

Effet de la salinité et la sodicité sur le comportement hydrique de mélanges sable-argile

Med T. Halilat ⁽¹⁾, D. Tessier ⁽²⁾

(1) Institut d'Agronomie Saharienne. Université de Ouargla (30000), Algérie

(2) INRA, station science du sol, route de Saint-Cyr, 78026 Versailles, France

RÉSUMÉ

Cet article est consacré à l'étude de l'amélioration des propriétés physiques des sols sableux du Sahara algérien par ajout d'argile. Son but est essentiellement de fournir des éléments d'interprétation des propriétés des sols en fonction des conditions qui président à leur fonctionnement en milieu aride, à savoir, le potentiel de l'eau, la sodicité et la salinité.

La rétention de l'eau de mélanges sable-argile dépend en premier lieu du taux d'argile. La teneur en argile accroît principalement la teneur en eau dans la gamme de hauts potentiels de l'eau. A l'état sec, la porosité des mélanges riches en argile devient plus faible.

En tenant compte de la qualité des eaux, on peut définir les conditions qui contrôlent les propriétés physiques du mélange sable-argile. L'effet de la sodicité/salinité se manifeste par des comportements hydriques très contrastés. Les hydratations les plus fortes sont obtenues avec des hautes valeurs du SAR et des concentrations en sels faibles. Dans tous les cas, contrairement au SAR, l'effet de la concentration en sels apparaît déterminant dans les propriétés. Notre interprétation est que l'échange des cations ne se produit réellement qu'aux fortes concentrations en sels de la solution. Il en résulte qu'aux faibles valeurs du SAR et aux faibles concentrations salines les argiles possèdent le comportement d'argiles sodiques. Pour la gamme de sodicité et salinité retenue des seuils de comportement ont été définis et une modélisation des propriétés de rétention de l'eau est proposée.

Mots clés

Argile, sable, teneur en eau, salinité, sodicité.

SUMMARY

EFFECT OF SALINITY AND SODICITY ON THE WATER BEHAVIOR OF SAND-CLAY MIXTURES

This work is devoted to the study of the improvement of physical properties of sandy soils of the Algerian Sahara by addition of clay. Its goal is to propose a framework in order to interpret soil properties in conditions that preside to their functioning in arid areas namely, a large range of water potential, sodicity and salinity.

The behavior of sand-clay mixtures depends in the first place on the rate of clay. For high water potential ranges, the sand-clay mixtures

are generally saturated with water. Their dry porosity is little affected by the amount of clay and the residual dry porosity similar for the different clay percentages.

The addition of clay to a sand material increases the water retention properties in a large range of water potential. Considering the quality of the solutions, one can define physico-chemical conditions that affects physical properties. With different range of sodicity and salinity, but also with the rate of clay within the mixtures, very contrasted behaviors were observed. For all cases, the higher the SAR value, the higher the salt concentration of the solution has to be important in order to obtain low hydration and swelling properties. This can be related to the cation exchange selectivity of the clay in relation the solution concentration. For low SAR values the clay behavior is still sodic. Threshold values for salt concentration and SAR have been defined in order to predict the physical properties of clay-sand mixtures. An equation is proposed to predict the behavior.

Key-words

Clay, sand, water content, salinity, sodicity

RESUMEN

EFFECTO DE LA SALINIDAD Y SODICIDAD SOBRE EL COMPORTAMIENTO HÍDRICO DE MEZCLAS ARENA-ARCILLA

Este artículo está enfocado al estudio del mejoramiento de las propiedades físicas de los suelos arenosos del Sahara argelino por aporte de arcilla. Su finalidad es esencialmente de ofrecer elementos de interpretación de las propiedades de los suelos en función de las condiciones que actúan por su funcionamiento en medio árido a saber, el potencial del agua, la sodicidad y la salinidad.

El comportamiento hídrico de mezclas arena-arcilla depende en primer lugar de la tasa de arcilla. La adición de arcilla conduce generalmente a un material saturado en agua en los potenciales elevados del agua.

La porosidad de los materiales secos es poco afectada por la presencia de la arcilla y las características de la arena (granulometría, forma) determinan la porosidad. El principal efecto del aumento de la tasa de arcilla es incrementar la cantidad de agua y la energía de retención del agua.

Tomando en cuenta la calidad de las aguas, se puede definir las condiciones físicas y fisico-químicas que controlan las propiedades de la mezcla arena y entonces apreciar mejor la cualidad del aporte de arcilla al suelo.

El efecto de la sodicidad/salinidad se manifiesta por comportamientos muy contrastados. Hemos podido definir las condiciones de sodicidad y de salinidad a partir de las cuales los materiales tienen un comportamiento muy hidratado de tipo sódico o al contrario menos hidratado de tipo cálcico. Más la tasa de sodio (SAR) es elevada, más la concentración en sales de la solución debe ser importante por tener un comportamiento cálcico. Umbrales de comportamiento pudieron ser definidos particularmente el campo de concentración en sal y el valor del SAR que controlan el comportamiento de los materiales estudiados.

Palabras claves

Arcilla, arena, cantidad en agua, salinidad, sodicidad.

Les ressources de l'agriculture des zones arides et semi-arides sont limitées, surtout si on les compare aux besoins des populations locales. Dans ces régions en effet, l'extension et le développement de l'agriculture exigent l'utilisation de systèmes d'irrigations adéquats. Traditionnellement, la Science du Sol était surtout orientée vers l'étude des propriétés physico-chimiques des sols dans le but d'en maintenir ou d'en améliorer la fertilité chimique. Beaucoup moins de travaux ont été effectués sur le devenir des propriétés physiques de ces régions. Par rapport à la gestion de l'eau et au développement des plantes, au voisinage du Sahara, le maintien de caractéristiques physiques les plus favorables à l'économie de l'eau et au développement des plantes doit être recherché.

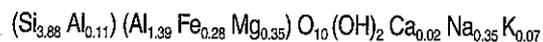
Dans le Nord du Sahara algérien, les sols sont d'origine éolienne et comportent essentiellement des sables. Ces sols sont, compte tenu de leurs caractéristiques physiques, très défavorables à l'agriculture. Une solution possible pour en améliorer les propriétés consiste à ajouter de l'argile aux matériaux sableux et ce, afin d'en augmenter leur réserve en eau. L'existence de gisements importants d'argile aux limites du Sahara et de l'Afrique du Nord rend a priori possible cette opération.

C'est la raison pour laquelle il a été décidé de développer une étude expérimentale du comportement de sable additionné d'argile. L'approche repose sur l'étude des propriétés de rétention en eau de mélanges artificiels sable-argile réhumectés par des solutions de concentrations salines variables.

MATERIAUX ET METHODES D'ETUDE

Des mélanges de sable et d'argile ont été préparés selon Kheyrabi et Monnier (1968), et Fiès (1971). Ce protocole permet de préparer des échantillons de l'ordre de 2 cm³ environ et présentant une structure macroscopiquement continue et homogène à l'état sec.

