



Relations entre la constitution granulométrique et minéralogique et les caractéristiques de l'espace poral des sols

J.C. Fiès, Pierre Stengel

► To cite this version:

J.C. Fiès, Pierre Stengel. Relations entre la constitution granulométrique et minéralogique et les caractéristiques de l'espace poral des sols. Livre jubilaire du cinquantième de l'AFES. 1934-1984, AFES, 1984. hal-02855590

HAL Id: hal-02855590

<https://hal.inrae.fr/hal-02855590v1>

Submitted on 8 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.

RELATIONS ENTRE LA CONSTITUTION GRANULOMETRIQUE ET MINERALOGIQUE ET LES CARACTERISTIQUES DE L'ESPACE PORAL DES SOLS

J.C. FIES et P. STENGEL *

Introduction

Le développement des travaux de recherche sur les relations entre l'espace poral et la granulométrie des sols a été, dès l'origine, sous tendu par la notion de texture introduite par HENIN.

Cette notion est logiquement liée aux travaux très antérieurs de caractérisation des sols par des analyses granulométriques : après avoir séparé, il fallait réunir. En effet, si l'on peut attribuer des propriétés spécifiques à chaque fraction granulométrique, il s'avère rare qu'une propriété d'un mélange de ces fractions soit la résultante simple de leurs effets particuliers. Des démonstrations en sont données par les travaux de MONNIER et KHEYRABI sur la stabilité structurale, de OSTY sur la rétention en eau à un équilibre de potentiel.

La porosité des sols n'échappe pas à cette règle. Son étude est largement justifiée parce que l'espace poral est au cœur de la compréhension des propriétés du sol et de leur prévision.

Il était difficile, à l'époque, de penser pouvoir aborder l'étude de la porosité des sols à toutes les échelles en l'absence d'outils de caractérisation quantitatifs, comme par exemple ceux forgés maintenant par la morphologie mathématique, ou de techniques visant à assurer une conservation de la géométrie des pores à différents états hydriques.

Rappelons que la variabilité de l'espace poral, sous l'effet au moins des phénomènes à court terme de gonflement-retrait n'était pas prise en compte et que les études morphologiques des sols, à l'échelle de la lame mince, étaient orientées vers la reconnaissance de traits micromorphologiques, en relations avec les phénomènes, à long terme, de la pédogénèse. DEMOLON en 1952 caractérisait encore l'espace poral d'un horizon de sol à partir d'une seule valeur de densité, indépendamment de l'échelle de mesure et de la teneur en eau.

C'est dans ce contexte, qu'ont été entreprises des expériences mettant en œuvre des particules à distribution granulométrique simplifiées associées selon des protocoles de mélange visant à assurer initialement la réalisation de systèmes isotropes. Elles étaient donc situées, d'emblée, à une échelle texturale où l'espace poral a pour origine l'organisation de constituants élémentaires. On a, en particulier, distingué les aspects propres aux dimensions des constituants de ceux dépendant de leur nature minéralogique en considérant d'une part des particules de taille supérieure à 2 μm -les squelettes- d'autre part des mélanges où intervenaient des constituants phylliteux inférieurs à 2 μm -la phase argileuse-.

La variable retenue comme caractéristique des interactions entre particules dans un mélange est très globale. Il s'agit de la densité du mélange ou de variables dérivées par calcul telles que la porosité ou l'indice des vides. Le choix d'une variable globale ne permettait de prendre en compte l'espace poral que d'une façon aveugle vis-à-vis des caractéristiques de cet espace.

* Station de Science du Sol, C.R. d'Avignon, INRA, 84140 MONTFAVET.

Cependant, l'étude de ses variations a constitué une étape préalable et nécessaire qui a servi de cadre d'ensemble dans lequel on s'efforce de caractériser maintenant la morphologie de l'espace poral, en particulier avec la porosimétrie au mercure, tout en développant l'étude des inter-relations entre l'espace poral et l'eau.

