



**HAL**  
open science

# Premiere contribution a l'etude des proprietes physiques et mecaniques particulieres des sols calcaires

N. Souty

► **To cite this version:**

N. Souty. Premiere contribution a l'etude des proprietes physiques et mecaniques particulieres des sols calcaires. Annales Agronomiques, 1978, 29 (5), pp.421-438. hal-02732226

**HAL Id: hal-02732226**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02732226v1>**

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.

44

## Première contribution à l'étude des propriétés physiques et mécaniques particulières de sols calcaires

Nicole SOUTY

avec la collaboration technique de Colette RODE

*Station de Science du Sol,  
Centre de Recherches d'Avignon, I. N. R. A.,  
84140 Monfavet*

---

### Résumé

Nous avons considéré une collection de sols calcaires de provenance variée et avons étudié leurs caractéristiques de constitution et quelques-unes de leurs propriétés liées à leur organisation : capacité d'échange, humidité équivalente, porosité texturale et sensibilité au compactage. Les résultats des analyses granulométriques sans et avec décarbonatation et l'interprétation de l'interaction matière organique-phyllite permettent de conclure que le carbonate de calcium fin semble être la meilleure caractéristique constitutive de l'effet calcaire.

Pour les propriétés, nous avons trouvé que la capacité d'échange diminue avec une augmentation de calcaire fin ; la valeur de l'humidité équivalente peut être exprimée par une relation tenant compte de la constitution carbonatée de la fraction  $< 2 \mu$  et la porosité augmente avec la teneur en calcaire fin.

Sous l'influence de facteurs mécaniques, l'assemblage élémentaire peut subir des modifications et la teneur en eau de la phyllite au point singulier de la courbe de sensibilité au compactage est, elle aussi, fonction de la teneur en calcaire fin. Le rôle essentiel du calcaire fin est ainsi mis en évidence.

---

### Introduction

D'après Pédro (1972), les affleurements rocheux contenant du carbonate de calcium occupent près de 10 p. 100 de la surface du globe terrestre. Même si l'on tient compte de l'existence de sols totalement décarbonatés développés sur roche calcaire, on doit donc admettre l'importance générale des sols calcaires, importance encore accrue dans certaines régions du globe telles que le pourtour de la Méditerranée et singulièrement, le Sud-Est de la France.

Malgré cela, on dispose de relativement peu d'informations spécifiques sur les propriétés physiques et mécaniques des matériaux calcaires bien que certains travaux montrent qu'ils peuvent avoir des comportements particuliers.

Les différences observées portent notamment :

- sur la dynamique et l'influence des matières organiques (Monnier, 1965) sur les propriétés physiques,
- sur les caractéristiques hydriques (Chiaverini, 1976),

- sur la porosité texturale fréquemment anormalement élevée (Guérif, 1974),
- sur les caractéristiques mécaniques, notamment l'entrée en plasticité (Faure, 1976).

D'un point de vue méthodologique, l'utilisation classique des données de l'analyse granulométrique pour caractériser le matériau constitutif d'un sol et tenter d'en prévoir les propriétés et comportements est délicate dans le cas des sols calcaires pour lesquels la notion de granulométrie est en effet particulièrement complexe :

— En premier lieu, on ne peut plus se baser sur une correspondance, au moins approximative, entre classes granulométriques et constitution minéralogique — qui est la règle générale à quelques exceptions près (terres de Boulbène — Marty, 1969) pour les matériaux non calcaires. En particulier, la classe granulométrique  $< 2 \mu$  n'est plus assimilable au groupe minéralogique des phyllites mais peut contenir des quantités variables et parfois importantes de calcite très divisée.

— En second lieu, la stabilité de la distribution granulométrique n'est pas assurée. Bien que peu soluble, le carbonate de calcium peut passer en solution ou précipiter suivant la pression partielle de  $\text{CO}_2$  dans le sol. Les variations des conditions physicochimiques prévalant dans le sol sont donc susceptibles d'entraîner des modifications de granulométrie dans la mesure où le carbonate de calcium peut, selon les cas, cimenter ou libérer des particules élémentaires définies par un type donné d'analyse granulométrique. D'autre part, la granulométrie même des fractions carbonatées après broyage est très hétérogène comme on peut le constater au scanning en observant les diverses populations de limons et sables calcaires (ce qui est différent dans le cas des quartz) ; de plus, ce broyage éloigne l'analyse « laboratoire » des données « terrain ».

\* \* \*

En tenant compte des considérations précédentes, nous nous sommes proposés, à partir d'une collection de trente matériaux issus de sols calcaires, de rechercher des paramètres spécifiques de constitution permettant de rendre compte d'une série de propriétés physicochimiques et physiques susceptibles d'être influencées par leur constituant minéralogique caractéristique.

Dans une première étape qui fait l'objet de ce mémoire, nous avons utilisé essentiellement une approche statistique destinée à mettre à jour les recherches les plus importantes à entreprendre au niveau des mécanismes. Elle a consisté à tester la validité des modèles d'ajustement efficaces en l'absence de calcaire et aussi à introduire de nouveaux paramètres traduisant l'influence supposée de telle ou telle caractéristique de la constitution granulométrique et minéralogique des sols étudiés.

Après avoir présenté la collection de matériaux, support de l'étude, nous analyserons leur constitution que nous essayerons de relier à un ensemble de propriétés dépendant plus ou moins étroitement de l'organisation en assemblage des particules dites élémentaires.

## I. — Matériaux calcaires étudiés

Compte tenu des objectifs et de la méthode retenue, nous nous sommes efforcés d'atteindre une variabilité suffisante quant à l'origine et la constitution des matériaux

étudiés, sans pour autant viser une représentativité illusoire d'une famille de constitutions et d'évolutions pédogénétiques aussi diverses.

### *Origine des matériaux*

Dans cet ensemble de ce fait quelque peu disparate, nous avons retenu quelques sous-ensembles regroupant chacun des matériaux d'origines similaires, ne se distinguant les uns des autres que par des aspects quantitatifs de leur constitution.

La collection se trouve composée des matériaux suivants :

- sols sur dépôts fluviaux et palustres de la glaciation wurmienne (Paluds de Vaucluse),
- sols sur alluvions limoneuses de Vitrolles (Bouches-du-Rhône),
- sols bruns calcaires des plateaux de Bourgogne,
- sols sur roche mère d'origine détritique : poudingues de Riez et de Valensole,
- sols sur roche mère calcaire : éboulis stabilisés,
- sols de Rendzine sur craie de la Marne,
- sol alluvial calcaire hydromorphe (dit « Bouchot » de Charente).

### *Caractéristiques générales de constitution*

Les résultats obtenus par Guérif (1974) suggèrent que la spécificité de comportement physique des sols calcaires n'apparaît clairement que pour des teneurs en calcaire total supérieures à 40 p. 100, aussi avons-nous choisi les matériaux étudiés dans une gamme de teneur en  $\text{CaCO}_3$  élevée puisqu'allant de 34,4 à 93,4 p. 100.

Une représentation synoptique de leur constitution figure sur le diagramme triangulaire de texture simplifié de la figure 1.