Le sable utilisé est de taille comprise entre 63 et 160 µm (figure 1) et provient de la région de Gassi-Touil au Sud-Est algérien. La bentonite naturelle provient de Mostaganem au Nord-Ouest de l'Algérie. Les analyses physico-chimiques (tableau 1) ainsi que l'analyse en diffraction des rayons X de cette argile montrent qu'il s'agit d'une smectite avec la formule structurale suivante :



L'étude de la capacité d'échange cationique (CEC) et des cations échangeables montre que cette argile contient au départ 75 % de sodium échangeable. Des mélanges de sable et d'argile à 3, 6, 12, 24 et 100 %

d'argile ont été effectués. Le choix de ces taux a été fait sur la base d'une suite géométrique. L'argile a été utilisée à l'état brut et mélangée à l'état sec. L'humectation du matériau ainsi préparé a été effectuée, d'une part avec de l'eau distillée et, d'autre part avec des solutions salines de différents SAR (Sodium Adsorption Ratio) qui est $(\text{Na}^+ / [(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++})/2]^{1/2})$, et à différentes concentrations, jusqu'à atteindre l'équilibre de leur complexe adsorbant avec la solution saline initiale ajoutée (vérification par la mesure de la conductivité électrique de la solution d'équilibre utilisée). Les valeurs du SAR et des concentrations en sels (CaCl₂ et NaCl) utilisées (tableau 2) représentent la gamme de salinité et de sodicité rencontrées généralement dans la région d'étude.

Les mélanges obtenus ont été portés à des potentiels de l'eau en fixant le potentiel matriciel de -1 kPa à -1600 kPa. Pour les potentiels de -1 à -100 kPa, on a utilisé le dispositif décrit par Tessier et Berrier (1979) et qui fonctionne selon le même principe que l'appareil de Richards (1947). La presse à membrane a été mise en œuvre de -100 kPa à -1600 kPa.

A chaque point expérimental, nous avons mesuré la teneur en eau par référence à un chauffage à 105 °C pendant 24 heures et le volume apparent par la mesure de la poussée d'Archimède dans du kérosène

Figure 1 - Distribution granulométrique du sable utilisé
Figure 1 - Mechanical analysis of the sand

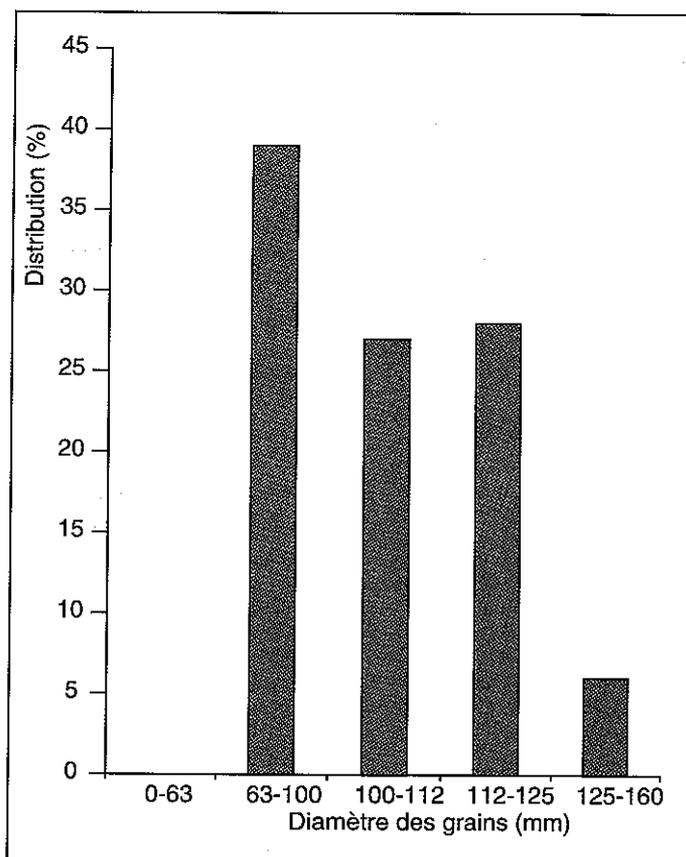


Tableau 1 - Cations échangeables (cmol⁺/kg) de l'argile brute (bentonite) et de sa fraction < 2 µm.**Table 1** - Exchangeable cations (cmol⁺/kg) of the raw material (bentonite) and of its clay (< 2 µm) fraction.

Echantillons	Cations échangeables				CEC (cmol ⁺ /kg)	Conductivité électrique (mS/cm)
	Ca	Mg	Na	K		
Argile brute	12,54	10,26	37,86	1,49	48,6	3,5
Argile < 2 µm	3,34	1,09	54	2,01	62,4	-

Tableau 2 - Composition des solutions salines initiales.**Table 2** - Composition of initial saline solutions.

	SAR = 0	SAR = 5	SAR = 15	SAR = 45
Concentration en cmol ⁺ /l	3,1	3,1	3,1	3,1
	12,5	12,5	12,5	12,5
	50	50	50	50
	200	200	200	200

(Monnier *et al.*, 1973). Les mesures ont été faites en dessiccation, à partir d'échantillons initialement saturés en eau.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Rétention d'eau

Propriétés de l'argile brute

Les résultats sont donnés pour des valeurs du SAR de 0, 5, 15 et 45 et des concentrations salines de 3,1, 12,5, 50 et 200 cmol⁺/l.

Nous avons regroupé *figure 2*, les résultats relatifs à l'effet de la concentration saline obtenus lors de la dessiccation de l'argile brute. L'examen de ces courbes conduit aux remarques suivantes :

- Le comportement de l'argile brute varie entre les valeurs des courbes de rétention extrêmes très similaires en fonction de la concentration saline et ce, quelle que soit la valeur du SAR.

- La concentration saline de la solution détermine largement le comportement hydrique du matériau. Pour un SAR donné, la teneur en eau à un potentiel donné est d'autant plus élevée que la concentration de la solution saline est faible. A un potentiel de - 1 kPa et à un même SAR de 15 par exemple, nous remarquons que la teneur en eau décroît de 380 à 80 %, lorsque la concentration saline passe respectivement de 3,1 à 200 cmol⁺/l. Ces valeurs extrêmes sont similaires pour les autres valeurs du SAR

Il apparaît que l'effet du SAR de la solution sur la teneur en eau de l'argile brute se manifeste jusqu'à une concentration saline de 50 cmol⁺/l (*figure 3*). Au delà (200 cmol⁺/l) les teneurs

en eau sont similaires. Dans tous les cas, il faut atteindre des potentiels hydriques élevés (bas pF, *tableau 3*) pour que l'hydratation de l'argile devienne maximale.

