



HAL
open science

**Influence des cations échangeables (Na^+ , Ca^{++} ,
 Mg^{++}) et de la concentration saline sur le
comportement physique (retention en eau, conductivité
hydraulique) de la montmorillonite**

A. Halitim, Michel Robert, Daniel D. Tessier, Rene Prost

► **To cite this version:**

A. Halitim, Michel Robert, Daniel D. Tessier, Rene Prost. Influence des cations échangeables (Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++}) et de la concentration saline sur le comportement physique (retention en eau, conductivité hydraulique) de la montmorillonite. *Agronomie*, 1984, 4 (5), pp.451-459. hal-02728155

HAL Id: hal-02728155

<https://hal.inrae.fr/hal-02728155v1>

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.

Influence des cations échangeables (Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++}) et de la concentration saline sur le comportement physique (rétention en eau, conductivité hydraulique) de la montmorillonite

Amor HALITIM, Michel ROBERT (*), Daniel TESSIER (*) & René PROST (*)

I.N.A., Département de Science du Sol, El Harrach, Alger

() I.N.R.A., Station de Science du Sol, route de St-Cyr, F 78000 Versailles*

RÉSUMÉ

L'examen de l'organisation des argiles en relation avec le potentiel de l'eau ainsi que des mesures de conductivité hydraulique ont été réalisés sur des échantillons de montmorillonite préparés avec les cations Ca, Mg et Na, en présence de solutions diluées (10^{-3} M) et concentrées (1 M).

Les résultats obtenus montrent que la teneur en eau varie linéairement avec l'E.S.P. (pourcentage de sodium échangeable). Ce n'est en revanche pas le cas de la conductivité hydraulique qui subit une chute brutale dès que E.S.P. < 10 p. 100. Les observations et mesures amènent alors les auteurs à conclure que les voies de circulation de la solution et les pores de rétention de l'eau présentent des tailles très différentes et ne correspondent pas aux mêmes sites du matériau. D'un autre côté, l'organisation et les propriétés hydriques des argiles Ca et Mg apparaissent peu modifiées par la concentration saline. C'est l'inverse qui se produit pour les smectites Na. On note alors que l'augmentation du gonflement se traduit par un abaissement de la conductivité hydraulique. Ces deux propriétés sont donc influencées de façon inverse par les potentiels osmotique et matriciel.

Mots clés additionnels : *Contrainte hydrique, rayon hydraulique moyen, microorganisation, quasi-cristal, feuillet, E.S.P., sols sodiques, argile biionique - argile Na, microscope électronique à balayage.*

SUMMARY

Influence of exchangeable cations (Na, Ca, Mg) and salt concentration on the physical properties (water retention, hydraulic conductivity) of montmorillonite.

Measurements of hydraulic conductivity and observations on the influence of water potential on clay structure were carried out on Na, Ca, and Mg-saturated montmorillonite samples in the presence of dilute (10^{-3} M) and concentrated (1 M) solutions.

Results showed that water content was linearly related to E.S.P. (exchangeable sodium percentage). This was not the case for hydraulic conductivity which showed a sharp decrease when E.S.P. was less than 10 %.

Both observations and measurements led to the conclusion that the pores in which the solution circulates and those in which water is immobile have very different sizes, and are differently located in the material.

In addition, the structure and water properties of Ca and Mg clay were only slightly modified by salt concentration. The reverse was found for Na smectite. In this case increase of swelling was accompanied by a decrease in hydraulic conductivity. These two indices were thus affected in an opposite way by osmotic and matrix potentials.

Additional key words : *Water potential, average hydraulic radius, microstructure, quasi-cristal, clay layer, E.S.P., sodium soils, biionic clay - Na clay, scanning electron microscope.*

I. INTRODUCTION

Parmi les paramètres physiques qui jouent un rôle important dans la fertilité des sols, la perméabilité et la rétention en eau sont primordiaux. Ces propriétés prennent toute leur importance dans les zones arides, caractérisées en général par un déficit hydrique et souvent par des concentrations salines élevées.

Pour comprendre l'influence des différents facteurs minéralogiques et physico-chimiques sur ces paramètres, de nombreuses expérimentations ont été faites sur les sols.

En ce qui concerne les argiles, les études ont montré en particulier que le comportement physique des sols était en relation avec la teneur et la nature minéralogique des argiles (Mc NEAL & COLEMAN, 1966 ; Mc

NEAL *et al.*, 1966). Ainsi la rétention en eau et surtout la conductivité hydraulique des sols riches en kaolinite sont peu influencées par de fortes concentrations en Na^+ , alors qu'elles montrent de grandes variations pour les sols riches en argiles expansibles. *Ce sont donc les smectites qui influencent avant tout le comportement des sols vis-à-vis de l'environnement physico-chimique et hydrique.*

En ce qui concerne le rôle des différents cations, tous les auteurs sont d'accord sur les effets défavorables du Na^+ et favorables du Ca^{++} sur les propriétés physiques du sol. Au sujet du Mg^{++} , les avis sont encore partagés. Certaines observations et expérimentations (DURAND, 1956 ; ABDERAHMAN & ROWELL, 1979 ; ROWELL & SHAIMBERG, 1979) ont montré que le Mg^{++} cause une dégradation de la structure entraînant la baisse de la conductivité hydraulique ; d'autres (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954 ; SERVANT, 1975) par contre, ont montré que le Mg^{++} avait les mêmes effets bénéfiques sur les propriétés physiques du sol que le Ca^{++} .

Mais il faut noter que toutes ces études ne prennent pas en compte, d'une part, la rétention en eau aux contraintes le plus souvent rencontrées dans les sols ni, d'autre part, le rôle spécifique des contraintes externes (en particulier celles de type succion) et des contraintes qui résultent du milieu physico-chimique (cation d'échange et concentration saline). A cet égard, il est particulièrement intéressant de suivre l'évolution simultanée de la conductivité hydraulique et de la teneur en eau des argiles.

Par ailleurs, le seuil de 10-15 p. 100 de Na^+ échangeable proposé par l'U.S.S. Staff (1954) et adopté sur le plan international (C.P.C.S., 1967 ; FAO-UNESCO, 1974 ; USDA, 1975) pour séparer les sols salins, d'une part, et les sols à alcali et sols salés à alcali, d'autre part, n'est pas accepté par tous les auteurs, en particulier par QUIRK & SCHOLFIELD (1955). De même, pour DUFEY & BANIN (1979), les propriétés des sols et des argiles sont peu affectées aussi longtemps que 60 à 70 p. 100 des sites d'échange sont saturés par des ions Ca^{++} . Il est donc important de bien cerner toute la signification de ce seuil sur le plan théorique.

