



**HAL**  
open science

# Etude experimentale de la sensibilite au compactage de materiaux meubles en fonction de leur composition granulometrique

A. Faure, J.C. Fiès

► **To cite this version:**

A. Faure, J.C. Fiès. Etude experimentale de la sensibilite au compactage de materiaux meubles en fonction de leur composition granulometrique. *Annales Agronomiques*, 1972, 23 (3), pp.317-332. hal-02731634

**HAL Id: hal-02731634**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02731634>**

Submitted on 2 Jun 2020

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

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

ANC 27

*Ann. agron.*, 1972, **23** (3), 317-332.

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE  
DE LA SENSIBILITÉ AU COMPACTAGE  
DE MATÉRIAUX MEUBLES  
EN FONCTION DE LEUR COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE

A. FAURE et J.-C. FIÈS

*Station centrale d'Agronomie,  
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,  
78 - Versailles*

---

# ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA SENSIBILITÉ AU COMPACTAGE DE MATÉRIAUX MEUBLES EN FONCTION DE LEUR COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE

A. FAURE et J.-C. FIÈS

*Station centrale d'Agronomie,  
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,  
78 - Versailles*

---

## RÉSUMÉ

L'étude de la sensibilité des sols au compactage est abordée, au laboratoire, à l'aide de mélanges binaires d'argile (kaolinite) et de sables.

Chaque mélange a permis de réaliser deux types d'échantillons qui diffèrent par l'énergie mise en jeu au cours de leur préparation :

échantillons préparés par malaxage manuel,  
échantillons portés à l'optimum Proctor.

L'influence de ces deux traitements a été appréciée au niveau de la densité apparente sèche des échantillons et de la porosité d'arrangement des particules du squelette. Dans ce dernier cas, les données obtenues sont confrontées à celles calculées à l'aide d'un modèle théorique d'arrangement des particules constitutives des échantillons.

La comparaison de l'ensemble des résultats fait ressortir que, dans un matériau où la teneur en argile croît, la sensibilité au compactage, très marquée pour les mélanges pauvres en argile, décroît dans les échantillons moyennement argileux et disparaît pratiquement quand le matériau est riche en argile (35 p. 100).

La généralisation aux conditions de plein champ a été amorcée à l'occasion de chantiers de travaux publics conduits sur des terrains agricoles du Bassin parisien.

---

## INTRODUCTION

Les problèmes des relations entre la distribution granulométrique des sols et leur propriétés physiques ont été abordés dans un article précédent (HÉNIN *et al.*, 1970), au niveau de la porosité des matériaux meubles, cette propriété étant prise comme résultante globale de la disposition relative des particules au niveau des assemblages élémentaires. Ces assemblages élémentaires sont susceptibles, sous

l'effet de facteurs mécaniques, de subir des modifications plus ou moins marquées selon leurs textures et selon l'intensité des facteurs mis en jeu.

Au champ, les passages d'engins lourds sont à l'origine de contraintes s'exerçant sur le sol et, pour certains types de textures, les sols sablo-argileux par exemple, de telles actions peuvent leur conférer une compacité difficile à modifier par la suite.

Pour cette raison, nous avons amorcé une étude expérimentale du phénomène à l'aide d'échantillons fabriqués par mélange d'une argile et de particules grossières. Chaque mélange a alors subi deux traitements différents et indépendants faisant intervenir des énergies de grandeurs et d'origines totalement différentes, d'une part un compactage dynamique nécessitant un développant de 6 kg.cm/cm<sup>3</sup> et d'autre part un malaxage manuel relativement doux. Ces traitements aboutissent à la création d'un échantillon présentant une structure continue dont la porosité est essentiellement liée aux caractéristiques dimensionnelles des particules et à leur disposition relative (FIÈS, 1971).

L'influence de ces deux méthodes de compactage a été appréciée par la mesure des densités apparentes. Sur la base de ces mesures, des études antérieures ont mis en évidence :

— le rôle prépondérant tenu par l'argile au cours du compactage d'un échantillon qui se trouve dans un certain état d'humidité (FAURE, 1971) ;

— la possibilité de caractériser l'arrangement des particules du squelette par leur porosité matricielle (FIÈS, 1971). Nous rappelons que la porosité matricielle est définie comme étant le volume relatif laissé libre par le squelette.

## I. — CHOIX DU MATÉRIAU

Pour éliminer toute influence incontrôlable liée à la forme des grains du squelette et à la nature de l'argile nous avons préféré des sols artificiels à des sols naturels. Ces matériaux ont été fabriqués par mélange d'un sable et d'une argile dans des proportions variables et éventuellement choisies.

En fait nous avons utilisé deux familles de mélanges binaires. Elles contiennent toutes les deux la même argile : une kaolinite provenant d'un sol du Perche et rendue calcique après son extraction. Le squelette sableux de la première famille, appartenant au faciès des sables de Fontainebleau est constitué d'éléments fins, celui de la deuxième famille est un squelette grossier appelé Sable de Brou. Les granulométries de ces deux squelettes sont les suivantes :

	Fontainebleau (%)	Brou (%)
Limon fin . . . . .	—	0,4
Limon grossier. . . . .	0,15	2
Sable fin . . . . .	65,6	9
Sable grossier. . . . .	34,1	89

Chaque matériau obtenu par mélange est noté FK<sub>i</sub> ou BK<sub>i</sub> selon qu'il appartient à l'une ou à l'autre de ces familles. L'indice *i* permet de distinguer dans une même famille deux matériaux de teneurs en argile (A p. 100) différentes. La fabrication de chacun d'entre eux a été effectuée en laboratoire à partir des constituants initiaux mis dans les proportions voulues par mélange dans une auge avec un excès d'eau. Une fois la pâte rendue aussi homogène que possible, le matériau obtenu est séché à 105° puis broyé et tamisé à 2 mm.