Propriétés des mélanges

D'une façon générale, pour les différentes valeurs du SAR et de la concentration saline, les teneurs en eau du matériau à 3 % d'argile varient peu, même si de légères variations sont néanmoins observées (*figure 4*). Quelle que soit la valeur du SAR, la teneur en eau est plus élevée avec l'eau distillée [0] qu'avec les différentes solutions salines. L'écart avec l'eau distillée est important aux hauts potentiels de l'eau et tend à s'annuler au voisinage de - 320 kPa (*figure 4*).

On constate aussi une très faible variation de la teneur en eau entre - 1 et - 3,2 kPa, alors que l'essentiel de l'eau est perdu de - 3,2 à - 32 kPa. Ensuite, de - 32 à - 1600 kPa, la variation de la teneur en eau devient de plus en plus faible. Signalons que les évolutions de teneurs en eau observées sur le mélange à 6 % d'argile sont peu différentes des résultats obtenus sur les mélanges à 3 % d'argile (Halilat, 1998).

Pour le mélange à 24 % d'argile (*figure 5*), les résultats montrent que le SAR et la concentration saline de la solution déterminent, à eux deux, les propriétés de rétention d'eau. Ainsi, pour chaque valeur du SAR, il existe une concentration saline à partir de laquelle la teneur en eau, à un potentiel donné, chute énormément par rapport à la teneur en eau obtenue avec la plus faible concentration (3,1 cmol⁺/l, *tableau 4*):

- Pour 3,1 cmol⁺/l, l'hydratation du matériau atteint des teneurs en eau élevées, de l'ordre de 60 à 83 % à - 1 kPa, et ceci quelle que soit la valeur du SAR.

- Pour 12,5 cmol⁺/l, lorsque le SAR ≥ 5 atteint, la teneur en eau à - 1 kPa est comprise entre 68 et 78 %.

- Pour 50 cmol⁺/l, il faut atteindre un SAR ≥ 45 pour obtenir une hydratation de l'ordre de 64 %.

- Pour 200 cmol⁺/l, le matériau n'exprime plus de propriétés de rétention d'eau élevées et la teneur en eau ne dépasse pas 30 % à - 1 kPa, et ce, quelle que soit la valeur du SAR.

Afin de mieux montrer l'effet de la salinité, nous avons effectué une analyse statistique sur les données obtenues à partir de la teneur en eau en fonction du potentiel hydrique. Cette analyse concerne l'argile brute et le mélange à 24 % d'argile. Elle a été effectuée sur quinze échantillons de chaque

Figure 2 - Effet de la concentration saline sur la teneur en eau pondérale de l'argile brute en fonction du SAR
Figure 2 - Effect of salt concentration on the water content of the raw clay material as a function of SAR

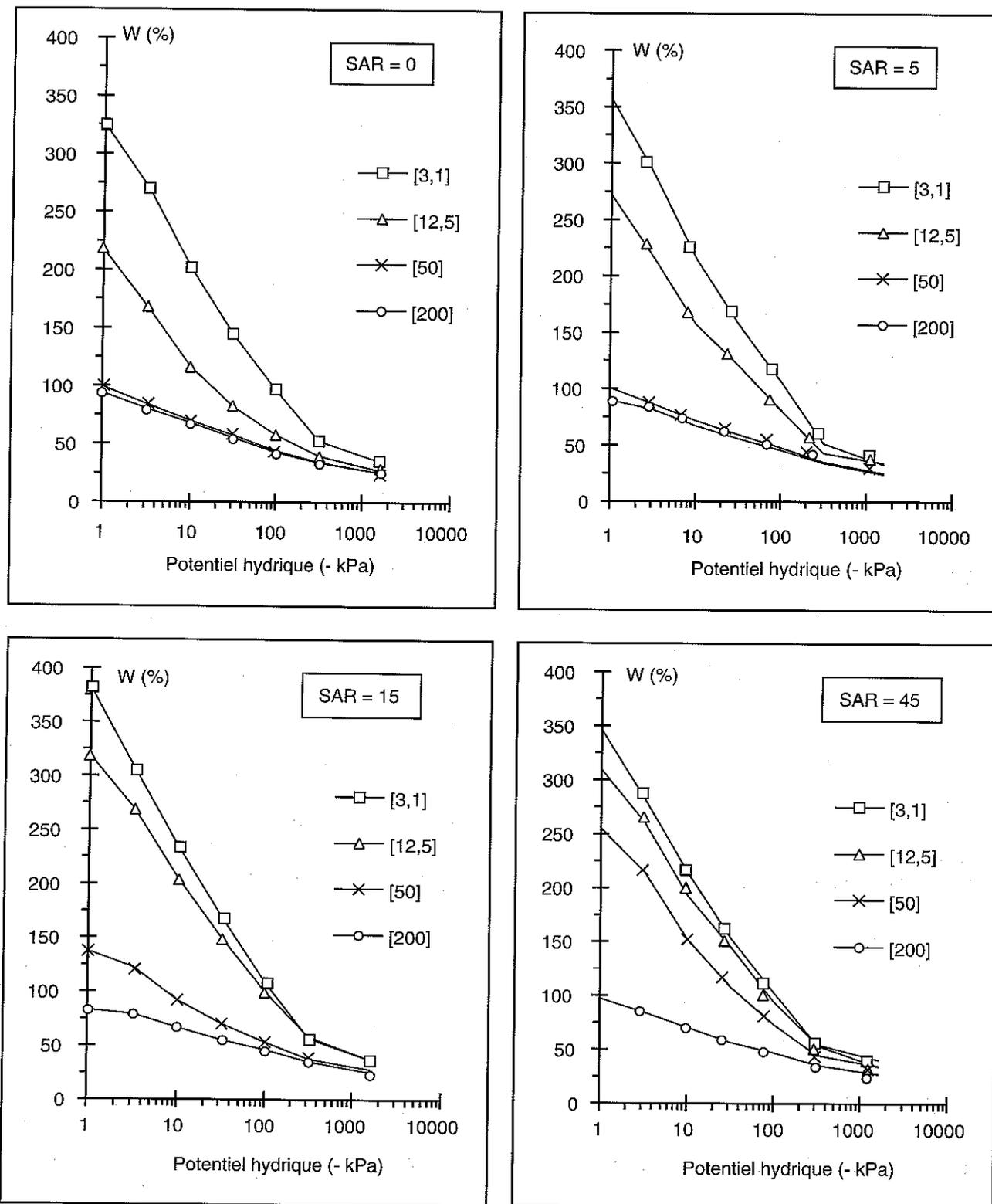


Figure 3 - Effet du SAR sur la teneur en eau pondérale de l'argile brute à différentes concentrations salines

Figure 3 - Effect of SAR on water content of the raw clay material at different salt concentrations