Nous allons, dans ce travail, reprendre certains de ces problèmes qui restent posés, concernant l'influence des conditions physico-chimiques sur le comportement hydrique des argiles, en accordant cependant une plus grande importance à la notion de contrainte hydrique et à l'influence de l'histoire de ces contraintes ainsi qu'à la micro-organisation des argiles.

II. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

A. Préparation des échantillons

Pour l'ensemble de nos expérimentations, nous avons utilisé la montmorillonite du Wyoming. La fraction $< 2 \mu\text{m}$ a été rendue homoionique Ca^{++} , Mg^{++} ou Na^+ par échange avec une solution saline du chlorure correspondant à la concentration 1 M. Par la suite, les argiles ont été équilibrées soit avec cette concentration saline 1 M, soit avec une solution 10^{-3} M pour avoir la concentration correspondante.

Pour préparer les argiles bioniques (Na-Ca) avec différents pourcentages de Na^+ échangeable (E.S.P.), 0, 10, 30, 50, 80, 100, nous avons utilisé des résines rendues Na^+ (BOLT & FRISSEL, 1960).

B. Techniques de mesure

Les échantillons préparés ont été soumis à des pressions externes déterminées de façon à tracer la courbe de rétention d'eau en fonction de la pression externe exercée. A 32 mb et à 1 bar, on a utilisé le dispositif préconisé par TESSIER & BERRIER (1979) qui permet de reproduire les phases de dessiccation et d'humectation. Pour 15 bars, on a employé l'appareil de RICHARDS (1947). Nous avons aussi laissé les échantillons en équilibre avec une humidité relative au-dessus d'une solution d' H_2SO_4 (Handbook of chemistry and physics, 1955) correspondant à 48 p. 100 (pF 6). A chaque pression appliquée ou équilibre réalisé, la teneur en eau a été mesurée par référence à un chauffage à 105°C .

Mesure de la conductivité hydraulique

Les mesures de conductivité hydraulique ont été réalisées à l'aide d'un dispositif conçu par PROST (1983) et schématisé sur la figure 1.

On exerce sur la cellule (B) contenant le gel d'argile une pression déterminée (ici nous avons choisi 1 bar correspondant à pF 3).

La solution de percolation placée dans le flacon (A) est identique à celle utilisée pour préparer le gel d'argile ou en équilibre avec la garniture cationique de l'argile (différents E.S.P.).

L'épaisseur de l'échantillon à l'équilibre est mesurée à l'aide d'un cathétomètre et vérifiée par le calcul à la fin de l'expérience.

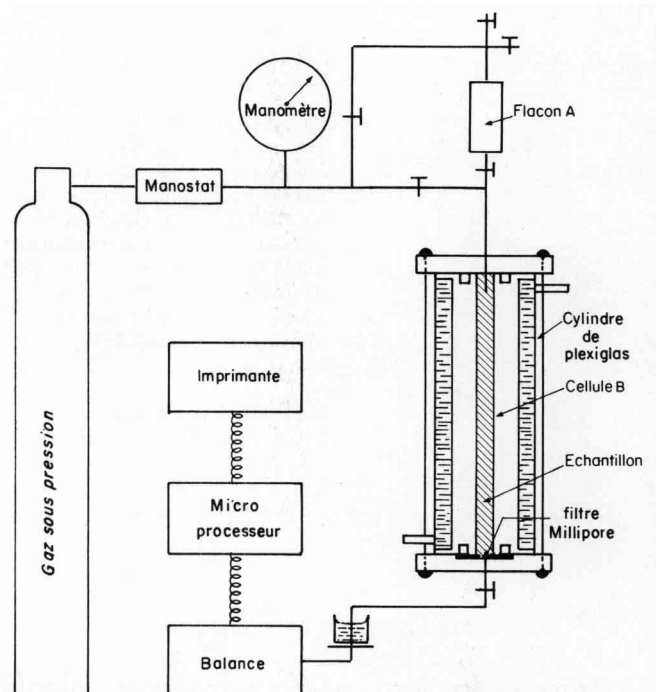


Figure 1
Dispositif de mesure de la conductivité hydraulique, selon PROST (1983).

Apparatus used for the measurement of hydraulic conductivity (after PROST, 1983).

III. RÉSULTATS

A. Evolution de la teneur en eau. Influence de la concentration saline et du cation compensateur

Nous comparons les résultats obtenus à partir des échantillons préparés avec une solution saline dont la concentration saline est $< 10^{-3}$ M à d'autres échantillons dont la concentration saline est molaire, d'abord au cours de la dessiccation ensuite au cours de la réhumectation.

— *Au cours de la dessiccation*, on constate d'abord que les teneurs en eau sont très différentes suivant que les argiles sont Na, Ca ou Mg et suivant l'ordre $\text{Na} \gg \text{Mg} > \text{Ca}$ (tabl. 1). De 32 mbars à 1 bar, la teneur en eau est divisée au moins par 3. On observe ensuite que les teneurs en eau diminuent quand la concentration saline augmente et cela quel que soit le type de cation (tabl. 1). Néanmoins, l'effet de cette concentration est beaucoup plus net avec le Na^+ comme cation compensateur qu'avec les Ca^{++} ou Mg^{++} . Ce phénomène avait été observé par TESSIER (1981) sur l'argile Na^+ .

— *Au cours de la réhumectation* des matériaux préalablement séchés à pF 6, les échantillons ne reviennent pas à l'état d'humidité de départ. C'est ainsi que

lorsque les échantillons sont réhumectés à une pression de 32 mbars (tabl. 2), ils refixent seulement entre 21,3 et 54,4 p. 100 de la teneur en eau de départ. Le taux de réhumectation pour un niveau de dessiccation donné est fonction du cation échangeable et de la concentration saline. Les teneurs en eau décroissent dans l'ordre suivant : $\text{Na}(\text{NaCl } 10^{-3} \text{ M}) > \text{Na}, \text{NaCl} (1 \text{ M}) > \text{Mg} > \text{Ca}$. En définitive, au cours de la dessiccation et de la réhumectation, il apparaît 2 grands types de comportements : celui des argiles Ca et Mg et celui des argiles Na préparées avec une solution diluée.

