

Relation entre la capacité d'échange cationique et le volume poral dans les sols argileux : incidences sur la morphologie de la phase argileuse à l'échelle des assemblages élémentaires

Ary Bruand, Daniel Zimmer

► **To cite this version:**

Ary Bruand, Daniel Zimmer. Relation entre la capacité d'échange cationique et le volume poral dans les sols argileux : incidences sur la morphologie de la phase argileuse à l'échelle des assemblages élémentaires. Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Serie II, 1992, 315, pp.223-229. insu-00862646

HAL Id: insu-00862646

<https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-00862646>

Submitted on 17 Sep 2013

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.

Relation entre la capacité d'échange cationique et le volume poral dans les sols argileux : incidences sur la morphologie de la phase argileuse à l'échelle des assemblages élémentaires

Ary BRUAND et Daniel ZIMMER

Résumé – Le volume poral développé par la phase argileuse de sols est étudié à partir d'échantillons non perturbés de sols argileux. Les résultats mettent en évidence une relation entre ce volume poral et la minéralogie des particules d'argile que l'on caractérise par leur capacité d'échange cationique. La discussion de cette relation conduit à proposer un modèle morphologique d'assemblage des particules élémentaires qui rend compte des variations de volume poral enregistrées.

Relationship between the cation exchange capacity and the pore volume of clayey soils: consequences for the morphology of the clay fabric

Abstract – The pore volume resulting from the clay particle fabric was investigated on undisturbed samples from clayey soils. The results show that the variations of this pore volume are related to clay mineralogy, which is characterized by the cation exchange capacity. A morphological model, which takes the measured pore volume variations into account, is proposed for the fabric of the elementary clay particles.

Abridged English Version – Laboratory studies on the behaviour of clayey soils have shown that the water retention properties at -15 MPa matric potential can be estimated by referring to both the clay content and fabric characteristics [1]. The sample feature, which was selected in order to express the variation of both clay content and the clay fabric, was the pore volume developed by the clay phase inside the sample (V_v^{arg} , cm^3/g) when the soil is at near field capacity. As V_v^{arg} cannot be directly measured, its variation was characterized by using the field bulk volume (V_t^{pr}) since:

$$(1) \quad V_t^{pr} = V_v^{arg} + V_s^{arg+sq}$$

with V_s^{arg+sq} equal to the volume of the solid phase and by considering the pore volume due to biological activity or cracks to be insignificant with regard to the pore volume due to clay fabric [1]. Moreover, a recent study on the water retention properties of clayey soils showed low variations of V_v^{arg} with soils resulting from the same pedogenesis on a particular parent material [2]. In this Note, the latter result is explained by slight variations of the clay mineralogy, and by V_v^{arg} variations related to changes in such mineralogy.

MATERIAL AND METHODS. – The experiments were performed with 86 samples collected from B horizons in northern France, during winter at near field capacity when swelling is at maximum (*Fig. 1*). They are Cambisols that developed over marl and limestone (Triassic and Jurassic). V_t^{pr} was measured with the kerosene method [3] on centimetric clods obtained by manual breaking of the undisturbed and undried collected samples. The cation exchange capacity was determined with the Metson method on air dried and sieved samples. Results were expressed with respect to dry sample mass, after oven-drying at 105°C for 24 hrs.

Note présentée par Gorges PÉDRO.

RESULTS AND DISCUSSION. — Earlier work done with pure clays showed the pore volume as being closely related to the clay mineralogy ([4], [5]). Later on, the role of clay mineralogy was discussed using clays extracted from soils ([6], [7]), but no work had been done on the pore volume of the clay fabric in clay phases of undisturbed soil samples.

The determination of V_v^{arg} requires that the pore volume due to cracks and biological activity can be neglected against the pore volume due to the clay fabric. That hypothesis can be discussed indirectly by analysing the water saturation of the samples. The relationship between V_t^{pr} and the water content (W , cm^3/g) is:

$$(2) \quad V_t^{pr} = 0.385 + 1.01 W \quad (r=0.99; n=86).$$

This is not significantly different from the equation:

$$(3) \quad V_t^{pr} = 0.377 + W$$

which corresponds to water-saturated samples with a solid phase volume of $0.377 \text{ cm}^3/\text{g}$ (reciprocal of 2.65 g/cm^3). V_v^{arg} was calculated with equation (1) by using $0.385 \text{ cm}^3/\text{g}$ as the solid phase volume which is the ordinate at the origin for equation (2). Thus:

