

**MINÉRALOGIE, MICROORGANISATION ET PROPRIÉTÉS PHYSIQUES
DES MINÉRAUX ARGILEUX**

**MINERALOGÍA, MICROORGANIZACIÓN Y PROPIEDADES FÍSICAS
DE LOS MATERIALES ARCILLOSOS**

M. ROBERT et D. TESSIER

RÉSUMÉ

Une synthèse est faite sur une série de travaux récents effectués à la Station de Science du Sol (I.N.R.A. Versailles) ayant traité à des mises au point méthodologiques, à la caractérisation de l'organisation des argiles et de leurs associations, et à l'étude des propriétés hydriques qui en découlent.

Si l'on veut caractériser les microstructures des argiles, il est indispensable de contrôler l'état hydrique du système argile-eau. La **méthodologie** présentée permet à la fois de fixer la contrainte, de déterminer les teneurs en eau en fonction des contraintes comprises entre 0 et 1000 bars (courbe teneur en eau/pF) et d'observer, sans les modifier, les micro-organisations correspondantes.

De telles études (TESSIER, 1984) effectuées sur des argiles de référence, et des mélanges d'argiles permettent d'opposer les argiles à particules rigides ou cristallites (kaolinite, micromicas) aux minéraux de type smectites qui présentent un réseau tridimensionnel à géométrie variable formé de tactoïdes ou quasicristaux.

Il est possible également de caractériser des associations argiles/matière organique ou argiles/fer ou aluminium qui conduisent à des micro-organisations bien particulières avec modification complète des propriétés physiques. Une opposition est faite à ce sujet entre les composés cristallisés du fer et de l'aluminium peu actifs sur les propriétés et les polycations ou composés amorphes.

Il est possible, dans le cas des sols, d'effectuer de telles études sur la fraction argile des sols (plasma < 2 μ) ou directement sur des mottes.

Les résultats devraient permettre de caractériser les micro-organisations des grands types de sol, de prévoir leurs propriétés hydriques et ainsi de mieux connaître l'ensemble du fonctionnement du sol.

RESUMEN

Se ha efectuado la síntesis de una serie de trabajos recientes llevados a cabo en la Station de Science du Sol (INRA Versailles) que han dado lugar a una puesta a punto de metodología, a la caracterización de la organización de las arcillas y sus asociaciones, y el estudio de las propiedades hídricas derivadas de ellos.

Si queremos caracterizar las microestructuras de las arcillas, es indispensable controlar el estado hídrico del sistema arcilla-agua. La metodología presentada permite a la vez de fijar la limitación, determinar el contenido en agua en función de los límites comprendidos entre 0 y 1000 bares (curva de contenido en agua/pF) y observar, sin modificarlas las microorganizaciones correspondientes.

Este tipo de estudios (TESSIER, 1984) llevados a cabo sobre arcillas de referencia, y mezclas de arcillas que permiten comparar las arcillas con partículas rígidas o cristalitas ("caolinitas, micromicas") con minerales de tipo smectites que presentan una red tridimensional de geometría variable formado de tactoïdos o quasicristales.

También se pueden caracterizar asociaciones como

arcillas/materia organica o arcillas/hierro ó aluminio que dan lugar a microorganizaciones especiales con modificacion completa de las propiedades físicas. En este caso se lleva a cabo el enfrentamiento entre las componentes cristalijados de hierro y aluminio poco activos sobre las propiedades y los policationes ó compuestos amorfos, muy eficientes. Es posible, en el caso de los suelos, llevar a cabo este tipo de estudios sobre la fracción arcillosa de los suelos (plasma $< 2 \mu$) ó directamente sobre terrones.

Los resultados permitiran caracterizar los microorganizaciones de los grandes tipos de suelos, prever sus propiedades hidricas y asi conocer mejor el conjunto del funcionamiento del suelo.

Il est généralement bien établi que les minéraux argileux déterminent de manière prépondérante à la fois les propriétés chimiques et physiques des sols.

En ce qui concerne les propriétés chimiques, il est assez aisé de passer du type de feuillet donc du niveau cristallographique, à la capacité d'échange et donc à la réactivité chimique.

Ce passage est par contre beaucoup plus difficile si l'on veut prévoir les propriétés physiques. A ce niveau par exemple, le type de feuillet et son degré d'hydratation tel que l'on peut le déterminer par diffraction des rayons X (7 à 15 Å) n'a aucune signification vis-à-vis des propriétés hydriques des sols.

Afin de faire progresser les connaissances sur cet aspect, il a d'abord été nécessaire, et ce sera la première partie de cet article, de mettre au point une méthodologie pour la caractérisation du système argile-eau.

Il est alors possible d'étudier à la fois la microorganisation et les propriétés hydriques des argiles, et les modifications que sont susceptibles d'introduire des composés comme le fer, l'aluminium ou la matière organique.

Dans une dernière partie, nous nous limiterons à citer quelques premiers exemples d'applications aux sols, de ces travaux récents développés à l'INRA (Station de Science du Sol, Versailles).

I. METHODOLOGIE CONCERNANT LA CARACTERISATION DU SYSTEME ARGILE-EAU

Il est indispensable tout d'abord d'avoir un bon **contrôle de l'état hydrique** et ceci pour des contraintes nulles, c'est-à-dire allant grosso modo de la saturation jusqu'à des contraintes correspondant à un séchage à l'air. Le domaine le plus important est celui qui se situe aux très hauts potentiels de l'eau, autrement dit des contraintes hydriques de 10 bars (pF 4) à 0,01 bars (pF 1) qui correspondent au fonctionnement hydrique et biologique le plus normal pour les sols.

Pour caractériser les échantillons de sols ou d'argiles, il est important de veiller à ne pas sécher les échantillons

de sol plus qu'il n'ont été séchés in situ. Une dessiccation à l'air modifie le plus souvent irréversiblement les organisations et les propriétés. Notons que c'est ce qui est fait généralement lors des études physiques et minéralogiques classiques.