## II. — DESCRIPTION DES TRAITEMENTS ET RÉSULTATS OBTENUS

### I. — Compactage dynamique

Ce compactage dynamique a été effectué selon les règles des essais Proctor utilisées en Travaux publics (PELTIER, 1959 ; TERZAGHI et PECK, 1961). Ces essais ont pour but de déterminer la densité apparente  $\gamma_d$  (définie par le rapport du poids sec sur le volume du matériau à l'état humide) lorsque le matériau est à une teneur en eau  $w$  p. 100 connue après compactage sous une énergie donnée. Pour tracer la courbe de variations de la densité apparente d'un mélange donné en fonction

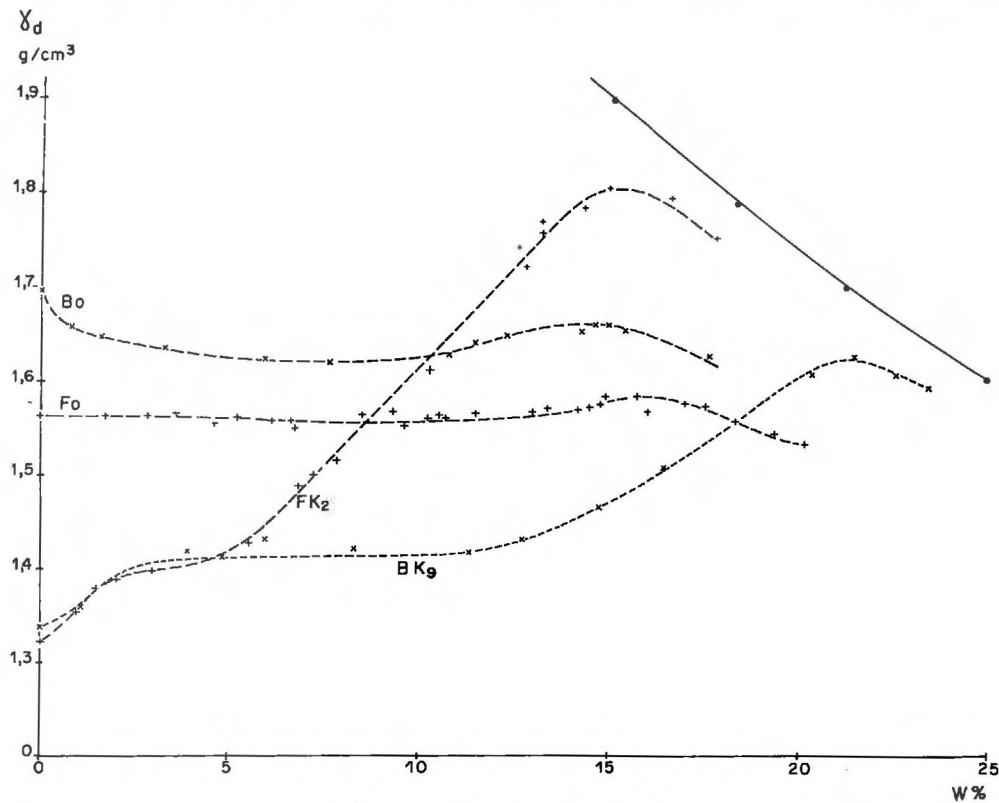


FIG. 1. — Compactage dynamique

de la teneur en eau (l'énergie utilisée étant toujours la même), chaque compactage a été effectué sur une nouvelle fraction de mélange. Nous étions ainsi assurés que la taille des agrégats initiaux était toujours la même. Le tracé de la courbe complète aurait nécessité une très grande quantité de matériau avec le moule standard dont le volume est de  $950\text{ cm}^3$  environ. Nous avons donc utilisé un moule plus petit, de diamètre  $70\text{ mm}$ , de hauteur  $78\text{ mm}$  donnant ainsi un volume de  $300\text{ cm}^3$ . Pour

TABLEAU I

*Caractéristiques des familles FK et BK*

Nom	A %	Compactage dynamique			Malaxage manuel			
		$\gamma_a$	$\gamma'_a$	$n'_{sq.}$	$H_e$	$\gamma'_a$	$n'_{sq.}$ obs.	$n'_{sq.}$ th.
F <sub>0</sub>	0	1,583	1,583	40,6	10,4	1,359	49	49
FK <sub>7</sub>	2	—	—	—	12,6	1,422	47,4	49
FK <sub>4</sub>	3,7	1,663	1,664	40,0	16	1,555	43,5	49
FK <sub>11</sub>	7,4	1,742	1,729	40,0	18,5	1,565	45,3	49
FK <sub>13</sub>	9,85	1,760	1,754	40,77	21	1,670	43,2	49
FK <sub>1</sub>	12,1	1,762	1,749	42,42	23,9	1,665	44,9	49
FK <sub>9</sub>	16,4	1,852	1,860	42,0	26	1,740	45,1	49
FK <sub>2</sub>	24	1,800	1,815	48,0	37,3	1,746	49,9	49
FK <sub>14</sub>	26,2	1,762	—	—	—	—	—	—
FK <sub>28</sub>	28	—	—	—	41,2	1,734	52,8	49
FK <sub>8</sub>	31,4	1,715	1,773	54,45	46,8	1,774	54,1	49
FK <sub>12</sub>	36,6	1,633	1,742	58,39	—	—	—	—
FK <sub>35</sub>	38	—	—	—	53	1,715	59,8	53,5
FK <sub>3</sub>	47,2	1,520	1,650	67,4	63,2	1,725	65,6	63
FK <sub>6</sub>	62	1,412	1,577	77,56	—	—	—	—
FK <sub>10</sub>	71	1,350	1,579	82,85	86,8	1,600	82,6	82,5
K <sub>0</sub>	100	1,150	1,404	100	122,5	1,429	100	100
B <sub>0</sub>	0	1,660	1,660	37,9	10,4	1,610	39,3	39,3
BK <sub>13</sub>	3,4	1,759	1,734	37,2	14,2	1,685	38,5	39,3
BK <sub>7</sub>	5,5	1,804	1,766	37,5	—	—	—	—
BK <sub>10</sub>	7,1	1,824	1,804	37,2	18,2	1,670	41,3	39,3
BK <sub>2</sub>	11,3	1,880	—	—	22,6	1,750	41,4	39,3
BK <sub>11</sub>	12,0	1,892	1,854	38,9	—	—	—	—
BK <sub>14</sub>	15,95	1,910	—	—	—	—	—	—
BK <sub>8</sub>	18,7	1,868	1,865	43,13	31,0	1,750	46,2	39,3
BK <sub>4</sub>	23,8	1,814	1,852	47,1	—	—	—	—
BK <sub>9</sub>	25,2	1,786	—	—	—	—	—	—
BK <sub>6</sub>	30,9	1,762	1,816	53,0	45,0	1,845	51,8	45,3
BK <sub>9</sub>	39,9	1,620	1,721	61,26	55,0	1,725	60,8	55,0
BK <sub>12</sub>	51,5	1,494	1,634	70,4	67,5	1,685	69,1	66,5

conserver l'énergie standard de  $6 \text{ kg} \cdot \text{cm}$  par  $\text{cm}^3$ , nous avons utilisé une dame de  $1 \text{ kg}$  dont la hauteur de chute est de  $20 \text{ cm}$ . L'échantillon est compacté en trois couches pour assurer une certaine homogénéité de la densité, à raison de 30 coups par couche.