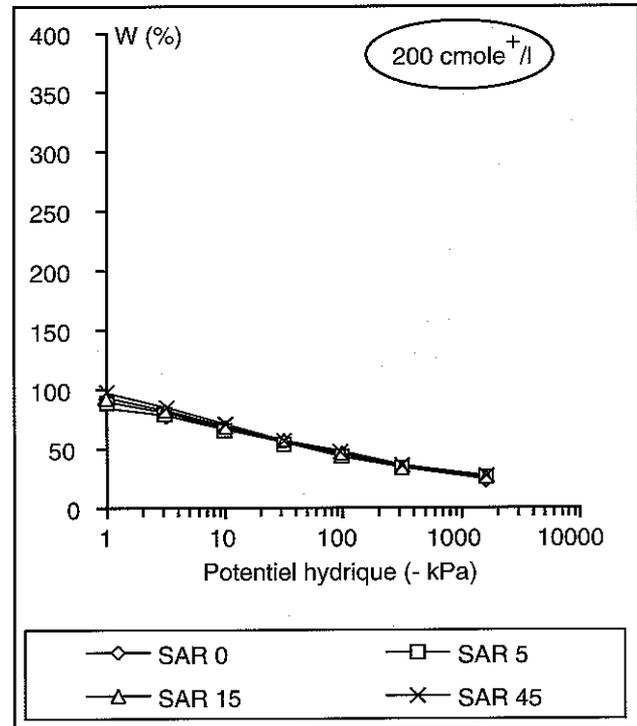
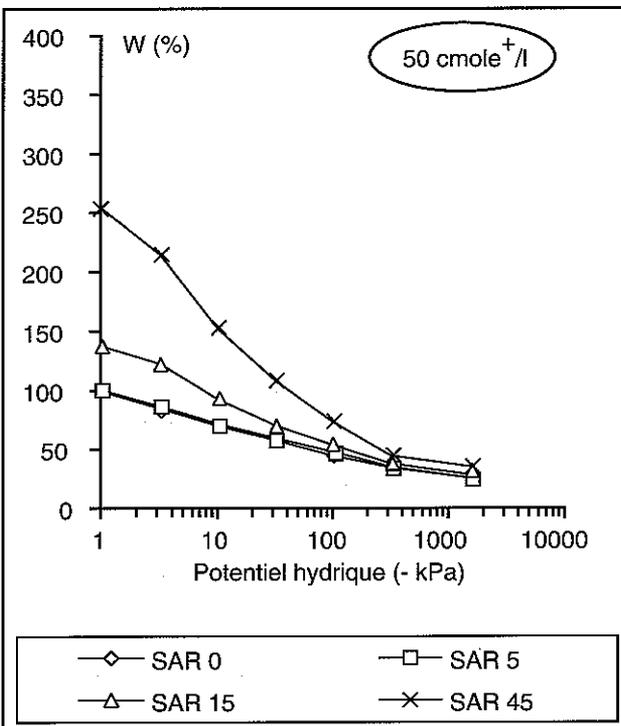
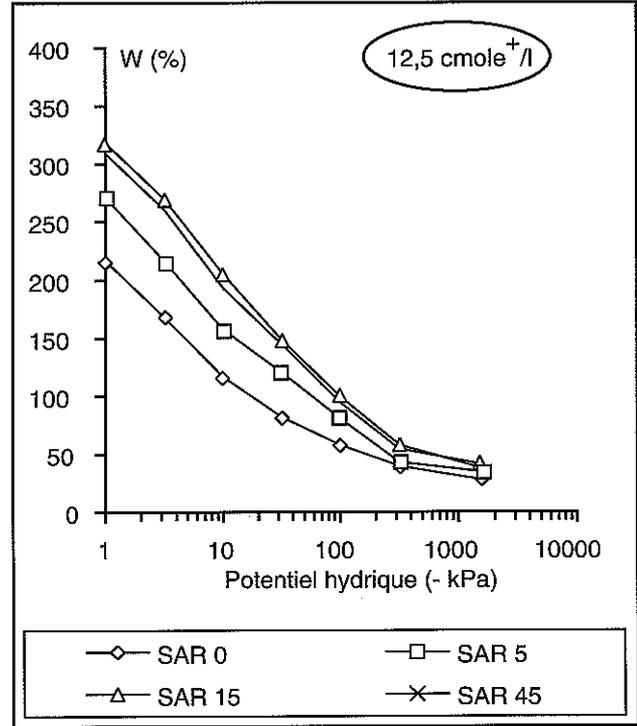
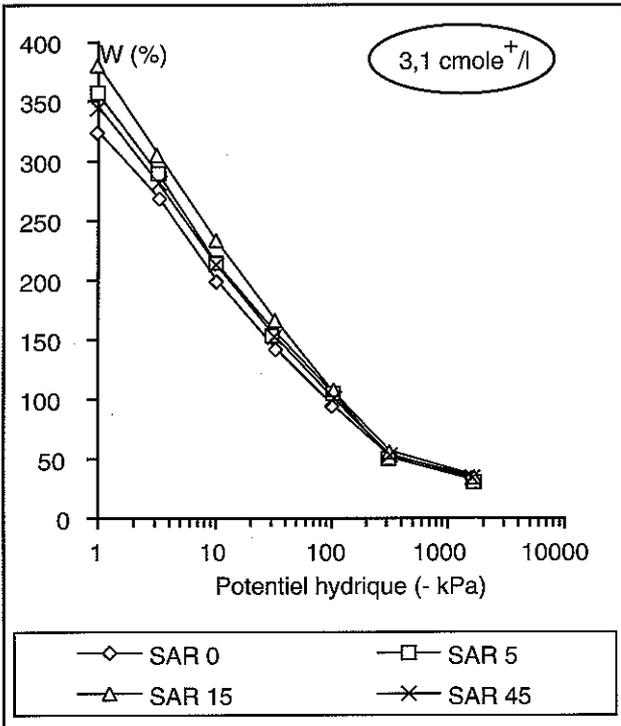


Figure 4 - Effet de la concentration saline sur la teneur en eau pondérale du mélange à 3 % d'argile en fonction du SAR
Figure 4 - Effect of salt concentration on water content of the material containing 3 % clay as a function of SAR