$$(4) \quad V_v^{arg} = V_t^{pr} - 0.385.$$

In order to separate the contribution on the clay content from that of the clay fabric for the V_v^{arg} variation, we decomposed V_v^{arg} as follows:

$$(5) \quad V_v^{arg} = t^{arg} \times v_v^{arg}$$

with t^{arg} = clay content (grammes per gramme of sample) and v_v^{arg} = pore volume developed by the clay phase (cubics centimetres per gramme of clay). Clay mineralogy was characterized by the cation exchange capacity (cec^{arg} , in mequivalent per gram of clay). The relationship between v_v^{arg} and cec^{arg} indicates the pore volume variation of the clay phase as being related to the clay mineralogy ($r=0.73; n=86$) (Fig. 2). Studies by transmission electron microscopy on clays extracted from clayey soils have shown that the cation exchange capacity of the clayey particles is related to the number of sheets which constitute the elementary clay particles [8].

This interpretation of the relationship between v_v^{arg} and cec^{arg} is consistent with the results from other work on elementary particles of illite, interbedded illite-smectite and smectite extracted from soils ([9], [10], [11]). By referring to the work that proposed a new conceptual model for interbedded clays ([9], [10]), we proposed a morphological model for the fabric of elementary particles that is consistent with the relationship between v_v^{arg} and cec^{arg} (Fig. 3).

CONCLUSION. — A relationship exists between the pore volume developed by the clay phase under maximum swelling conditions and clay particle mineralogy that is characterized by the cation exchange capacity. The latter is interpreted as being an estimation of the number of sheets of elementary clay particles, thus explaining the increase in pore volume with the cation exchange capacity. The results also explain why the estimate of water retention properties of clayey soils is better when their cation exchange capacity is taken into account, as compared to the estimate obtained with the clay content alone ([1], [2], [12]).

I. INTRODUCTION. — Dans une précédente Note, il a été montré que l'on peut prévoir les propriétés de rétention en eau d'échantillons non perturbés de sols argileux à un potentiel matriciel de -15 MPa en se référant aux caractéristiques des argiles [1]. La qualité de la prévision est maximale, lorsque l'on prend en compte à la fois la quantité

d'argile et son organisation. La grandeur qui a été retenue pour y parvenir est le volume poral développé par la phase argileuse (V_v^{arg} , en centimètre cube par gramme d'échantillon) lorsque le sol est dans un état d'hydratation proche de la capacité au champ et, par la même, en état de gonflement maximal. L'estimation de V_v^{arg} peut être réalisée à partir du volume massique (V_i^{pr} , en centimètre cube par gramme d'échantillon) de mottes de quelques centimètres cubes de volume pour lesquelles l'organisation est conservée. En effet, s'il est possible de négliger pour de tels échantillons le volume de pores biologiques et de fissures devant celui dû à la phase argileuse, on peut écrire la relation suivante [1] :

$$(1) \quad V_i^{pr} = V_v^{arg} + V_s^{arg+sq}$$

avec V_s^{arg+sq} égal au volume massique de la phase solide. V_s^{arg+sq} est l'inverse de la masse volumique de la phase solide du sol; il est peu variable et proche de 2,65 g/cm³. Si les seuls pores des échantillons sont ceux de la phase argileuse, V_i^{pr} varie de la même façon que V_v^{arg} . Dans une étude plus récente [2], l'utilisation de la relation (1) a confirmé l'intérêt de la variable V_i^{pr} lorsqu'il s'agit de discuter les propriétés de rétention en eau des sols argileux. Cette étude a aussi mis en évidence que le volume poral développé par la phase argileuse d'un ensemble de sols argileux formés à partir de la même roche mère et résultant du même type de pédogenèse est étroitement corrélé à la teneur en argile. Le volume poral développé par unité de masse d'argile varie donc très peu au sein de tels ensembles de sols. L'objectif de cette Note est de montrer que ce dernier résultat s'explique par une faible variation de minéralogie de la phase argileuse et, de façon plus générale, qu'il est dû à l'existence d'une relation entre le volume poral développé par la phase argileuse et sa constitution minéralogique.

II. PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE. — Un ensemble de 86 horizons argileux, non calcaires ou très faiblement calcaires (teneur inférieure à 2 % de l'échantillon), a servi de support à cette étude. Les sols échantillonnés sont situés pour plus des trois quarts en Lorraine et, pour les autres, dans le Sud du Bassin parisien. Un grand nombre de ces sols sont des sols faiblement différenciés et développés à partir de marnes et de calcaires marneux du Lias et du Trias en place ou remaniés durant le Quaternaire : ils ont alors été généralement déplacés et redistribués le long des versants. Une dizaine d'échantillons proviennent de sols plus différenciés qui possèdent un horizon B textural net. Dans ce dernier cas, les sols sont développés dans des matériaux argilo-limoneux ou limono-argileux qui reposent sur des calcaires durs du Jurassique. L'échantillonnage effectué couvre une large gamme, aussi bien au plan des teneurs en argile que du point de vue de leur nature minéralogique. La teneur en carbone organique est inférieure à 5 g/kg, excepté pour trois échantillons où elle est comprise entre 5 et 9 g/kg. Les caractéristiques des échantillons sont présentées dans la figure 1.

Des échantillons non perturbés de dimensions décimétriques ont été prélevés en fin d'hiver dans des horizons de moyenne profondeur (30-80 cm) et en conditions proches de la capacité au champ. Ces échantillons ont été stockés de façon à préserver leur état d'hydratation *in situ* lors du prélèvement. Avant chaque série de déterminations, les échantillons ont été fragmentés à la main en mottes de 5 à 10 cm³ de volume pour lesquelles l'organisation naturelle est conservée. Le volume massique de ces mottes (V_i^{pr} , cm³/g) et leur teneur en eau ont été déterminés à partir d'un lot de dix à quinze mottes à l'aide de la méthode au pétrole [3]. La capacité d'échange cationique a été déterminée à l'aide de la méthode Metson sur les échantillons séchés à l'air, puis tamisés

à 2 mm. Les résultats ont été rapportés à la masse de l'échantillon séché à 105°C à l'étuve pendant 24 h.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSION. — (1) Notre objectif est d'étudier la relation entre la minéralogie de la phase argileuse et le volume poral qu'elle développe. Les études sur matériaux argileux modèles ont en effet montré que pour un état d'hydratation donné, ce volume poral est fonction de la nature minéralogique des particules d'argile ([4], [5]). Il augmente dans le sens kaolinite, illite et smectite. Par la suite ([6], [7]), ce résultat obtenu sur matériaux argileux modèles a été validé sur des argiles extraites de sols, mais aucune étude du volume poral développé par l'assemblage des particules d'argiles n'a encore concerné les argiles de matériaux non perturbés du sol.

L'utilisation de la relation (1) implique que l'on puisse négliger le volume de pores biologiques et de fissures devant celui dû à l'assemblage des particules d'argile. Une validation indirecte de l'absence de ces pores peut être apportée par l'étude de l'état de saturation des échantillons lors du prélèvement : si ces échantillons sont saturés ou quasi-saturés, le volume de pores de taille relativement grande et pouvant être vidangés à de faibles valeurs de succion est nécessairement très faible. La droite de régression entre V_t^{pr} et la teneur en eau au moment du prélèvement (W , en cm^3/g) est la suivante :

$$(2) \quad V_t^{pr} = 0,385 + 1,01 W \quad (r = 0,99; n = 86).$$

Les écarts-types des paramètres valent 0,005 pour l'ordonnée à l'origine et 0,016 pour la pente. Cette équation est non significativement différente de la droite de saturation d'équation :

$$(3) \quad V_t^{pr} = 0,377 + W$$

qui correspond à des matériaux de masse volumique du solide égale à 2,65 g/cm^3 .

(2) L'ordonnée à l'origine donnée par la droite de régression (2) étant égale à 0,385, nous avons calculé V_v^{arg} avec l'hypothèse que le volume massique du solide est égal à 0,385 cm^3/g . On peut écrire alors :

$$(4) \quad V_v^{arg} = V_t^{pr} - 0,385.$$

Quant aux variations de V_v^{arg} , si l'on suppose l'organisation des particules d'argiles homogène au sein des échantillons, on peut écrire :

$$(5) \quad V_v^{arg} = t^{arg} \times v_v^{arg}$$

avec t^{arg} : teneur massique en argile (g/g d'échantillon) et v_v^{arg} : volume poral développé par la phase argileuse en centimètre cube par gramme d'argile. La teneur en argile étant connue pour chaque échantillon, nous avons calculé v_v^{arg} .