La figure 1 donne quelques exemples de courbes de variations des densités des mélanges BK et FK dont le tableau 1 donne les caractéristiques granulométriques et les résultats que nous utiliserons par la suite. Ces courbes conduisent à plusieurs constatations :

1. La variation de la densité apparente pour tous les mélanges présente un coude aux faibles teneurs en eau. La teneur en eau correspondante augmente en fonction de la teneur en argile.

2. La densité apparente passe par une valeur maximale pour une teneur en eau caractéristique. Ce maximum, appelé « Optimum Proctor » dépend de la teneur en argile et de la nature du squelette utilisé. Il est vraisemblable qu'il dépend également des propriétés gonflantes de l'argile (FAURE, 1971).

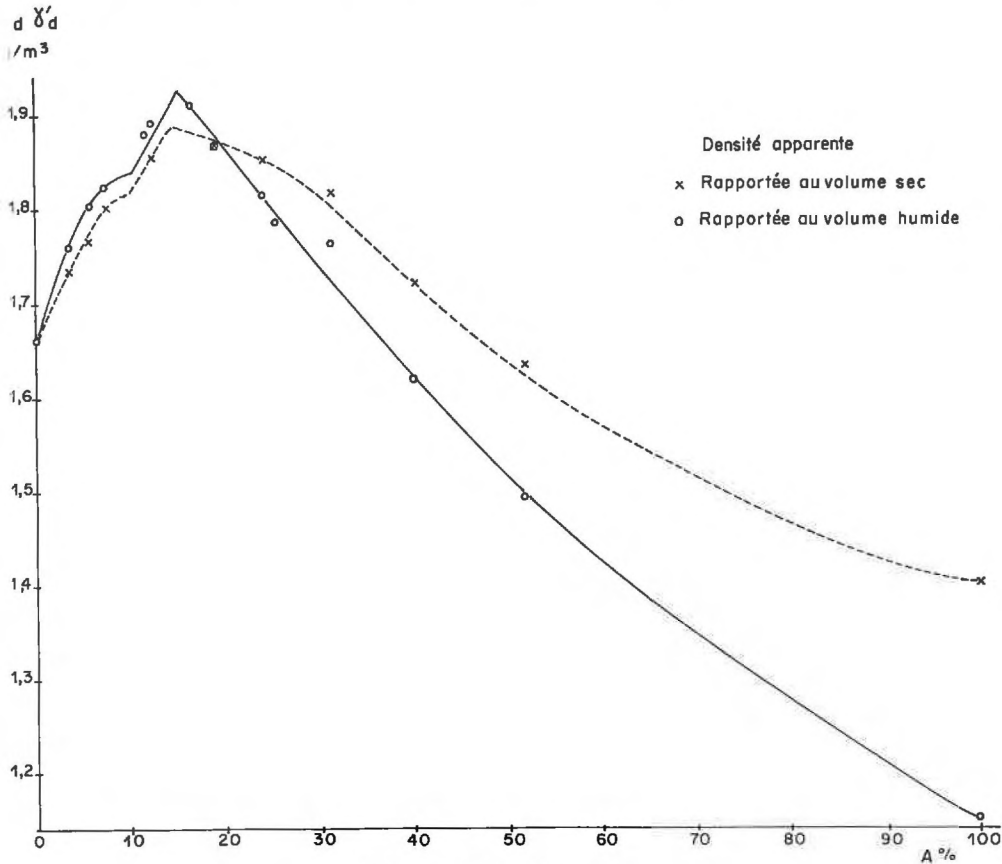


FIG. 2. — Compactage dynamique

Variation de la densité apparente famille FK

la courbe en trait plein est obtenue à partir des considérations théoriques; les points représentent les résultats expérimentaux.



3. Au-delà du maximum les courbes ont une allure hyperbolique. Le mélange en effet est de plus en plus saturé en eau, et la courbe de variation devient asymptotique à la courbe de saturation totale.

Si les faits mis en évidence dans l'alinéa 1 méritaient d'être soulignés, nous ne retiendrons cependant, pour la suite de cette étude, que les valeurs des densités apparentes maximales de chaque mélange. De ce fait nous nous plaçons dans des conditions extrêmes de compactage par rapport à celles obtenues par malaxage manuel.

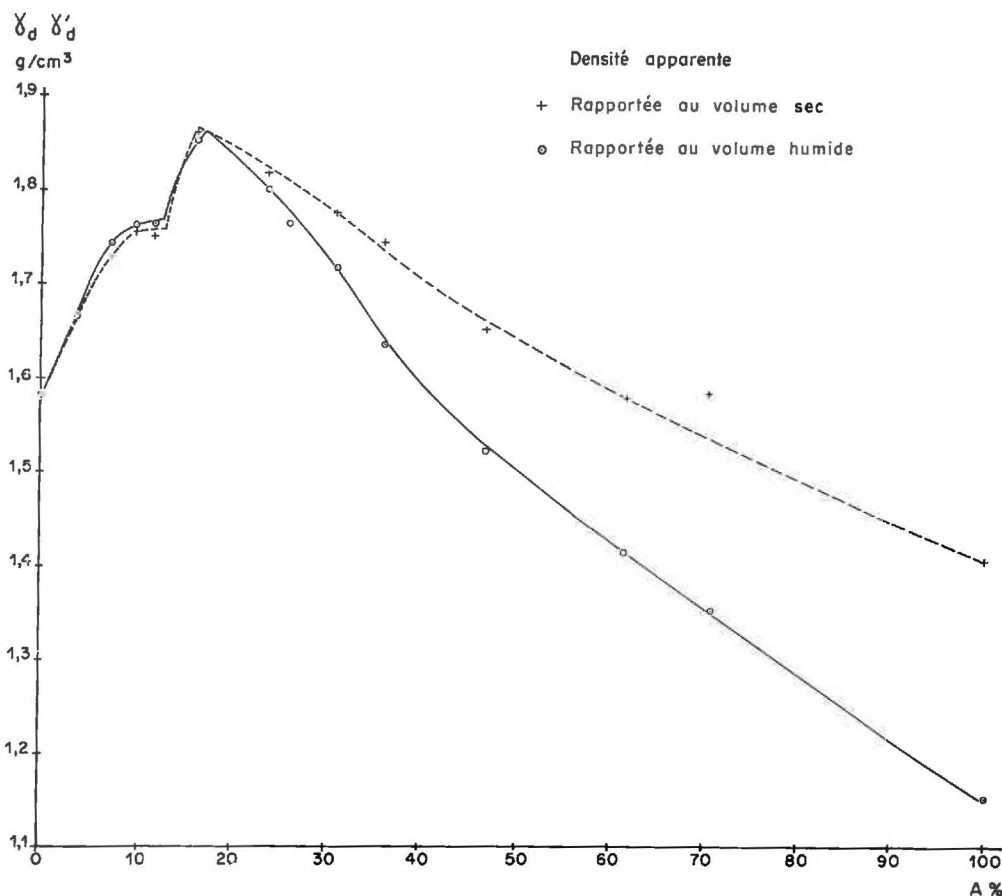


FIG. 3. — Compactage dynamique  
Variation de la densité apparente famille BK

La courbe en trait plein est obtenue à partir des considérations théoriques, les points représentent les résultats expérimentaux.