I. Etude de l'arrangement de particules granulométriquement assimilables au squelette du sol

Les mesures sur mélanges de deux classes de particules de tailles différentes ont vite révélé que toutes choses égales par ailleurs, ce mélange présentait une porosité d'autant plus faible que le rapport de taille entre particules était élevé.

Des hypothèses simples de remplissage et de substitution proposées en 1931 par **GRATON et FRASER** permettaient d'expliquer la tendance générale du phénomène tout en fournissant une référence permettant le calcul de valeurs qui seraient idéalement atteintes en l'absence de l'effet de facteurs stériques.

Les développements ultérieurs ont alors tous été basés sur les notions de perturbation : les écarts entre valeurs observées et calculées pouvaient être alors interprétés comme la manifestation globale des effets stériques (**HENIN et al., 1970**).

Leur signification physique a pu être précisée en simulant l'introduction de particules d'une taille donnée dans une matrice de particules d'une autre taille. Conduite dans un cadre géométrique, cette démarche a permis de retrouver l'allure des courbes expérimentales sans toutefois déboucher sur des relations généralisables (**FIES, 1978**). Il a fallu, pour cela, créer un modèle numérique intégrant les coefficients de perturbation. Il a été alors possible d'obtenir, en fonction du rapport de taille, des résultats concordant avec les données observées (**FIES, 1978**) et extrapolables à d'autres cas (**GUENNELON et al., 1982**).

Avec les travaux complémentaires de **CHRETIEN** prenant en compte les facteurs de forme de particules sableuses, il faut noter des approches comparables de chercheurs américains (**YERAZUNIS, 1965 ; STAPLE, 1975**). Celles-ci sont cependant toutes limitées à des compositions singulières ou à des variations partielles d'un constituant dans les mélanges, mais représentent des tentatives pour aborder des mélanges à classes de distribution très étalées.

D'une façon générale, ces études ont contribué à relativiser le jugement porté sur les valeurs de densité de sol en suggérant, à côté de l'influence des contraintes internes ou externes au sol, le rôle de la distribution granulométrique du squelette. Ainsi, le fait qu'une variation de 10 du rapport de taille entre particules suffise dans les mélanges à réduire la porosité d'un tiers suggérait une influence probable des classes de squelettes appartenant aux limons fins et aux sables grossiers.

Cette hypothèse, très simplificatrice, a été testée en utilisant les valeurs de densité texturale mesurées sur des sols secs riches en squelette (moins de 20 p.cent d'argile granulométrique). Dans la représentation de la figure 1, la disposition des valeurs de densité évoque bien les résultats obtenus sur les mélanges. A titre indicatif, on a porté sur le même graphique la courbe représentative d'une loi de mélange, calculée à posteriori avec le modèle numérique (**FIES et STENGEL, 1981**).

II. Organisation des systèmes argile-squelette

Dans le cas de sols naturels, à l'état sec, l'accroissement de la teneur en éléments inférieurs à 2 μm est corrélé avec celui de la densité texturale (**FIES et STENGEL, 1981**). Cette tendance est retrouvée au niveau expérimental quand on associe divers

squelettes en proportions variées à une pâte argileuse, saturée en eau, constituée de phyllites inférieures à 2 μm extraites de sols et rendues calciques et qu'on laisse le mélange se dessécher. On a pu ainsi préciser qu'une valeur maximale de densité est atteinte au voisinage de 70 p.cent d'argile. La gamme de variation de densité se réduit quand le squelette utilisé présente une distribution nettement bimodale ou encore quand les particules qui le constituent deviennent plus grossières. Ce dernier point a pu être vérifié sur les données obtenues par **SMITH et al. (1978)** avec des agrégats de sols naturels à teneur faible en limon.

Cependant, les valeurs des porosités calculées des mélanges expérimentaux après leur séchage posaient un problème d'interprétation qui a conduit à la recherche d'un assemblage équivalent.

Alors que le mécanisme de substitution suffisait seul à rendre compte des valeurs observées dans les mélanges encore fortement hydratés (et ceci était bien en accord avec la différence de taille entre phyllite et squelette), il se révélait inadapté quand ces mélanges passaient à des états d'hydratation moindres, puis à l'état sec.