Les dispositifs utilisés pour contrôler le pF sont classiques au-dessus de pF 4 : ils correspondent à l'utilisation de la presse de Richards ou à l'équilibre avec des solutions salines. Au-dessous de pF 4 un dispositif original (TESSIER, 1984) est préconisé comprenant un tube de filtration soumis à une pression pneumatique déterminée (fig.1). L'échantillon disposé sur le filtre est au contact d'une solution dont on peut contrôler la concentration (potentiel osmotique). L'échantillon peut être soit du plasma argileux, soit des mottes. Il est alors possible de caractériser les propriétés de rétention en eau en fonction du potentiel. La mesure de la teneur en eau pondérale et du volume (déterminé au pétrole, MONNIER et al., 1973) se fait après équilibre de quelques jours.

La caractérisation des organisations est réalisée après avoir fixé l'état hydrique de l'échantillon. On peut ensuite utiliser différentes techniques (fig.2).

* Une congélation-lyophilisation qui permet ensuite d'étudier l'échantillon fracturé en microscopie électronique à balayage (dispositif spécial dit cryoscan utilisé à Versailles).

* Le remplacement de l'eau par l'acétone ou l'alcool, puis l'utilisation d'une résine. On peut ainsi obtenir des lames minces pour la microscopie optique ou des lames ultraminces pour la microscopie électronique à transmission.

* **Des mesures de porosité** peuvent être effectuées sur les échantillons : les pores de 20 μm à 10 nm sont étudiés par l'utilisation de l'injection mercure, de 10 à 3 nm par l'adsorption d'azote (CAMBIER, et PROST, 1981). Il faut noter que si pour certains matériaux l'étude de la porosité peut être effectuée après congélation-lyophilisation d'un échantillon humide (van OORT, 1982), des artéfacts interviennent pour bon nombre d'échantillons par développement de cristaux de glace (A. BRUAND, 1985).

* Une des seules possibilités de caractériser la porosité d'un échantillon à un potentiel hydrique déterminé reste donc le tracé des courbes teneur en eau volumique-contrainte et l'application de la loi de Laplace pour connaître la taille maximale des pores remplis d'eau.

Sur des échantillons remaniés (plasma argileux) des mesures de conductivité hydraulique sont réalisables en saturé sous une charge hydraulique déterminée en appliquant la loi de

Darcy (dispositif R. PROST, 1979).

II. MICROORGANISATION DES PRINCIPALES ARGILES

Si on part de la maille élémentaire cristallographique, l'unité de base est évidemment le feuillet. A partir de différents feuillets, qui ont une grande extension latérale dans le plan a b, la superposition face à face conduit à la particule primaire qui a une importance essentielle en ce qui concerne les propriétés physiques.

Ensuite, on peut retrouver plusieurs grands types d'organisation (fig.3) :

- les particules rigides, isolées, cas des kaolinites, micromicas, vermiculites, chlorites. On peut aussi avoir des associations de particules de petite taille comme dans le cas des illites (domaines).

- Dans le cas des smectites (photos planche I), les particules sont associées plutôt par recouvrement face à face que par liaison bord bord pour former des tactoïdes quand la double couche diffuse est formée (smectites sodiques), ou des quasi cristaux lorsqu'on a des couches d'eau organisées entre les feuillets sont présentes (smectites calciques).

En ce qui concerne les propriétés hydriques, on aura dans un cas (kaolinites, illites) des particules rigides qui vont simplement s'écartier ou se rapprocher en fonction de l'hydratation ou de la dessiccation (photos 1-2 planche II). Dans un autre cas au contraire, pour les smectites, on a une argile à géométrie variable et qui est susceptible de changer dans les trois dimensions de l'espace en fonction de la variation de teneur en eau. Cette dernière dépend :

- du potentiel matriciel
- de la concentration en sels ou de la nature des sels (potentiel osmotique)
- de l'histoire du matériau (cycles de dessiccation-humectation, origine géologique...)

III. PROPRIETES HYDRIQUES DES ARGILES

Avec les méthodes décrites précédemment, il est possible de caractériser les variations d'organisation de l'argile à différentes échelles au cours de la dessiccation ou de la réhumectation. On peut aussi mesurer la rétention de l'eau et le volume en fonction du potentiel hydrique. La figure 4 représente des courbes de rétention en eau de différentes argiles de pF 1 à pF 6.

On note que la montmorillonite se différencie des autres argiles par la forte rétention en eau aux faibles contraintes et par la forme de la courbe.

Pour les autres argiles (illites, kaolinites), la rétention varie peu avec le type de cation ou au cours des cycles humectation dessiccation. Elle dépend surtout de la taille et de la forme des particules, c'est-à-dire de la texture de l'argile. Par contre, la rétention en eau de la montmorillonite va varier énormément selon le type de cation. Pour une montmorillonite Na (faible concentration), on a un système très gonflant quel que soit le niveau de dessiccation et on peut passer de l'état de suspension, au gel et au solide plastique : il n'y a pratiquement pas de limitation au gonflement (cas des sols sodiques). La limite de retrait ne peut pas le plus souvent être atteinte. Avec le calcium, en revanche, on a une irréversibilité progressive des phénomènes plus l'argile a été séchée à un pF élevé, moins elle retient d'eau. On retrouve dans ce type de système une analogie avec la pression de surconsolidation ou la notion de contrainte équivalente.

Enfin, l'halloysite constitue elle aussi un système particulier puisque dans une très large gamme de contrainte on n'a pas de variation de teneur en eau (GRANDJEAN et al. 1983).

Par ailleurs, le fait d'avoir mesuré les volumes permet d'établir (fig.5) pour chaque valeur de pF la répartition entre les trois phases : solide eau et air. On a également selon la loi de Laplace, pour chaque valeur de la pression de gaz maximale sous la presse à membrane la taille des pores remplis d'eau. Ces données sont essentielles pour le fonctionnement hydrique et la vie biologique.

Pour la montmorillonite, le changement de volume est très important, l'argile reste saturée au niveau de l'arrangement des particules presque jusqu'à dessiccation complète.

Pour la kaolinite de grande taille, ou pour l'illite après une perte d'eau importante, l'eau est située entre les particules, et la limite de retrait ainsi que le point d'entrée d'air apparaissent à des contraintes beaucoup plus faible et qui dépendent de la taille des particules (TESSIER, 1984).

