

Effet du sodium échangeable et de la concentration saline sur les propriétés physiques des sols de la plaine du Cheliff (Algérie)

D. Saidi⁽¹⁾, Y. Le Bissonais⁽²⁾, O. Duval⁽²⁾, Y. Daoud⁽³⁾ et A. Halitim⁽⁴⁾

- (1) Faculté des Sciences de la Terre et des Sciences Agronomique, UHBC, BP151, Chlef, Algérie
(2) Centre INRA d'Orléans, Unité de Science du Sol, 45160 Olivet cedex, France
(3) INA, Département de Science du Sol, El-Harrach, Alger, Algérie
(4) Université de Batna, Institut d'Agronomie, Batna, Algérie

RÉSUMÉ

La stabilité structurale des sols affectés par les sels solubles et le sodium échangeable est un facteur déterminant de leur évolution structurale superficielle sous l'action des pluies et des irrigations. Ce travail étudie les propriétés physiques des sols et met en œuvre une méthode de caractérisation de la stabilité structurale par l'utilisation d'un granulomètre à diffraction laser avec trois traitements correspondant à des états hydriques initiaux et des niveaux d'énergie appliquée différents. La méthode est appliquée à des échantillons d'horizons de surface des sols affectés par les sels solubles et le sodium échangeable du Cheliff. Les résultats des tests de stabilité structurale sont représentés par des courbes quasi-continues des diamètres des particules agglomérées ou élémentaires résultantes; elles décrivent la désagrégation sur une très large gamme granulométrique allant jusqu'à un diamètre de 0,05 μm dans le cas des sols affectés par le processus de dispersion physico-chimique. Les effets du rapport d'adsorption du sodium [$\text{SAR} = \text{Na} / ((\text{Ca} + \text{Mg})/2)^{0.5}$] dans lesquelles les concentrations sont exprimées en meq l^{-1} et de la concentration saline sur la rétention en eau, la stabilité structurale et l'infiltration sont quantifiées. Tous les échantillons étudiés manifestent un comportement structural à risque lorsque le rapport d'adsorption du sodium (SAR) de la solution du sol dépasse un certain seuil. Ainsi la désagrégation augmente à mesure que la concentration du sodium et la concentration électrolytique augmentent; le taux d'infiltration diminue aussi au fur et à mesure que le SAR et la concentration saline augmentent. Les résultats de la matrice de corrélation linéaire amènent à conclure que la salinité des sols de la plaine du Cheliff s'accompagne toujours d'une sodisation du complexe absorbant. Les valeurs seuils acceptables de SAR et de ESP nécessaires pour conserver une structure stable se situent respectivement à 2 et 5 %. La dispersibilité apparaît très sensible, principalement au sodium échangeable et secondairement à la conductivité électrique qui traduit globalement la salinité du sol.

Mots clés

Sodium échangeable, concentration saline, stabilité structurale, infiltration.

SUMMARY

EFFECT OF EXCHANGEABLE SODIUM AND SALINE CONCENTRATION ON SOIL PHYSICS PROPERTIES OF CHELIFF PLAIN (ALGERIA)

The soil aggregate stability which is affected by soluble salts and exchangeable sodium is a determining factor of their superficial structural evolution under the actions of rain and irrigation. This work studies the physical properties of soils and applies a method of structural characterisation by using the laser diffraction particle-size analyser with three treatments corresponding to various initial moisture conditions and levels of energy. This method is applied on surface horizon samples of the Cheliff plain soil which is affected by the soluble salts and the exchangeable sodium. The tests measure the aggregates size distribution after break down. The curves describe the disintegration on a very large granulometric range reaching a diameter of $0,05 \mu\text{m}$, if the soil is affected by the dispersion process. The effect of sodium adsorption ratio [$\text{SAR} = \text{Na} / ((\text{Ca} + \text{Mg})/2)^{0.5}$, where concentrations are expressed in meq l^{-1}] and the saline concentration on the water retention, the aggregate stability and the infiltration rate are quantified. All the studied samples show a risk of structural degradation when the sodium adsorption ratio (SAR) exceeds a certain threshold. However, the disaggregation increased as the sodicity and electrolyte concentration of soil solution increased, also, the infiltration rate decreased as the SAR and salt concentration increased. The results of the linear correlation matrix carry to conclude that the soils salinity of the Cheliff plain always comes with a sodisation of the exchange complex. The threshold values acceptable of the Na concentration (SAR) and the exchangeable sodium percentage (ESP) needed, to maintain stable structure, correspond to 2 and 5 % respectively. The dispersion appears to be mainly sensitive to the exchangeable sodium and secondarily to the electric conductivity that represents globally the salinity of soil.

Key-words

Exchangeable sodium, saline concentration, aggregate stability, infiltration

RESUMEN

EFFECTO DEL SODIO INTERCAMBIABLE Y DE LA CONCENTRACIÓN SALINA SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS DE LA PLANICIE DEL CHELIFF (ARGELIA)

La estabilidad estructural de los suelos afectados por los sales solubles y el sodio intercambiable es un factor determinante de su evolución estructural superficial bajo acción de las lluvias y de las irrigaciones. Este trabajo estudia las propiedades físicas de los suelos y experimenta un método de caracterización de la estabilidad estructural por el uso de un granulometro a difracción láser con tres tratamientos correspondiendo a estados hídricos iniciales y a niveles diferentes de energía aplicada. Se aplica sobre muestras de horizontes superficiales de suelos afectados por sales solubles y sodio intercambiable del Cheliff. Los resultados de los tests de estabilidad estructural son medidas puntuales y continuas de la distribución del tamaño de las partículas, con menos rupturas de medidas entre las clases. Se representan por curvas que describen la desagregación sobre una larga gamma granulométrica hasta un diámetro de $0,05\mu\text{m}$ en los casos de los suelos afectados por el proceso de dispersión físico-química. Los efectos del sodio intercambiable y de la concentración salina sobre la retención en agua, la distribución del tamaño de las partículas resultantes de los tests de estabilidad y la infiltración son cuantificadas. Todos las muestras estudiadas manifiestan una reacción negativa general cuando la taza del sodio intercambiable rebasa un cierto umbral. Así la desagregación aumenta a medida que el ESP y la concentración salina aumentan. Las partículas arcillosas se dispersan de manera notable cuando el porcentaje de sodio intercambiable rebasa 5%. La dispersión aparece muy sensible principalmente al sodio intercambiable y en segundo por la conductividad eléctrica que traduce globalmente la salinidad del suelo.

Palabras clave

Sodio intercambiable, concentración salina, estabilidad estructural, infiltración

La salinisation et la sodisation des sols constituent des phénomènes importants dans les zones sèches. Elles provoquent une dégradation des propriétés biologiques, chimiques et physiques des sols. La conséquence de cette dégradation des propriétés des sols est la diminution de leur fertilité qui entraîne une réduction des rendements des cultures, et parfois la disparition du couvert végétal naturel. Ces phénomènes de dégradation des sols sont donc des facteurs de désertification (Aubert, 1975).