Une première étude (FAURE, 1971) nous a permis d'avancer quelques hypothèses sur le comportement des sols lorsqu'ils sont compactés selon cette technique Proctor. En effet les résultats obtenus en mesurant la densité apparente et la teneur en eau de mélanges binaires constitués d'un squelette donné et d'une argile (kaolinite) ont mis en évidence l'existence, dans l'échantillon, d'une eau qui n'a pu être absorbée par l'argile gonflée au maximum et que nous avons appelée « eau excédentaire ». Pour justifier la présence de cette eau dans l'échantillon, nous avons



considéré qu'elle était nécessaire pour favoriser l'arrangement des grains. Ce rôle donné à l'eau excédentaire nous a suggéré la notion de potentiel de lubrification dont la loi règne sur le mécanisme de compactage de tels mélanges.

Mais les résultats obtenus et la théorie avancée ne concernent que les échantillons à l'état humide. Afin de mieux comprendre le processus d'arrangement des particules constitutives du matériau, nous avons examiné les échantillons après leur séchage dans une étuve, à 105°. Nous en avons mesuré la densité apparente « sèche »  $\gamma'_d$  (poids sec rapporté au volume de l'échantillon à l'état sec) dont les valeurs numériques sont portées dans le tableau 1. Les figures 2 et 3 représentent les variations expérimentales de cette densité apparente  $\gamma'_d$  en fonction de la teneur en argile, pour les deux familles de mélanges. Sur ces mêmes graphiques nous avons porté les variations expérimentales et théoriques de la densité apparente rapportée au volume de l'échantillon à l'état humide ( $\gamma_d$ ) conformément aux hypothèses avancées au cours de notre précédente étude (FAURE, 1971). La comparaison des compacités de chaque mélange à deux états d'humidité bien distincts est ainsi plus immédiate.

Ces figures, ainsi que le tableau 1 montrent qu'une fois séchés, les échantillons gardent une trace des effets des trois types de lubrification que nous avons proposés. De ce fait nous retrouvons, pour les échantillons secs, les trois phases mises en évidence sur les échantillons humides.

## 2. — *Malaxage manuel*

Ce mode de traitement des mélanges a été emprunté au protocole mis au point par KHEYRABI et MONNIER (1968). Ce protocole précise que la condition nécessaire d'homogénéité du matériau est réalisée par malaxage à la main, avec une forte spatule, en présence d'une quantité d'eau optimale  $H_e$  p. 100 (tabl. 1) obtenue en multipliant par 1,9 l'humidité équivalente calculée par la formule de GRAS (1957). La durée du malaxage a été limitée à 10 mn pour éviter une trop grande dessiccation. La pâte obtenue a été ressuyée sur Büchner pendant cinq heures puis séchée à 105°.

Notons que pour ces conditions de préparation, les auteurs ont vérifié qu'un comportement aussi global que la stabilité structurale, appréciée sur des échantillons ainsi préparés, était analogue à celui du matériau prélevé sur place et ayant la même granulométrie. Ce résultat nous autorise à considérer le malaxage manuel comme reproduisant l'état naturel du sol en structure continue, en l'absence de toute contrainte autre que celle liée aux facteurs naturels.

Après pesée des échantillons séchés, la détermination du volume apparent sec des échantillons a nécessité leur imperméabilisation à l'aide d'un vernis. Celle-ci rend ainsi possible la mesure de la poussée d'Archimède qu'ils subissent lorsqu'ils sont plongés dans l'eau, l'irrégularité des formes présentées excluant toute mesure directe. Ces résultats nous ont permis de calculer les valeurs des densités apparentes sèches  $\gamma'_d$ .

Une première interprétation globale des mesures de densités peut être tentée au niveau de la disposition relative des constituants, en se référant à un modèle d'arrangement dont la théorie a été exposée antérieurement (HÉNIN, FRÈS et MONNIER, 1970). D'après ce modèle théorique basé sur l'hypothèse de la non perturba-

tion de la disposition des constituants d'une classe quand la seconde est introduite au cours d'un mélange, la porosité matricielle reste inchangée jusqu'à ce que l'argile introduite occupe avec sa porosité propre tous les espaces libres ménagés entre les grains du squelette. Au-delà de ce seuil, les échantillons présentent une phase argileuse continue. La porosité matricielle croît alors en fonction de la teneur en argile : un volume apparent d'argile se substituant à un même volume réel de squelette.