— *Au cours de la dessiccation* la rétention d'eau par la montmorillonite à faible contrainte c'est-à-dire à 32 mbars et à 1 bar est proportionnelle à l'E.S.P. (fig. 2). Cette influence de l'E.S.P. s'annule pratiquement à 15 bars (fig. 3). Elle tend à s'inverser à pF 6 (fig. 3).

Pour les 2 valeurs extrêmes de l'E.S.P. (0-100) on a effectué des *mesures en réhumectation*. Pour les différents matériaux séchés au préalable à pF 4,2 et à pF 6, on constate qu'on ne revient en aucun cas à la teneur obtenue au cycle de dessiccation pour une contrainte donnée et que la teneur en eau des matériaux réhumectés est d'autant plus faible que la dessiccation a été plus poussée (tabl. 3).

TABLEAU 1

Influence de la nature du cation compensateur et de la concentration saline sur la rétention en eau pondérale de l'argile en p. 100.
Effects of cation composition of the clay and of salt concentration on water retention as a percentage of clay mass.

Cation compensateur	Concentration saline 10^{-3} M/l				Concentration saline 1 Mole/l			
	Dessiccation		Réhumectation		Dessiccation		Réhumectation	
	pF 1,5 → pF 3		pF 6 → pF 1,5	pF 6 → pF 3	pF 1,5	pF 3	pF 6 → pF 1,5	pF 6 → pF 3
Na^+	900	253	490	130	798	195	190	64
Ca^{++}	350	118	108	52	347	105	75	38
Mg^{++}	400	125	115	56	375	110	80	39

TABLEAU 2

Taux de réhumectation (1) en fonction de la nature du cation compensateur et de la concentration saline en p. 100.
Relative rehydration in relation to cation composition of the clay and salt concentration (%).

Niveau de la réhumectation	Cation compensateur et concentration saline					
	Na^+		Ca^{++}		Mg^{++}	
	10^{-3} M/l	1 Mole/l	10^{-3} M/l	1 Mole/l	10^{-3} M/l	1 Mole/l
pF 6 → pF 3	51,4	32,8	44,1	36,2	44,8	35,5
pF 6 → pF 1,5	54,4	29,3	30,8	21,6	28,8	21,3

$$(1) \text{ Taux de réhumectation en } \% = \frac{H_p \%(\text{pF } 1,5)_r \times 100}{H_p \%(\text{pF } 1,5)_d}$$

$H_p \% (\text{pF } 1,5)_d$ = Humidité pondérale à pF 1,5 en dessiccation.

$H_p \% (\text{pF } 1,5)_r$ = Humidité pondérale à pF 1,5 en réhumectation.

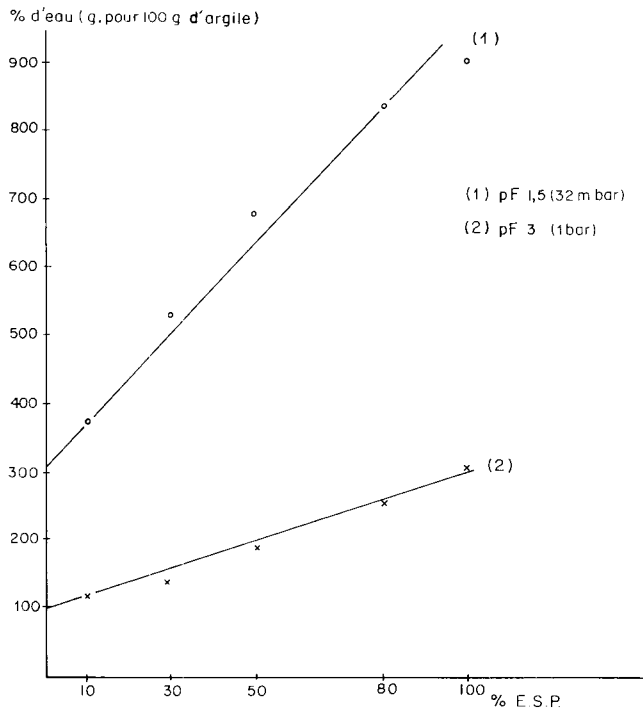


Figure 2
Influence de l'E.S.P. sur la rétention en eau d'une montmorillonite Na, Ca.
Effects of E.S.P. on water retention by an Na, Ca montmorillonite.

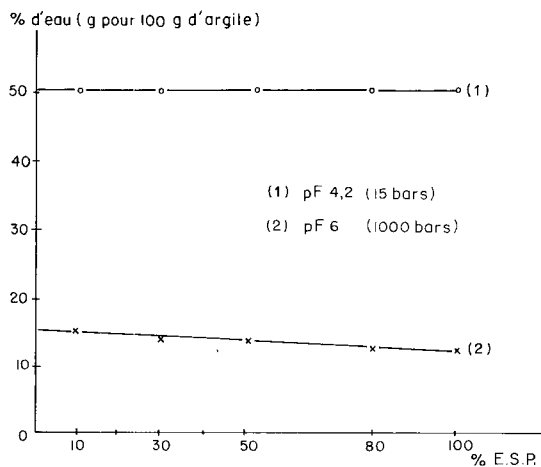


Figure 3
Influence de l'E.S.P. sur la rétention en eau.
Effects of E.S.P. on water retention.

TABLEAU 3

Teneur en eau en p. 100 obtenue au cours de la réhumectation en fonction du niveau de dessiccation.
Water content (%) obtained during rehydration in relation to various desiccation levels.

E.S.P.	Teneur en eau en dessiccation à pF 1,5		Teneur en eau en réhumectation à pF 1,5
100	900	pF 6 → pF 1,5	490
		pF 4,2 → pF 1,5	597
0	350	pF 6 → pF 1,5	108
		pF 4,2 → pF 1,5	205

Il y a lieu d'observer aussi que plus l'E.S.P. est bas et plus le taux de réhumectation est faible (fig. 4).

Cet ensemble de résultats peut apparaître logique au vu des résultats de TESSIER (1981) obtenus sur la montmorillonite Na et Ca. Mais le point essentiel démontré ici est que la relation E.S.P.-teneur en eau peut être présentée par un modèle linéaire aussi bien en dessiccation qu'en réhumectation.

B. Variation de la conductivité hydraulique

Les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux 4 et 5 et sur la figure 5 ; on peut en tirer une série de conséquences.

Tout d'abord, il apparaît que la concentration saline augmente la conductivité hydraulique, mais c'est dans le cas de l'argile sodique que cette influence est la plus marquée.