Sous les réserves imposées par le mode d'obtention de ces résultats (cf. ci-après la méthode d'analyse granulométrique utilisée), ce diagramme permet d'apprécier la diversité de la granulométrie, simultanément à la nature minéralogique de l'échantillon des matériaux étudiés.

Si l'on considère les matériaux non décarbonatés, on constate que, malgré la diversité recherchée de leur origine, ils n'apparaissent, pour la grande majorité d'entre eux, que dans une plage limitée du triangle de texture correspondant en gros aux classes limoneuse et limono-argileuse de la classification proposée par le GEPPA\*.

La granulométrie des constituants non calcaires (obtenue après décarbonatation des matériaux) est très différente. A un très petit nombre d'exception près, elle s'étire dans la gamme des textures argileuses (des argiles limoneuses aux argiles lourdes) et peut être en outre caractérisée par la faiblesse des taux de sables fins et grossiers.

Enfin, les particules calcaires dont la granulométrie a été obtenue par référence aux deux précédentes apparaissent fortement limoneuses et présentent des taux relatifs de calcaire inférieur à 2  $\mu$  variant de 0 à près de 30 p. 100.

Ce diagramme fait en outre clairement apparaître le problème, évoqué en introduction, de la granulométrie des sols calcaires dont l'interprétation devra tenir compte de propriétés liées aux interactions dimension-nature minéralogique.

\* GEPPA : Groupe d'Etudes des Problèmes de Pédologie Appliquée.

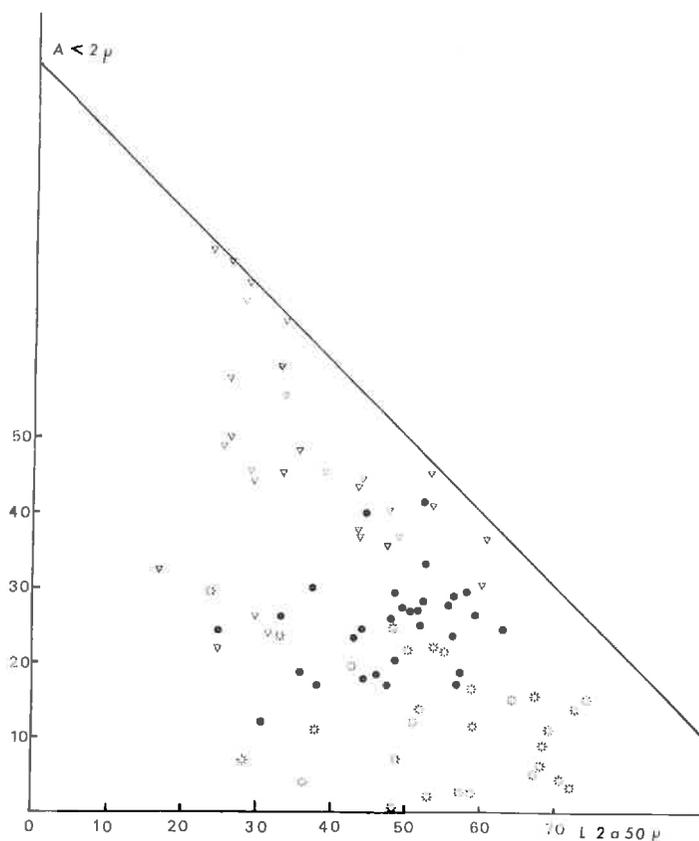


FIG. 1. — Constitution des sols — Soils constitution

- { Granulométrie du matériau non décarbonaté.  
Particles size of natural samples.
- ▽ { Granulométrie de la fraction non calcaire.  
Particles size of decarbonated samples.
- ⚙ { Granulométrie de la fraction calcaire.  
Particles size of calcareous particles.

## II. — Méthodologie : analyse granulométrique et dosage de la matière organique

Après destruction des matières organiques à l'eau oxygénée 20 volumes, les échantillons (10 g de terre) ont été traités par une solution 0,1 N de KCl, lavés par centrifugation puis dispersés en présence d'hexamétaphosphate de sodium.

La séparation a été assurée par sédimentométrie à la pipette de Robinson pour les particules d'un diamètre équivalent ou inférieur à 20  $\mu$  et par tamisage pour les particules plus grossières.

Ce même traitement a été appliqué aux échantillons non prétraités et aux échantillons préalablement soumis à une décarbonation complète.

Dans les deux cas, les résultats sont rapportés à la terre totale séchée à 105° non décarbonatée. Les taux des différentes fractions granulométriques (A, Lf, Lg, Sf, Sg) portent en indice la lettre « G », dans le cas de la granulométrie effectuée sur la terre totale, qui est une granulométrie globale, et la lettre « v » pour les résultats obtenus après décarbonatation : c'est-à-dire pour les particules individualisées au vrai sens du terme.

Nous avons établi la répartition granulométrique du calcaire par différence entre les taux obtenus pour chaque fraction avec et sans décarbonatation préalable ( $\text{CaCO}_3 < 2\mu \text{ p. } 100 = A_G - A_v$ , par exemple).

Cette méthode est théoriquement critiquable (Dupuis, 1975). L'analyse granulométrique sans décarbonatation préalable peut en effet isoler des particules complexes constituées par un assemblage de particules plus fines (calcite, quartz, phyllite...) agrégées de façon stable par un ciment calcaire.

Lors de la décarbonatation, ces particules sont libérées en particules élémentaires. Lorsque de telles particules complexes existent, il peut y avoir sous estimation de la teneur en carbonates des fractions fines et, au contraire, surestimation de cette teneur dans toutes les classes granulométriques où figuraient initialement des particules complexes à constituants élémentaires non calcaires.

Pour éviter de telles erreurs, la meilleure méthode consiste à doser directement le calcaire (par titrimétrie ou conductimétrie du  $\text{CO}_2$  issu de la décarbonatation) sur chaque fraction préalablement préparée en quantité suffisante. Une telle méthode est laborieuse et non dépourvue de risques d'erreurs analytiques.

Aussi, nous sommes-nous bornés à vérifier que la méthode d'évaluation par différence, comparée au dosage direct sur fraction, pratiqué à titre d'essai sur quelques échantillons (tabl. 1), n'entraînait pas de distorsion sensible (« Bouchot » de Charente — 1<sup>re</sup> ligne — et Paluds de Vaucluse).

TABLEAU 1

Quelques teneurs en carbonate de calcium des différentes classes granulométriques : comparaison de deux méthodes d'obtention.