La caractérisation minéralogique de la phase argileuse a été réalisée en se référant à un élément global : sa capacité d'échange cationique (cec^{arg} en meq/g d'argile). Celle-ci a été calculée en rapportant la capacité d'échange cationique déterminée pour chaque échantillon (CEC, en meq/g d'échantillon) à la quantité d'argile suivant la relation :

$$(6) \quad \text{cec}^{arg} = \text{CEC}/t^{arg}.$$

Une relation entre v_v^{arg} et cec^{arg} , et donc entre le volume poral développé par la phase argileuse et sa nature minéralogique existe (fig. 2). Une régression linéaire donne :

$$(7) \quad v_v^{arg} = 0,275 + 0,067 \times \text{cec}^{arg} \quad (r = 0,73; n = 86).$$

Cette relation entre le volume poral de la phase argileuse et sa capacité d'échange cationique nous amène à rediscuter la signification de cette dernière variable. La capacité d'échange cationique de l'argile varie en fonction des caractéristiques cristalochimiques

des feuillets à la surface desquels sont localisés les sites d'échange et de l'accessibilité de ces derniers dans l'espace interfeuillets. Les observations en microscopie électronique à transmission sur des argiles extraites de sols formés à partir des mêmes matériaux géologiques que ceux concernés par cette étude ont montré que la morphologie des particules élémentaires d'argile de type 2 : 1 varie avec la capacité d'échange cationique [8]. Selon ces observations, le passage d'un pôle illitique, où la capacité d'échange cationique est de 0,3 à 0,5 mequivalents par gramme d'argile, à un pôle smectitique où elle est de 0,6 à 0,7 mequivalents par gramme, s'accompagne d'une diminution du nombre de feuillets par particule élémentaire. La variable cec^{arg} peut alors être interprétée comme étant un estimateur du nombre moyen de feuillets par particule élémentaire d'argile de type 2 : 1, puisque ce sont ces particules qui sont essentiellement à l'origine de la capacité d'échange cationique.

(3) Cette interprétation, qui implique que la charge électrique du feuillet soit relativement constante, rejoint celle proposée dans d'autres travaux à propos de la morphologie des particules élémentaires d'illite, d'interstratifiés illite-smectite et de smectite de sols ([9], [10], [11]). Ces travaux ont en effet montré que des smectites de sol peuvent être constituées de particules élémentaires de faible extension latérale et composées même d'un seul feuillet de 10 Å. Elles se distinguent dans ce cas nettement des smectites des matériaux argileux modèles utilisées dans de nombreux travaux [4]. Quant aux particules élémentaires d'illite, il s'agit de cristallites constitués au moins de deux feuillets, et au plus de 5 à 6 feuillets, les espaces interfeuillets étant anhydres et saturés par des cations K^+ .

En s'appuyant sur les morphologies de particules élémentaires proposées ([9], [10], [11]), nous avons établi un modèle morphologique d'assemblage de particules d'argile qui rend compte de l'évolution conjointe de v_p^{arg} et de cec^{arg} correspondant à la relation (7) (fig. 3). Selon ce modèle, l'augmentation de cec^{arg} résulte d'une diminution du nombre de feuillets par particule élémentaire et, sans préjuger de l'existence de niveaux d'organisation plus macroscopiques, l'eau est retenue à l'échelle de l'assemblage des particules élémentaires. De la sorte, le volume poral, et donc le volume d'eau puisque celui-ci est saturé d'eau, rapporté à la surface externe des particules est constant. La quantité d'eau retenue par la phase argileuse d'un sol argileux, en condition de gonflement maximal, serait par conséquent fonction de la surface externe des particules d'argile. La nature minéralogique des particules d'argile interviendrait donc essentiellement par ce qu'elle implique en terme de nombre de feuillets par particule élémentaire.

CONCLUSION. — Les résultats présentés dans cette Note mettent en évidence l'existence d'une relation entre le volume poral développé par la phase argileuse dans les sols argileux, lorsqu'ils sont en condition de gonflement maximal, et la minéralogie de cette phase argileuse que l'on caractérise par sa capacité d'échange cationique. En accord avec les résultats d'études sur des argiles extraites de sols, nous avons été conduits à interpréter la variable capacité d'échange cationique comme étant un estimateur du nombre moyen de feuillets par particule élémentaire d'argile et, par là même, du degré de division de la phase argileuse. Ce degré de division de la phase argileuse serait la caractéristique majeure des échantillons expliquant l'accroissement du volume poral développé par la phase argileuse lorsque sa capacité d'échange augmente.