En ce qui concerne le cation compensateur, la conductivité hydraulique de l'argile Na⁺ est au moins 3 fois plus faible que celle de l'argile Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ qui présentent elles-mêmes des similitudes de comportement. Ainsi, plus l'E.S.P. est élevé et plus la conductivité hydraulique est faible. On observe cependant une chute brutale de la conductivité hydraulique aux environs de 10 p. 100 de Na échangeable, valeur au-delà de laquelle la courbe tend vers un palier.

Il n'apparaît donc pas de relation linéaire entre la conductivité hydraulique et les valeurs de l'E.S.P.

D'un autre côté, les courbes de débit en fonction du temps (fig. 6) montrent que le débit est constant au cours de la mesure. On en déduit que le matériau ne se déforme plus et que la loi de DARCY peut être appliquée sur de tels systèmes. Sur la base des lois de DARCY et de POISEUILLE, il est ainsi possible de déterminer un rayon hydraulique moyen équivalent des voies de circulation des solutions dans les matériaux (FERNANDEZ-PINEDA & MENGUAL, 1977 ; PROST, 1979) correspondant à la conductivité hydraulique. Le

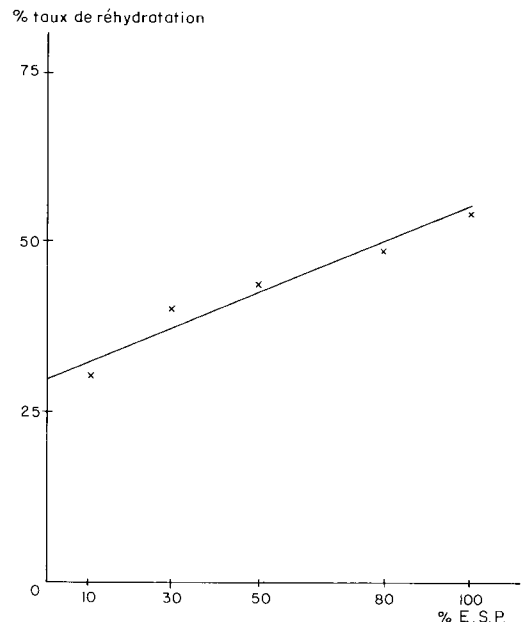


Figure 4
Taux de réhydratation (pF 6 pF 1,5) en fonction de l'E.S.P.
Proportion of rehydration (pF 6 pF 1,5) in relation to E.S.P.

TABLEAU 4

Influence du cation compensateur et de la concentration saline sur la conductivité hydraulique (A) et le rayon hydraulique moyen (rb)
Effects of cation composition and salt concentration of the clay on hydraulic conductivity (A) and average hydraulic radius (rb).

Nature du cation compensateur	Concentration saline	Débit g/s/cm ²	A cm ³ .s.g ⁻¹	rb Å
Na ⁺	< 10 ⁻³ M	< 3,81 10 ⁻⁶	< 2,67 10 ⁻¹²	< 84
	1 Mole	4,65 10 ⁻⁶	3,23 10 ⁻¹²	101
Ca ⁺⁺	< 10 ⁻³ M	1,13 10 ⁻⁵	9,67 10 ⁻¹²	174
	1 Mole	1,25 10 ⁻⁵	10,69 10 ⁻¹²	192
Mg ⁺⁺	< 10 ⁻³ M	1,15 10 ⁻⁵	9,84 10 ⁻¹²	177
	1 Mole	1,22 10 ⁻⁵	10,44 10 ⁻¹²	187

TABLEAU 5

Effets de l'E.S.P. sur la conductivité hydraulique (A) et le rayon hydraulique moyen (rb).
Effects of E.S.P. on hydraulic conductivity (A) and average hydraulic radius (rb).

E.S.P.	Débit g/s/cm ³	A cm ³ .s.g ⁻¹	rb Å	Porosité
E.S.P. 0	1,13 10 ⁻⁵	9,67 10 ⁻¹²	174	0,7655
10	6,58 10 ⁻⁶	4,47 10 ⁻¹²	118	0,7697
30	6,10 10 ⁻⁶	4,04 10 ⁻¹²	109	0,8095
50	4,74 10 ⁻⁶	2,65 10 ⁻¹²	87	0,8315
80	3,81 10 ⁻⁶	2,67 10 ⁻¹²	84	0,9045

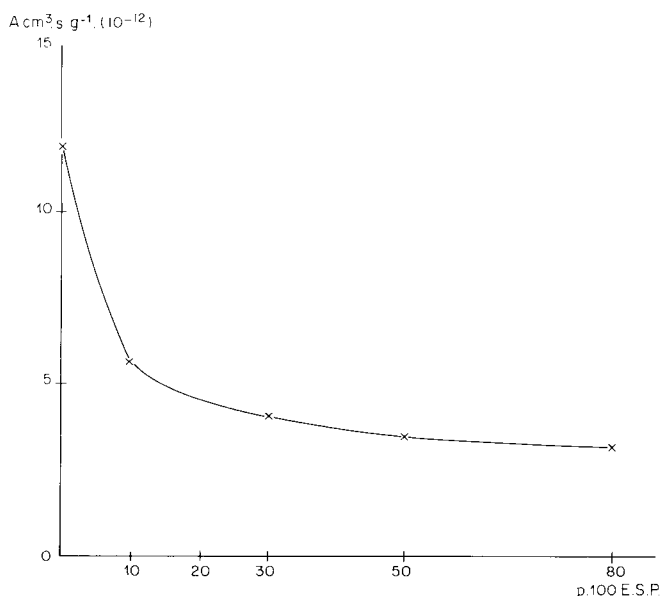


Figure 5
Influence de l'E.S.P. sur la conductivité hydraulique à 1 bar (pF 3).
Effect of E.S.P. on hydraulic conductivity at 1 bar (pF 3).