Amounts of calcium carbonate in the separated fractions : comparison between two obtention methods

$\text{CaCO}_3 < 2\mu \%$ par		$\text{CaCO}_3 2-20 \mu$ par		$\text{CaCO}_3 20-50 \mu$ par		$\text{CaCO}_3 50-200 \mu$ par		$\text{CaCO}_3 200 \mu-2 \text{ mm}$ par		$\text{CaCO}_3$ total par	
Diffé- rence	Dosage direct	Diffé- rence	Dosage direct	Diffé- rence	Dosage direct	Diffé- rence	Dosage direct	Diffé- rence	Dosage direct	$\Sigma$ Diffé- rence	$\Sigma$ Dosage
24	15,6	21,6	23	13,1	14	12,8	13,8	24,2	24,5	95,7	90,9
17,4	13	32,4	33,5	17,2	18,1	13,8	13,1	10,5	12,5	91,3	90,2
6,8	5	15,5	20	7,5	7,1	3,3	3,4	2,3	2,9	35,4	38,4
12,3	12	28,8	28	15,9	16,2	13,9	15,3	13,9	15,9	84,8	87,4
13,3	11,8	31,3	28,3	14,4	14,1	12,8	15,3	13,2	14,6	85	84,1
7,3	7,5	18	19,3	18,1	18,3	9,1	9,4	2,4	4,1	54,9	58,6
12,1	11,2	15,2	17,5	14	14,7	6,3	8,4	1,7	2,8	49,3	54,6
6,4	6,3	3,9	6,3	4,7	9	5,2	8,4	18	19,7	38,2	49,7

Par ailleurs, des diagrammes RX sur les fractions limoneuses et sableuses décarbonatées des quelques sols de Paluds révèlent l'absence de phyllite dans ces assemblages.

A côté de ce problème, subsiste celui posé par la dispersion, préalable à la granulométrie, des matériaux non décarbonatés, notamment lorsqu'elle a été réalisée à l'hexamétaphosphate de sodium.

Différents auteurs (Mehrotra et Dhar, 1949 ; Tyner, 1940) se sont efforcés d'analyser les conséquences des réactions entre l'hexamétaphosphate et le carbonate de calcium sur les résultats de l'analyse granulométrique. Globalement, il ressort de ces travaux que le risque prédominant est celui d'une légère surestimation des fractions fines. En conséquence, on doit considérer que, dans les matériaux calcaires, la notion de particule élémentaire n'a fréquemment qu'une valeur relative. L'analyse granulométrique prend alors la signification d'un test permettant des comparaisons dont le caractère approximatif doit rester présent à l'esprit.

Les matières organiques libres et liées sont dosées par détermination du pouvoir réducteur du sol selon la méthode de Anne (1945), la présence de carbonate de calcium rendant en effet imprécises les méthodes par combustion (emploi du carmohographe par exemple).

### III. — Caractéristiques de constitution

L'analyse granulométrique sans décarbonatation ne fournit pas directement de données intéressantes. Il est cependant curieux de constater que les résultats de Banin et Amiel (1970) sur sols d'Israël, de Gheyi, Frankart et Van Bladel (1974) sur sols du Maroc et nos propres résultats montrent qu'il existe une corrélation linéaire négative assez étroite entre taux d'argile  $< 2 \mu$  et taux de sables  $2 \mu$  à  $2 \text{ mm}$ , et que le coefficient de proportionnalité est dans les 3 cas très voisin de  $-1$ . Ainsi la présence des limons fins ( $L_{fG}$ ) en quantité sensiblement identique dans les sols calcaires pourrait être un phénomène général.

Par ailleurs, les données de l'analyse granulométrique après décarbonatation permettent de trouver une corrélation négative satisfaisante entre les limons fins ( $2 \mu$  à  $20 \mu$ ) vrais  $L_{fV}$  et le calcaire total de l'échantillon. Ce dernier résultat nous incite à rechercher en fonction du calcaire total des indications de la part des teneurs « calcaires » obtenus par différences ( $A_G - A_V$ ), ( $L_{fG} - L_V$ ) etc... ; pour cela, non seulement la répartition granulométrique du carbonate de calcium est intéressante mais aussi les teneurs en carbonate de calcium des différentes fractions granulométriques, à savoir :

$$\frac{\text{CaCO}_3 < 2 \mu}{A_G}, \frac{\text{CaCO}_3 2-20 \mu}{L_{fG}} \dots$$

Mais l'important, à partir des résultats de calculs statistiques effectués, est de savoir quels sont les paramètres de constitution indépendants. Sur les trente échantillons de notre collection, nous avons trouvé que les variables dépendant assez étroitement du calcaire total sont d'une part,  $\text{CaCO}_3 < 2 \mu$  ( $r = 0,8$ ) et d'autre part,

$$\frac{\text{CaCO}_3 < 2 \mu}{A_G} (r = 0,815), \frac{\text{CaCO}_3 2-20 \mu}{L_{fG}} (r = 0,812) \text{ et } \frac{\text{CaCO}_3 20 \mu-2 \text{ mm}}{S 20 \mu-2 \text{ mm}} (0,9).$$

Dans la suite de ce travail, nous éviterons donc de faire intervenir simultanément ces 4 paramètres et le calcaire total. Par ailleurs, les coefficients de proportionnalité

relatifs à  $\frac{\text{CaCO}_3 < 2 \mu}{A_G}$  (1,37) et  $\frac{\text{CaCO}_3 20 \mu-2 \text{ mm}}{S_G}$  (0,77) montrent que c'est le taux de calcaire fin dans l'argile granulométrique qui admet la plus large gamme de variations. Ce constituant calcaire fin apparaît d'ores et déjà devant jouer un rôle particulier dans notre étude.

L'importance du paramètre calcaire fin est mise aussi en évidence lorsque nous voulons interpréter la MO d'un sol contenant du calcaire en terme de comportement. Habituellement, pour tenir compte de l'interaction existant au niveau colloïde d'un sol entre MO et argile au cours de la formation des complexes argilo-humiques, les auteurs (Kheyrahi et Monnier, 1968) considèrent le rapport  $\frac{\text{MO}}{\text{argile}}$ . Dans le cas de la collection étudiée, en éliminant toutefois les échantillons de Vitrolles qui, étant des sous-sols, doivent posséder une MO peu mobile, c'est seulement entre  $\frac{\text{MO}}{A_V}$  et  $\text{CaCO}_3 < 2 \mu$  que nous obtenons la meilleure corrélation ( $r = 0,91$ ) (fig. 2).

$$\frac{\text{MO}}{A_V} \times 100 = 1,9 \text{ CaCO}_3 (< 2 \mu) + 6,2 .$$

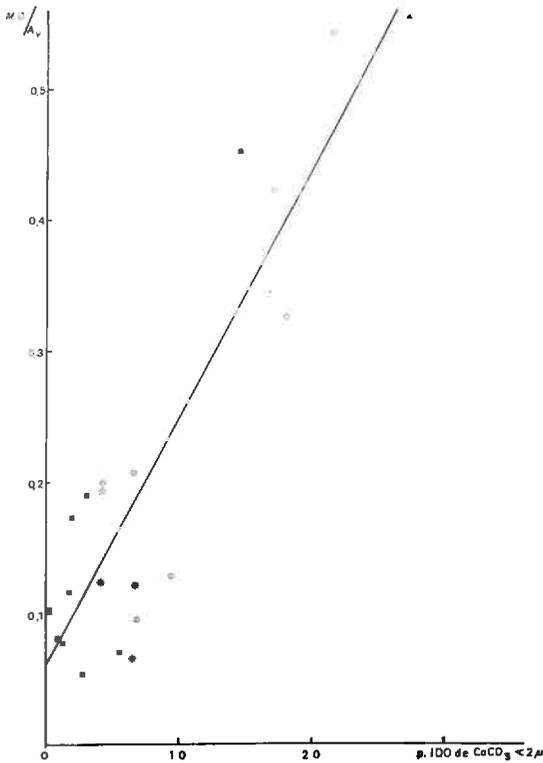


FIG. 2.\* — Relation  $\frac{\text{MO}}{A_V}$  et calcaire fin.