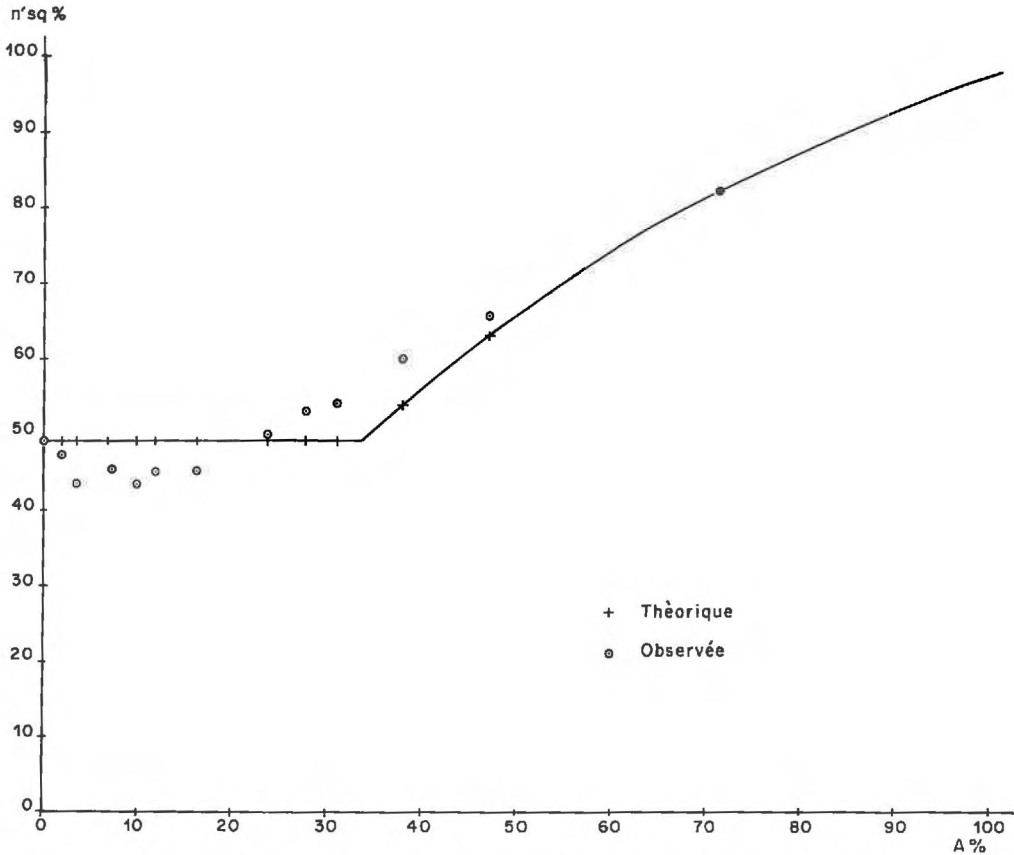


FIG. 4. — Variations théoriques et expérimentales de la porosité matricielle Échantillon FK, après séchage

La confrontation de cette hypothèse aux résultats expérimentaux obtenus sur des mélanges d'argiles et de squelettes variés a montré que l'introduction d'une phase argileuse conduit à une perturbation de l'arrangement des grains du squelette se traduisant en général par un accroissement de la porosité matricielle dès les faibles teneurs en argile. Plus précisément, pour les échantillons étudiés à sec, ce phénomène se manifeste dans un domaine de teneurs en argile s'étendant entre 5 p. 100 et 80 p. 100 environ. Ce fait expérimental a entraîné l'introduction dans le modèle d'un coefficient dit « coefficient de perturbation ». La recherche de la signification physique de ce coefficient a montré que la perturbation dans l'arran-

gement des particules est liée à une disposition préférentielle sur la surface des particules du squelette d'une partie de l'argile introduite dans les mélanges. Pour les teneurs en argile inférieures à 5 p. 100 ou supérieures à 80 p. 100 l'hypothèse d'arrangement proposée par le modèle paraît se vérifier et permet de conclure dans le premier cas à une localisation de l'argile entre les grains et dans le second cas à la réalisation d'une phase continue d'argile.

Nous avons reporté dans le tableau 1 les valeurs expérimentales obtenues et les données théoriques calculées que nous utiliserons par la suite : densité apparente sèche  $\gamma'_d$ , porosités matricielles  $n'_{sq}$ , observées et calculées.

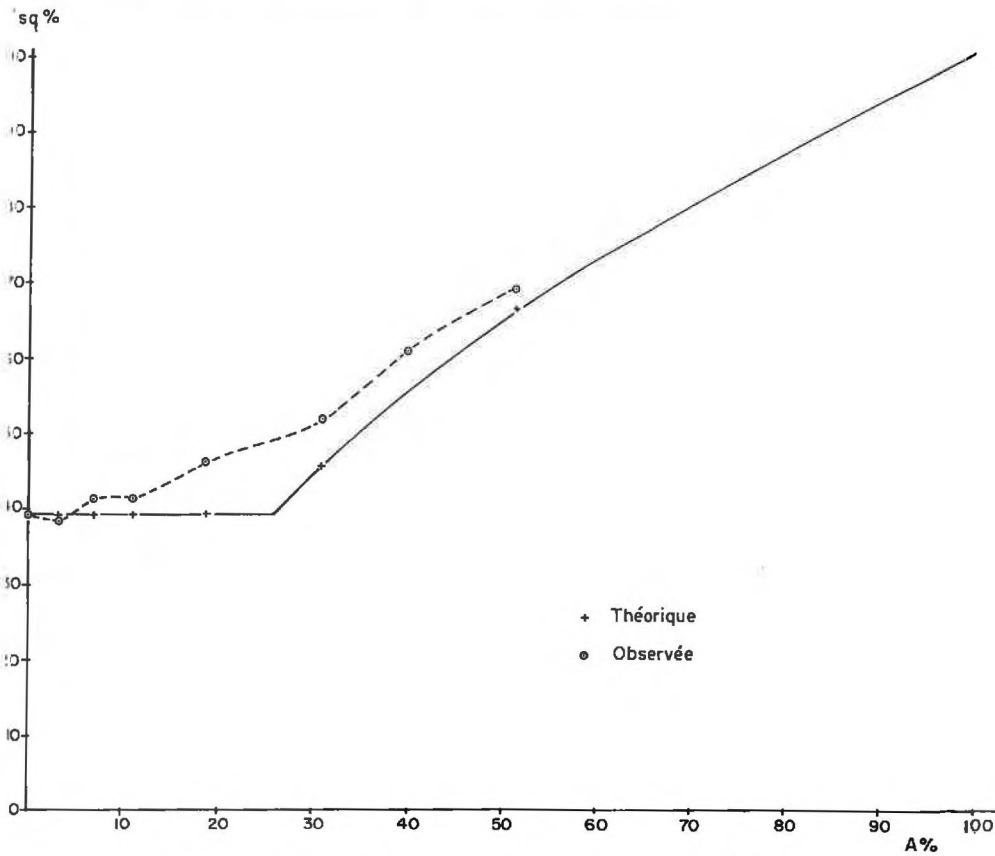


FIG. 5. — Variations théoriques et expérimentales de la porosité matricielle Échantillon BK, après séchage

Les figures 4 et 5 représentent les variations théoriques et expérimentales de la porosité matricielle des échantillons à l'état sec, en fonction de la teneur en argile pour les mélanges BK<sub>i</sub> et FK<sub>i</sub>.

Nous constatons que les échantillons de la famille BK se comportent comme l'ensemble des familles déjà étudiées. Pour une teneur en argile donnée supérieure à 5 p. 100, la porosité matricielle observée est toujours supérieure à la valeur calculée. Par contre, la famille FK présente pour des teneurs en argile inférieures à 20 p. 100, des porosités matricielles expérimentales inférieures aux valeurs théo-

riques et qui passent par un minimum. Au-delà de 20 p. 100, les valeurs observées deviennent supérieures aux valeurs calculées conformément au comportement général des mélanges binaires. Nous disposons dans cet intervalle d'un échantillon riche en argile (FK<sub>10</sub> à 71 p. 100 d'argile) qui nous permet de remarquer que les valeurs expérimentales de la porosité matricielle tendent à se rapprocher des valeurs théoriques et que nous sommes alors en présence d'une phase continue d'argile.