formalisme utilisé permet d'obtenir le rayon hydraulique moyen en considérant que les pores occupent toutes les directions de l'espace :

$$r = \sqrt{\frac{24 \mu}{E} \cdot A}$$

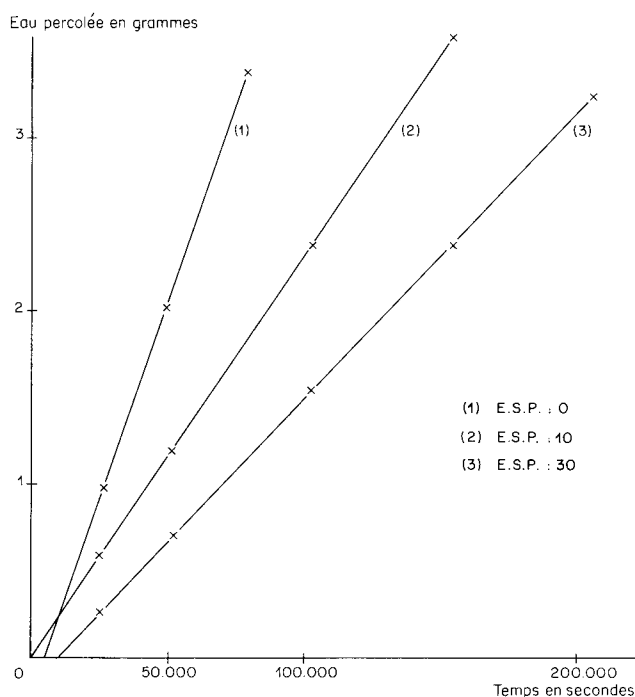


Figure 6
Courbe de débit obtenue avec la montmorillonite de Wyoming.
Total water flux through a Wyoming montmorillonite.

où r est le rayon du pore en cm, μ la viscosité en poise, A la conductivité hydraulique en cm³.s.g⁻¹ et E la porosité.

Nous pouvons voir (tabl. 4 et 5) que le rayon hydraulique moyen déduit des expériences se situe entre 84 et 192 Å. Nous constatons aussi qu'il dépend de la nature des cations compensateurs et augmente avec la concentration saline. En outre, il est inversement proportionnel à l'E.S.P. D'un autre côté, le rayon hydraulique moyen devient de plus en plus petit au fur et à mesure que la teneur en eau ainsi que la porosité qui subsiste à cette contrainte saturée d'eau diminuent.

C. Observation morphologique

Pour préserver au mieux l'organisation des échantillons correspondant à l'état humide, l'étude au micros-

cope électronique à balayage a été réalisée, sur des échantillons préalablement congelés dans du fréon 22 refroidi par de l'azote liquide ou déshydratés par la technique du point critique (TESSIER & BERRIER, 1979). Nous avons regroupé l'ensemble des photos sur la planche 1.

— *A 32 mbars*, l'argile se présente sous la forme d'un réseau solide isotrope : on n'observe aucune orientation selon un quelconque plan préférentiel. Les pores sont sensiblement bien individualisés et prennent

la forme de polyèdres plus ou moins réguliers. La distance maximale entre les parois du réseau est d'environ $2 \mu\text{m}$ pour tous les échantillons.

— *A 1 bar*, le réseau devient plus condensé et s'oriente par rapprochement des parois des polyèdres. La distance maximale entre les parois des pores est alors $< 1 \mu\text{m}$ pour tous les échantillons.

Ainsi, la succion a une grande influence sur la microorganisation des smectites : l'augmentation de la contrainte se traduit par une déformation du matériau

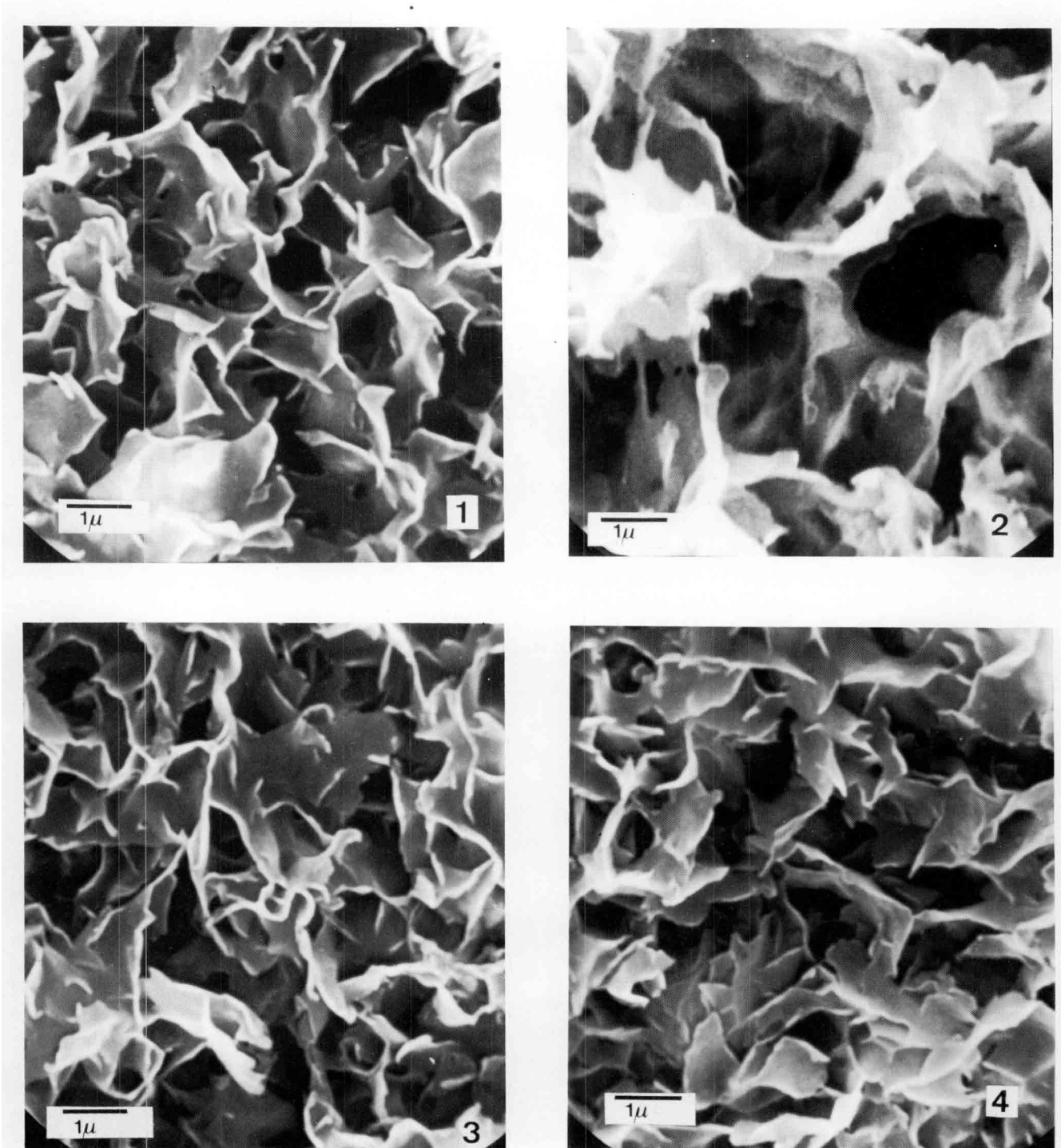


Planche 1

Microorganisation de la montmorillonite en fonction de la contrainte hydrique et des conditions physico-chimiques.