Ce sont les argiles qui changent le plus de volume qui vont être les plus actives dans les phénomènes de dessiccation humectation. Les conséquences macroscopiques seront importantes avec les smectites et l'on a formation de fentes de retrait à la dessiccation ou de leur fermeture en réhumectation. Ainsi, nous verrons que l'apparition lors de l'humectation de plan de cisaillement, que ces fentes existent à différentes échelles dans les vertisols. On doit souligner les propriétés exceptionnelles de la montmorillonite par rapport aux autres argiles : propriétés de gonflement et d'hydratation en relation avec la géométrie variable de l'argile. Il faut néanmoins souligner que ce n'est pas l'eau interfoliaire qui est importante : en effet, l'hydratation

interfoliaire de l'argile à 2 couches (15 A) n'a d'existence qu'à partir de pF 5,5 mais c'est l'eau présente dans la porosité < à 2 μm qui est surtout impliquée dans les phénomènes de gonflement retrait.

IV. ORGANISATION ET PROPRIETES DES MATERIAUX ARGILEUX

Les exemples décrits précédemment concernent des argiles de référence, parfaitement définies et homogènes, mais la minéralogie des argiles des sols montre une réalité beaucoup plus complexe.

1) Cas des mélanges et des minéraux interstratifiés

Les mélanges d'argiles semblent être une règle quasi générale. Si ce sont des argiles à particules rigides (kaolinite, illite), la présence de ce type d'argile aura peu d'importance sur les propriétés macroscopiques (hydratation, gonflement). Il n'en est pas de même si on introduit dans le mélange des smectites. Celles-ci vont pouvoir constituer un "liant" entre les autres particules et modifier considérablement les propriétés (gonflement, structuration). Les résultats obtenus par CAMARA (1981) montrent qu'au delà de 25 % de smectite, les propriétés d'hydratation, ainsi que le gonflement et la microstructure, sont fortement modifiés. Ce type de mélange kaolinite-smectite à dominance kaolinite, semble très fréquent dans les sols de Cuba, et des propriétés physiques et chimiques originales pourraient donc s'expliquer par cette raison.

Dans le cas des minéraux interstratifiés, illite-smectite, fréquents dans les régions tempérées ou les sédiments, kaolinite-smectite plus spécifiques des régions tropicales, il est probable que la composante smectite introduira les mêmes modifications d'organisation et de comportement.

2) Intervention des composés du fer et de l'aluminium

La présence de composés du fer et de l'aluminium est une règle dans les sols en particulier pour les sols fersiallitiques et ferrallitiques où ils atteignent une proportion importante.

Des travaux expérimentaux réalisés avec la méthodologie présentée précédemment et avec les mêmes minéraux argileux, permettent de préciser l'action des différents types de composés Fe-Al associés aux argiles (ROBERT et al., 1982, 1983, 1985).

- Les composés cristallisés de type goethite, hématite ou gibbsite se développent indépendamment des surfaces des argiles et n'en modifient ni l'organisation, ni les propriétés (photos 3 et 4, planche II).

- Les espèces cationiques simples Al^{3+} ou Fe^{3+} ont un rôle flocculant sur les argiles surtout visible sur les smectites où l'on note la présence de particules plus épaisses et plus rectilignes qui semblent donc plus rigides (photo 5, planche II).

- Les espèces les plus actives à la fois sur l'organisation des argiles et les propriétés hydriques sont les composés amorphes (ou cristallisés à courte distance) de type gel ou ferrihydrite et surtout les espèces polycationiques fortement chargées de type $R^{3+} (OH)^{n+} 3 - n$. Ces composés provoquent la microagrégation des particules de kaolinite ou d'illite par une cimentation entre les particules (photo 7, planche III). Dans le cas des smectites, on a rupture du réseau tridimensionnel caractéristiques argiles Ca ou Na avec formation d'agrégats d'une cinquantaine de microns (photo 6, planche II).

La modification des organisations des argiles s'explique par la fixation de composés de très petite taille ($< 50 \text{ \AA}$) ayant, au-dessous de pH 7, une charge positive élevée. Il en résulte d'importantes modifications de rétention d'eau, donc de la géométrie du système et, en conséquence de la conductivité hydraulique en milieu saturé (augmentation d'un facteur de 100 à 1000). On peut noter aussi qu'une dessiccation suffit à provoquer une fissuration des associations argiles polycations, ce qui entraîne une modification complète de l'ensemble des propriétés des matériaux argileux (rétention d'eau, conductivité hydraulique, etc...).

3) Intervention des composés organiques

Sur ce point également, des études expérimentales permettent d'envisager leur rôle dans les sols. Ainsi, les acides fulvique et humique (VICENTE et ROBERT, 1981) et surtout les polysaccharides (CHENU, 1985) peuvent servir de liants entre les particules (photos 8, 9, 10, planche III). Cet effet sera plus efficace sur les argiles à particules rigides, mais il semble limité pour les smectites, car ils modifient peu le spectre poral et donc la rétention d'eau (CHENU, 1985).

Par contre, la fixation de composés plus hydrophobes sur les surfaces des argiles et tout particulièrement sur celles très réactives des smectites, peut modifier totalement leurs propriétés de mouillabilité. Ceci peut être à l'origine d'une microagrégation des smectites (JOUANY, 1985).

On constate donc qu'avec les composés amorphes, minéraux ou organiques, actifs on a une modification complète des organisations microstructurales des argiles avec en particulier formation de microagrégats. Celle-ci induit également un changement complet des propriétés de surface :

- de flocculation - agrégation

- rétention en eau avant ou après dessiccation
- variation importante des valeurs de conductivité hydraulique.

V. APPLICATION A LA PREVISION DES PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLS

Les résultats présentés ont été obtenu à partir d'argiles pures ou d'associations de ces argiles avec d'autres constituants. Pour l'avenir, il sera nécessaire d'appliquer les connaissances acquises à la prévision des propriétés des sols in situ.

1) En ce qui concerne les **déterminations minéralogiques**, il faudra tout d'abord effectuer des déterminations quantitatives, en particulier pour évaluer précisément le pourcentage de smectite (argile la plus active). Il faudra aussi déterminer d'autres caractéristiques des minéraux en relation directe avec leurs propriétés physiques : surface, taille, forme des particules en relation avec leur cristallinité, constitution des interstratifiés des sols.

2) En ce qui concerne les **propriétés hydriques**, de nombreuses informations peuvent être obtenus à partir d'échantillons de sol non remaniés (mottes de taille avoisinant 10 cm³) et en utilisant la méthodologie décrite précédemment.