Relationship between  $\frac{\text{organic matter}}{\text{non calcareous clay}}$  and  $\text{CaCO}_3 < 2 \mu$  content

\* (Dans toutes les figures, les sols d'une même région sont représentés par le même signe) (In all the figures, the soils of the same country are represented by the same sign).

Nous remarquons qu'à teneur en phyllite constante, la teneur en matières organiques croît avec celle du calcaire fin. Ce résultat est à rapprocher de celui obtenu par Chouliaras (1976) sur des rendzines.

En effet, il montre qu'une part très importante du carbone lié est bloquée par du carbonate. Sous l'action du  $\text{CO}_2$  dégagé lors de la biodégradation de la MO du milieu, il y a attaque du  $\text{CaCO}_3$  présent et formation d'ions  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{HCO}_3^-$  qui peuvent conduire à des mécanismes aboutissant à une redistribution du  $\text{CaCO}_3$ . D'après Chouliaras, il peut y avoir simultanément action chimique avec saturation des sites libres de la MO en voie de biodégradation et action mécanique avec enrobage cristallin de  $\text{CaCO}_3$  autour de la MO accessible aux micro-organismes.

Cet effet protecteur se retrouve dans le fait qu'en sol calcaire une augmentation de la teneur en matières organiques ne modifie que très peu la mouillabilité qui, par contre, se trouve diminuée en sol non calcaire. Nous avons d'ailleurs effectué des déterminations de stabilité structurale sur quelques-uns des échantillons calcaires et n'avons trouvé aucune relation entre le taux d'agrégats stables au benzène dont dépend la mouillabilité, et le taux de MO.

Les résultats obtenus dans cette première partie apportent quelques précisions sur la constitution des sols contenant du calcaire et essentiellement sur la fraction fine qui apparaît comme étant la meilleure caractéristique constitutive de l'effet calcaire.

#### IV. — Propriétés en relation avec l'organisation des sols

Les propriétés des sols dépendent en grande partie de la distribution dimensionnelle des particules constitutives. Cependant la prévision de ces propriétés est difficile sur la seule base des données granulométriques : il existe un effet de texture dû aux interactions entre constituants. Il peut y avoir de « vrais » grains grossiers formant le squelette, mais parfois, des éléments colloïdaux, par effet d'enrobage et de cimentation d'éléments plus fins que les sables, conduisent à la formation d'éléments de taille comparable à celle des « vrais » grains grossiers. D'ailleurs, nous avons déjà parlé (p. 5) des conséquences de ces phénomènes sur la granulométrie. Divers états résultent de la nature, de la proportion de ces ciments et de la façon dont ils se placent : à chaque état correspond un ensemble de propriétés spécifiques. Parmi ces dernières, et pour la collection de sols dont nous disposons, nous avons choisi d'étudier la capacité d'échange (liée à un phénomène de surface), l'humidité équivalente (liée à la distribution dimensionnelle de la porosité du sol), la porosité d'agrégats naturels (partie de la porosité totale du sol), fonction de l'arrangement des particules élémentaires entre elles et enfin, la sensibilité au compactage.

##### 1. — Capacité d'échange

Les valeurs de la capacité d'échange en cations exprimant la réactivité des sols sont très étroitement reliées à la teneur en phyllite et absolument pas à la teneur en argile granulométrique.

$$\text{CE meq/100 g} = 1,69 + 0,57 A_v \quad r = 0,95 \quad (1)$$

Puisque les propriétés physico-chimiques des colloïdes humiques présentent

quelques analogies avec celles des colloïdes argileux, nous avons tenté, comme l'a fait Osty (1971), d'introduire le taux de matière organique :

$$CE = 1,21 MO + 0,51 A_v - 1,51 \quad r = 0,98 \quad (2)$$

En éliminant les échantillons provenant de Vitrolles pour les raisons évoquées au chapitre III, nous obtenons :

$$CE = 1,58 + 0,51 A_v \quad r = 0,93 \text{ (fig. 3)} \quad (3)$$

et

$$CE = 1,083 MO + 0,51 A_v - 1,077 \quad r = 0,98 \quad (4)$$

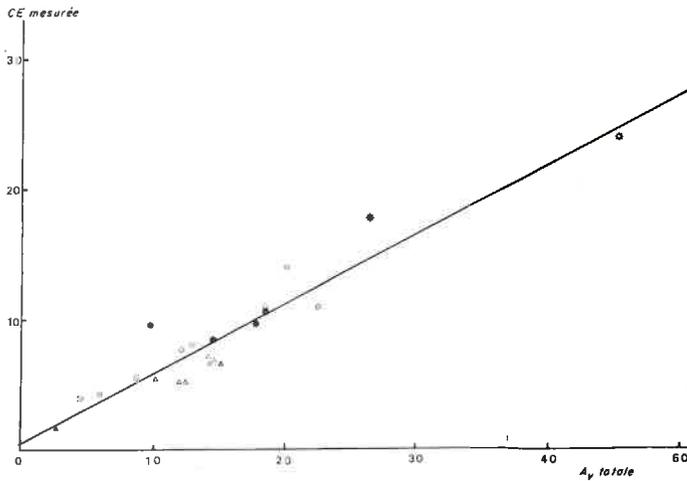


FIG. 3. — Relation capacité d'échange et teneur en phyllite.  
Relationship between cation exchange capacity and noncalcareous clay content.

Dans les deux cas, l'introduction du facteur matière organique améliore la corrélation linéaire. Or, au chapitre III, nous avons été amenés à conclure qu'une partie de la matière organique pouvait être protégée par du carbonate de calcium fin. Cet effet protecteur peut alors être exprimé par le rapport  $\frac{MO}{CaCO_3 < 2 \mu}$  (pour les sols contenant du calcaire dans la fraction fine). On trouve :

$$CE = 1,22 + 0,39 A_v + 3,54 \frac{MO}{CaCO_3 < 2 \mu} \quad (2 \text{ bis})$$

pour l'ensemble des échantillons et

$$CE = 1,64 + 0,43 A_v + 2,7 \frac{MO}{CaCO_3 < 2 \mu} \quad (4 \text{ bis})$$

pour les sols exceptés ceux provenant de Vitrolles.

Cette relation est plus satisfaisante que la précédente quant au signe et à la valeur du terme constant ; en outre, elle exprime que la capacité d'échange est d'autant

plus faible que le taux de calcaire fin est élevé. Cette constatation met encore l'accent sur l'action du  $\text{CaCO}_3$  fin sur la matière organique : en effet, par réaction chimique, les sites libres de la MO peuvent être saturés par  $\text{CaCO}_3$ .

## 2. — Humidité équivalente

Nous comparons les valeurs des humidités équivalentes mesurées et calculées d'après la relation de Gras (1957) :

$$\begin{aligned} \text{He} &= 0,59 A_G + 0,16 Lf_G + 5,47 && (\text{He} > 20 \text{ p. } 100) \\ \text{He} &= 0,51 A_G + 0,14 Lf_G + 7,35 && (\text{He} < 20 \text{ p. } 100) \end{aligned}$$

dans lesquelles  $A_G$  et  $Lf_G$  représentent les argiles et les limons fins obtenus par la granulométrie, donc sur échantillons non décarbonatés.