Assemblage équivalent

Un bilan de volume de l'espace poral des mélanges, après dessiccation, montre qu'il peut être divisé en deux compartiments avec l'hypothèse que la densité de la phase argileuse soit indépendante du squelette associé :

- celui correspondant à la porosité de la phase argileuse considérée,
- celui de l'espace poral lacunaire.

A partir d'une hypothèse d'enrobage proposée par **MONNIER**, on a pu alors proposer un schéma textural, l'assemblage équivalent, dans lequel une fraction de la phase argileuse recouvre la surface des particules du squelette, la fraction complémentaire encombrant partiellement la lumière ménagée entre les grains enrobés (figure 2).

Cet assemblage paraît être conservé lors de la réhumectation aux variations près liées au gonflement, jusqu'à des teneurs en argile élevées.

L'observation de lames minces (figure 2) et les travaux de **CHRETIEN (1979)** ont bien vérifié, dans le cas de mélanges à squelette sableux, la présence des pores assimilables aux lacunes. Une étude de quantification de lames minces montrait par ailleurs l'intérêt de l'assemblage proposé pour l'analyse morphologique et l'ajustement d'un modèle simulant la disposition des phases argile-grain-lacune.

Enfin, une tentative de modélisation du retrait d'une pâte argileuse dans un système contenant des grains de squelette a suggéré l'existence de variations importantes de l'amplitude du retrait de l'argile déterminées localement par la disposition des grains dans l'espace. Ce seraient alors les modifications des propriétés rhéologiques de l'argile avec la diminution de teneur en eau qui conduiraient à un cisaillement et à la manifestation des lacunes.

Les limites de ce modèle sont marquées par le fait qu'il ne rend pas compte des différences observées entre systèmes à dominantes sableuse ou limoneuse. Elles soulignent que l'on ne peut pas entièrement dissocier, dès lors que l'on a une phase dont le comportement dépend de son état d'hydratation, les problèmes de constitution des problèmes d'histoire hydrique.

III. Les développements

On se limitera ici aux programmes actuellement en cours. Ils portent sur l'étude des facteurs de l'organisation des systèmes argile-squelette et la quantification de l'espace poral.

Typologie des courbes de retrait

Malgré l'ancienneté des travaux de **HAINES** et la conscience précoce de l'importance des phénomènes de retrait-gonflement pour l'évolution structurale des sols, l'intensification des recherches sur ce sujet est relativement récente. En France, elle a été longtemps limitée, si nous exceptons les recherches conduites en génie civil, à l'étude de la physico-chimie du gonflement, essentiellement appliquée aux particules phylliteuses en suspension. Celle-ci, cependant, s'est avérée inopérante pour prévoir autrement que de façon très globale les propriétés de retrait-gonflement des sols (**PARKER et al., 1982**).

Alors qu'une activité significative s'est développée à l'étranger, dans le but d'étudier les transferts hydriques en sol gonflant, les travaux français sont surtout le fait de chercheurs préoccupés de décrire ou prévoir les processus d'évolution structurale à différentes échelles.

Dans le cas de fractions phylliteuses isolées, la description très fine de leur organisation au cours du premier cycle de retrait-gonflement après dispersion est maintenant réalisée pour un certain nombre d'espèces minérales types (**TESSIER et al., 1980**). Dans le cas de mélanges phyllite-squelette, l'étude des relations potentiel hydrique-indice des vides-teneur en eau (**STENGEL, 1981**) montre que, dans le domaine saturé, le comportement des matériaux au cours du premier retrait peut être déduit de celui de la fraction phylliteuse isolée. Dans le cas des fortes teneurs en phyllite ($A > 60\%$), ce domaine correspond à une part très prépondérante du retrait total. Par ailleurs, les coordonnées du point d'entrée d'air et le retrait résiduel sont alors peu modifiés par rapport à ceux de l'argile isolée.