Trois grands types de courbes peuvent être obtenus :

- Sur des sols sableux (ou constitués de pseudosables) CHRETIEN (1986), il n'y a pas de variation de volume lors de l'extraction d'eau, le matériau est rigide et les réserves en eau faibles (fig.6 a).

- Sur des sols très argileux (par exemple, les vertisols) les échantillons restent saturés en eau dans une très large gamme de contrainte. La variation de volume est parallèle à la perte en eau. Le sol a donc une forte susceptibilité à la fissuration lors du retrait (fig.6 b).

- Un troisième type de courbes concerne les sols à comportement mixte par exemple lorsque des associations fer-smectite assurent la présence d'air aux faibles pF (pF 1) et qui révèlent la présence d'une macroporosité accessible à l'air et à l'eau s'écoulant par gravité. Le départ d'eau entraîne alors une réduction de volume moindre que le départ d'eau : le sol se fissure à l'échelle de la motte, ce qui permet en particulier l'aération et la pénétration des racines (fig.6 c).

- Dans le cas des sols limoneux, on a généralement un point d'entrée d'air qui se situe à des contraintes relativement faibles (STENGEL, 1981).

Ainsi, des études réalisées sur mottes non remaniées, c'est-à-dire non séchées préalablement à leur étude, permettent d'obtenir au laboratoire des informations précises sur la macroporosité (aération), la structuration, l'eau disponible des sols.

3) Microorganisations et propriétés des sols argileux

Les études morphologiques réalisées à différentes échelles (macro et microscopiques) apportent des renseignements essentiels sur la structure du sol et sa porosité. Nous insisterons seulement ici sur l'intérêt de poursuivre ces études en particulier pour les sols argileux jusqu'au micro et nanostructures (microscopie électronique à balayage et transmission). Nous prendrons pour cela trois exemples :

a) Cas des sols salés riches en smectites

Les études présentées sur le comportement hydrique des différentes argiles en fonction de la nature des sols et de leur concentration. (TESSIER, 1984, HALITIM et al. 1984) montrent que pour la majorité des argiles (kaolinite, illite, chlorite) saturées par du sodium, le phénomène de gonflement lié au développement d'une couche diffuse n'est pas très important. En revanche, le sodium échangeable agit essentiellement sur la dispersion de l'argile.

Par contre, le rôle du sodium devient essentiel sur l'ensemble des propriétés des sols contenant une forte proportion de smectites ou d'interstratifiés à base de smectite. En plus des phénomènes de dispersion, vont intervenir alors des phénomènes de gonflement. Ceci est, comme le montre la microscopie à transmission de la présence de pores de l'ordre du μm qui assurent la rétention de l'eau et de pores plus fins (100 à 200 Å) qui assurent la circulation de l'eau (conductivité hydraulique) au sein de l'argile saturée en eau (photo 11 et 12 planche III).

Le sodium échangeable (de même que la concentration en sels) va jouer sur l'épaisseur des tactoïdes et sur la taille des micropores assurant la communication. Le seuil critique de 15 % de Na, seuil séparant les sols salés des sols sodiques, pourrait ainsi s'expliquer (HALITIM et al., 1983) par une localisation préférentielle du Na sur les surfaces externes des tactoïdes. La formation d'une couche diffuse entraîne la diminution du pore de constriction intertactoïde.

b) Cas des vertisols

Là encore toute la dynamique de l'eau est régie par le comportement des smectites : rétention de l'eau dans la porosité interparticule dont la taille est $< 2 \mu\text{m}$ et circulation de l'eau dans des espaces beaucoup plus grands ($> 5 \mu\text{m}$) qui tendent à disparaître lors des humectations et à se

former au cours des dessiccations. On retrouve alors le développement d'un réseau de fissures au niveau microscopique (photo 12, planche III), mais également à des échelles macroscopiques allant jusqu'au mètre (JAILLARD et CABIDOCHÉ, 1984).

Il est probable que la présence de matières organiques adsorbée à la surface des particules de smectite vient modifier le comportement des smectites, mais c'est bien l'existence de ces réseaux de fissures et de la microporosité qui conditionne les propriétés de ces sols.

c) Cas des oxisols et des sols fersiallitiques

Il est fondamentalement différent selon que l'on a ou pas des associations argile-"fer actif". Nous avons vu précédemment que le fer se fixe sur tous les minéraux argileux, qui se présentent souvent dans les sols sous la forme de très petites particules (quelques centaines d'angström), en provoquant la formation d'agrégats de petite taille ($< 50 \mu\text{m}$). Ceci modifie toutes les propriétés hydriques du sol. C'est le cas pour les sols rouges bien agrégés (CHAUVEL, 1977) dont le comportement physique s'oppose généralement à celui des sols beiges ou jaunes.

On peut là encore distinguer en général deux types de porosité : l'une de très petite taille ($< 100 \text{ nm}$) entre les cristallites qui assure la rétention de l'eau, l'autre de taille beaucoup plus grande interagrégats de cristallites qui assure l'écoulement de l'eau.

CONCLUSION

Nous proposons dans cet article une approche de l'étude du sol, qui doit permettre d'établir le lien entre la minéralogie et l'organisation des constituants d'une part, et les propriétés physiques d'autre part. Tous les résultats que nous avons rapportés ici ont été obtenus sur des constituants argileux ou des associations modèles (argile-fer ou matière organique).

Ces études attirent l'attention sur le fait que pour comprendre le comportement physique des sols, la prise en compte des grands types de particules et de leur organisation est absolument nécessaire.

A partir des exemples traités dans cet article, nous disposons de données de base permettant de comprendre et prévoir certaines propriétés des sols, spécialement des régions tropicales. Ceci tient du fait que ces sols tropicaux sont souvent très argileux et contiennent soit du fer (oxisols), soit de la matière organique (vertisols).

Il est donc important que des études de laboratoire

soient dorénavant menées, parallèlement à des études de terrain, en mettant en oeuvre la même méthodologie sur les principaux sols des régions tropicales.

BIBLIOGRAPHIE

BRUAND A. (1985) - Contribution à l'étude de la dynamique de l'organisation de matériaux gonflants. Application à un matériau argileux d'un sol argilo-limoneux de l'Auxerrois. Thèse Dr. Spécialité Université Paris VII, 225 p.