Si l'effet des sels solubles et du sodium échangeable sur les propriétés physiques des sols est connu depuis longtemps (U. S. Salinity Laboratory, 1954, Tessier, 1984), les seuils de sensibilité sont encore mal identifiés et très discutables (Suarez, 2001). En effet, ces seuils dépendent également de certaines caractéristiques du sol (texture, minéralogie des argiles, teneur et nature des composés organiques, pH et sesquioxydes...). Pour cela, la mise en valeur des sols affectés par ces phénomènes nécessite une détermination spécifique des seuils acceptables pour le sol et le végétal (Suarez, 2001, Shaggs *et al.*, 2001). Si ces phénomènes affectent préférentiellement les sols irrigués en zones sèches, il n'en demeure pas moins que les sols non irrigués peuvent être concernés par ce problème à la suite d'apports de solutions chargées par les eaux de ruissellement, par les écoulements hypodermiques et les remontées capillaires, et par les vents (Aubert, 1975, Halitim, 1985).

Concernant l'effet néfaste du sodium échangeable sur la structure des sols, le seuil de 15 % est initialement considéré comme le niveau critique qui affecte la stabilité structurale des sols (U. S. Salinity Laboratory, 1954). Par la suite, de nombreux travaux ont montré que ce seuil est variable selon certains paramètres caractéristiques des sols tels que la texture, la nature des colloïdes et des constituants secondaires (Shainberg *et al.*, 1981, Lebron *et al.*, 2002). C'est ainsi que McIntyre (1979) proposa le seuil de 5 % de sodium échangeable pour définir les sols sodiques.

Si la stabilité structurale est une propriété qui joue un rôle fondamental dans le fonctionnement des sols, sa caractérisation pose encore des problèmes méthodologiques (Whelan *et al.*, 1995; Le Bissonnais, 1996; Saidi *et al.*, 1999; Draz-zouita *et al.*, 2002).

Ce travail a pour objectifs d'étudier le comportement physique d'échantillons de sols affectés par les sels solubles et le sodium échangeable. Il s'agit en particulier de cerner leur seuil de sensibilité au sodium échangeable par la mise en œuvre d'une méthode récente de caractérisation de la stabilité structurale des sols.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Les échantillons étudiés

Ils proviennent de l'horizon de surface des principaux types de sols de la plaine du Bas Cheliff (Algérie). Ce sont des sols peu évolués non climatiques d'apport alluvial et des sols halomorphes à struc-

ture non dégradée, salins et à efflorescences salines (CPCS, 1967), ou Fluvisols et Salisols selon le Référentiel Pédologique (AFES, 1995). Les sols sont carbonatés, argileux à limono-argileux, la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée est comprise entre 1 et 30 dS m⁻¹, le taux de sodium échangeable varie entre 3 et 25 % de la capacité d'échange cationique (Saidi, 1992).

Pour étudier le comportement physique (rétention en eau, stabilité structurale, infiltration sous pluie simulée) des sols de la région, 6 échantillons sont sélectionnés, couvrant largement les gammes possibles de variation de la salinité (exprimée par la conductivité électrique (CE) de l'extrait de pâte saturée en dS m⁻¹ à 25°C) et de la sodicité (exprimée par le pourcentage de sodium fixé sur le complexe absorbant (ESP) et le rapport d'adsorption du sodium de la solution du sol (SAR)). Un septième échantillon, désigné par La Bouzule (lieu de prélèvement Champenoux, 54) est utilisé comme une argile modèle dans notre étude. Le sol est un Sol brun à caractère vertique (CPCS, 1967) ou un Pélosol Typique selon le Référentiel Pédologique (AFES, 1995).

Compte tenu de l'influence des carbonates des différentes fractions granulométriques sur les propriétés physiques des sols (Halitim, 1985; Daoud, 1993), et de leur répartition très variable, il était nécessaire pour établir des comparaisons valables, de raisonner uniquement sur les pourcentages relatifs des diverses fractions minérales insolubles.

On a donc réalisé sur chaque échantillon, tamisé au préalable à 2 mm, une analyse granulométrique après décarbonatation et dispersion à l'hexaméthaphosphate de sodium (méthode de la pipette Robinson), et une mesure de la teneur en calcaire total par volumétrie au calcimètre de Bernard. Le carbone organique est analysé par la méthode Anne (1945); le pH mesuré dans une suspension terre/eau de 1/2,5 après 2 heures d'agitation et 24 heures de mise en équilibre. La conductivité électrique est mesurée sur un extrait de pâte saturée; les mesures de la capacité d'échange et des cations solubles ont été réalisées au Laboratoire d'Analyses des Sols de l'INRA d'Arras à l'aide de deux méthodes, la méthode Metson, par extraction à l'acétate d'ammonium au pH 7 et la méthode par extraction au chlorure de cobalthexammine au pH du sol et l'extraction diluée au rapport sol/eau de 1/25.

La rétention en eau

Les déterminations ont porté sur des mottes de dimensions centimétriques (5 à 10 cm³) obtenues par fragmentation à la main de blocs décimétriques. La densité apparente des mottes a été mesurée à l'aide de la méthode au pétrole (Monnier *et al.*, 1973). Six teneurs en eau ont été déterminées pour des valeurs de potentiel matriciel de -10 hPa ($W_{1,0}$ à pF = 1), -330 hPa ($W_{2,5}$ à pF = 2,5), -1 000 hPa ($W_{3,0}$ à pF = 3,0), -3 300 hPa ($W_{3,5}$ à pF = 3,5), -10 000 hPa ($W_{4,0}$ à pF = 4,0), -15 000 hPa ($W_{4,2}$ à pF = 4,2). Les mesures ont été réalisées en utilisant un dispositif pneumatique. Ce dispositif s'apparente à celui utilisé par Tessier et Berrier (1979) tout en permettant de mettre à l'équilibre 30 à 40 mottes à la fois dans une

seule cellule. La teneur en eau est mesurée après 7 jours de mise à l'équilibre avec la pression choisie puis passage à l'étuve à 105°C pendant au moins 24 heures. Ces différentes déterminations effectuées sur échantillons non perturbés requièrent un grand nombre de répétitions. Les valeurs moyennes sont obtenues à partir de 5 à 6 mottes.