Montmorillonite fabric in relation to water stress and physico-chemical conditions.

1. *Montmorillonite Na 10^{-3} M, pF 3.*
2. *Montmorillonite Na 10^{-3} M, pF 1,5.*
3. *Montmorillonite Ca 10^{-3} M, pF 3.*
4. *Montmorillonite Na 1 M, pF 3.*

et par une diminution de la taille des vides. Aussi bien à 32 mbars qu'à 1 bar, les échantillons sodiques présentent des pores sensiblement plus grands que les échantillons Ca^{++} et Mg^{++} (qu'on ne peut distinguer l'un de l'autre). Par contre, l'influence de la concentration saline n'est pas visible sur la morphologie des argiles. Il est même difficile de mettre en évidence l'influence de l'E.S.P. sur la morphologie des argiles, sauf si on compare des valeurs extrêmes telles que E.S.P. 0 et E.S.P. 100, ce qui revient à comparer une argile Na^+ et une argile Ca^{++} . Néanmoins, il est tout à fait vraisemblable que plus l'E.S.P. est élevé, plus le nombre de pores est important. En effet, la taille des pores des échantillons est peu différente à une contrainte physique donnée alors que la teneur en eau augmente avec l'E.S.P.

Enfin, il faut noter qu'il n'est pas possible de comparer l'observation morphologique (au M.E.B.) aux données de la conductivité hydraulique, dans la mesure où la seule porosité apparente à cette échelle est une porosité de l'ordre du micron alors que les voies de circulation des solutions déterminées par le calcul ont des rayons moyens inférieurs à 200 Å.

En résumé, on peut dire que :

- la taille des pores visibles au M.E.B. diminue quand la contrainte externe augmente,
- le nombre de pores est lié aux conditions physico-chimiques et donc au type de cation compensateur, à l'E.S.P. et à la concentration saline,
- en conséquence, pour un niveau de succion donné, la teneur en eau est surtout déterminée par le nombre de pores beaucoup plus que par la taille de ces derniers.

IV. DISCUSSION

Nous avons vu que l'organisation de l'argile a des conséquences sur la rétention en eau et la conductivité hydraulique. Nous allons discuter ces 3 aspects successivement en les confrontant.

A. Organisation de la smectite

Il est clair que les observations en MEB des smectites ne permettent pas d'individualiser des particules dont la taille (dans le plan a b des feuillets) est déterminée, mais une organisation à base de réseau, c'est-à-dire dont seulement la taille suivant le plan c des feuillets peut être réellement appréhendée. Si on se réfère aux données de la littérature, les auteurs parlent, selon les cas, de tactoïdes, domaines, cristallites, quasi-cristaux ou de particules. Pour nous, c'est le terme quasi-cristal qui semble convenir le mieux à la description des parois délimitant des pores de l'ordre de 1 μ des systèmes eau-montmorillonite. Il constitue donc un élément du réseau solide dont l'extension dans le plan a b des feuillets n'est pas précisé. En fait, pour toutes les questions en rapport avec l'hydratation macroscopique des smectites, c'est la paroi du pore (fig. 7) qui joue un rôle essentiel. La surface de ces parois représente en première approximation la surface externe. Le nombre de feuillets constitutifs des particules argileuses a été caractérisé par différents auteurs ; il est de 3-9 (BLACKMORE & MILLER, 1961), de 16 (SHOMER & MINGEL-

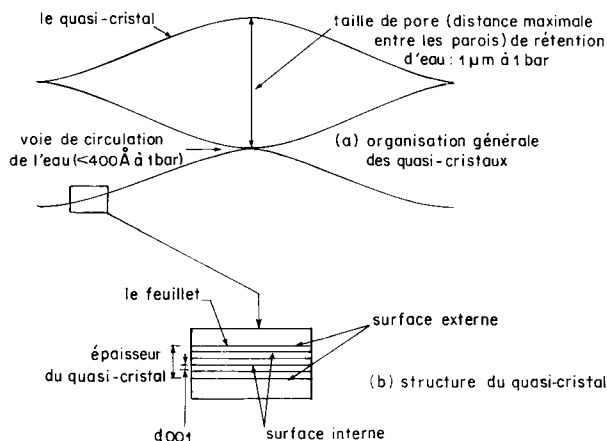


Figure 7

Schéma de la structure des smectites en relation avec leur fonctionnement hydrique (rétention de l'eau, conductivité hydraulique).

General diagrammatic representation of the structure of quasi-crystals in relation to water retention and its circulation in smectites.

GRIN, 1978) et de 30 (TESSIER, 1981) pour une montmorillonite Ca^{++} . En outre, les résultats obtenus par TESSIER & PEDRO (1981) en MEB et en MET et par PONS *et al.* (1981) avec la diffusion des rayons X aux petits angles, montrent que le nombre de feuillets augmente avec la concentration saline et devient plus important avec le Ca^{++} comme cation compensateur.

Il apparaît, en définitive, que les résultats divergent à cause, d'une part, de l'utilisation des smectites différentes par leur charge, d'autre part, des techniques de préparation des argiles, d'observation et de mesure. Par exemple au sujet de la charge, TESSIER & PEDRO (1981) ont trouvé 5 feuillets par quasi-cristal pour l'hectorite Na^+ ($z = 0,29$) et 20 feuillets pour la montmorillonite Santa-Rita Na^+ ($z = 0,49$).

Concernant la disposition des quasi-cristaux, deux hypothèses ont été avancées : pour VAN OLPHEN (1963), les quasi-cristaux s'organisent en château de cartes formant une trame rigide tridimensionnelle, c'est-à-dire que l'association se fait *bord contre face*. Pour TESSIER & PEDRO (1981) par contre, cette association n'existe pas et ces auteurs considèrent que les quasi-cristaux ont une dimension dans le plan a b illimitée ($> 2 \mu$) ; il s'agit essentiellement d'une association *face-face*.