Pour les mélanges à faible teneur ($A < 15\%$), l'absence de retrait résiduel réduit le problème de la prévision du retrait et du déterminisme de l'assemblage textural à celui du déterminisme de l'entrée d'air (figure 3). Dans les cas intermédiaires, la part importante du retrait résiduel rend le problème sensiblement plus complexe. Il s'agit à la fois de modéliser le mécanisme de l'entrée d'air et les variations du volume des lacunes dans un domaine où :

- l'interaction squelette-argile modifie de façon complexe la relation potentiel-teneur en eau par rapport à celle de l'argile pure,

- l'évaluation de la contrainte effective est difficile puisque le matériau n'est pas saturé.

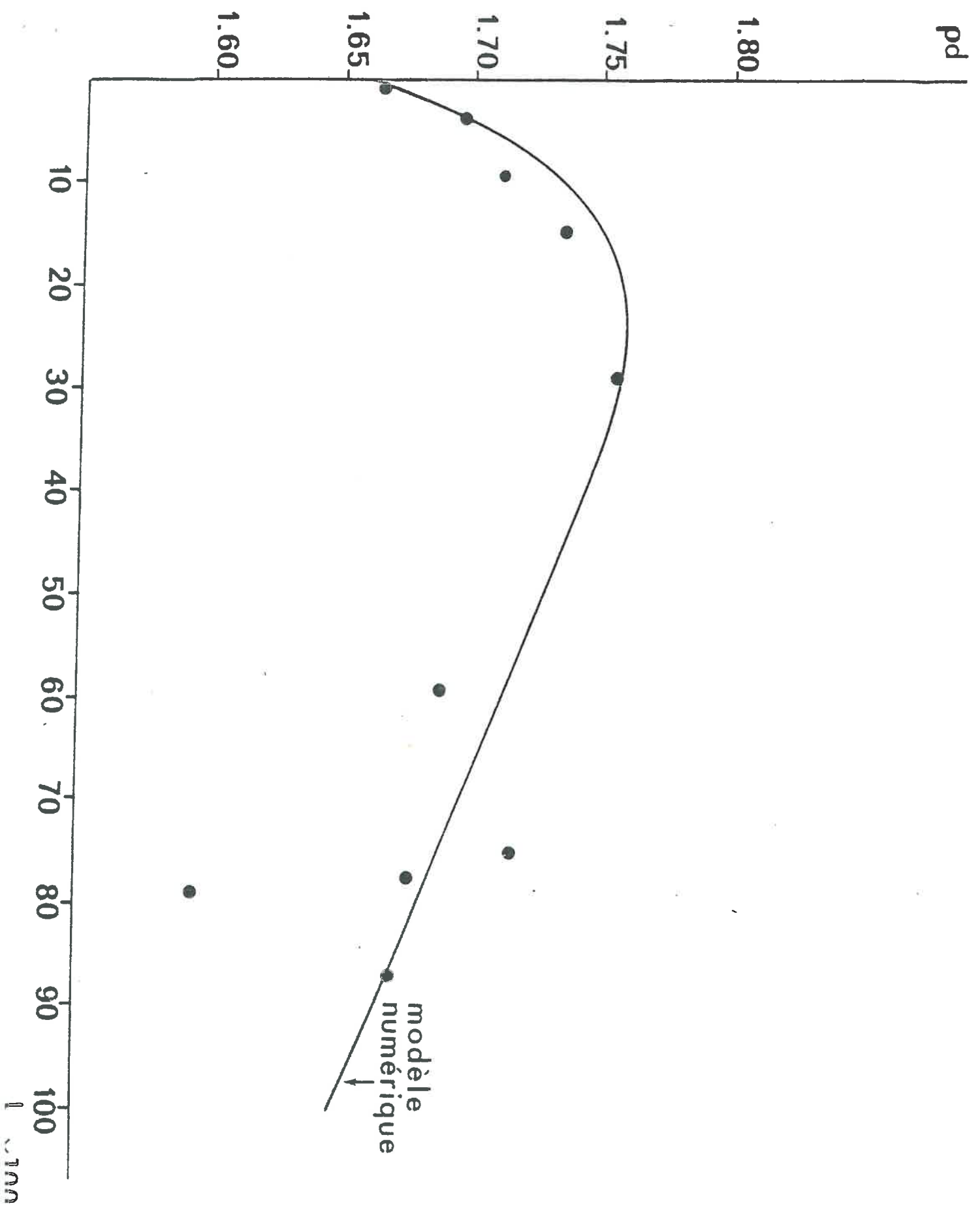
La limite de retrait au sens strict, semble quant à elle être déterminée par les propriétés propres à la phase phylliteuse.