Le fait le plus marquant demeure la diminution de la porosité matricielle présentée par la famille FK. Ce fait suggère un réarrangement des particules du squelette vers un état plus compact que celui présenté par le squelette nu. Ceci ne paraît pas fondamentalement en contradiction avec le processus d'enrobage proposé. Cet enrobage éliminerait les forces de frottement s'opposant à la réalisation d'un arrangement serré. Ce dernier est sans doute lié aux caractéristiques granulométriques propres au squelette utilisé qui pourrait être lui-même considéré comme un mélange binaire de sables fin et grossier.

### III. — MISE EN COMMUN DES RÉSULTATS COMPARAISON DES COMPORTEMENTS

L'approche la plus immédiate pour comparer les comportements des échantillons soumis aux deux traitements précédemment décrits est de porter sur un même graphique (fig. 6) les valeurs des densités apparentes  $\gamma'_d$  des échan-

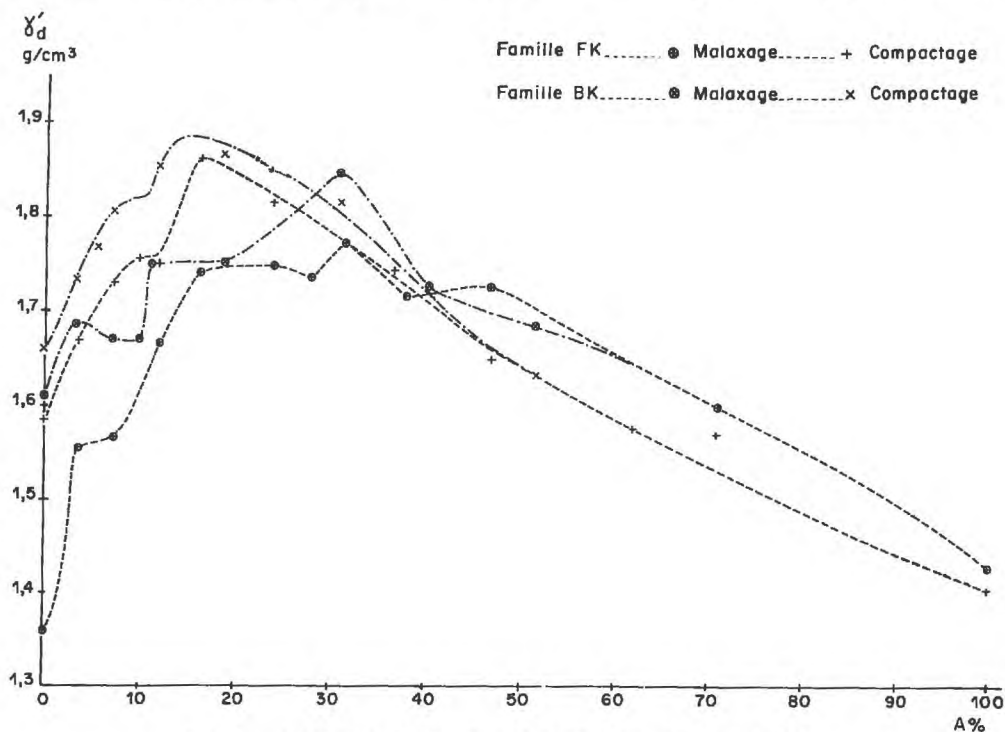


FIG. 6. — Variations des densités apparentes rapportées au volume sec

tillons une fois séchés. Le graphique met en évidence les trois points principaux suivants :

— aux teneurs en argile inférieures à 30 p. 100 environ, le compactage dynamique donne, comme une logique immédiate le laisserait prévoir, des valeurs des densités bien supérieures à celles obtenues avec l'autre traitement ;

— au-delà de 30 p. 100, il est remarquable de constater que les traitements ne se différencient plus et il apparaît même, lorsque la teneur en argile devient importante, que les valeurs les plus élevées de  $\gamma'_d$  sont obtenues après malaxage manuel.

En première approximation, cette différence peut être considérée comme systématique, bien qu'elle reste relativement faible, au-delà de 30 p. 100 d'argile. Elle semble pouvoir se rapporter au développement constaté, en raison de la taille de l'échantillon et de la technique de dessiccation, de fissures entraînant une surestimation de la valeur du volume apparent sec après compactage dynamique.

Compte tenu de cette remarque, la convergence entre les valeurs de  $\gamma'_d$  obtenues après les deux traitements sur l'argile pure (échantillon  $K_0$ ) démontre que les énergies mises en jeu restent inférieures à celles qui auraient pu entraîner un réarrangement des particules argileuses elles-mêmes.

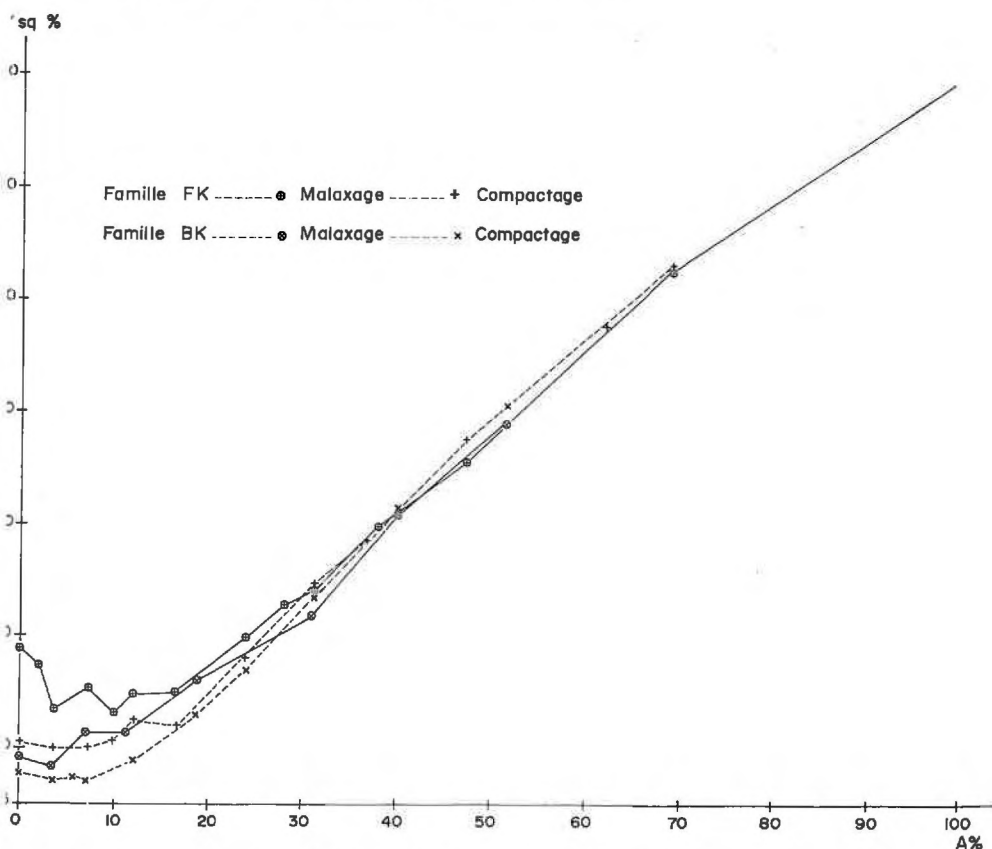


FIG. 7. — Évolution comparée des porosités matricielles des échantillons malaxés ou compactés