B. Rétention en eau

Aux pressions < 15 bars la réorganisation du système au cours de la dessiccation implique qu'une grande partie de l'eau est située entre les éléments du réseau (fig. 7). En effet, au cours de la succion la taille des pores diminue fortement. Le potentiel total exprimé en pF étant égal à la somme du potentiel matriciel et du potentiel osmotique (HILLEL, 1971), on peut s'attendre à ce que l'augmentation du potentiel osmotique, c'est-à-dire de la concentration saline, ait les mêmes effets que la contrainte physique. Cependant l'action de la concentration saline fait intervenir des processus pouvant être différents :

- une augmentation des feuillets par quasi-cristal et conséquemment,
- une diminution du nombre de quasi-cristaux et du nombre de pores.

Au niveau des quasi-cristaux, la distance interfoliaire dépend de la nature du cation compensateur. Cette distance est plus importante en présence du Na^+ que du Ca^{++} . En effet, alors que les feuillets Ca^{++} , par suite d'une forte énergie électrostatique d'attraction, ne peuvent se séparer que de 10 Å, la distance interfoliaire avec le Na^+ peut atteindre et même dépasser 50 Å (PONS *et al.*, 1981) lorsque la concentration saline est faible.

Mais si on considère que globalement, en tenant compte du nombre de feuillets, les quasi-cristaux de la montmorillonite Ca^{++} sont plus épais que ceux de la même argile Na^+ , la différence de teneur en eau trouvée s'explique largement par une augmentation du nombre de quasi-cristaux et de pores dans le cas de l'argile Na^+ .

Dans le cas de mélange de cations compensateurs en tenant compte de leur répartition (GAULTIER & MAMY, 1981), il est logique de penser que la moyenne des distances interfoliaires varie avec l'E.S.P. On peut supposer que le comportement du système résulte des comportements des feuillets Na^+ et des feuillets Ca^{++} , et la proportion de feuillets Na^+ augmente avec l'E.S.P. Précisons que cela n'est vrai que si la concentration saline est faible, sinon d001 des feuillets Na^+ et Ca^{++} reste proche de 20 Å.

— *A pF 6* (1 000 bars), la courbe teneur en eau/pF en fonction de l'E.S.P. s'inverse. La teneur en eau est alors fonction des propriétés d'hydratation du cation compensateur. En outre, à cette contrainte, la proportion d'eau en dehors de l'espace interfoliaire est inversement proportionnelle au degré d'hydratation de ce cation (PROST, 1975).

Concernant la *réhumectation*, le taux de réhumectation apparaît lié à la capacité des quasi-cristaux de s'écarter les uns des autres et probablement de se diviser. Il est d'autant plus faible que l'énergie d'attraction des feuillets ($\text{Ca}^{++} > \text{Na}^+$) et la concentration saline sont plus élevées.

C. Conductivité hydraulique

Nous avons montré que la conductivité hydraulique diminue quand l'E.S.P. augmente. A faible concentration saline, nous avons vu que l'augmentation de l'E.S.P. se traduit par une augmentation de la distance interfoliaire. On peut donc en conclure que la *circulation de l'eau ne se fait pas à travers l'espace interfoliaire* qui passe de 9 (argile Ca^{++}) à environ 100 Å (argile Na^+ , $\text{NaCl } 10^{-3} \text{ M}$).

D'autre part, la taille des pores observés au MEB, autrement dit ceux qui servent à la rétention de la quasi-totalité de l'eau de l'argile, est très proche de 1 µm à une pression de 1 bar alors que, dans les mêmes conditions, le rayon hydraulique moyen des voies de circulation est au maximum de 200 Å. Il est donc clair que *les pores observés au MEB (voisins de 1 µm) n'influencent pas directement la circulation de l'eau*. Nous pensons que quel que soit le mode d'association des quasi-cristaux la communication entre les pores observés au MEB pourrait se faire par des voies beaucoup plus petites se situant au niveau des surfaces de contact inter-quasi-cristaux. Il s'agirait alors plutôt *d'un rayon hydraulique moyen de constriction* (fig. 7).

La taille de ces voies de communication est inverse-

ment proportionnelle à celle des pores de rétention de l'eau, c'est-à-dire que plus l'argile gonfle, plus la dimension de ces voies diminue. A l'inverse, tous les facteurs qui favorisent le rapprochement des feuillets d'un même quasi-cristal (E.S.P. faible, concentration saline élevée) facilitent la circulation de l'eau.

SHAIMBERG & KEMPER (1966), comparant l'énergie d'attraction des ions, trouvent que les propriétés électro-chimiques des ions Ca^{++} sur les surfaces externes des quasi-cristaux sont similaires à celles des ions Na^+ ; par contre, l'affinité de Ca^{++} pour la surface interne des quasi-cristaux est 3 fois plus élevée que pour la surface externe (ceci dans le cas d'une concentration de 10^{-3} M). Ainsi on peut supposer que le Na^+ se concentre d'abord sur la surface externe du quasi-cristal avant de pénétrer à l'intérieur. C'est ainsi qu'à faible E.S.P., c'est-à-dire autour de 10 p. 100, le comportement intra-quasi-cristal serait influencé par le Ca^{++} et le comportement inter-quasi-cristal par le Na^+ . A l'extérieur des quasi-cristaux, la double couche diffuse pourrait alors se développer entraînant un rétrécissement très important des voies de circulation des solutions au niveau des associations des quasi-cristaux. Ce processus — qui n'est vrai que si l'on considère que l'eau de la double couche diffuse, à cause de sa faible mobilité, n'intervient pas dans nos mesures — expliquerait la chute brutale de la conductivité hydraulique pour un faible E.S.P. Quant à l'influence de la concentration saline sur la conductivité hydraulique, elle serait due à la compression de la double couche diffuse et conséquemment à l'accroissement de ces voies de circulation.

Un effet inverse apparaît lors de l'augmentation de l'E.S.P. qui provoque en même temps une division des quasi-cristaux et, par conséquent, une augmentation du nombre des surfaces de contact, lesquelles, comme nous l'avons déjà vu, constitueraient les voies de circulation des solutions. Mais ce mécanisme s'est traduit par une baisse de la conductivité hydraulique. Cette dernière apparaît donc liée plutôt à la taille des voies de circulation des solutions qu'à leur nombre.