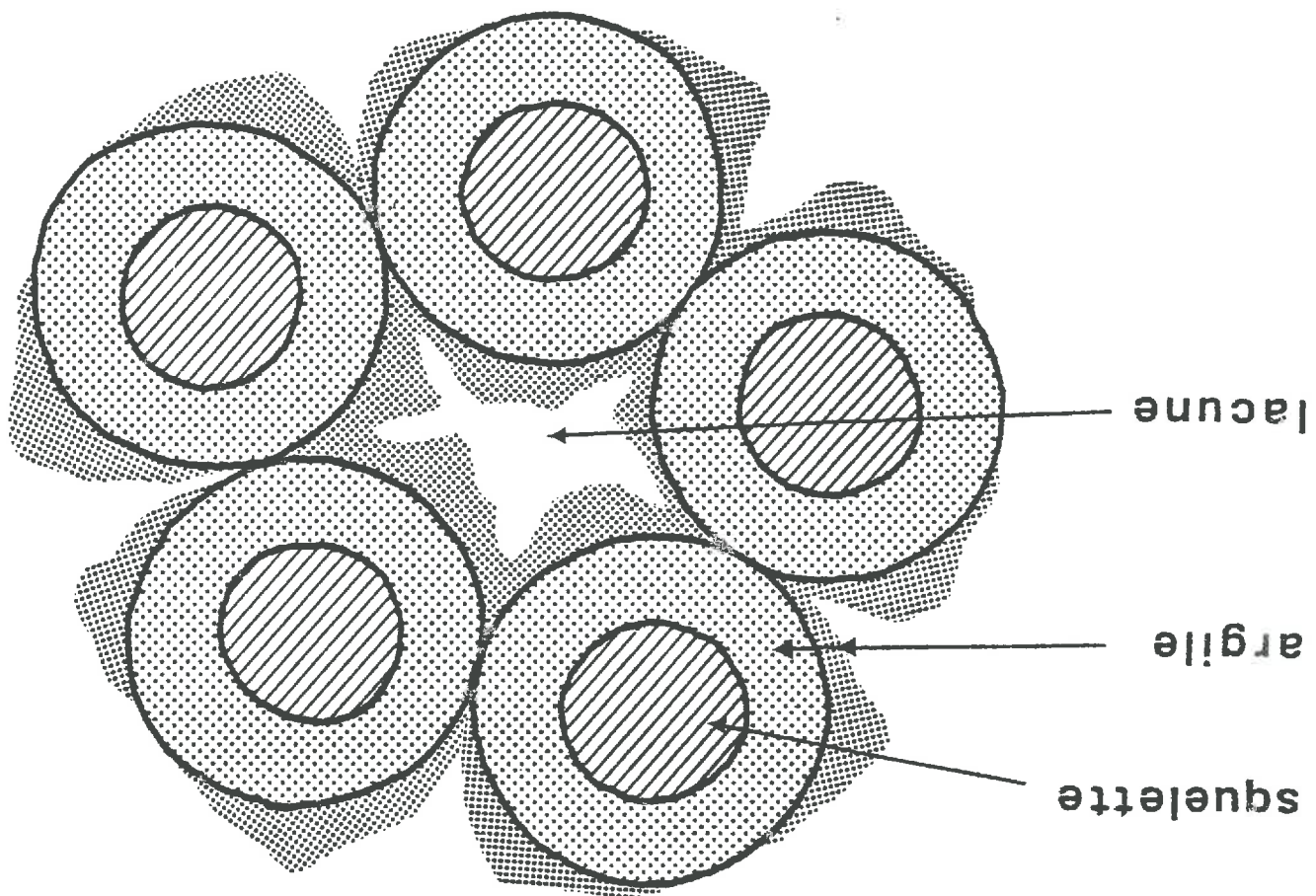
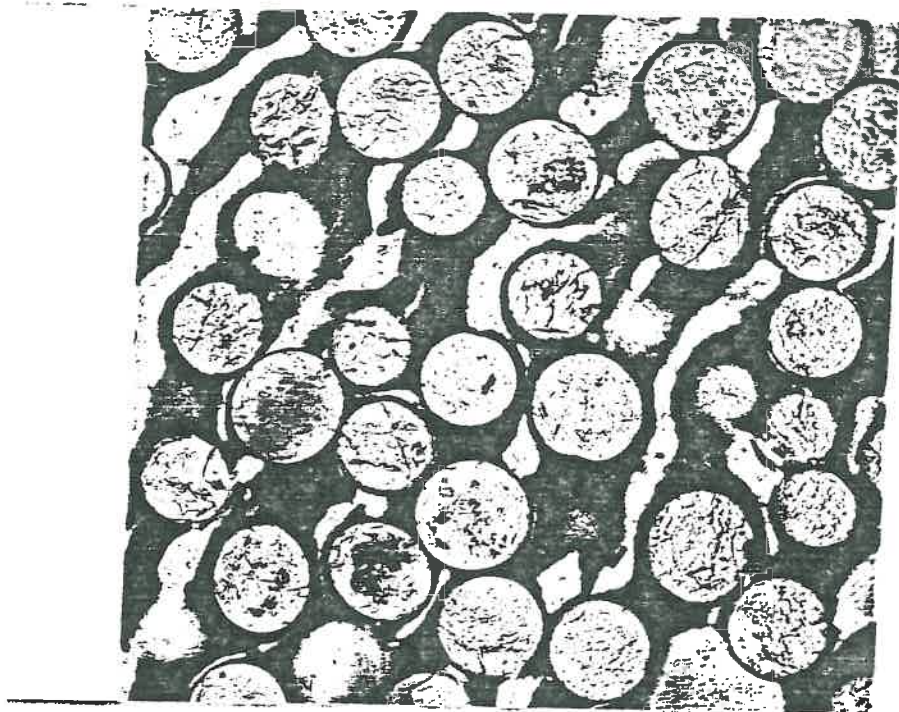
Il est possible actuellement de prévoir à partir de références expérimentales, et de relations statistiques (pour les matériaux naturels), les caractéristiques des courbes de retrait à partir de la connaissance de la constitution du matériau et des propriétés de l'argile qu'il contient. On peut en déduire une description du volume poreux distinguant les lacunes des pores propres à la phase argile. En revanche, la compréhension des mécanismes qui déterminent ce comportement reste au stade des hypothèses.