La stabilité structurale

La mesure de la stabilité structurale sur des agrégats de 3 à 5 mm obtenus après tamisage, est réalisée selon le protocole proposé par Le Bissonnais (1996). Avant de soumettre les agrégats aux tests, un séchage à l'étuve à 40 °C pendant 24 heures permet de mettre les échantillons étudiés aux mêmes conditions hydriques afin d'établir des comparaisons valables. L'objectif de la méthode est de donner une description réaliste du comportement des sols soumis à l'action de la pluie et de permettre un classement relatif des matériaux vis-à-vis de ce comportement. Trois types de tests sont effectués (humectation rapide, agitation après pré-humectation et humectation lente); chacun d'eux caractérise un phénomène particulier (éclatement total, désagrégation par énergie mécanique et éclatement partiel ou microfissuration). La stabilité est exprimée par la caractérisation de la distribution de la taille des particules agrégées résultant des tests. Le granulomètre laser Mastersizer S (Malvern Instruments Ltd) a été utilisé. Il fait appel à la théorie de diffusion de la lumière de Mie pour calculer le diamètre des particules dispersées ou agrégées. La mesure est réalisée directement sur des particules en suspension dans l'eau. Le type de lentille choisi (300RF) permet de mesurer des diamètres compris entre 0,05 et 880 µm. Une opération de tamisage à 500 µm est effectuée avant le passage au granulomètre. Le refus du tamis est ensuite séché à l'étuve jusqu'à poids constant. Les résultats s'expriment soit graphiquement sous la forme de courbes des fréquences cumulées, soit par le calcul du diamètre moyen pondéral pour chaque test (MWD, pour Mean Weight Diameter de Van Bavel (1949) et Youker et Mc Guinness (1956)) qui représente la moyenne des fréquences cumulées. On peut également faire la moyenne des trois MWD pour avoir une valeur synthétique. La facilité d'utilisation de l'appareil et la rapidité des mesures donnent la possibilité d'effectuer des cinétiques de désagrégation au cours du temps. Nous avons donc effectué des mesures granulométriques après 5 minutes d'agitation, et les résultats sont exprimés par le MWD_{bis} . Chaque valeur du MWD correspond à trois répétitions.

Mesure de l'infiltration du sol sous pluie simulée

Les averses artificielles ont été mises en œuvre à l'aide d'un dispositif d'aspersion. Le simulateur de pluie est de type IRD (ORSTOM), conçu par Asseline et Valentin (1978). Il est constitué d'un système d'arrosage fixé au sommet d'une tour pyramidale de 4 mètres de haut et protégé de l'action du vent par une bâche amovible. L'aspersion est assurée par un gicleur calibré, monté sur un bras oscillant dont

le mouvement est imprimé par un moteur électrique. Cet infiltromètre à aspersion permet de simuler des pluies d'intensités contrôlables sur une placette de 1 m². La gamme d'intensité disponible varie de 20 à 150 mm.h⁻¹. Le protocole de simulation comprend plusieurs essais pluvieux d'une intensité moyenne de 30 mm.h⁻¹ pendant 90 minutes, soit 45 mm de précipitation. Cette dernière est obtenue avec un réglage de la pression de 1,7 bars au niveau du gicleur et elle correspond bien à celle rencontrée dans la zone d'étude pour un événement pluvieux naturel de récurrence décennale.

Le dispositif, qui permet de travailler à l'échelle d'un massif d'agrégats et à succion imposée, est préconisé dans les modèles conçus par Shainberg *et al.* (1980), Fies et Panini (1995) et Le Bissonnais *et al.* (1996). Le cylindre plastique de 5 cm de diamètre, reçoit environ 120 g d'agrégats secs de taille 3-5 mm à la densité apparente de 1,5 g cm⁻³ qui forment une couche d'épaisseur 40 mm sur une couche de sable épaisse de 10 mm*. Les cylindres sont transparents afin de pouvoir contrôler visuellement l'humectation. Ils sont perforés à leur base pour permettre l'évacuation de l'eau et la mesure de l'infiltration. Les échantillons sont d'abord saturés par la base. Ils sont ensuite exposés à une pluie simulée (eau permutée) jusqu'à ce que le taux d'infiltration stabilisée soit obtenu. Le flux d'eau passant à travers l'échantillon est mesuré toutes les 5 minutes et désigne le volume d'eau infiltré par unité de temps. Le rapport entre l'infiltration finale et l'intensité de pluie qui correspond au coefficient d'infiltration finale (CIF) est calculé pour chaque essai. Les conditions standard du fonctionnement du simulateur pour chaque épisode pluvieux sont étalonnées et vérifiées.

Trois répétitions ont été faites pour chaque échantillon traité.

RÉSULTATS

Caractérisation de la population d'échantillons

Les caractéristiques physico-chimiques des 6 échantillons sélectionnés de la plaine du Bas Chélif ainsi que celui de la Bouzule sont rapportées dans le *tableau 1*. Les valeurs de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée varient de 2 et 41 dSm⁻¹, celle de la Bouzule est de 0,86 dSm⁻¹. Ils sont généralement calcaires avec des teneurs en matière organique comprises entre 1,9 et 3 %; leur texture est argilo-limoneuse. Les paramètres importants pour apprécier les risques de sodisation des sols sont le SAR (sodium adsorption ratio) de la solution du sol et le pourcentage de sodium fixé sur le complexe adsorbant (ESP). Dans les échantillons, les valeurs du SAR varient de 0 à 6, et celles de l'ESP de 3 à 52 %. Les valeurs de la CEC, lorsqu'elles sont mesurées au pH du sol, sont comprises entre 18 et 21 cmol kg⁻¹ pour les sols du Chélif; elle est de

* En considérant que la densité moyenne de la fraction solide du sol est de 2,65 g cm³, le volume des pores du lot d'agrégats dans le cylindre serait de 45 cm³.

Tableau 1 - Caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés**Table 1** - Physical and chemical characteristics of the studied materials

Référence Sol	Unité	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Bouzule N.
Texture ^a		A	AL	AL	AL	AL	AL	ALO
Argile		47,07	43,07	45,23	41,05	40,82	43,47	56,20
Limon		34,33	41,27	45,75	55,15	44,87	41,47	42,60
Sable	%	18,60	15,72	9,02	3,80	14,32	15,07	1,20
Mo ^b		3,38	2,76	1,90	2,30	2,30	2,37	1,07
CaCO ₃		20,91	22,49	6,75	18,44	20,69	15,08	2,10
CEC _{sol}	cmol kg ⁻¹	20,80	20,40	19,30	20,00	19,70	18,50	24,58
SS	m ² g ⁻¹	325,35	344,00	359,79	314,60	310,08	315,72	288,00
pH _(1/2,5)		8,10	8,11	8,34	8,16	8,13	8,35	7,81
[Na ⁺]/[Ca ⁺⁺]		1,03	1,60	0,43	2,12	2,78	0,97	0,07
[Na ⁺]/[Mg ⁺⁺]		2,20	2,60	2,78	2,88	2,48	12,88	0,65
[Na] ^c (1/25)	cmol l ⁻¹	0,54	0,89	10,50	2,89	5,22	21,84	0,05
CST ^d (1/25)		1,48	1,98	39,10	5,41	9,35	46,36	0,80
CE ^e	dS m ⁻¹	1,93	3,80	32,53	16,41	20,70	41,33	0,86
SAR ^f		0,87	1,34	2,79	2,66	3,70	6,27	0,08
ESP ^g	%	3,00	5,00	11,00	19,00	26,00	52,00	0,34

a : D'après le triangle textural de l'USDA (United States Department of Agriculture)

b : Matière organique (MO),

c : Concentration du sodium dans la solution du sol en meq l⁻¹ ([Na⁺]),

d : Somme des cations solubles en meq l⁻¹ (SCS)

e : Conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée (CE)

f : Rapport d'adsorption de sodium SAR = Na⁺ / ((Ca²⁺ + Mg²⁺)/2), [] : meq l⁻¹

g : Pourcentage du sodium échangeable ESP = Na⁺ x 100 / CEC, [Na⁺] : sodium adsorbé en cmol 100 g⁻¹ de sol, CEC : capacité d'échange cationique en cmol 100 g⁻¹ de sol

CEC_{sol} : Capacité d'échange cationique en cmol kg⁻¹ mesurée après échange à la cobaltihexamine à un pH proche du sol

SS : Surface spécifique de la fraction argileuse

l'ordre de 25 cmol kg⁻¹ pour celui de la Bouzule qui n'est ni salé ni sodique.