Pour faire une comparaison plus approfondie des comportements, nous avons préféré utiliser le paramètre porosité matricielle  $n'_{sq}$  des échantillons séchés. La figure 7 en traduit les variations en fonction des teneurs en argile, pour chaque traitement et pour chaque famille.

Ce graphique fait apparaître trois comportements distincts des mélanges.

1. — *Teneurs en argile inférieure à 18 p. 100 environ*

Dans ce cas les effets des deux traitements sont distincts, le compactage dynamique conduisant aux plus faibles valeurs de la porosité matricielle. Pour chacun de ces traitements les deux familles ont quantitativement des comportements différents, mais le classement des familles ne paraît pas lié aux méthodes de compactage : les porosités matricielles de la famille FK étant toujours supérieures à celles de la famille BK.

Alors que les valeurs des porosités matricielles des deux familles permettent de retrouver l'existence des deux premières phases de lubrification mises en évidence précédemment par compactage dynamique, nous pouvons constater qu'il est impossible d'affirmer que ces deux phases existent après malaxage manuel.

2. — *Teneurs en argile comprises entre 18 p. 100 et 35 p. 100 environ*

Si, dans ces domaines intermédiaires, les effets des traitements sont encore distincts, les familles ont perdu toutes les deux leur individualité. Le compactage dynamique est encore celui qui donne les porosités matricielles les plus faibles. Il apparaît que les variations de  $n'_{sq}$  sont proportionnelles aux valeurs des teneurs en argile.

3. — *Teneurs en argile supérieures à 35 p. 100 environ*

Ce dernier domaine est caractérisé par la tendance des deux traitements à aboutir à des valeurs de  $n'_{sq}$  très proches. Le compactage dynamique n'a donc pas plus d'effet que le malaxage manuel sur l'arrangement des grains du squelette. Nous constatons même, avec les échantillons FK<sub>3</sub>, FK<sub>6</sub> et BK<sub>12</sub>, que les porosités matricielles après compactage dynamique sont plus élevées que celles obtenues après malaxage manuel, ce qui traduit la manifestation, dans notre système de représentation, de la surestimation des valeurs des volumes apparents secs des échantillons compactés. Il nous est difficile d'affirmer, sur la vue de ces seuls résultats expérimentaux, que les variations de  $n'_{sq}$  sont linéaires, car nous devons tenir compte du fait que ces échantillons ont été préparés à l'état humide et qu'ils subissent donc les arrières-effets des phénomènes de lubrification qui se traduisent par une relation pseudo-hyperbolique (FAURE, 1971).

*Remarque.*

Le tableau 2 donne un ordre de grandeur des valeurs des porosités totales à l'état sec, présentées par les échantillons dans les trois domaines précédemment définis.

Ces résultats font clairement ressortir que la porosité totale, dans une famille de mélanges, est tout d'abord fonction de la proportion des constituants et que l'effet d'un compactage ne peut se révéler que par rapport à une valeur de référence des porosités. La nécessité du choix d'une référence souligne l'intérêt général de la mise au point du traitement par malaxage qui permet de définir une porosité texturale à partir de laquelle il est possible de situer les modifications physiques de l'état du sol.

TABLEAU 2

*Porosités totales des échantillons à l'état sec*

	A %	0	3,7	7,4	9,85	12,1	16,4	24	31,4	47,2	71	100
FK	Malaxage	49	41,2	40,6	36,4	36,5	32,9	32,6	31,2	31,1	35,7	41,2
	Compactage	40,6	37,4	34,5	33,5	33,6	29,1	30,5	31,7	35,3	36,6	42
BK	A %	0	3,4	7,1	11,3	18,7	30,9	39,9	51,5			
	Malaxage	39,3	36,1	36,5	33,2	32,8	28,4	32,4	33,4			
	Compactage	37,9	34,8	31,8		28,9	30,1	33,1	35,8			

## CONCLUSION

Le but poursuivi par cette étude est de mettre en évidence les effets de l'application de deux types de contraintes fort différents sur des modèles de sols constitués par des mélanges binaires d'argile et de squelette. Les premiers résultats obtenus ici à partir d'un choix limité à un seul type d'argile (kaolinite) et à deux squelettes sableux ont permis de décrire le comportement des échantillons en utilisant notamment le paramètre de porosité matricielle qui rend compte de façon globale de la disposition des grains du squelette.

Nous avons pu ainsi montrer qu'un matériau où la teneur en argile varie ne paraît pas également sensible aux effets d'un compactage dynamique. Par rapport à un malaxage manuel ce domaine de sensibilité semble ici se limiter aux teneurs en argile inférieures à 35 p. 100 environ, les effets les plus nets du compactage se manifestant entre 0 et 18 p. 100 d'argile. Au-delà du seuil de 35 p. 100, dans ce qu'il est commun d'appeler les terres argileuses, les différences entre les effets du compactage dynamique et ceux du malaxage manuel semblent peu perceptibles.

Une application pratique de ces premières considérations concerne l'estimation des dégâts consécutifs au passage dans une terre humide d'un véhicule lourde-



ment chargé et laissant derrière lui des ornières. Deux cas sont donc à considérer :

— s'il s'agit d'une terre argileuse, l'ornière, souvent profonde, est simplement la conséquence du déplacement du matériau lui-même sans compactage notable ;

— par contre, dans le cas de terres sablo-argileuses, l'ornière, même moins marquée, traduit une augmentation de la compacité du matériau.

L'ornière, parfois impressionnante, créée dans le premier cas entraînerait par un jugement trop hâtif des conclusions erronées. Les dégâts causés sont en fait plus importants dans le deuxième cas où les propriétés physiques du matériau, notamment sa porosité, ont été modifiées plus profondément. Une illustration nous en a été donnée par l'étude des modifications des densités apparentes sèches  $\gamma'_a$  déterminées sur une série d'échantillons à structure continue, prélevés entre 0 et 30 cm de profondeur, sur des chantiers de travaux publics installés en plein champ. Il convient de noter que les mesures ont été effectuées un an après la fin des travaux.