BRUAND A., TESSIER D. (1985) - Etude de l'organisation d'un matériau argileux en microscopie : modifications intervenant lors de la déshydratation. Réunion Internationale de microscopie des sols (proposé pour publication dans les actes du congrès)

CAMARA L. (1982) - Comportement hydrique et propriétés de gonflement macroscopique de mélanges d'argiles. Thèse 3^e cycle, Université Paris VI, 155 p.

CAMBIER Ph., PROST R. (1981) - Etude des associations argile oxyde : organisation des constituants d'un matériau ferrallitique. Agronomie 1, (9) 713-722

CHAUVEL A. (1977) - Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. Thèse Doct. d'Etat, Univ. Strasbourg, Travaux et Doc. ORSTOM, 62, 532 p.

CHENU C. (1985) - Etude des interactions argiles polysaccharides neutres. Contribution à la connaissance des phénomènes d'agrégation d'origine biologique des sols. Thèse de Doctorat de l'Université Paris VII, 187 p.

CHRETIEN J. (1985) - Role du squelette dans l'organisation des sols. Conséquences sur les caractéristiques de l'espace poral des sols sur arènes et sur terrasses fluviatiles. Thèse Doct.es Sciences Université Dijon, 412 p.

GRANDJEAN E., CABIDOUCHE Y.M., ROBERT M., TESSIER D. (1984) - Effect of allophane hydrique on that of some Guadeloupean andosols. Panel Internacional de Suelos volcanicos. Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo, Julio 1984, Universidad de La Laguna, 26-42

HALITIM A., ROBERT M., TESSIER D., PROST R. (1984) - Influence des cations échangeables (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) et de la concentration saline sur le comportement physique (rétention en eau, conductivité hydraulique) de la montmorillonite. Agronomie, 4, (5) 451-459

HALITIM A. (1985) - Contribution à l'étude des sols des zones

arides. (Hautes plaines steppiques d'Algérie). Morphologie, distribution et rôle des sels dans la genèse et le comportement des sols. Thèse Doct. d'Etat, Univ. de Rennes, 383 p.

JAILLARD B., CABIDOUCHE Y.M. (1984) - Etude de la dynamique de l'eau dans un sol argileux gonflant. I Dynamique hydrique. Sci. Sol (3), 239-251

JOUANY C. (1986) - Propriétés d'organisation et de rétention en eau de montmorillonite saturée par des ions alkylammonium (à paraître).

MONNIER G., STENGEL P. et FIES 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, 533-545.

PEDRO G., TESSIER D. (1985) - Importance de la prise en compte des paramètres texturaux dans la caractérisation des argiles. Proc. Euroclay, Prague.

PROST R. (1979) - Application de mesures de conductivité hydraulique à l'étude de la structure des gels d'argile. Clay Miner., 14, 173-179

ROBERT M., BERRIER J., VENEAU G., VICENTE M.A. (1981) - Action of amorphous compounds on clay particle associations. Proc. Int. Clay Conf., Bologne, 411-422

ROBERT M., VENEAU G., HERVIO M. (1983) - Influence des polycations du fer et de l'aluminium sur les propriétés des argiles. Sci. Sol, 3-4, 235-251

TESSIER D., BERRIER J. (1979) - Utilisation de la microscopie électronique à balayage : dans l'étude des sols. Observation de sols humides soumis à différents pF. Sci. Sol (1) 67-82

TESSIER D. (1984) - Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Thèse Dr. ès-Sciences, Univ. Paris VII, 361 p., INRA Versailles Ed.

TESSIER D. (1984) - Comportement hydrique des matériaux argileux en relation avec leur organisation. Conséquences sur les propriétés macroscopiques. Colloque Fonctionnement hydrique des sols, Dijon, A.F.E.S., 297-308

van OORT F. (1984) - Géométrie de l'espace poral, comportement hydrique et pédogénèse. Application à des sols sous prairie et alpage isus de l'altération des calcshistes sédimentaires en moyenne montagne, Alpes du Nord Beaufortain. Thèse Doct. Ing., I.N.A.P.G., 281 p.

VICENTE M.A., ROBERT M. (1981) - Rôle des acides fulviques et

humiques dans la micro-agrégation des particules argileuses.
C.R. Ac. Sci., 292, II, 1161-1166

FIGURES

FIGURAS

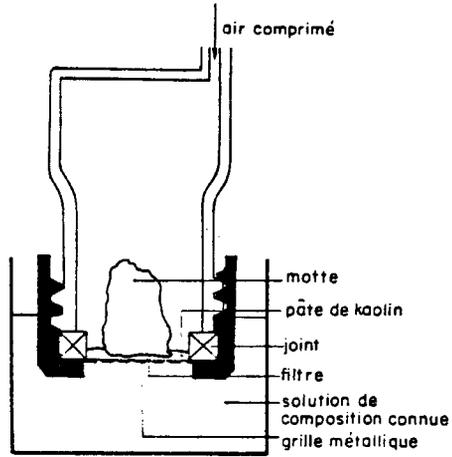


Fig. 1 : Schéma du dispositif de filtration utilisé pour les dessiccations et réhydratation dans le domaine de pression < 1 bar (pF 3).

Fig. 1 : Esquema del sistema de filtración utilizado para las desecaciones y rehidratación a una presión inferior a < 1 bar (pF 3).