Hormis le cas de trois échantillons, pour lesquels l'accord  $\text{He}_{\text{mes}} - \text{He}_{\text{cal}}$  est satisfaisant, les valeurs des  $\text{He}$  mesurées sont différentes des valeurs  $\text{He}_{\text{cal}}$  avec un écart relatif d'au moins 10 p. 100 ; on peut distinguer en outre deux catégories : les sols dont le taux de calcaire total varie entre 70 et 100 p. 100 de calcaire pour lesquels  $\text{He}_{\text{mes}} > \text{He}_{\text{cal}}$  et les sols dont le taux de calcaire varie de 34 à 70 p. 100 pour lesquels  $\text{He}_{\text{mes}} < \text{He}_{\text{cal}}$  (fig. 4). Cependant ni les écarts absolus, ni les écarts relatifs ne sont significativement reliés à l'un des termes « calcaires ».

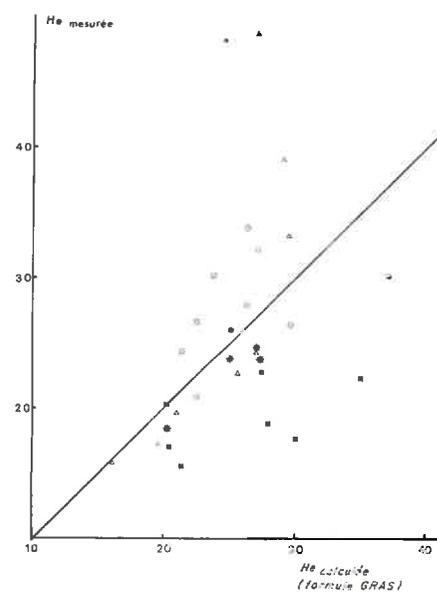


FIG. 4. — Humidité équivalente mesurée et calculée (d'après Gras).  
Measured and calculated (Gras) water capacity.

Une corrélation double du même type que l'équation de Gras, s'est avérée non significative sur ces résultats expérimentaux, que l'on prenne en compte les teneurs granulométriques  $A_G$  et  $Lf_G$  ou les teneurs vraies ( $A_v$  et  $Lf_v$ ). Dans ces conditions,

pour expliquer les valeurs de He mesurée nous ne disposons plus que des teneurs en carbonates :  $\text{CaCO}_3 (< 2 \mu)$  et  $\text{CaCO}_3$  squelette ; puisque la première variable apparaît comme jouer un rôle primordial tant dans les relations de constitution (chapitre III) que dans la détermination de la CE, nous avons testé l'influence de ce paramètre sur les valeurs de He et avons obtenu :

$$\text{He} = 17,71 + 0,96 \text{ CaCO}_3 (< 2 \mu) \quad r = 0,83 \quad (\text{fig. 5}). \quad (5)$$

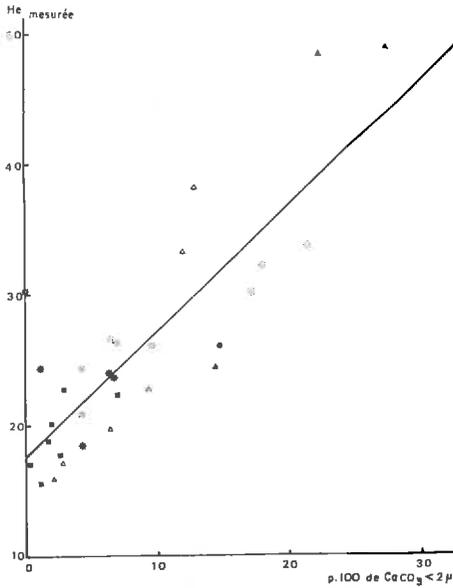


FIG. 5. — Relation humidité équivalente et calcaire fin.  
Relationship between water capacity and  $\text{CaCO}_3 < 2 \mu$  content.

Néanmoins, il était peu probable que l'humidité ne soit reliée qu'à ce seul paramètre, le modèle de Gras faisant toujours intervenir deux classes granulométriques ; aussi avons-nous introduit une deuxième variable :  $\text{CaCO}_3$  2  $\mu$  à 20  $\mu$ . Nous obtenons alors :

$$\text{He} = 13,78 + 0,93 \text{ CaCO}_3 (< 2 \mu) + 0,17 \text{ CaCO}_3 (2 \mu - 20 \mu) \quad r = 0,84 \quad (6)$$

relation dans laquelle le coefficient affectant la variable  $\text{CaCO}_3 (2 \mu - 20 \mu)$  est semblable à celui des limons fins trouvé par Gras.

Puisque l'argile et les limons granulométriques ne fournissent pas d'explication à l'humidité équivalente et que, par contre, le calcaire fin joue un rôle appréciable, nous avons voulu distinguer l'éventuel effet de la phyllite seule de celui du calcaire fin. Nous avons trouvé dans ces conditions, que la phyllite avait une tendance ( $r = 0,71$ ) à une influence négative sur l'humidité équivalente, le calcaire fin ayant un effet positif :

$$\text{He} = 10,8 - 0,29 A_v + 0,47 (\text{CaCO}_3 (< 2 \mu) + \text{Lfa}). \quad (7)$$

On trouve aussi cet effet de la phyllite dans l'équation :

$$He = 22,07 + 3,02 \frac{CaCO_3(< 2 \mu)}{A_v} \quad (r = 0,81) \quad (8)$$

Ces deux équations (7 et 8) nous amènent à poser la question : que se passe-t-il donc à l'intérieur de l'assemblage  $CaCO_3(< 2 \mu)$ -phyllite ? puisque la phyllite semble avoir un effet surprenant, parce que dépressif, sur la valeur de l'humidité équivalente.

Des observations au microscope électronique sur lames minces de la phase argile granulométrique seraient certainement riches en renseignements.

Néanmoins, parmi les corrélations (5), (6), (7) et (8), somme toute satisfaisantes toutes les quatre, nous choisirons la relation (6) pour estimer la valeur de l'humidité équivalente d'un sol contenant du calcaire ; en effet, cette corrélation présente l'avantage de montrer que l'humidité est une fonction additive de la partie calcaire des fractions granulométriques et non pas, comme pour un sol non calcaire, une propriété additive des classes granulométriques.