Le tableau 3 permet de comparer les résultats des échantillons prélevés hors chantier et sur chantier dans deux exemples de sols présentant des granulométries différentes.

TABLEAU 3

*Caractéristiques des sols in situ*

Parcelle I				Parcelle II			
Granulométrie (%)	Prof. de prélèvement (cm)	$\gamma'_a$		Granulométrie (%)	Prof. de prélèvement (cm)	$\gamma'_a$	
		HC *	C **			HC *	C **
0-2 $\mu$ 11	5-15	1,69	2,01	0-2 $\mu$ 57	0-20	1,78	1,81
2-20 $\mu$ 18				2-20 $\mu$ 23			
20-50 $\mu$ 27	15-25	1,69	1,95	20-50 $\mu$ 12	20-30	1,75	1,74
50-2 000 $\mu$ 43				50-2 000 $\mu$ 6			

\* Hors chantier.

\*\* Chantier.

Nous pouvons constater que les changements de compacité sont, conformément aux résultats obtenus à l'aide des familles FK et BK, plus marqués pour la parcelle I qui correspond à un sol sablo-argileux. Ces modifications n'ont pas un caractère temporaire et sont difficilement effacées malgré les façons culturales appropriées.

De telles vérifications *in situ* justifient largement les études entreprises au laboratoire sur l'aptitude au compactage des sols.

*Reçu pour publication en novembre 1971.*

## SUMMARY

EXPERIMENTAL STUDY OF THE COMPACTION SENSITIVITY  
OF LOOSE MATERIALS ACCORDING TO THE PARTICLE-SIZE DISTRIBUTION

A study of the compaction sensitivity of soils was carried out in the laboratory with a binary mixture of clay (kaolinite) and sands.

Each mixture provided two types of test portions that differed by the energy involved in the mixing process, as follows :

- i) hand-mixed ;
- ii) compacted to the Proctor's maximum.

The effect of both treatments was evaluated in all test portions by studying the variation of the dry apparent bulk density, with regard to the porosity distribution of the component particles.

On the other hand the experimental data have been compared with those obtained from the arrangement of particles according to an equivalent theoretical pattern.

The comparison of the test data shows that, as the clay content of a material increases, compaction sensitivity, which is high when clay content is low, decreases when it is intermediate and virtually disappears when high (35 p. 100).

This observation had been verified by the way of civil engineering works which were carried out in the field on agricultural land in the Parisian Basin.

## ZUSAMMENFASSUNG

EXPERIMENTALE UNTERSUCHUNG DER EMPFINDLICHKEIT  
ZUR VERDICHUNG VON KOCEREN ERDEN IN ABHÄNGIGKEIT  
IHRER GRANULOMETRISCHEN ZUSAMMENSETZUNG

Die Untersuchung der Empfindlichkeit der Böden zur Verdichtung wird im Laboratorium mit Hilfe von binären Mischungen aus Ton (Kaolinit) und Sand erörtert.

Jede Mischung gab zwei verschiedene Typen von Stichproben, die durch die im Laufe ihrer Herstellung eingesetzte Energie voneinander abweichen :

- Stichproben durch Handkneten hergestellt,
- Stichproben, die bis zum Optimum proctor gebracht wurden.

Des Einfluss diesser zwei Behandlungsarten wurde auf der Ebene der scheinbaren trockenen Dichte der Stichproben und der Anordnungsporosität der Skeletteilchen beurteilt. In diessem letzten Falle werden die erhaltenen Ergebnisse mit jenen gegenübergestellt, die mit Hilfe eines theoretischen Anordnungsmusters der Aufbauteilchen der Stichproben berechnet wurden.

Des Vergleich der gesamten Ergebnisse zeigt, dass in einem Boden mit wachsenden Tongehalt die Empfindlichkeit zur Verdichtung, welche für die Mischungen mit wenig Ton sehr markiert ist, in den mittelmässig tonigen Stichproben abnimmt und fast null wird, wenn der Boden reich an Ton ist (35 p. 100).

Aus Anlasse von Strassenbauten, die auf landwirtschaftlichen Gebieten des Pariser Beckens unternommen wurden, wird eine Verallgemeinerung diesdr Beobachtungen auf offenem Felde vorgenommen.

## РЕЗЮМЕ

Экспериментальное изучение чувствительности рыхлых материалов к уплотнению в зависимости от их гранулометрического состава.

А. ФОР, Ж. К. ФИЕС.

С помощью бинарных смесей глины (каолинит) и песка проведено было изучение, в лабораторных условиях, чувствительности почв к уплотнению.

Из каждой смеси получено было два типа образцов различавшихся энергией приложенной при их изготовлении :

- образцы полученные с помощью ручного разминания;
- образцы изготовленные при оптимальном значении проктора.

Влияние этих двух способов приготовления рассматривалось на уровне об'емного веса каждого образца и порозности расположения частиц скелета. В этом последнем случае, полученные данные сравнивались с данными, вычисленными при помощи теоритической модели расположения частиц составляющих образцов.

Сравнение всех результатов показывает что в материалах с увеличивающимся содержанием глины, чувствительность к уплотнению очень сильна для смесей со слабым содержанием глины, уменьшается в образцах средне-глинистых, и практически не существует, когда материал содержит 35 % глины. Обобщение в применении к поле вым условиям, предпринято на участках общественных работ проводящихся на сельскохозяйственных почвах Парижского Бассейна.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- FAURE A., 1971. Contribution à l'étude du mécanisme du compactage des sols. Notion de potentiel de lubrification. *Ann. agron.*, **22** (5), 487-513.
- FIÈS J. C., 1971. Recherche d'une interprétation texturale de la porosité des sols. *Ann. agron.*, **22** (6), 655-685.
- GRAS R., 1957. In *Le profil cultural*. Masson et C<sup>ie</sup>, Paris, 1969.
- HÉNIN S., FIÈS J.-C., MONNIER G., 1970. Étude théorique de la porosité des matériaux meubles en fonction de leur composition granulométrique. *C. R. Acad. Sci.*, **271**, 1960-1963.
- KHEYRABI D., MONNIER G., 1963. Étude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. agron.*, **19** (2), 129-152.
- PELTIER R., 1959. *Manuel du laboratoire routier*. Dunod, Paris.
- TERZAGHI K., PECK R. B., 1961. *Mécanique des sols appliqués*. Dunod, Paris.