V. CONCLUSION

Il apparaît tout d'abord que le comportement hydrique d'une smectite est à la fois lié aux contraintes physiques, à l'histoire hydrique et aux conditions physico-chimiques du milieu. Nous rejoignons là les conclusions de TESSIER (1981). Cependant, la contrainte physique et les conditions physico-chimiques influencent, *par des mécanismes différents*, la rétention d'eau et la conductivité hydraulique. Quand le potentiel osmotique et le potentiel matriciel augmentent, la conductivité hydraulique augmente elle aussi, tandis que le gonflement diminue. Le gonflement et la conductivité hydraulique de l'argile sont liés de façon inverse aux potentiels osmotique et matriciel.

On a montré également que le gonflement de l'argile est lié à la taille et au nombre de pores, alors que la conductivité hydraulique est liée uniquement à la taille des *rayons de constriction*.

En ce qui concerne l'influence des cations compensateurs : le Mg^{++} a une action très proche de celle du Ca^{++} , aussi bien sur le comportement hydrique que sur la micro-organisation de l'argile.

Enfin, on peut dire que si les résultats relatifs à l'influence de l'E.S.P. sur le gonflement ne justifient pas un seuil particulier pour distinguer les sols salins, d'une part, et les sols salins à alcali et les sols à alcali, d'autre part, par contre ceux relatifs à la conductivité hydraulique démontrent pleinement l'utilité d'un seuil E.S.P. autour de 10 p. 100, d'autant que dans les

sols salés ou appelés à être irrigués avec des eaux salées, la perméabilité est un facteur essentiel. Nous venons ainsi de montrer qu'il existe un fondement théorique à l'utilisation de l'E.S.P. dans la classification des sols salés.

Reçu le 8 juillet 1983.
Accepté le 20 janvier 1984.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abderahman W., Rowell D. L.**, 1979. The influence of magnesium in saline and sodic soils : a specific effect or a problem of cation exchange. *J. Soil Sci.*, **30**, 535-546.
- Blackmore A. V., Miller R. D.**, 1961. Tactoid size and osmotic swelling in calcium montmorillonite. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 169-173.
- Bolt G. H., Frissel M. J.**, 1960. The preparation of clay suspensions with specified ionic composition by means of exchange resins. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 172-177.
- C.P.C.S.**, 1967. *Classification des sols*. Ecole Nationale Supérieure Agronomique, Grignon, 87 p.
- Dufey J. E., Banin A.**, 1979. Particle shape and size of two sodium-calcium montmorillonite clays. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **43**, 782-785.
- Durand J. H.**, 1956. Contribution à l'étude des « solonetz-magnésiens ». *Bull. Assoc. Fr. Etude Sol, Sci. Sol*, n° 77, 508-513.
- F.A.O.-UNESCO**, 1974. *Soil map of the world*. Rome-Paris, 59 p.
- Fernandez-Pineda C., Mengual J. I.**, 1977. Permeation of water of low pressure in cellulose acetate membranes. II. Nature of flow. *J. Colloide Interface Sci.*, **61**, 95-108.
- Gaultier J. P., Mamy J.**, 1981. Demixing phenomenon in low water content bionic K-Na montmorillonites. *VII Int. Clay Conf.*, 451-457.
- Handbook of chemistry and physics**, 1955. 37 ed., Chem. Rubber Publishing Co. Cleveland ed.
- Hillel D.**, 1971. *Soil and water, physical principles and processes*. Academic Press, New York, 288 p.
- Mc Neal B. L., Coleman N. T.**, 1966. Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **30**, 308-312.
- Mc Neal B. L., Nowell W. A., Coleman N. T.**, 1966. Effect of solution composition on the swelling of extracted soil clays. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **30**, 313-317.
- Pons C. H., Tessier D., Ben Rahiem H., Tchoubar D.**, 1981. A comparison between X-ray studies and electron microscopy observations of smectite fabric. *VII Int. Clay Conf.*, 177-185.
- Prost R.**, 1975. *Etude de l'hydratation des argiles : interactions eau-minéral et mécanisme de la rétention de l'eau*. Thèse Doct. Etat. Université Pierre et Marie Curie, Paris, 82 p.
- Prost R.**, 1979. Application de mesures de conductivité hydraulique à l'étude de la structure des gels d'argile. *Clay Minerals*, **14**, 173-179.
- Prost R.**, 1984. Etude de la conductivité hydraulique des pâtes de kaolinite en fonction de l'enthalpie libre ΔG du système argile-eau. *Agronomie*, **4** (1), 29-36.
- Quirk J. P., Scholfield R. K.**, 1955. The effects of electrolyte concentration on soil permeability. *J. Soil Sci.*, **6**, 163-178.
- Richards L. A.**, 1947. Pressure membrane apparatus construction and use. *Agric. Eng.*, **28**, 451-454.
- Rowell D. L., Shaimberg I.**, 1979. The influence of magnesium and of easily weathered minerals on hydraulic conductivity changes in a sodic soil. *J. Soil Sci.*, **30**, 719-726.
- Servant J.**, 1975. *Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes. L'exemple des sols salés au sud et au sud-ouest de la France*. Thèse Doct. d'Etat, Montpellier, S.E.S. I.N.R.A., 200 p.
- Shaimberg I., Kemper W. D.**, 1966. Electrostatic forces between clay and cations as calculated and inferred from electrical conductivity. *Clays Clay Miner.*, **14**, 117-132.
- Shomer I., Mingelgrin U.**, 1978. A direct procedure for determining the number of plates in tactoids of smectites : the Na-Ca-montmorillonite case. *Clays Clay Miner.*, **26** (2), 135-138.
- Tessier D.**, 1981. Hydric behaviour and fabric of Ca and Na smectites. Conference argiles, états de l'eau. Versailles, 7 p.
- Tessier D., Berrier J.**, 1979. Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude des sols. Observations des sols humides soumis à différents pF. *Bull. Assoc. Fr. Etude Sol, Sci. Sol*, **1**, 67-82.
- Tessier D., Pedro G.**, 1981. Electronic microscopy study of Na smectite fabric. Role of layer charge, salt concentration and suction parameters. *VIIIth Int. Clay Conf.*, 165-176.
- U.S.D.A.**, 1975. *A basic system of soil classification for making and interpreting soil survey*. U.S.D.A. Soil Conservation Serv. Agric. Handbook n° 436, 754 p.
- U.S. Salinity Laboratory Staff**, 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. U.S.D.A. Handbook n° 60, 160 p.
- Van Olphen H.**, 1963. *An introduction to clay colloid chemistry*. Interscience Publishers edit. New York, 300 p.