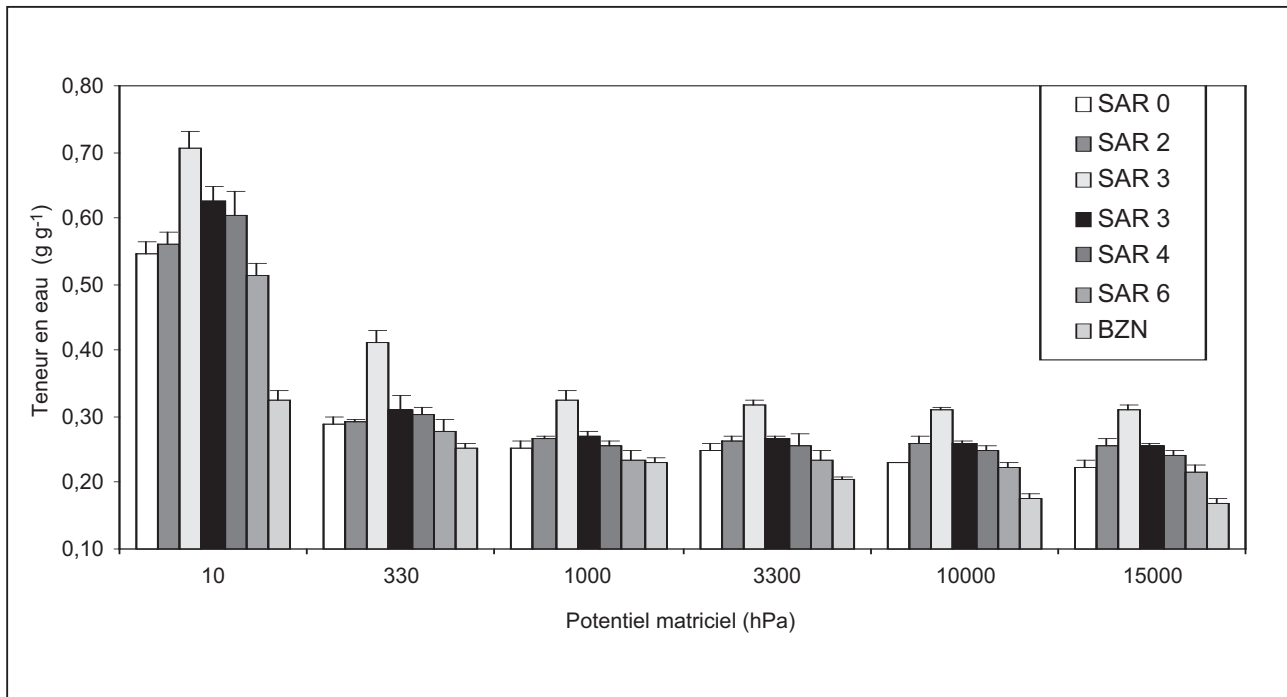
La fraction inférieure à 2 µm des échantillons appartient au faciès caractéristique des illites, avec un mélange de minéraux argileux de type smectite, kaolinite et de chlorite (Daoud, 1993). La surface spécifique (SS) est en moyenne de 328 m²g⁻¹ pour les fractions argileuses des sols du Bas Cheliff, elle est de 288 m²g⁻¹ pour la Bouzule.

Les sols salsodiques ont en général une évolution dominée par la présence de fortes quantités de sels plus solubles que le gypse. On mesure la salinité par la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée (CE). La richesse du complexe adsorbant des sols en ions sodium provenant de ces sels et la susceptibilité de la dégradation de leurs propriétés physiques sont caractérisées par le pourcentage du sodium échangeable (ESP) et le sodium adsorption ratio (SAR) de la solution du sol lorsqu'ils dépassent respectivement les valeurs de 15 % et 10 (Sposito et Mattigod, 1977; USDA, 1979; Aubert, 1983). Ils sont couramment utilisés pour prévoir l'évolution de la composition du complexe d'échange et pour définir le terme

de sodicité. Le *tableau 2* confirme l'existence d'une relation linéaire positive entre la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée et la sodicité qui est exprimée soit par le SAR, soit par l'ESP. Les coefficients de corrélation linéaire sont élevés ($r > 0,90$) et suggèrent que ces paramètres sont très fortement corrélés entre eux; ils signifient que la salinité des sols de la plaine du Cheliff s'accompagne toujours d'une sodisation du complexe adsorbant.

La rétention en eau

L'influence de la phase saline sur la rétention en eau aux différents potentiels de l'eau est présentée sur la *figure 1*. Pour chacun des matériaux, les teneurs pondérales en eau diminuent du pF 1 au pF 4,2, et pour chaque pF, la teneur en eau est très variable en fonction du SAR et de la concentration saline de la solution du sol. Les différences de teneur en eau observées entre les échantillons semblent comparables, avec un maximum de teneur en eau obtenu pour un SAR de 3. Pour les échantillons ayant une concentration un SAR < 2, la teneur en eau augmente avec la conductivité électrique de la solution du sol; par contre les échan-

Figure 1 - Valeurs de teneurs en eau aux différents potentiels matriciels des matériaux étudiés**Figure 1** - Water retention at various water potential for the studied materials

tillons ayant un SAR > 3, une diminution progressive de la teneur en eau est observée pour toutes les concentrations salines étudiées. Les résultats montrent d'une manière générale que dans la gamme de potentiels de l'eau de -10 hPa à -15 000 hPa, c'est à dire de la capacité maximale au champ au point de flétrissement permanent des plantes, la teneur en eau est divisée au moins par 2. Par la suite, les teneurs en eau augmentent quand la concentration saline augmente, pour toutes les valeurs du potentiel matriciel. Néanmoins l'effet de cette concentration est limité à un seuil déterminé au-delà duquel cette teneur en eau diminue quand la concentration en sodium dans la solution du sol augmente.