Ainsi s'explique que la prévision des propriétés de rétention en eau des sols argileux soit améliorée lorsque l'on utilise la capacité d'échange cationique de l'échantillon à la place de la seule teneur en argile ([1], [12]). En effet, selon l'interprétation proposée, les

variations à la fois de la teneur en argile et du volume poral qu'elle développe sont liées à la capacité d'échange cationique de l'échantillon. On comprend alors que cette caractéristique soit un meilleur estimateur du volume massique (V_p^r), et par conséquent, des propriétés de rétention en eau puisque celles-ci ont été reconnues étroitement dépendantes du volume massique ([1], [2]).

Note remise le 23 mars 1992, acceptée après révision le 21 mai 1992.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. BRUAND, D. TESSIER et D. BAIZE, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 307, série II, 1988, p. 1937-1941.
- [2] A. BRUAND, *J. Soil Sci.*, 41, 1990, p. 491-497.
- [3] G. MONNIER, P. STENGEL et J. C. FIES, *Ann. agron.*, 24, (5), 1973, p. 533-545.
- [4] D. TESSIER, Étude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. *Thèse Sc.*, Paris-VII, 1984, 361 p.
- [5] G. PEDRO et D. TESSIER, *5th Meeting of the European Clay Group*, Prague, 1983, p. 417-428.
- [6] D. TESSIER, A. BEAUMONT et G. PEDRO, *Soil Micromorphology*, L. A. DOUGLAS éd., Elsevier Science Publishers, 1990, p. 115-121.
- [7] D. TESSIER, A. BRUAND et A. BEAUMONT, *Abstracts 9th Int. Clay Conf.*, Strasbourg, 1989, p. 400.
- [8] M. ROBERT, M. HARDY et F. ELSASS, *Clay Minerals*, 26, 1991, p. 409-420.
- [9] P. H. NADEAU, J. M. TAIT, W. J. MCHARDY et M. J. WILSON, *Clay Minerals*, 19, 1984, p. 67-76.
- [10] P. H. NADEAU, M. J. WILSON, W. J. MCHARDY et J. M. TAIT, *Clay Minerals*, 19, 1984, p. 757-769.
- [11] M. J. WILSON, *Proceedings of the International Clay Conference*, Denver, 1985, L. G. SCHULTZ, H. VAN OLPHEN et F. A. MUMPTON éd., The Clay Minerals Society, Bloomington, Indiana, 1987, p. 167-173.
- [12] P. H. OSTY, *Ann. Agron.*, 22, (4), 1971, p. 451-476.

A. B. : *Service d'Étude des Sols et de la Carte pédologique de France*,
I.N.R.A., Ardon, 45160 Olivet;

D. Z. : *Division Drainage, C.E.M.A.G.R.E.F.*,
B.P. n° 121, 92185 Antony Cedex.

EXPLICATIONS DE LA PLANCHE

Fig. 1. — Caractéristiques des échantillons étudiés (teneur en argile : a , capacité d'échange cationique : b et volume massique : c).

Fig. 1. — *Characteristics of the samples (a, clay content, b, cation exchange capacity and c, bulk volume).*

Fig. 2. — Volume poral développé par la phase argileuse (v_p^{arg}) en fonction de sa capacité d'échange cationique (cec^{arg}).

Fig. 2. — *Pore volume due to clay particle fabric (v_p^{arg}) versus the cation exchange capacity (cec^{arg}).*

Fig. 3. — Morphologie des assemblages de particules élémentaires d'argile proposée pour rendre compte des variations enregistrées pour v_p^{arg} en fonction de la capacité d'échange cationique (cec^{arg}).