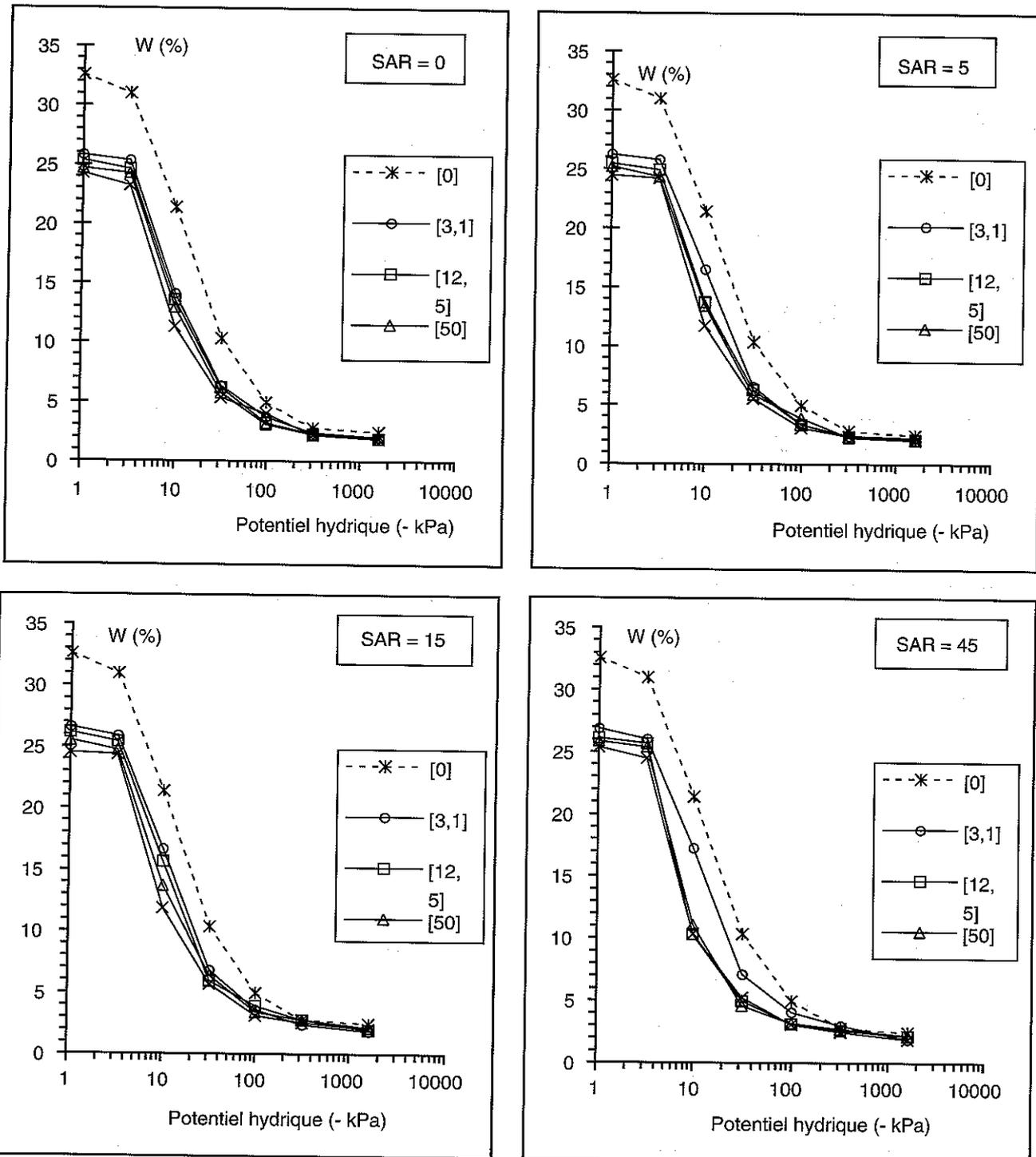


Figure 5 - Effet du SAR sur la teneur en eau pondérale du mélange à 24 % d'argile à différentes concentrations salines
Figure 5 - Effect of SAR on the water content of the material containing 24 % clay at different salt concentrations

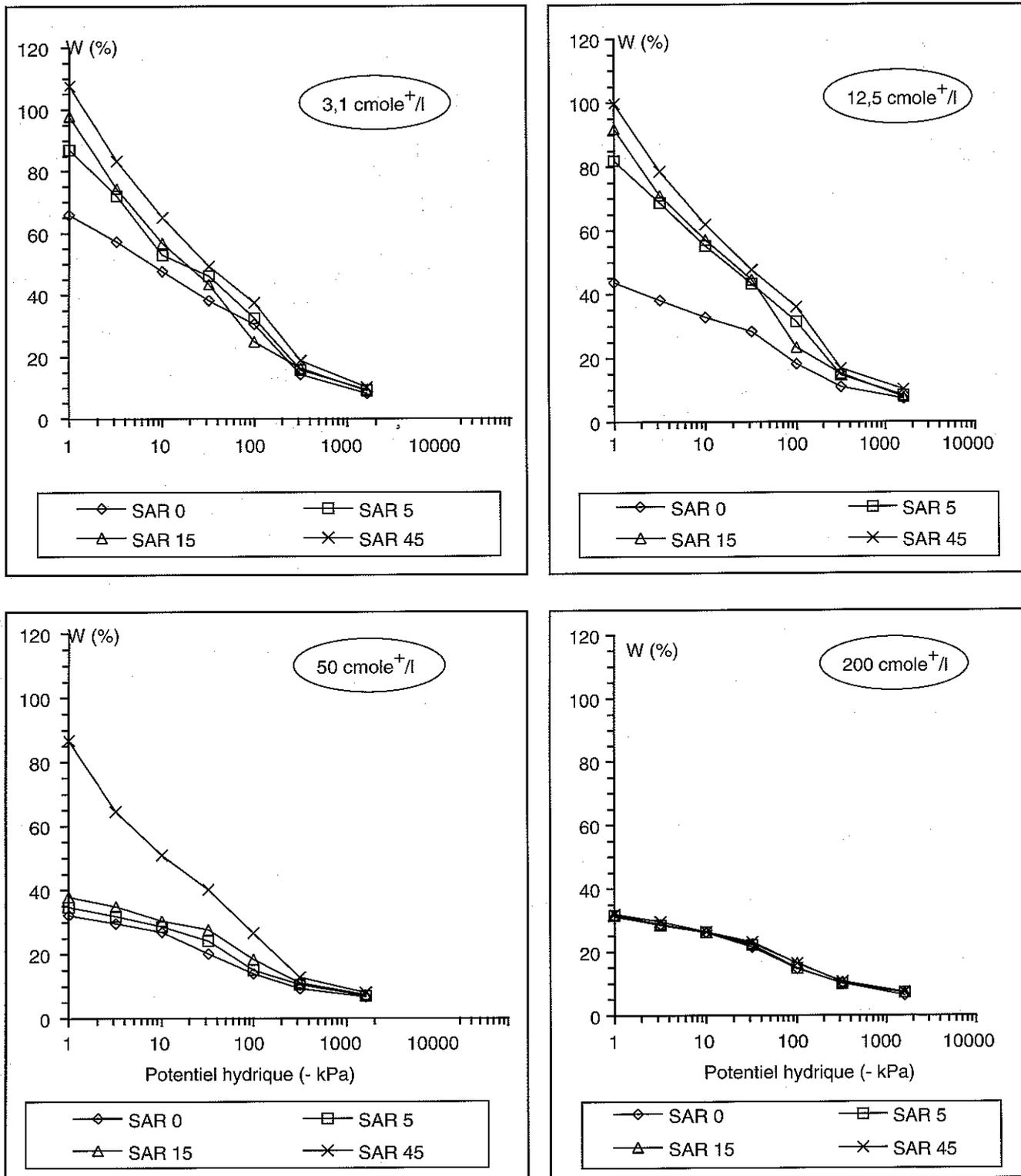


Tableau 3 - Domaine d'influence de la salinité et sodicité sur la rétention de l'eau (%) de l'argile brute à - 3,2 kPa.**Table 3** - Area of influence of salinity and sodicity on the water content (%) of the raw clay (bentonite) at - 3,2 kPa.