Ce comportement est à rapprocher de l'évolution de la taille des pores remplis d'eau qui diminue quand le potentiel total augmente. Le potentiel total étant égal à la somme du potentiel matriciel et du potentiel osmotique (Hillel, 1980), l'augmentation du potentiel osmotique, c'est-à-dire la concentration saline à un seuil déterminé ($CE < 4 \text{ dS m}^{-1}$, SAR < 2 et ESP < 5), présente les mêmes effets que la contrainte physique, mais avec des teneurs en eau relativement élevées. Au-delà de ce seuil la tendance s'inverse. De ce fait, lorsque le potentiel osmotique et le potentiel matriciel augmentent, la rétention en eau diminue.

Par ailleurs, la sodicité possède un effet plus discriminant que la salinité dans la variation de la teneur en eau pondérale. En effet, la rétention en eau dans les sols du Chélif est limitée par le sodium

échangeable à des concentrations salines comparables comme l'ont montré les travaux de Halitim *et al.* (1984) et Tessier (1984).

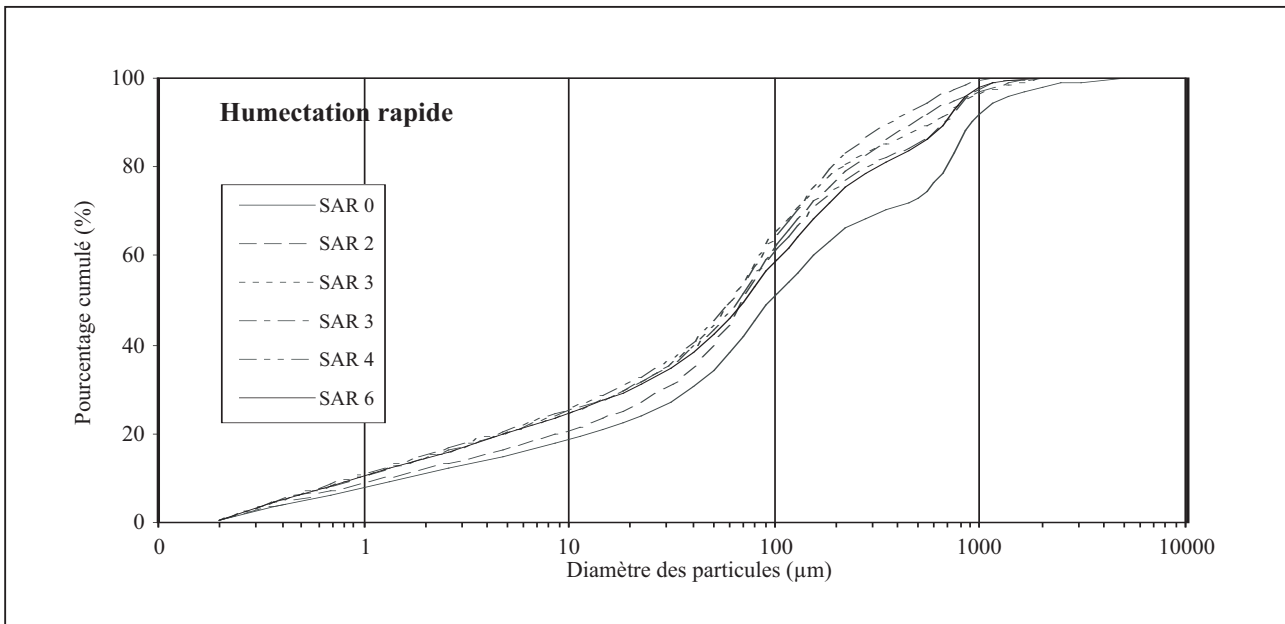
Stabilité structurale

L'éclatement total

Ce traitement permet de tester le comportement de matériaux secs placés dans un même contexte climatique et cultural et qui sont soumis à des humectations brutales, du type irrigation par submersion, ou des pluies intenses. Le mécanisme d'éclatement total, lié au piégeage de l'air lors de l'humectation des agrégats permet de fournir des indications globales et tendancielle sur les comportements des sols en fonction des variations de la salinité globale.

D'après la *figure 2*, on constate que lorsqu'on immerge rapidement dans l'eau les agrégats secs des différents échantillons, les distributions granulométriques obtenues présentent deux allures différentes. L'échantillon caractérisé par un SAR 0 et ayant une faible concentration saline ($CE < 4 \text{ dS m}^{-1}$) présente une allure différente de celles du groupe d'échantillons à SAR 3, SAR 4, et SAR 6 qui se comportent de façon comparable. La courbe de distribution de la taille des particules résultantes (*élémentaires ou agrégées*) de l'échantillon à SAR 2 semble être intermédiaire entre les deux types de courbes dans l'intervalle de classes granulométriques inférieures à 60 μm ; elle rejoint celles du groupe d'échantillons à SAR relativement plus élevé à partir de la classe granulométrique supérieu-

Figure 2 - Distribution au granulomètre de la taille des particules résultantes des matériaux utilisés lors de l'immersion brutale
Figure 2 - Particle size distribution after breakdown resulting from fast wetting for the studied materials



re à 60 µm.

Les résultats de ce test montrent une constance de la forme générale des courbes de distribution granulométrique, avec une légère discrimination entre les sols étudiés. Au-delà d'un seuil déterminé, la mise en évidence de l'étendue de la désagrégation n'est pas clairement établie, et les distributions granulométriques évoluent peu.

La désagrégation mécanique

Ce traitement permet de tester le comportement de matériaux humides. La réhumectation préalable a pour objectif de tester la cohésion des matériaux à l'état humide indépendamment de l'éclatement. Cette réhumectation sans éclatement est réalisée par l'utilisation d'un liquide (éthanol) non polaire et non miscible à l'eau (Le Bissonnais, 1996).

Lorsque les agrégats des différents échantillons sont soumis à ce test, la désagrégation est différente et semble être associée au processus de dispersion physico-chimique. Pour la fraction inférieure à 20 µm, la distribution de la taille des particules résultantes (*figure 3*) prend trois allures différentes : les échantillons à SAR 0 et SAR 2 présentent des allures spécifiques et différentes de celles des autres échantillons. Au-delà de la fraction supérieure à 20 µm, la variation de la distribution de la taille des particules demeure importante et évolue selon la variation de la sodicité et de la salinité. Ce test permet d'établir des différences entre les matériaux du point de vue des particules résultantes produites. Il permet aussi de mettre en évidence une meilleure discrimination des sols de la plaine du Chélif,

selon la stabilité structurale de chaque échantillon.

La désagrégation par humectation lente

Tous les échantillons présentent des réponses nuancées à l'exception des échantillons au SAR 0 et au SAR 2 qui ont une stabilité structurale meilleure que les autres échantillons (*figure 4*).

