^c}$	36.28	36.28	36.28	46.69	61.40	71.65		75.87	88.43					
		$\frac{b_{2f}^c}{b_{2f} - b_2}$	65.51	65.51	65.51	67.64	70.67	72.50		72.70	72.70					
		$\frac{b_{2f}^c}{A}$	0.778	0.778	0.778	0.954	1.204	1.355		1.372	1.372					

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

=====

- ALBERRO J. - 1967 - Estudio de una correlacion entre pruebas de compactacion estatica y dinamica.
3^d Panamerican C.S.M.F.E. Venezuela Vol. II (p. 143)
- BISHOP A.W. - 1960 - The measurement of pore pressure in the triaxial test in Pore pressure and suction in soils.
(38 - 46) Butterworths London.
- BELLIER J. - 1968 - Contribution à l'étude de l'écroutissement d'un matériau cohérent - Mode de rupture - Application au problème du compactage des sols.
Doctorat de Spécialité (3^e cycle Mécanique des Solides, Mécanique des Sols) Grenoble.
- BODDAERT D. - 1976 - Etude du comportement mécanique d'un sol travaillé, soumis au roulage d'engins agricoles.
Mémoire de Fin d'Etude E.N.I.T.A. de Dijon. I.N.R.A. Avignon.
- CLEGG B. et PAUL M.J. - 1967 - The effect of compaction methods on the pore pore pressure in laboratory test specimens.
5th Australian C.S.M.F.E. (p. 49)
- CLERIN J. - 1973 - Compactage sur chemin oedométrique, avec et sans vibrations, de milieux pulvérulents.
Remarques sur les essais in situ.
Thèse Dr. Ing. Grenoble.
- DHAWAN C.L. et BAHRI J.C. - 1957 - Stable Density
Proc. 4th International C.S.M.F.E. London (1 : 149 - 152)
- FAURE A. - 1971 - Contribution à l'étude du mécanisme du compactage des sols.
Notion de potentiel du lubrification.
Ann. Agro 22(5) - (487 - 513)

- FAURE A. - 1974 - Des caractéristiques mécaniques de la fraction argileuse dans le mécanisme de tassements des sols.
C.R. Acad. Sc. , Serie D, t. 278, (1175 - 1178).
- FIES J.C. - 1971 - Recherche d'une interprétation texturale de la porosité des sols.
Ann. Agro. 22(6) - (655 - 685)
- FIES J.C. , HENIN S. et MONNIER G. - 1972 - Etudes de quelques lois régissant la porosité de matériaux meubles.
Ann. Agro. 23(6) - (621 - 653)
- GIULANI F. et ROBLEDO S. - 1963 - Nuevo metodo de analysis de compactation de suelos.
2 nd Panamerican C.S.M.F.E. Brazil Vol. II (p. 397)
- GRATON L.C. et FRASER H.J. - 1935 - Systematic packing of spheres with particular relations to porosity and permeability.
J. Geology 43 (785 - 909)
- GRIMALDI M. -1977 - Etudes en laboratoire du comportement au tassement du sol limoneux du Rheu (Ille et Vilaine)
Observations micromorphologiques.
D.E.A. présenté à l'E.N.S.A. de Rennes. I.N.R.A. Avignon-Rennes.
- HAINES W.B. - 1923 - The volume changes associated with variations of water content in soils.
J. Agr. Sc. 13 : (296 - 310)
- HORN H.M. et DEERE D.U. - 1962 - Frictional characteristics of minerals.
Geotechnique Decembre. (319 - 335)
- ILKER U. - 1969 - Ecrouissage et fragilité comparée de plusieurs argiles
Thèse Dr. Ing. Grenoble.
- JOHNSON A.W. et SALLBERG J.R. - 1962 - Factors influencing compaction results.
Highway Research Board Bulletin 319
- KOLMAYER R. - 1970 - Contribution à l'étude du compactage par vibration des matériaux meubles pulvérulents.
Thèse Dr. Ing, Grenoble.
- KUMBASAR V. et TOGROL E. - 1969 - Penetration resistance of compacted cohesive soils.
VII C.I.S.M.F.E. Mexico (p. 219)