Fig. 3. — *Proposed morphology for a elementary clay particle fabric that takes both the clay pore volume (v_p^{arg}) and clay mineralogy (cec^{arg}) variations into account.*

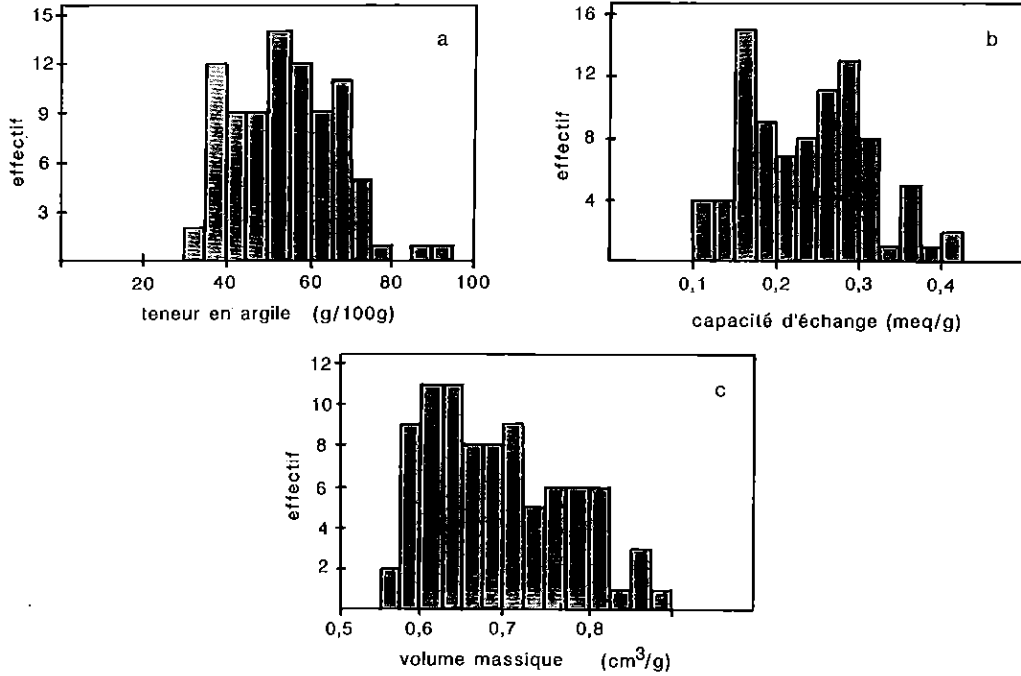


Fig. 1

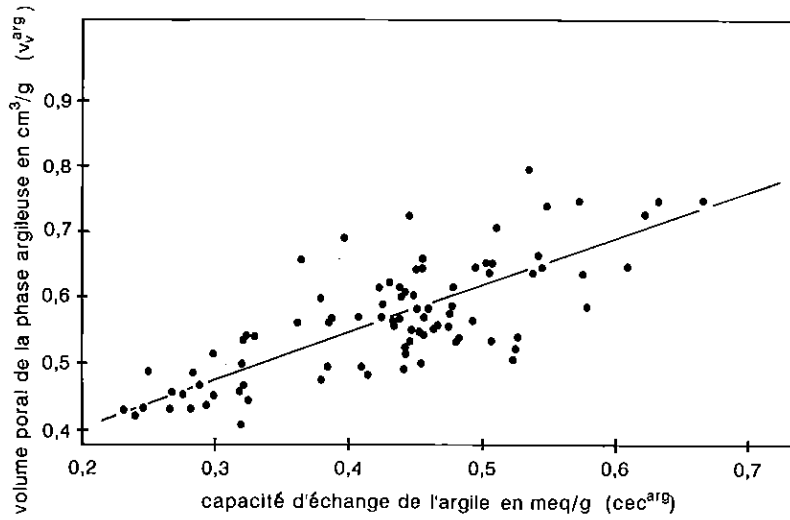


Fig. 2

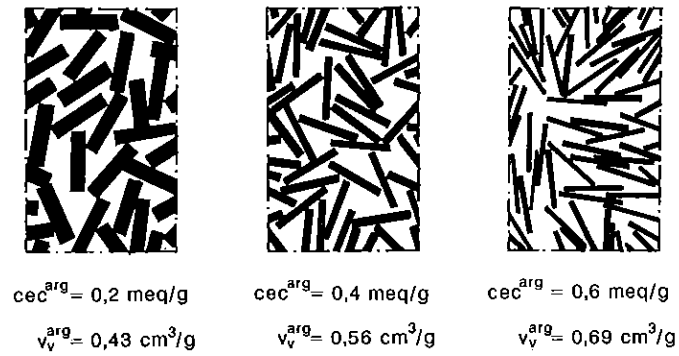


Fig. 3