La stabilité structurale moyenne

La *figure 5* présente les courbes de distribution de la taille des particules résultantes moyenne des trois traitements des matériaux de la plaine du Cheliff et celui du matériau argileux pris comme modèle (La Bouzule naturelle). Pour ce qui est de la stabilité de La Bouzule, elle est nettement meilleure que celle des autres matériaux utilisés, du fait de l'absence du mécanisme de dispersion lors de l'immersion des agrégats dans l'eau. Le matériau au SAR 0 est plus stable que celui au SAR 2. Par contre, les autres matériaux possèdent une faible stabilité structurale et leurs distributions sont plus rapprochées les unes des autres dans l'intervalle de la fraction inférieure à 200 µm. Au-delà de cette limite, l'écart entre les courbes traduit une désagrégation qui évolue avec le taux de saturation en sodium et la concentration saline mesurée par la CE. Lorsque le SAR dépasse le seuil de 2, l'écart entre les courbes est faible. Il s'agit donc du processus de dispersion qui permet la production des particules fines élémentaires du simple fait d'une mise en contact avec l'eau des agrégats aussi bien à sec qu'à saturation.

À travers ces résultats nous remarquons que la désagrégation résulterait de l'action de plusieurs mécanismes dépendants. Les fac-

Figure 3 - Distribution au granulomètre de la taille des particules résultantes des matériaux utilisés lors de la désagrégation par énergie mécanique.

Figure 3 - Particle size distribution after breakdown resulting from wet stirring for the studied materials

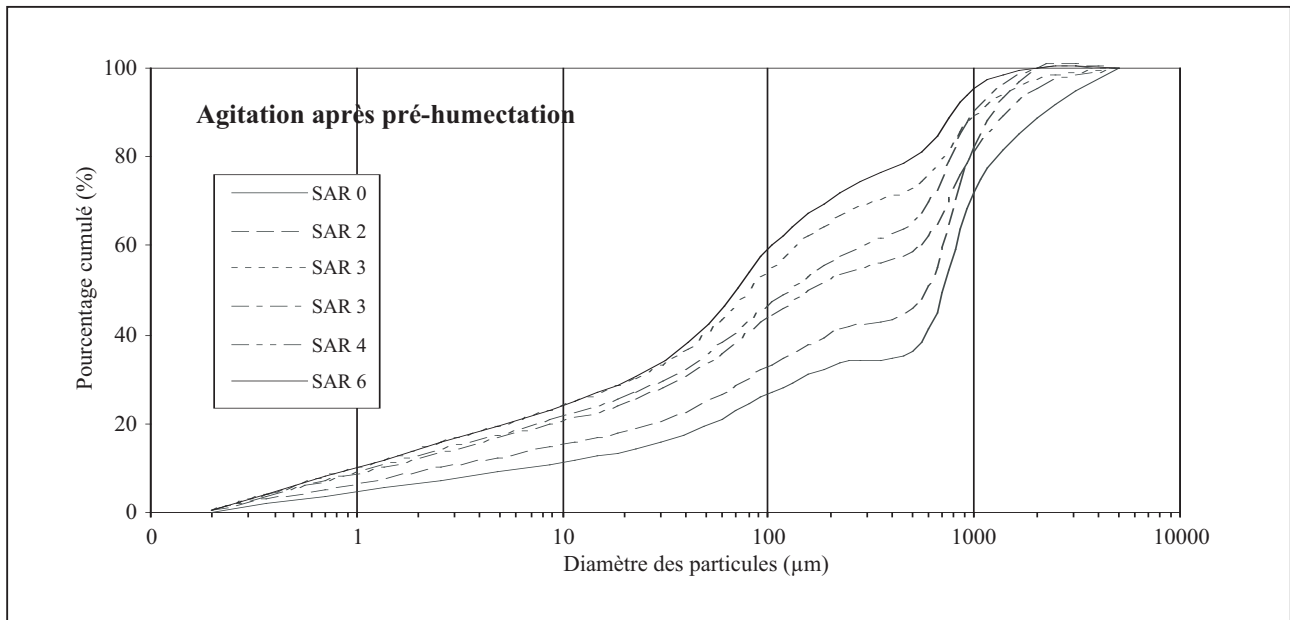


Figure 4 - Distribution au granulomètre de la taille des particules résultantes des matériaux utilisés lors de la réhumectation par capillarité

Figure 4 - Particle size distribution after breakdown resulting from slow wetting for the studied materials

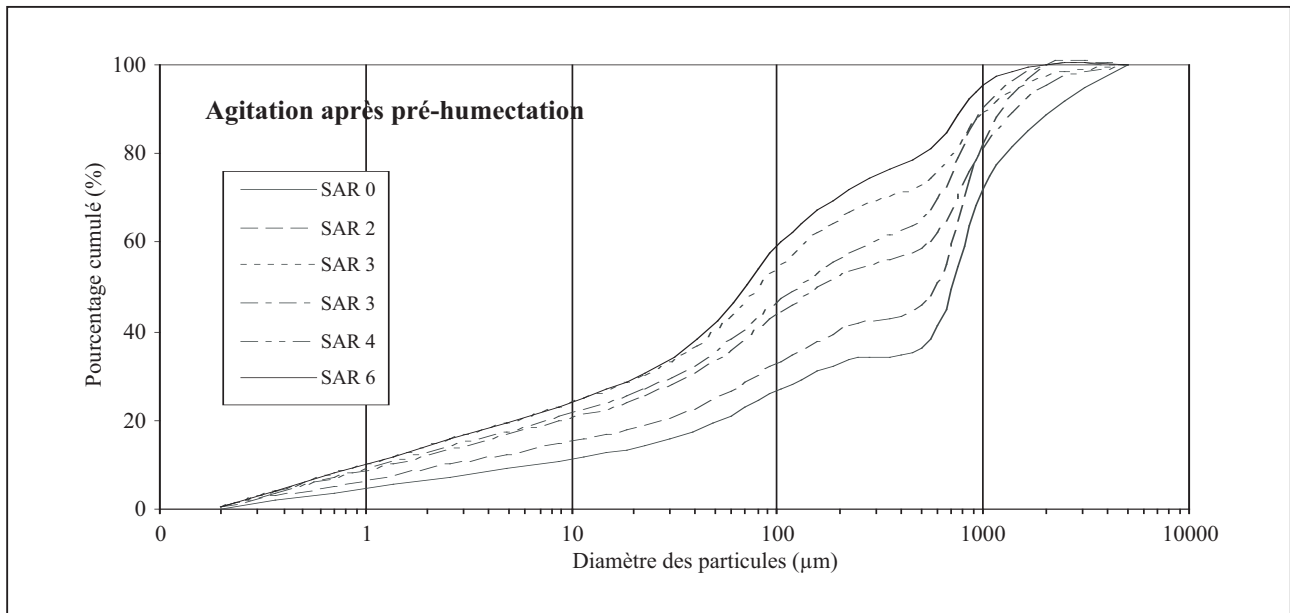
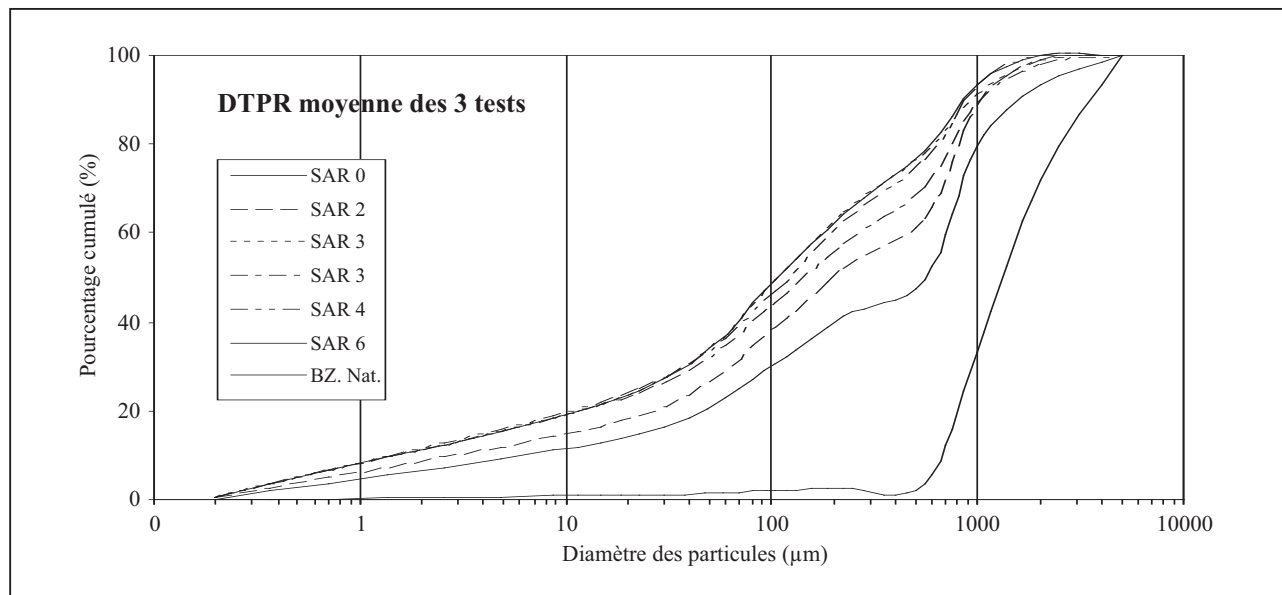