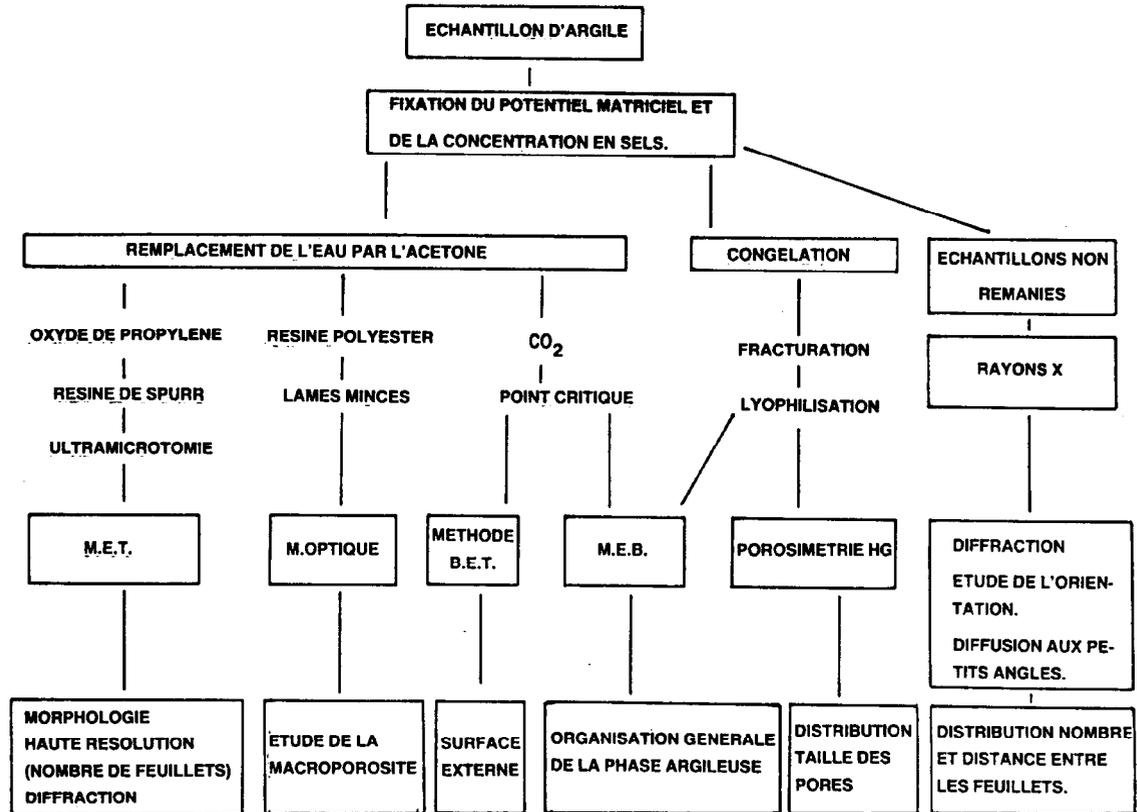


Fig. 2 : Différentes méthodes de caractérisation des constituants et des micro-organisations.

Fig. 2 : Los diferentes métodos para la caracterización de los constituyentes y de las microorganizaciones.

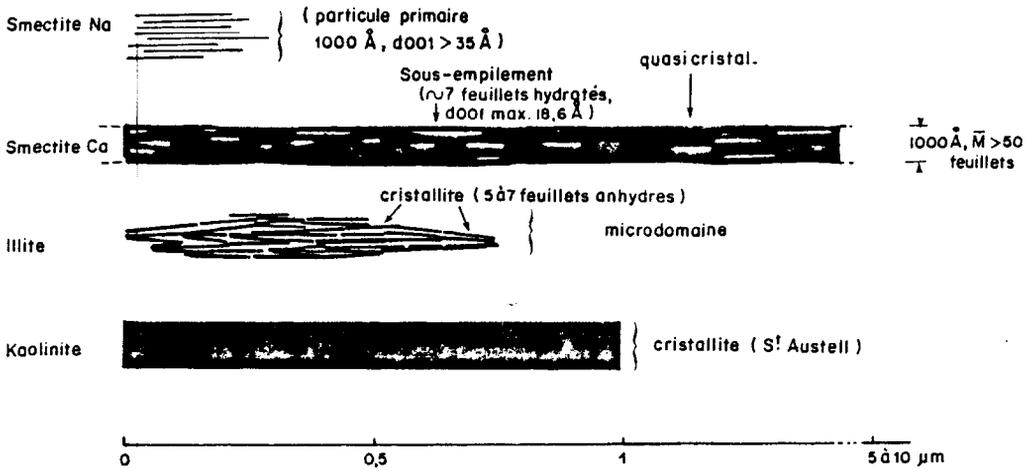


Fig. 3 : Représentation schématique des grands types de particules des argiles aux faibles contraintes.

Fig. 3 : Esquema de los principales tipos de particulas arcillosas con tensiones bajas.

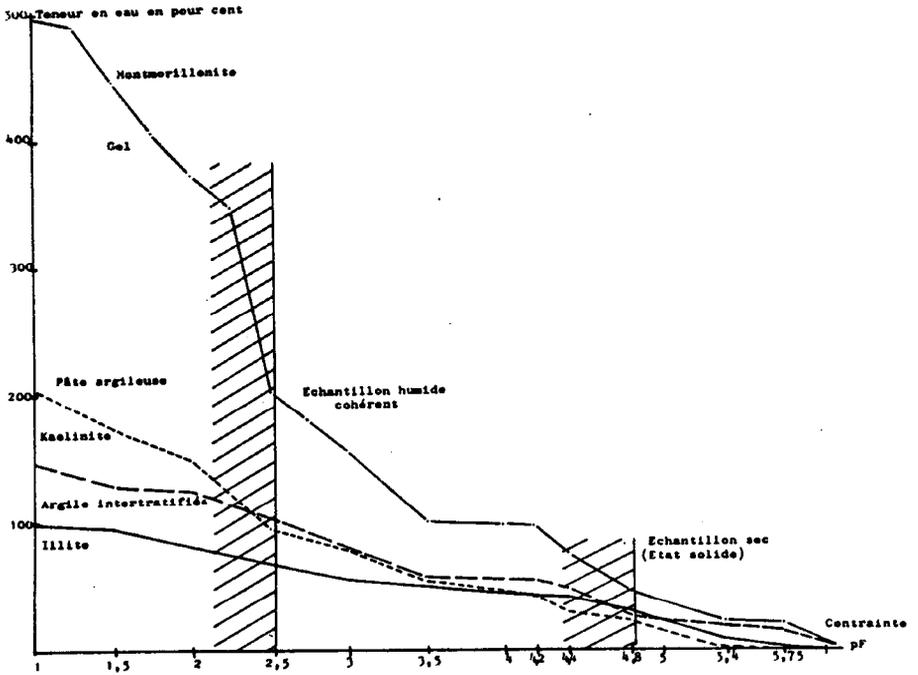


Fig. 4 : Evolution de la teneur en eau en fonction de la contrainte appliquée pour différentes argiles.

Fig. 4 : Evolución del contenido de agua con arreglo a la tensión aplicada para diferentes arcillas.