SAR	Concentration en cmol ⁺ /l			
	3,1	12,5	50	200
0	270	167	84	80
5	289	215	86	81
15	306	269	122	81
45	282	260	214	84

Tableau 4 - Domaine d'influence de la salinité et sodicité sur la rétention de l'eau (%) du mélange à 24 % d'argile à - 3,2 kPa.**Table 4** - Area of influence of the salinity and sodicity on water retention of the 24 % clay material at - 3,2 kPa.

SAR	Concentration en cmol ⁺ /l			
	3,1	12,5	50	200
0	57	38	29	28
5	72	68	29	28
15	74	70	32	29
45	83	78	64	29

matériau. Les résultats (Tableau 5) montrent que pour la teneur en eau le coefficient de variation (CV) et l'écart type (ET) sont très faibles. Nous montrons ainsi qu'il existe une différence significative entre les différentes teneurs en eau obtenues pour chacun des traitements. Ceci permet de conclure que la teneur en eau de - 1 à - 1 600 kPa décroît avec la concentration en sels de la solution dans l'ordre suivant: 3,1 > 12,5 > 50 > 200 cmol⁺/l et ce, quelle que soit la valeur du SAR.

Variation du volume et structuration des matériaux

L'approche expérimentale que nous avons développée permet, à chaque teneur en eau d'un matériau, de suivre les variations de volume de l'échantillon et la géométrie des pores

Tableau 5 - Résultats des analyses statistiques.**Table 5** - Statistical analysis results.

Matériau	Variance	F calculé	C. V. (%)	ET	Signification
Argile brute	118,61	47,16	1,0	0,15	S
à 24 % d'argile	139,24	35,52	1,1	0,13	S

(C. V. : coefficient de variation; ET : écart type; S : significatif)

au cours de la dessiccation (Haines, 1923; Newman et Thomasson, 1979; Bruand, 1986).

Les courbes d'indice de vide (figure 6) montrent que les comportements sont très différents entre l'argile brute, le sable pur (0 % d'argile) et les mélanges de sable et d'argile.

Nous avons observé que l'argile brute présente un retrait normal, c'est à dire que tout départ d'eau entraîne une variation identique de volume (Halilat, 1998). L'indice des vides (e) passe ainsi de 5,56 à 0,58 respectivement de $\psi = -1$ kPa à $\psi = -100$ MPa.

Par contre le sable pur (0 % d'argile) possède des propriétés de gonflement-retrait très faibles, c'est à dire que le volume du matériau varie très peu en fonction de la teneur en eau. Il en est ainsi pour les mélanges à 3 et 6 % d'argile qui possèdent ainsi des propriétés de gonflement-retrait quasi nulles proches de celles du sable. Autrement dit, une teneur en argile de 6 % ne suffit pas à faire varier le volume du mélange et donc à le réorganiser macroscopiquement. Il faut atteindre 12 % d'argile pour obtenir entre l'état sec et - 1 kPa un doublement de l'indice des vides. A - 1 kPa, ce même volume sera multiplié par 3 avec le mélange à 24 % d'argile.

Il apparaît aussi que tous les mélanges sable-argile aboutissent au-delà de - 320 kPa à un volume stable, bien que les volumes apparents soient différents d'une teneur en argile à l'autre, en accord avec les résultats de Fiès et Bruand (1992). Mais l'essentiel de la variation de volume et donc la possibilité de structuration macroscopique des matériaux se produit pour les potentiels de l'eau ≥ -10 kPa (bas pF). Nous concluons donc que les mélanges de sable et d'argile étudiés présentent une limite de retrait et que leur comportement est influencé de manière différente suivant la proportion d'argile et le domaine de potentiel de l'eau concerné.

Recherche d'une équation de comportement

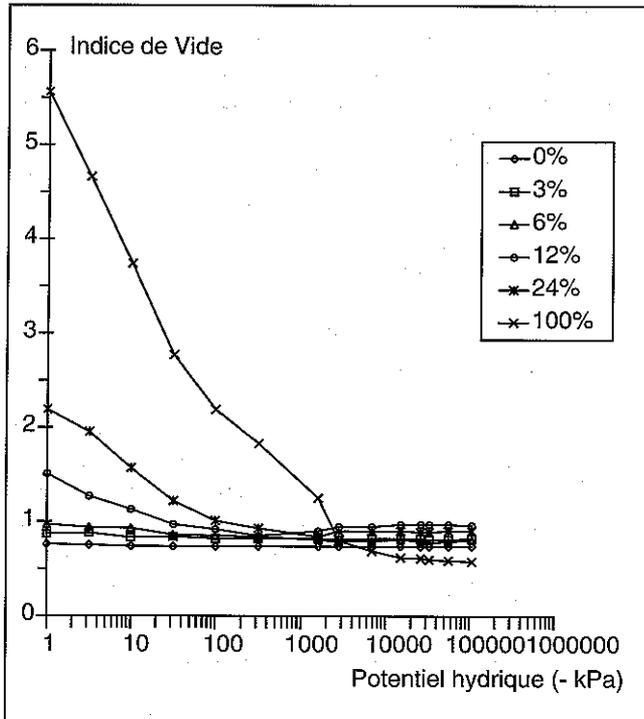
Rétention de l'eau

Nous avons reporté la teneur en eau en fonction de la teneur en argile (figure 7) pour chacun des potentiels de l'eau étudiés, en fonction de la granulométrie du matériau et en tenant compte également des variations de la salinité et de la sodicité.

Les courbes ont été tracées pour chacun des potentiels de l'eau retenus, c'est à dire de $\psi = -1$ kPa à $\psi = -100$ MPa pour les

Figure 6 - Changement de l'indice de vide en fonction de la teneur en argile

Figure 6 - Changes in void ratio according to the clay content



mélanges sable-argile avec de l'eau distillée, et de $\psi = -1 \text{ kPa}$ à $\psi = -1,6 \text{ MPa}$ pour les mélanges au contact de solutions salines à différentes valeurs du SAR.

Sur chacune des courbes nous avons ajusté une équation de régression ou un modèle de type :

$$W = ax + b$$

où :

W: la teneur en eau (%)

a: la pente de la droite ajustée sur la courbe rétention de l'eau-potential de l'eau

b: une constante, et

x: la teneur en argile

Les résultats obtenus montrent que la teneur en eau à un potentiel donné augmente proportionnellement à la quantité d'argile du mélange.