Figure 5 - Distribution de la taille des particules résultantes moyenne des matériaux utilisés**Figure 5** - Mean particle size distribution from the three tests for the studied materials

teurs les plus importants sont l'état hydrique initial et les caractéristiques chimiques (salinité et sodicité) des agrégats. Ces deux facteurs ont servi à déterminer d'une part la probabilité d'intervention de ces mécanismes de désagrégation, et d'autre part, la limite de désagrégation maximale, et donc les risques de dégradation structurale des sols au-delà du seuil déterminé.

Evolution de l'infiltration nette

Les courbes d'évolution de l'infiltration nette (*figure 6*) montrent trois allures. La première correspond à l'allure de la courbe d'infiltration de La Bouzule qui possède un très faible SAR ($< 0,1$) et une stabilité structurale meilleure; la seconde correspond à la courbe d'infiltration du matériau dont le SAR est égal à 0,87 et qui présente une stabilité structurale moyenne; la troisième regroupe les matériaux dont le SAR est supérieur ou égal à 2.

Au début des pluies, nous constatons que l'infiltrabilité diffère selon les échantillons. L'écart demeure significatif entre l'échantillon au SAR 0 et l'échantillon au SAR 2; il est relativement plus faible entre l'échantillon au SAR 2 et le reste du groupe d'échantillons. On observe une chute brutale de l'infiltration pour les sols au SAR > 2 , avec une pluie de 15 mm; par la suite les courbes tendent vers un palier à partir de 20 mm de pluie cumulée.

À partir de 25 mm de pluie cumulée, les niveaux de courbe de l'ensemble des échantillons du Cheliff sont analogues et possèdent une valeur d'infiltration finale très faible (1 mm h^{-1}). À ce stade, il n'apparaît donc pas de relation linéaire entre l'évolution hydrodynamique, les valeurs du SAR et la concentration de la solution dans le cas des sols de la région du Bas Cheliff. Cette valeur de 1 mm h^{-1} coïncide avec la fermeture totale de la macroporosité et l'apparition des

flaques d'eau sur l'état de surface (flaquage) et à la formation d'une croûte sédimentaire. L'échantillon de la Bouzule présente une évolution hydrodynamique de surface relativement plus lente que celles des autres échantillons (*figure 6*).

DISCUSSION

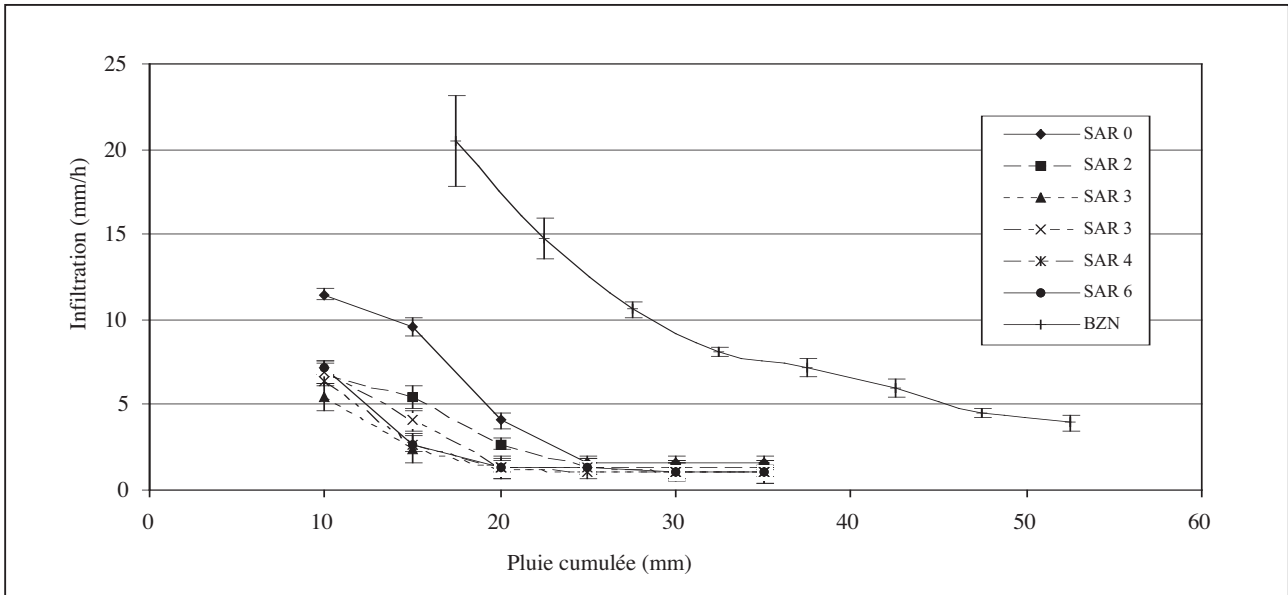
La stabilité structurale et l'infiltration des sols seraient les paramètres les plus discriminants pour évaluer la sensibilité des sols à la dégradation physique. Le *tableau 2* montre l'existence d'une relation linéaire positive ($r = 0,61^*$) entre la conductivité électrique (CE) et l'inverse du diamètre moyen pondéral ($1/MWD$) et d'une relation linéaire négative ($r = -0,62^*$) entre la conductivité électrique et le coefficient d'infiltration final (CIF). La même tendance du point de vue comportement est observée lorsqu'il s'agit de sodicité, mais avec des coefficients légèrement élevés.