### 3. — Porosité texturale

Les échanges d'eau, d'air et de chaleur dépendent des caractéristiques de l'espace poral, lesquelles résultent, outre de l'activité biologique, des relations complexes entre constituants granulométriques, génératrices d'un effet texture. Comme nous venons de montrer que la capacité d'échange et l'humidité équivalente sont affectées par la présence du calcaire dans les sols, il se peut qu'il en soit de même pour la porosité texturale. Par définition, la porosité représente le pourcentage des vides par rapport au volume encombré, ce qui se traduit à l'aide des densités par :

$$P = \left( 1 - \frac{d_{app}}{d_{solide}} \right) \times 100.$$

Les mesures de densité apparente sur agrégats de 2 à 3 mm par la méthode au pétrole (Monnier, Stengel et Fiès, 1973) sont comprises entre 1 et 1,9 pour des valeurs de densité de solide se situant entre 2,55 et 2,72, ce qui aboutit à des porosités souvent élevées. Les densités de solides sont du même ordre de grandeur que celles des sols calcaires ; par contre, les densités apparentes d'agrégats de sols calcaires sont très significativement plus faibles que celles d'agrégats de sols non calcaires bien qu'ils possèdent des teneurs en argile granulométrique identiques ; il en résulte alors une porosité significativement plus élevée pour les sols calcaires. Puisque la porosité texturale résulte de l'arrangement des constituants du sol entre eux selon leur taille et leur nature et que cet arrangement est lui-même fonction de la granulométrie, de l'histoire pédologique, hydrique et mécanique, deux hypothèses peuvent être avancées pour tenter d'expliquer cette porosité élevée.

— l'arrangement des phyllites est modifié par la présence de  $CaCO_3$  fin à l'intérieur de la phase « argile »,

— l'arrangement même des phyllites par rapport au squelette est modifié.

Pour tester la validité de l'une ou l'autre de ces hypothèses, il fallait analyser la porosité d'agrégats naturels de ces sols et pour cela, la comparer à la porosité texturale qu'ils présentent après qu'ils aient subi une histoire hydrique standard (Khey-

rabi et Monnier, 1968) n'entraînant pas de remaniements des carbonates et conduisant à un certain arrangement de la phase « argile » par rapport aux grains du squelette. Ainsi, nous avons mesuré la densité apparente  $\gamma_d$  d'agrégats de même taille que les agrégats naturels, mais obtenus à partir de « gâteaux » organisés selon la méthode préconisée par Kheyrabi (1968).

Statistiquement, la corrélation  $\gamma_{d \text{ nat}} \gamma_{d \text{ gâteau}}$  est bonne

$$(r = 0,94) \text{ (fig. 6) avec } \gamma_{d \text{ nat}} = 0,161 + 0,861 \gamma_{d \text{ gât}}$$

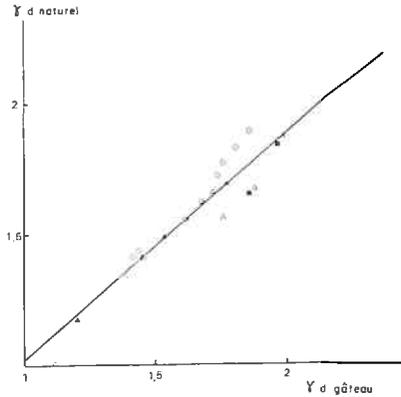


FIG. 6. — Comparaison des densités apparentes d'agrégats naturels et d'agrégats obtenus à partir des « gâteaux » Kheyrabi.

*Comparison between bulk density obtained from particles aggregated in situ or like Kheyrabi method.*

les densités d'agrégats naturels n'étant supérieures que de 2 à 5 p. 100 environ aux densités de gâteaux. Nous avons donc simulé au laboratoire un système ayant une existence dans le milieu naturel calcaire ; ce qui laisse supposer que les valeurs faibles des densités apparentes sont en relation avec un assemblage particulier des particules les plus fines, c'est-à-dire de la phase argile-calcite. Cet arrangement plus lâche des particules (entraînant un foisonnement du système) est peut être dû à des phénomènes de dissolution, de recristallisation et de redistribution (même sans mouvement) qui se produisent dans le sol sous l'effet de variations de température et/ou de pression partielle de  $\text{CO}_2$ . Ces divers phénomènes peuvent ainsi être à l'origine de nouvelles lacunes ou de ponts conduisant à un foisonnement du volume.

Les conséquences de ces divers phénomènes sont mises en évidence par des corrélations linéaires négatives entre  $\gamma_{d \text{ nat}}$  et les taux de calcaire total d'une part, et de calcaire fin d'autre part (fig. 7 et 8).

$$\begin{aligned} \gamma_{d \text{ nat}} &= 2,333 - 0,0111 \text{ CaCO}_3 \text{ total} \\ \gamma_{d \text{ nat}} &= 1,827 - 0,0246 \text{ CaCO}_3 (< 2 \mu) . \end{aligned}$$

La relation  $\gamma_{d \text{ nat}} \text{ CaCO}_3 (< 2 \mu)$  est la plus satisfaisante car elle donne pour un sol sans calcaire dans la fraction fine, une valeur acceptable de la densité apparente pour une granulométrie comparable (1,827). Cette relation quantifie le rôle foisonnant du calcaire fin : la densité apparente d'un agrégat étant plus faible, sa porosité texturale est évidemment plus élevée.

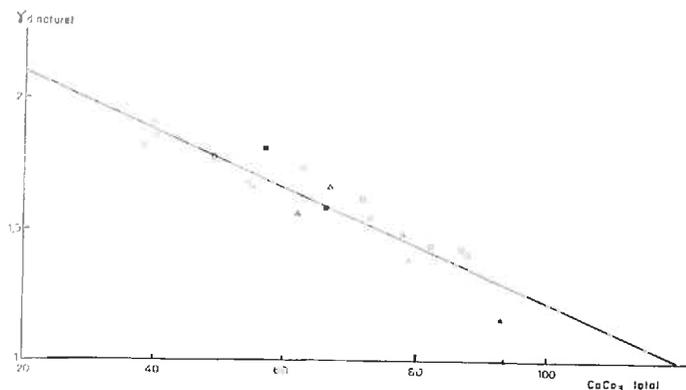


FIG. 7. — Relation densité apparente d'agrégats naturels et teneur en  $\text{CaCO}_3$  total.  
Relationship between bulk density of aggregates in situ and total calcium carbonate content.

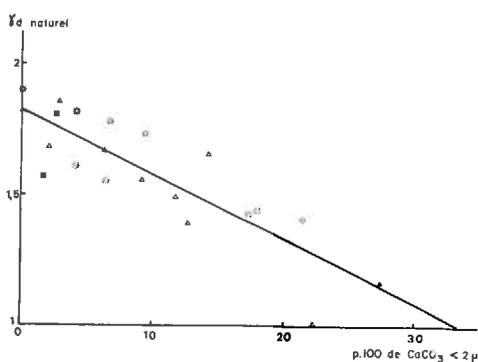


FIG. 8. — Relation densité apparente d'agrégats naturels et teneur en  $\text{CaCO}_3$  fin.  
Relationship between bulk density of aggregates in situ and  $\text{CaCO}_3 < 2 \mu$  content.

#### 4. — Sensibilité au compactage

Les assemblages élémentaires dans lesquels la disposition relative des particules est responsable de la porosité, peuvent subir, sous l'influence de facteurs mécaniques, des modifications plus ou moins marquées selon leur texture.

Pour un sol donné, la sensibilité au compactage dépend essentiellement de sa constitution physique et de la teneur en eau à laquelle il est compacté. Des études faites par Faure en sols non calcaires (1971-1974) ont montré que la sensibilité n'est pas un phénomène textural mais un phénomène dépendant seulement de l'état dans lequel se trouve le constituant argile seul.