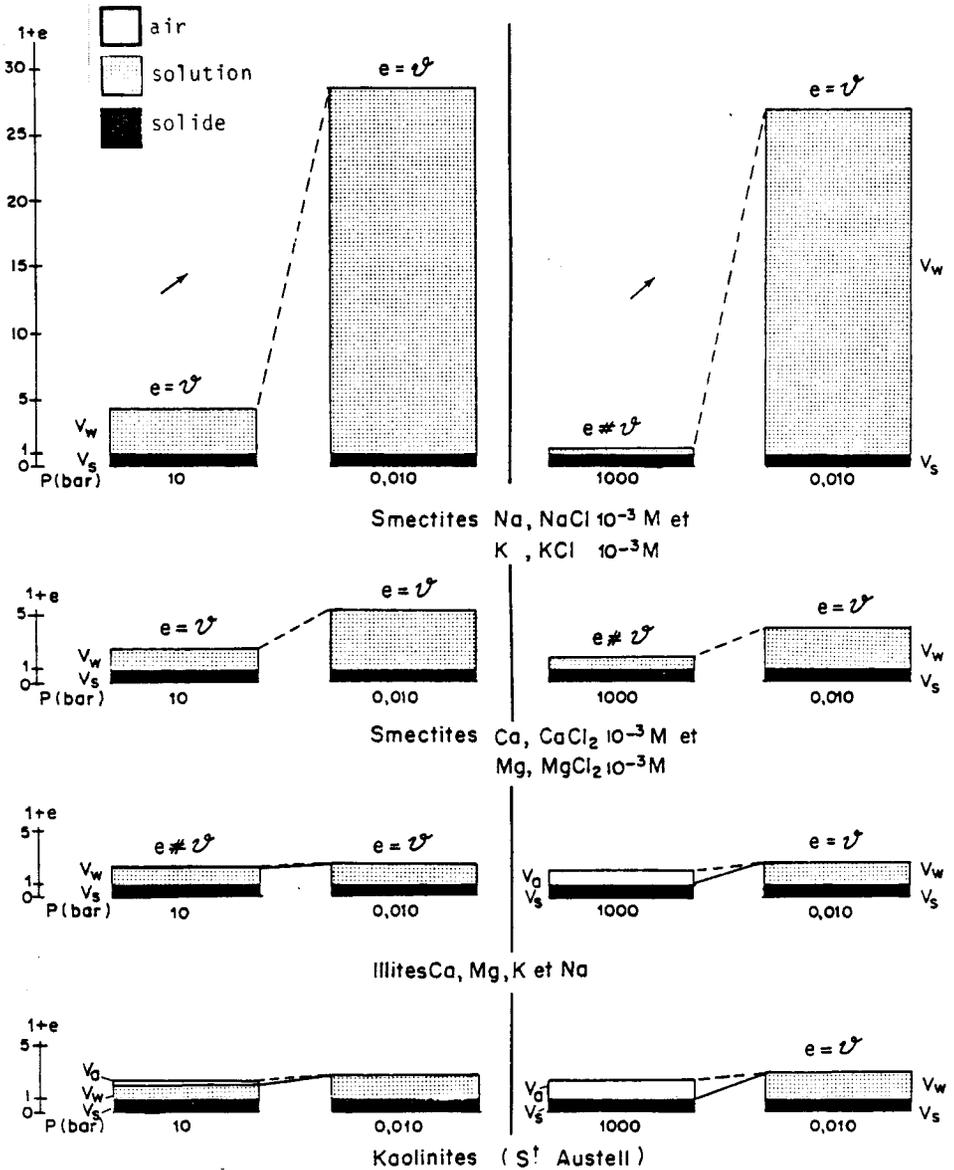


Fig. 5 : Représentation schématique de l'évolution du volume apparent (v) et des composantes du volume (solide + solution - air) pour les grands types de matériaux argileux au cours de la première dessiccation depuis pF 1 jusqu'à pF 6.

Fig. 5 : Esquema de la evolución de la densidad aparente y de los componentes del volumen (sólido + solución - aire) para los principales tipos de materiales arcillosos, durante la primera desecación desde pF 1 hasta pF 6.

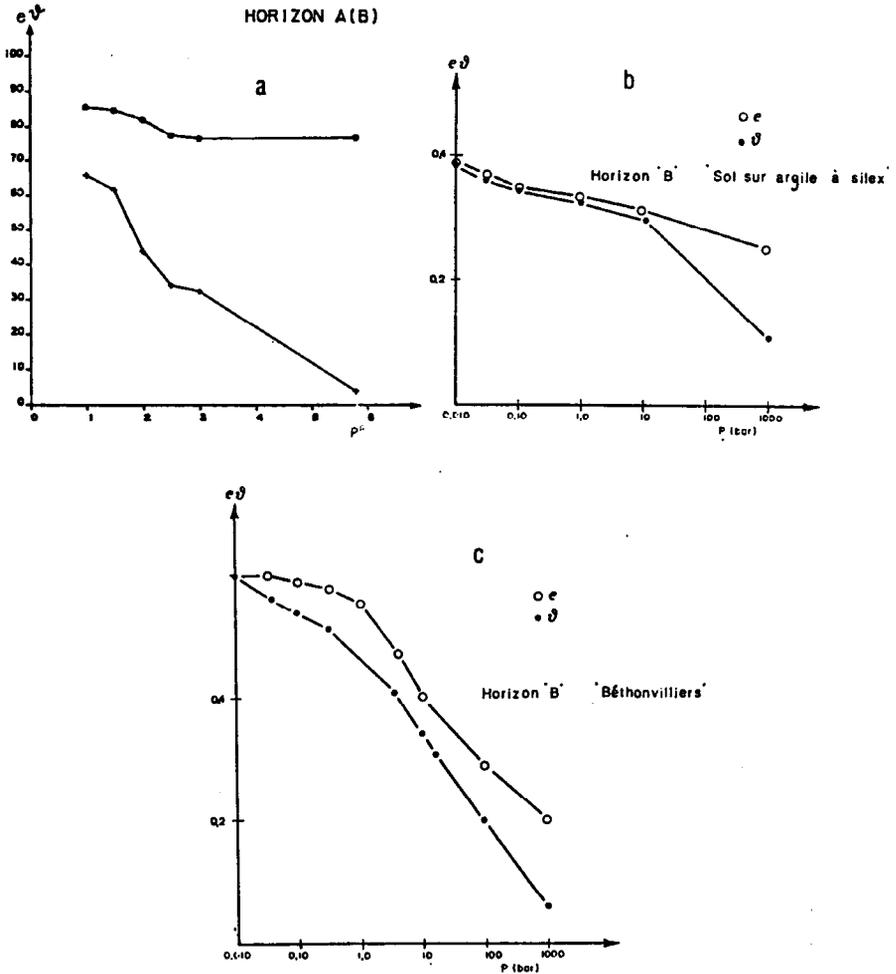


Fig. 6 : Courbes teneur en eau/indice des vides obtenues sur des mottes.