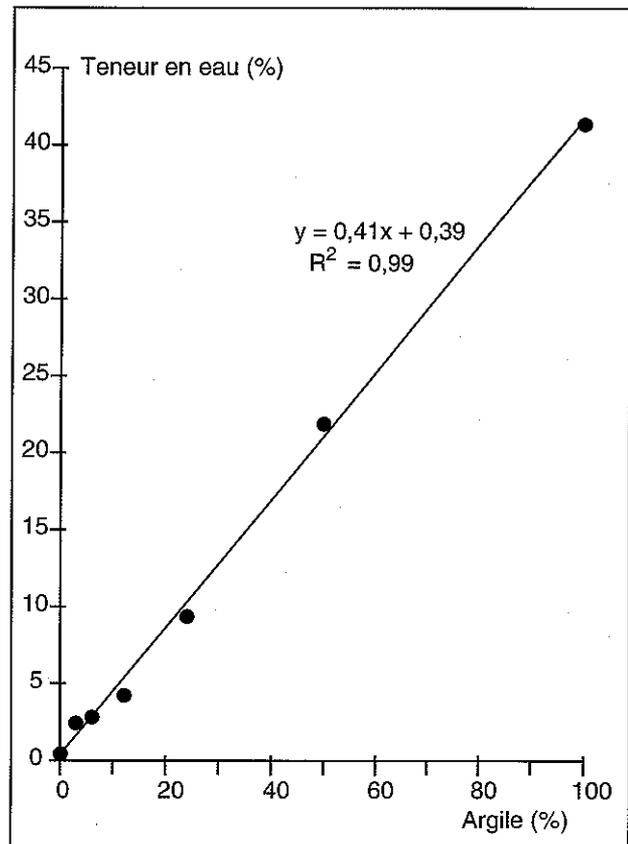
A partir des équations ainsi obtenues, nous avons retenu la valeur de la pente "a" de la droite de régression pour caractériser les propriétés d'hydratation des matériaux. Les résultats sont reportés figure 8. L'ajustement de la valeur de la pente "a" en fonction du potentiel hydrique est effectué à partir d'un modèle que l'on peut formuler ainsi :

$$\text{Pente} = -a \ln(\text{Potentiel hydrique}) + b$$

(a et b sont des constantes)

Figure 7 - Exemple d'un modèle de Régression à $-1,6 \text{ kPa}$

Figure 7 - Example of a regression model at $-1,6 \text{ kPa}$



Cette équation implique que la variable explicative, c'est à dire le potentiel hydrique, est une fonction directe de la variable à expliquer, la pente "a". Il apparaît ainsi deux grandes familles de comportement pour la rétention de l'eau :

- de -1 à -1600 kPa
- de -3 à -107 MPa

Ceci indique que le comportement des matériaux sablo-argileux et notamment la rétention de l'eau obéit à des lois complètement différentes suivant le potentiel de l'eau :

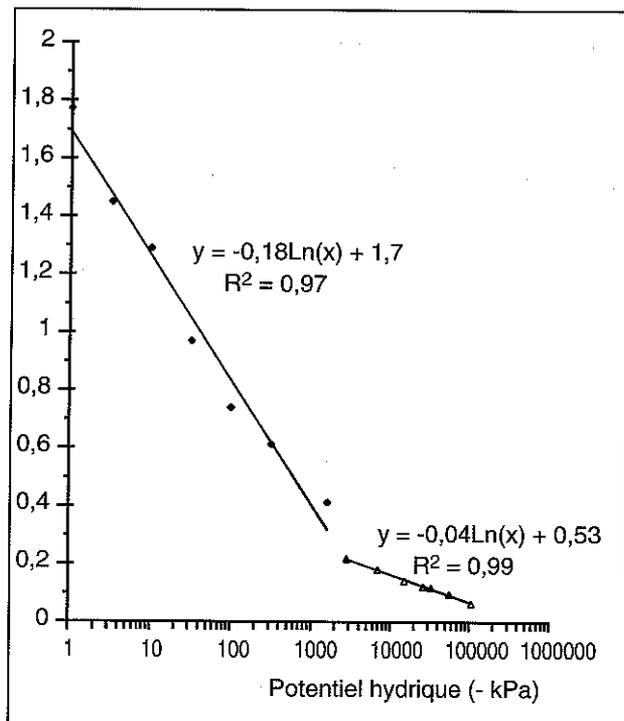
- Pour les hauts potentiels ($\geq -1,6 \text{ MPa}$), les matériaux perdent en fait une eau faiblement liée, probablement de type capillaire, retenue entre les grains de sable ou dans une matrice argileuse déformable.

- Pour les bas potentiels ($\leq -3 \text{ MPa}$), l'eau est principalement retenue dans la porosité de la matrice argileuse et entre les feuillets des argiles. Les quantités extraites sont alors beaucoup plus faibles qu'aux hauts potentiels de l'eau.

Un tel résultat est conforme à la littérature et confirme que dans le domaine de l'eau utilisable par les plantes ($\geq -1,6$

Figure 8 - Pente de la courbe de rétention d'eau des matériaux aux différents potentiels de l'eau

Figure 8 - Slope of the water retention curve at different water potentials



MPa), le mécanisme de la rétention de l'eau est totalement différent de celui aux plus fortes dessiccations. Des conclusions similaires ont été établies par Tessier (1984) qui a montré que dans le domaine des potentiels $\geq -1,6$ MPa l'eau est essentiellement retenue dans les pores de la matrice argileuse (entre les particules argileuses) et non dans l'espace interfeuillet des argiles.

Influence de la salinité/sodicité

L'effet de la salinité/sodicité sur le comportement des mélanges sable-argile a été étudié sur l'ensemble des échan-

illons. Nous reportons dans ce qui suit les différents SAR (0, 5, 15 et 45) et les concentrations salines extrêmes, c'est à dire 3,1 et 200 $\text{cmol}^{\circ}/\text{l}$ (tableau 6).

- Pour la concentration saline de la solution, on remarque que son effet est très important sur la valeur de la pente "a". Ainsi pour SAR = 45 et un potentiel hydrique de -1 kPa, "a" passe par exemple de 3,75 à 0,75 quand la concentration saline croît de 3,1 à 200 $\text{cmol}^{\circ}/\text{l}$.

- Pour chaque valeur du SAR, à une concentration saline donnée et à un potentiel de l'eau déterminé, "a" est quasi constant.

Mais la concentration et la nature des sels de la solution en équilibre avec les matériaux étudiés conditionnent largement la rétention d'eau de l'argile. Cependant, pour une même concentration saline, avec une solution de chlorure de calcium pure (SAR = 0), le comportement de l'argile n'est pas très différent de celui obtenu à des valeurs élevées du SAR, c'est à dire lorsque la proportion de NaCl dans la solution est importante (tableau 3). Nos résultats ne nous permettent pas de préciser la nature exacte des cations échangeables saturant la capacité d'échange de la smectite. Rappelons cependant que la capacité d'échange en cations de l'argile brute possède au départ un taux de saturation en sodium de 78 %.