Nous avons déterminé, en fonction de la teneur en eau, les variations de densité apparente de quatorze échantillons de la collection, compactés selon la méthode Proctor. Tout comme dans le cas des sols non calcaires, la courbe densité-teneur en eau présente un point singulier au delà duquel la densité est fonction croissante de la teneur

en eau jusqu'à atteindre une valeur maximale. Soit  $W_c$  la teneur en eau de ce point singulier ; d'après Faure, des sols de granulométries variées et de provenances naturelles diverses, tout comme des milieux modèles (argile-sable) ne sont pas sensibles aux effets du compactage tant que l'argile qu'ils contiennent n'a pas atteint le seuil de teneur en eau défini par  $\frac{W_c}{A} = Cte$ . Cette constante est de l'ordre de 35 p. 100 pour les sols naturels, 32 p. 100 pour des mélanges kaolinite-sable et 38 p. 100 pour des milieux montmorillonite-sable. Toujours sur des sols naturels parmi lesquels les échantillons précédemment traités, Faure et Guérif ont trouvé que l'introduction du taux de MO conduisait à une très bonne corrélation :

$$\left(\frac{W_c}{A}\right) p. 100 = 1,74 \frac{MO}{A} p. 100 + 23,57 .$$

Sur les échantillons calcaires qui nous intéressent, nous constatons que les rapports  $\frac{W_c}{A_G}$  et  $\frac{W_c}{A_V}$  ne sont pas constants, qu'ils sont toujours supérieurs aux valeurs de  $\frac{W_c}{A}$  calculés à l'aide de la régression précédente, mais que cet excès se trouve expliqué avec une très bonne corrélation ( $r = 0,985$ ) par le rapport  $\frac{CaCO_3 (< 2 \mu)}{A_V}$  (en p. 100) c'est-à-dire :

$$\left(\frac{W_c}{A_V}\right) p. 100 = 1,74 \left(\frac{MO}{A_V}\right) p. 100 + 0,78 \left(\frac{CaCO_3 (< 2 \mu)}{A_V}\right) p. 100 + 35,24 \quad (fig. 9).$$

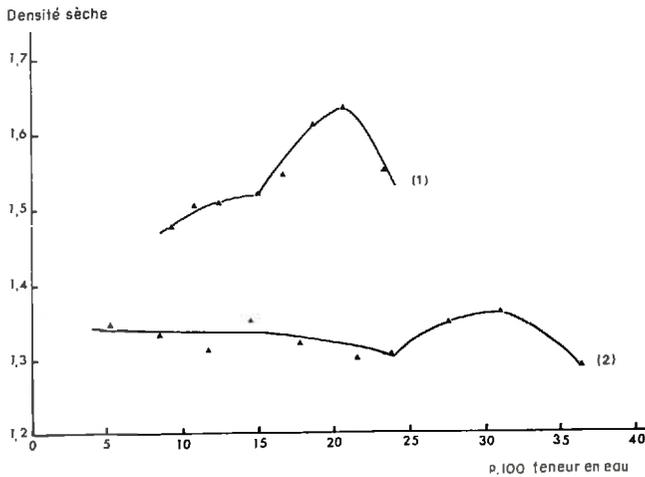


FIG. 9. — Courbes de compactage.

Compaction curves.

(1)  $\frac{CaCO_3 < 2 \mu}{A_V} p. 100 = 30,1$

(2)  $\frac{CaCO_3 < 2 \mu}{A_V} p. 100 = 1 050.$

Il ressort de cette équation qu'un sol sans MO et sans calcaire fin présente un  $\frac{Wc}{A_v}$  de 35, valeur non significativement différente de celle trouvée par Faure. De plus, puisque nous avons vu au chapitre III que le rapport  $\frac{MO}{A_v}$  augmente avec la teneur en calcaire fin, la teneur en eau au point singulier sera toujours une fonction croissante de cette teneur en calcaire fin.

Par ailleurs, puisque les rapports (exprimés en p. 100)  $\frac{CaCO_3 (< 2 \mu)}{A_v}$  sont, à l'exception de 2, tous supérieurs d'au-moins deux fois (et jusqu'à vingt fois) aux rapports  $\frac{MO}{A_v}$ , le terme correctif  $0,78 \frac{CaCO_3 (< 2 \mu)}{A_v}$  sera toujours plus important que le terme  $1,74 \frac{MO}{A_v}$ ; ainsi ressort encore une fois l'influence prépondérante de la constitution de la fraction fine d'un sol calcaire.

### Conclusion

Ce travail réalisé sur les propriétés des sols calcaires a montré que la grandeur caractéristique de ces sols est la teneur en carbonate de calcium fin (exprimé en p. 100 de terre). En effet, dès l'examen de leur constitution, nous avons remarqué que la teneur en carbonate de calcium fin de la fraction argile, pour des taux de calcaire total compris entre 34 et 93 p. 100, présentait une plage de variations plus importante que la teneur en calcaire du squelette. De plus, en considérant le paramètre matière organique, nous avons trouvé que la présence de calcaire fin était responsable d'une part de sa valeur généralement élevé et d'autre part de son influence très affaiblie sur la stabilité structurale. Cet effet protecteur du calcaire fin sur la matière organique apparaît aussi dans l'évaluation de la capacité d'échange qui est diminuée par augmentation de la teneur en calcaire fin; ce résultat prouvant que les échanges d'ions au niveau des colloïdes humiques sont rendus difficiles par la présence du carbonate.

Dans le chapitre IV, nous avons considéré des propriétés physiques en relation avec l'organisation des matériaux constitutifs des sols calcaires. C'est ainsi que la circulation de l'eau et son stockage sont déterminés en grande partie par l'architecture du sol: les possibilités de rétention d'eau d'un sol dépendent de sa porosité, c'est-à-dire du volume des vides qui peuvent varier en forme et répartition. Puisque, on l'a constaté au niveau de la porosité texturale, c'est le carbonate de calcium fin qui régit essentiellement l'assemblage élémentaire, il est satisfaisant de mettre en évidence le rôle du carbonate de calcium dans les mécanismes hydriques et, en particulier, dans les déterminations de l'humidité équivalente. Dans ces conditions, il est normal que les régressions de Gras (1957) basées uniquement sur la texture du sol ne donnent pas de valeurs correctes de l'humidité équivalente. On sait aussi que les assemblages élémentaires peuvent subir des modifications sous l'action de facteurs mécaniques et, dans le cas des échantillons calcaires, nous avons mis l'accent sur l'importance du terme  $\frac{CaCO_3 (< 2 \mu)}{A_v}$  sur la teneur en eau de la phyllite à son état

d'entrée en plasticité : en effet, cette teneur en eau est considérablement augmentée par la présence de calcaire fin.

Tous ces résultats obtenus au niveau soit constitution, soit organisation des sols contenant du carbonate de calcium, nous amènent à conclure qu'un sol pourra être qualifié de « calcaire » s'il contient du carbonate de calcium dans la fraction fine (inférieure à  $2\ \mu$ ), ce carbonate fin étant, dans la majorité des cas, responsable des propriétés particulières de ces sols.