- a) sol sableux
 - b) argile à silex
 - c) comportement mixte (argile de Béthonvilliers)
- (a) CHRETIEN, 1986 - (a et b) TESSIER

Fig. 6 : Curvas relativas al contenido de agua/índice de los intersticios obtenidos en los agregados.

- a) suelo arenoso
 - b) arcilla con pedernal
 - c) comportamiento mixto (arcilla de Béthonvilliers)
- (a) CHRETIEN, 1986 - (b et c) TESSIER

Photo I : Microstructure de smectites 10^{-3} M NaCl en microscopie électronique
 montmorillonite grecque au MEB - pF 1,5 bar (a) et pF 3 (b)
 hectorite (c) et montmorillonite grecque à pF 1,5 au TEM (d)

Foto I : Microestructura de esmectitas 10^{-3} M NaCl en microscopia
 electrónica, montmorillonita griega por medio del microscopio
 electrónico con barrido - pF 1,5 bar (a) et pF 3 (b) hectórita
 (c) y montmorillonita griega a pF 1,5 por medio del TEM (d)

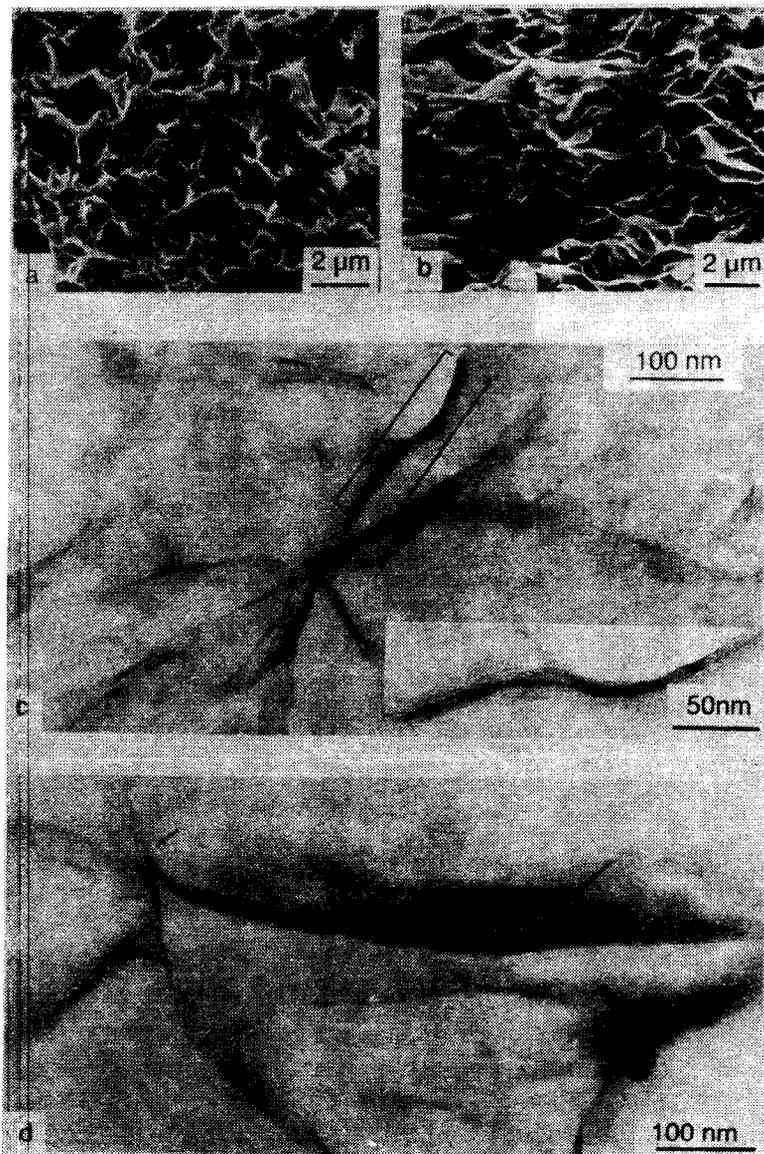


Photo II : Microorganisation des argiles (TESSIER, 1984) ou des associations d'argiles avec d'autres composés (ROBERT et al., 1982, 1983)

- 1) kaolinite de St-Austell pF 1
- 2) kaolinite de St-Austell pF 4
- 3) montmorillonite + hématite
- 4) kaolinite de St-Austell + gibbsite
- 5) montmorillonite + cation Al^{3+}
- 6) montmorillonite + polycations d'aluminium ou de fer

Foto II : Microorganización de las arcillas (TESSIER, 1984) u de las asociaciones de arcillas con otros componentes (ROBERT et al., 1982, 1983)

- 1) caolinita de St-Austell pF 1
- 2) caolinita de St-Austell pF 4
- 3) Montmorillonita + hematites
- 4) caolinita de St-Austell + gibbsite
- 5) montmorillonita + cation Al^{3+}
- 6) montmorillonita + policationes de aluminio o de hierro

Photo III : 7) agrégation de la kaolinite par des polycations de fer
TEM

- 8) kaolinite - acide fulvique
- 9) dépôt d'acide humique à la surface des tactoïdes de montmorillonite
- 10) kaolinite - polysaccharide
- 11) et 12) vertisol des Antilles non remanié pF 2

Foto III : 7) agregación de la caolinita por policationes de hierro
TEM

- 8) caolinita de ácido fúlvico
- 9) depósito de ácido húmico en la superficie de los tactoideos de montmorillonita
- 10) caolinita - polisacárido
- 11) y 12) vertisuelo no retrabajo de las Antillas pF 2