Ce résultat ne peut être explicité sans faire intervenir deux facteurs importants à savoir (i) la cinétique d'échange des cations entre l'argile et la solution et (ii) la sélectivité d'échange de l'argile en fonction de la concentration de la solution. Nous avons vérifié que les équilibres argile-solution étaient bien réalisés. En revanche, la sélectivité d'échange en fonction de la concentration semble un aspect très important quant au comportement de l'argile. Ainsi, seules de fortes concentrations en sels apparaissent en mesure de permettre d'échanger la plus grande partie du Na échangeable de l'argile brute. Notre interprétation est donc qu'une solution de chlorure de calcium pure (SAR = 0), mais de faible concentration (0 et 3,1 $\text{cmol}^{\circ}/\text{l}$) ne permet qu'un échange très partiel de Na présent initialement sur l'argile par Ca. Il n'est donc pas surprenant que l'argile au contact d'une solution faiblement concentrée et de SAR = 0 présente encore un comportement de type sodique (forte

Tableau 6 - Effet de la concentration saline et du SAR sur la pente "a" pour l'argile brute.

Table 6 - Effect of the saline concentration and the SAR on the slope "a" for the brute clay.

SAR	Concentration en $\text{cmol}^{\circ}/\text{l}$			
	3,1		200	
	-1 kPa	-1 600 kPa	-1 kPa	-1 600 kPa
0	3,19	0,32	0,62	0,23
5	3,49	0,35	0,65	0,24
15	3,65	0,37	0,68	0,24
45	3,75	0,40	0,75	0,26

teneur en eau) et non de type calcique (faible teneur en eau). En revanche, dès que la concentration en sel augmente, à 50 cmol/l par exemple, une bonne partie du sodium doit être échangé. L'argile présente alors les propriétés d'hydratation beaucoup plus faibles, qui sont caractéristiques d'une smectite calcique. Ceci est confirmé par les résultats de la littérature à savoir que les smectites calciques présentent, quelle que soit la concentration saline à leur contact, des teneurs en eau faibles et similaires (Tessier, 1984). Il faut ajouter que les argiles sodiques préparées à de fortes concentrations salines présentent aussi des teneurs en eau faibles et comparables aux argiles calciques. Il n'est donc pas aisé de trancher par rapport aux mécanismes mis en jeu au contact des solutions, notamment quant au caractère plus ou moins calcique ou sodique des argiles. Cependant, en accord avec la *figure 5*, nos résultats confirment qu'avec des fortes concentrations salines à leur contact, les argiles sodiques et calciques possèdent des teneurs en eau faibles et similaires.

En fonction des résultats obtenus et en tenant compte à la fois du SAR et de la concentration en sels de la solution, on peut déterminer la valeur à partir de laquelle le comportement physique du matériau est affecté. Dans tous les cas, le rôle du squelette sableux n'est pas à négliger puisqu'il module le comportement de l'argile vis à vis de sa porosité, ses propriétés d'hydratation et de retrait.

CONCLUSION

Les résultats exposés dans cet article donnent un cadre explicatif à l'étude de la rétention de l'eau dans les matériaux sableux lorsqu'on ajoute de l'argile. Il est important de souligner que ces travaux ont été effectués avec des sables de granulométrie très resserrée de façon à bien mettre en évidence le rôle de l'argile au sein de la porosité. A partir de matériaux sableux provenant d'un autre gisement et d'une argile de nature différente, les conclusions qui suivent devraient sans doute être modulées, même si les phénomènes identifiés sont de nature similaire.

Au total, il apparaît qu'il est possible d'augmenter la teneur en eau à un potentiel hydrique donné d'un matériau sableux à partir de l'ajout d'argile. Ceci confirme ainsi les résultats obtenus par Lhotsky (1971) et Bousnina et Mhiri (1997). La teneur en argile nécessaire pour obtenir une variation de volume macroscopique significative est de l'ordre de 12 %. En outre, même si des variations de porosité sont observées d'une teneur en argile à l'autre, l'ajout d'argile n'est pas en mesure de faire fortement varier la porosité des mélanges aux bas potentiels ($\leq 1,6$ MPa). Il existe cependant une porosité résiduelle (limite de retrait) caractéristique de chaque mélange.

En fonction des résultats obtenus et en tenant compte à la fois des valeurs du SAR et de la concentration saline, on peut déter-

miner la valeur à partir de laquelle la teneur en eau varie fortement, notamment d'un comportement de type sodique avec une solution diluée à un comportement de type calcique voire sodique mais avec de fortes concentrations salines. Il y a lieu de tenir compte des relations spécifiques entre l'argile et le sable ce qui entraîne des propriétés particulières liées à l'organisation du mélange et qui ne sont pas simplement les propriétés additives du sable et de l'argile. En présence de sable et aux hauts potentiels de l'eau, la teneur en eau ramenée à l'argile étant diminuée par rapport à celle de l'argile, nous concluons que la présence d'un squelette sableux empêche l'argile d'exprimer pleinement ses propriétés d'hydratation.

Nos résultats montrent qu'il est possible de modéliser le comportement physique de tels matériaux, mais l'extension de tels résultats aux sols reste à confirmer et à discuter.

BIBLIOGRAPHIE

- Bousnina H. et Mhiri A., 1997 - Amélioration de la réserve d'eau utile des sols sableux des régions arides par un amendement argileux. *Sécheresse*, 8 (4): 241-246
- Bruand A., 1986 - Contribution à l'étude de la dynamique de l'espace poral. Utilisation des courbes de retrait et des courbes de rétention en eau. *Science du sol*, 4: 351-362
- Fiès J. C., 1971 - Recherche d'une interprétation texturale de la porosité des sols. *Ann. Agron.*, 22 (6): 655-685
- Fiès J. C. et Bruand A., 1992 - Analysis of soil textural porosity to skeleton particle size using mercury injection porosimetry. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 56: 1062-1067
- Haines W. B., 1923 - The volume changes associated with variation of water content in soil. *J. Agric. Sci.*, 13: 296-310
- Halilat M. T., (1998) - Etude expérimentale de sable additionné d'argile. Comportement physique et organisation en conditions salines et sodiques. Thèse Dr INAPG, 250p
- Kheyrahi D. et Monnier G., 1968 - Etude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. Agron.*, 19 (2): 129-152
- Lhotsky J., 1971 - Influence de la bentonite sur le changement des dimensions de pores dans un sol sableux. *Science du sol*, 2: 97-109
- Monnier G., Stengel P. et Fiès J. C., 1973 - Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Ann. Agron.*, 24 (5): 533-545
- Newman A. C. D. et Thomasson A. J., 1979 - Rothamsted studies of soil structure. Pore size distributions and shrinkage processes. *J. Soil Sci.*, 30: 415-439
- Richards L. A., 1947- Pressure membrane apparatus-construction and use. *Agric. Eng.*, 28: 451-454
- Tessier D. et Berrier J., 1979 - Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude des sols. Observations des sols humides soumis à différents pF. *Science du 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. INRA Versailles Ed., 361p