*Reçu pour publication en novembre 1978.*

### Summary

#### *First contribution to the study of the specific physical and mechanical characteristics of calcareous soils.*

The extent of the calcareous soils on the periphery of the Mediterranean sea and more precisely at the regional level, their high specificity (from an agronomical point of view as well as from a physico-chemical and physical one) and the deficient knowledge of their characteristics gave rise to this study.

We considered a collection of calcareous soils of various origins and studied their composition characteristics and some of their properties linked with their organization : exchange capacity, moisture equivalent, texture porosity and compaction susceptibility.

At the level of the composition the agreement between the size grade and the mineralogical composition cannot be chosen for basis as it is the case in the other soils : the  $< 2\ \mu$  part in particular is no more comparable to the phyllite group as it cannot contain variable amounts of calcium carbonate. The results of the granulometric analyses with decarbonation or not and the interpretation of the interaction between organic matter and (phyllitous) clay lead to the conclusion that the fine calcium carbonate itself seems to be the best constitutive characteristic of the calcareous effect.

Among the properties we stated that the higher the fine calcium carbonate content is, the lower is the exchange capacity ; moreover a quite satisfactory approach of the value of the moisture equivalent is obtained with a relation taking the carbonated composition of the fine fraction into account. The porosity of a soil being responsible for its water retention capacity and the role of the fine calcium carbonate on the moisture equivalent being proved, it is not surprising to find that fine calcium carbonate seems also to rule the elementary structure : as a matter of fact porosity increases with fine calcium carbonate content. This structure may finally undergo modifications under the influence of mechanical factors : under these conditions the water content of phyllite at the singular point in the curve representing the compaction susceptibility appears to be also a function of the fine calcium carbonate content.

### Zusammenfassung

#### *Erster Beitrag zur Untersuchung der den Kalkboden eigenen Physikalischen und mechanischen Eigenschaften.*

Wir haben eine Sammlung von Kalkböden verschiedener Herkunft betrachtet und haben ihre Aufbaumerkmale und einige ihrer mit ihrer Organisation verbundenen Eigenschaften : Umtauschkapazität, Feldkapazität, Texturporosität und Verdichtungsempfindlichkeit studiert. Die Ergebnisse der Korngrösseanalysen mit oder ohne Kohlensäureentziehung und die Deutung der Zwischenwirkung der organischen Substanz mit Phyllit führen zu der Schlussfolgerung dass der Karbonat von feinen Kalzium das beste Aufbaumerkmal des Kalkeffekts zu sein scheint.

Was die Eigenschaften betrifft haben wir beobachtet dass die Umtauschkapazität mit der Zunahme von Feinkalk abnimmt ; der Wert der Feldkapazität kann mit einer den Kohlenstoffhaltigen Aufbau der Fraktion  $< 2\ \mu$  betrachtenden Beziehung ausgedrückt sein und die Porosität wächst mit dem Gehalt an Feinkalk zu.

Unter dem Einfluss mechanischer Faktoren kann die Grundzusammenstellung Veränderungen ertragen und der Wassergehalt des Phyllits an dem sonderbarem Punkt der Kurve der Verdichtungsempfindlichkeit hängt auch von dem Gehalt an Feinkalk. Die Hauptrolle des Feinkaliums ist so klargestellt.

## РЕЗЮМЕ

Первая контрибуция к изучению физических и механических особенностей известковых почв.

## СУТИ НИКОЛЬ

Рассматривалась коллекция известковых почв разного происхождения и изучались характеристики их состава и некоторые свойства связанные с их организацией: емкость обмена, эквивалентная влажность, порозность структуры и чувствительность к уплотнению. Результаты гранулометрических анализов до и после декарбонатации и интерпретация междудействия органического вещества с филлитом, позволяют заключить что мелкий карбонат кальция является по всей вероятности лучшей составной характеристикой известкового эффекта.

В отношении свойств, найдено, что емкость обмена уменьшается с увеличением содержания мелкого известняка; величина эквивалентной влажности может быть выражена соотношением, принимающим во внимание карбонатный состав фракции  $< 2 \eta$ ; что-же касается порозности — она увеличивается с увеличением содержания мелкого известняка.

Под влиянием механических факторов, элементарная смесь может подвергнуться изменениям и содержание воды в филлите, в отдельном пункте кривой чувствительности к уплотнению будет зависеть также от содержания мелкого известняка. Таким образом выявляется существенная роль мелкого известняка.

## Références bibliographiques

- ANNE P., 1945. Dosage du carbone organique du sol. *Ann. agron.*, **2**, 161-172.
- BANIN A., AMIEL A., 1969-1970. A correlative study of the chemical and physical properties of a group of natural soils of Israel. *Geoderma*, **3**, 185-198.
- CHIAVERINI J., 1976. *Recherches sur les sols calcaires des lavanderaiies du Sud-Est de la France. Liaisons entre quelques paramètres physiques et chimiques.* Thèse Docteur de spécialité (Nice).
- CHOUILIARAS N., 1976. *Evolution de la matière organique dans une rendzine.* Thèse Docteur Ingénieur, Nancy I.
- DUPUIS M., 1975. La répartition granulométrique des carbonates dans le sol. *Sci. Sol*, **4**, 249-270.
- FAURE A., 1976. Influence de la phase argileuse sur la susceptibilité au tassement des sols. *Sci. Sol*, **2**, 121-130.
- FAURE A., GUÉRIF J. A paraître.
- GHEYI H. R., FRANKART R., Van BLADEL R., 1974. Chemical and physical properties of some calcareous soils of Nkheila and Gharb regim (Morocco). *Pédologie*, XXIV, 199-215.
- GRAS R., 1957. Relations entre l'humidité équivalente et la granulométrie du sol (Rapport non publié).
- GUÉRIF J., 1974. Caractéristiques physiques et techniques des terroirs maraichers du Vaucluse. *Mémoire fin d'études E. S. I. T. P. A.*, Paris.
- KHEYRABI D., MONNIER G., 1968. Etude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. agron.*, **19** (2), 129-152.
- MARTY J. R., 1969. *Contribution à l'étude des Boulbènes.* Thèse Docteur Université, Paris.
- MEHROTRA R. C., DHAR N. R., 1949. Preparations and properties of sodium hexametaphosphate and a study of the extent of complexe formation with calcium ions by conductivity data. *Proc. Nat. Ind. Sci. Inst.*, **16**, 59-69.
- MONNIER G., 1965. *Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols.* Thèse Docteur Ingénieur, Paris.
- MONNIER G., STENGEL P., FIÈS J. C., 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Ann. agron.*, **24** (5), 533-545.
- OSTY P. L., 1971. Essai de quantification de l'aptitude à la fissuration de terres très argileuses par délitement dans l'alcool éthylique. Recherche du rôle de différents facteurs. *C. R. Acad. agric.*, **1**, 75-87.
- PÉDRO G., 1972. Les sols développés sur roches calcaires. Nature, originalité et cadre général de leur évolution à la surface du globe. *Sci. Sol*, **1**, 5-18.
- TYNER E. H., 1940. The use of sodium metaphosphate for dispersion of soils for mechanical analysis. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **4**, 106-113.