- LAMBE T.W. - 1958 - The structure of compacted clay
Journal of the soil Mech. and Found. Div.
Proc. A.S.C.E. (SM 2) 1654 : (1 - 34)
- LE L. - 1968 - Contribution à l'étude des propriétés mécaniques des sols
sous fortes pressions.
Thèse Dr. Ing. Grenoble.
- Mc DOWELL C. - 1957 - Principles of controlled compaction
WASHO Proc. (128 - 149)
- Mc RAE J.L. et RUTLEDGE P.C. - 1952 - Laboratory kneading of soil to
simulate field compaction
HRB Proc. 31 (593 - 600)
- MADDISON L. - 1944 - Laboratory tests on the effect of stone content on the
compaction of soil mortar.
Roads and Road Construction (Ldn) 22 Feb. 1. (37 - 40)
- MANDEL J. - 1950 - Essai sur la mécanique physique des pseudo - solides
(terres, béton)
Annales des P. et Ch. Mai - Juin
- PAGEN Ch. A. et JAGANNATH B.N. - 1967 - Evaluation of soil compaction by
rheological techniques
HRR 177
- PELTIER R. - 1959 - Manuel du laboratoire routier
Dunod Ed. Paris.
- PIKE D.C. - 1972 - Compactability of graded aggregates 1. Standard
laboratory tests.
Transport and road research laboratory
TRRL Report LR 447
- PRAKASH S. et GUPTA M.K. - 1967 - Compaction of sand under vertical and
horizontal vibrations.
Conf. on Soil Engng Asia Bangkok.
- SCHON Ch. - 1966 - Contrôle du compactage des remblais et des assises de
chaussées.
Bull. Liaison Labo. P. et Ch. N° 17 Janv. Fév.

- SEED H.B. et CHAN C.K. - 1959 - Structure and strength characteristics of compacted clays.
Proc. A.S.C.E. (SM 5) - (85 - 128)
- SEED H.B. LUNDGREN R. et CHAN C.K. - 1954 - Effect of compaction method on stability and swell pressure of soils.
HRB Bull. 93 (33 - 48)
- SEED H.B. et MONISMITH C.L. - 1954 - Relationship between density and stability of subgrade soils
HRB Bull. 93 (16 - 32)
- SEED H.B. , WOODWARD R.J. et LUNDGREN R. - 1964 - Fundamental aspects of the Atterberg limits.
Journ. of the Soil Mech. and Found. Division
Proc. of the Am. Soc. of Civil Eng. (75 - 105)
- SKEMPTON A.W. et BJERRUM L. - 1957 - A contribution to the settlements analysis of foundations on saturated clay. Géotechnique.
- SOWERS G.G. et KENNEDY C.M. - 1954 - Effect of repeated load applications on soil compaction efficiency.
HRB Bull. 93 (61 - 64)
- STAPLE W.J. - 1975 - The influence of size distribution on the bulk density of uniformly packed glass particles.
Soil Sc. Soc. Am. Proc. 39 (3) - (404 - 408)
- SUBBARAO C. - 1972 - Compactage et mécanique des milieux continus.
Thèse Doc. Ing. Grenoble
- TERZAGHI K. et PECK R.B. - 1961 - Mécanique des sols appliquée.
Dunod Ed.
- TURNBULL W.J. et FOSTER C.R. - 1957 - Compaction of a graded crushed stones base Course.
Proc. 4th Intern. Conf. S.M.F.E. 2. (181 - 185)
- VOIGHT B. - 1973 - Correlation between Atterberg plasticity limits and residual shear strength of natural soils.
Géotechnique t 23,2. (265 - 267)

WILSON S.D. - 1950 - Small soil compaction apparatus duplicates field results closely.

Engineering News Record 145 : N° 18 (34 - 36) Nov. 2

YERAZUNIS S. and Al. - 1962 - Packing of binary mixtures of spheres and irregular particles.

Nature Vol. 195 (33 - 35)

YERAZUNIS S. and Al. - 1965 - Dense Random packing of binary mixtures of spheres.

Nature Vol. 207 (835 - 837)

ZEIGLER E.J. - 1948 - Effect of material retained on the No 4 sieve on the compaction test of soils.

HRB Proc., 28 (409 - 414)