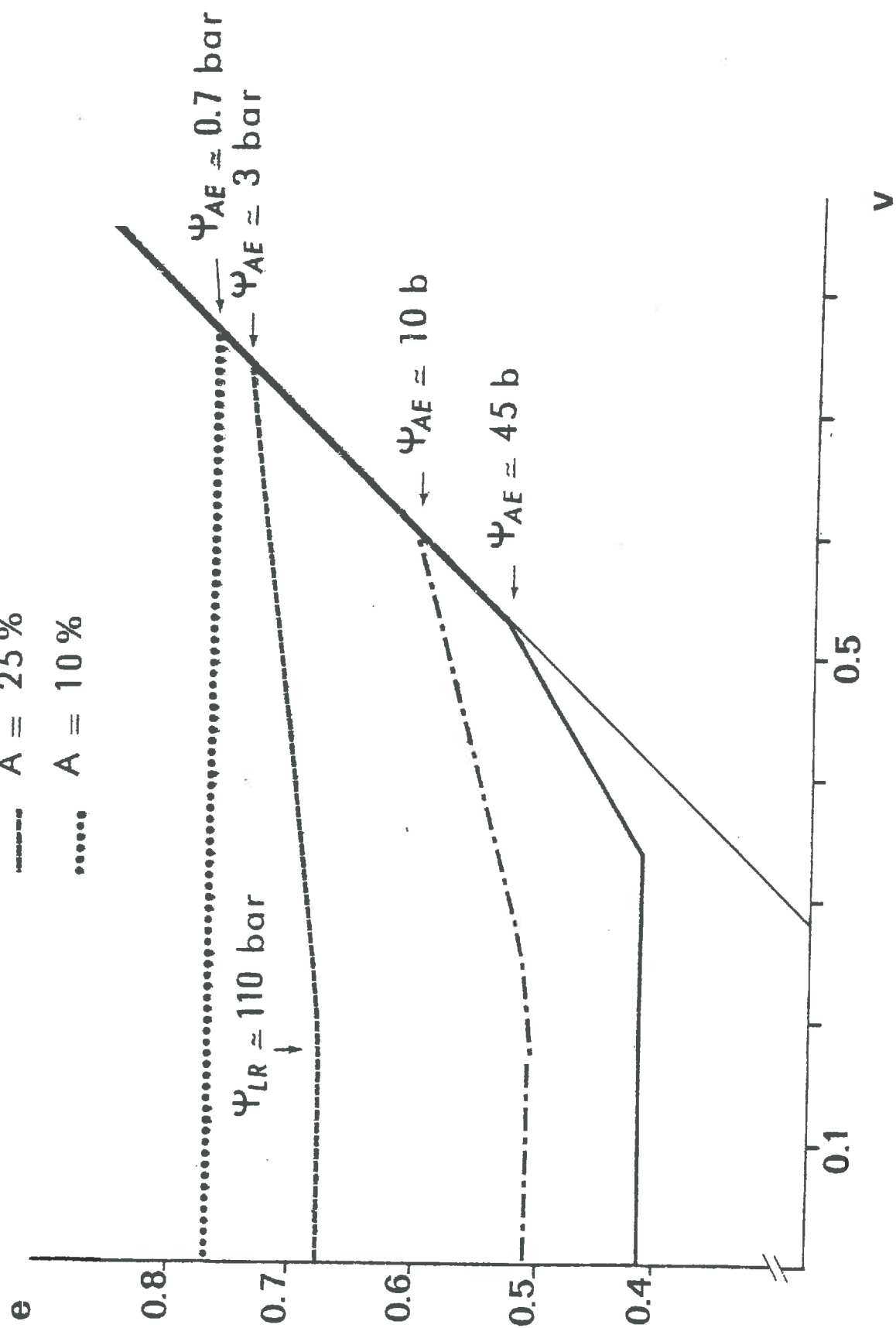
Porosimétrie au mercure

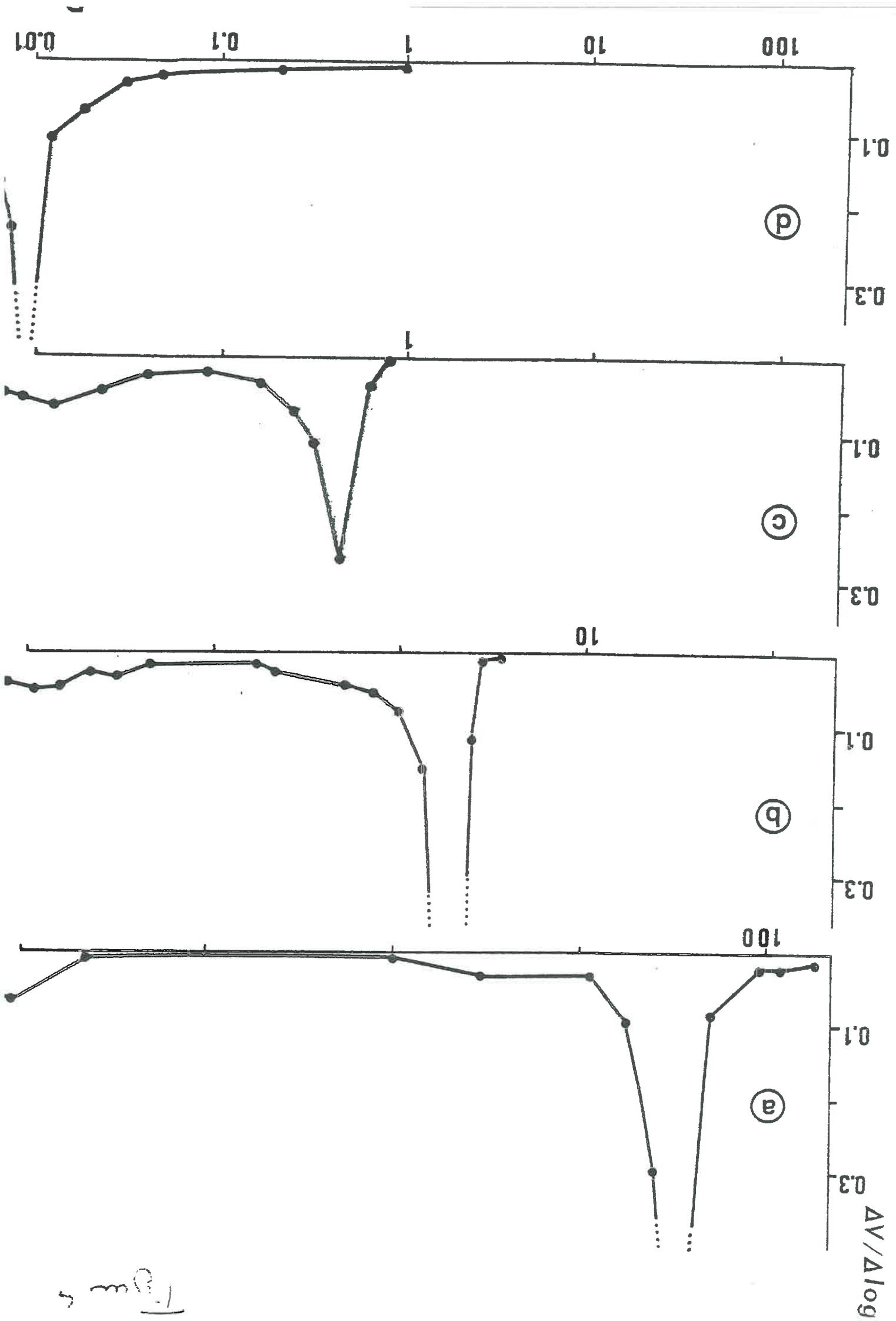
Un exemple des résultats obtenus sur des mélanges argile-squelette est donné à la figure 4. Pour de tels systèmes, considérés à l'état sec, l'accessibilité au mercure paraît bien refléter l'existence de deux compartiments poreux. Le premier, assimilable aux pores lacunaires est caractérisé par des pores d'entrée dont la valeur modale paraît dépendre de la granulométrie du squelette alors que les caractéristiques du

Fig. 1









Liste des figures et légendes

Figure 1 : Influence des proportions relatives de limon 2-20 μm (I) et de sable 200-2000 μm (S) sur la densité texturale de sols naturels ($A < 20$ p.cent)

Figure 2 : Schéma de la disposition relative de l'argile et du squelette dans une hypothèse d'enrobage partiel et photographie d'une lame mince dans un mélange de billes 160-200 μm et de 30 p.cent d'argile (la phase argile est en noir).

Figure 3 : Courbes de retrait de mélanges smectite-limon 2-20 μm .

v volume d'eau rapporté au volume de solide

e indice des vides

ψ_{AE} succion à l'entrée d'air

ψ_{LR} succion à la limite de retrait

Figure 4 : Distribution des pentes des courbes cumulatives d'entrée de mercure en fonction du diamètre d'entrée, pour des mélanges après dessiccation

a = 100-200 μm et 30 p.cent d'argile

b = 10- 20 μm et 30 p.cent d'argile

c = 2- 20 μm et 40 p.cent d'argile

d = 100 p.cent d'argile