La relation linéaire entre la stabilité structurale, l'infiltration et les paramètres de la somme des cations est significativement différente de zéro. Ces relations avec la somme des cations échangeables (SCE) sont significatives, ainsi qu'avec la somme des cations solubles (SCS). En revanche les coefficients de corrélation de ces derniers avec les paramètres de propriétés physiques ne sont pas significatifs.

Il est à noter que les variables de sodicité (ESP et SAR) sont mieux corrélées que les variables de salinité vis-à-vis de la désagrégation sous agitation pendant une durée de 5 minutes ($1/MWD_{bis}$). Cela indique que le déclenchement du mécanisme de dispersion physico-chimique (lors de la désagrégation qui entraîne la production de

Figure 6 - Courbes d'évolutions hydrodynamiques de surfaces des différents matériaux utilisées

Figure 6 - Net infiltration curves for the studied materials



particules fines) est bien lié principalement à la teneur en sodium échangeable, et secondairement à la CE qui traduit généralement la concentration en électrolytes de la solution.

L'infiltration finale est bien corrélée à l'inverse du MWD ($r = -0,77^{**}$). Cette relation est hautement significative dans la mesure où la valeur du coefficient de corrélation est supérieure à la valeur critique ($r = 0,68$ au seuil de signification de 1 %). Cela explique clairement que la mesure de l'infiltration nette peut faire l'objet d'une bonne estimation de la stabilité structurale. La corrélation entre l'infiltration nette finale et l'inverse du diamètre moyen pondéral bis ($1/MWD_{bis}$) est aussi hautement significative ($r = -0,73^{**}$) ; elle montre en effet l'étendue de la stabilité structurale, car dans le cas

où les échantillons subissent l'agitation pendant une durée de 5 minutes, la désagrégation est maximale et ne peut avoir des conséquences sur le stade final de l'infiltration.

Le mécanisme de dispersion à différentes échelles d'investigation est un mécanisme fondamental dans la dégradation de la structure (Le Bissonnais, 1988; Chiang *et al.*, 1987; Daoud, 1993), et dans les sols, la dispersion dépend principalement du Pourcentage du Sodium Echangeable (ESP). Comme nous l'avons souligné, la salinité rencontrée dans les sols du Chelif s'accompagne d'une sodiation du complexe adsorbant. La désagrégation structurale et la dispersion des ces sols peuvent se manifester dès la valeur du SAR 2. Nos résultats sont compatibles avec les données de

Tableau 2 - Matrice de corrélation linéaire entre les paramètres de la phase saline et les propriétés physiques

Table 2 - Matrix of linear correlation between salinity parameters and physical properties

	CE	SCS	SCE	ESP	SAR	1/MWD	1/MWD _{bis}	CIF
CE	1,00							
SCS	0,94	1,00						
SCE	0,98	0,91	1,00					
ESP	0,94	0,85	0,96	1,00				
SAR	0,92	0,81	0,94	0,98	1,00			
1/MWD	0,61	0,52	0,68	0,70	0,67	1,00		
1/MWD _{bis}	0,57	0,45	0,67	0,67	0,66	0,98	1,00	
CIF	-0,62	-0,48	-0,62	-0,67	-0,64	-0,77	-0,73	1,00

Les corrélations significatives au seuil de 0.05 et 0.01 sont respectivement supérieures à 0.5529 et 0.6835, à n=13

Northcote et Skene (1972) sur les sols d'Australie, de McIntyre (1979), et de Shainberg et Letey (1984) qui proposent un seuil de sodium échangeable de 5 %. Ce taux de sodium échangeable sur le complexe adsorbant déclenche le processus de dispersion qui réduit les forces d'attraction entre les particules colloïdales lors de l'humectation des agrégats dans l'eau (Sumner, 1993) et induit par conséquent une désagrégation très intense, responsable de la faible infiltrabilité des sols à cause de la mobilité des particules terreuses (Ben-Hur *et al.*, 1992). Nos résultats rejoignent les travaux de Halitim *et al.*, (1984), de Abu-Sharar *et al.* (1987), de Daoud, (1993) et de Morshedi *et al.* (2000) qui ont montré que la dispersion associée au phénomène d'éclatement réduit la conductivité hydraulique parce que les particules argileuses dispersées sont mobiles et capables d'engendrer la fermeture des pores conducteurs.

CONCLUSION

Il apparaît que le comportement structural et l'évolution hydrodynamique de surface des sols sont à la fois liés aux contraintes physiques, à l'histoire hydrique et aux conditions physico-chimiques des sols. La contrainte physique et les conditions physico-chimiques (SAR, ESP, concentration saline) influencent par des mécanismes différents, la stabilité structurale, la rétention d'eau et l'infiltration. Tous les sols étudiés manifesteraient le même comportement structural à risque lorsque le rapport d'adsorption du sodium (SAR) de la solution du sol dépasse un certain seuil. Ainsi la désagrégation augmente à mesure que la concentration de sodium et la concentration électrolytique augmentent, le taux d'infiltration diminue aussi au fur et à mesure que le SAR augmente et que la concentration saline augmente. Du fait du rôle des mécanismes de désagrégation qui étaient à l'origine de la production des particules fines et par suite de la formation des croûtes de surface, il est raisonnable de dire que la mesure de la stabilité structurale puisse fournir une bonne estimation de la sensibilité au mécanisme de dispersion physico-chimique. Les résultats des tests fournis par le granulomètre à diffraction laser permettent de décrire d'une part, la désagrégation sur une très large gamme granulométrique allant jusqu'à un diamètre de 0,05 μm et d'autre part, d'illustrer sa validité pour la prédiction des comportements des sols sous l'action des pluies et des irrigations.

Nous avons observé pour les sols du Cheliff une tendance à l'augmentation de la désagrégation lors du test de l'immersion brutale et du test de rehumectation par capillarité lorsqu'on dépasse les seuils de 2 et de 4 dSm^{-1} , représentant respectivement le SAR et la conductivité électrique de la solution (CE). Par contre, il existe une différence de susceptibilité à la destruction de la structure entre les sols pris individuellement lorsque les agrégats sont soumis au traitement de désagrégation mécanique par agitation après rehumectation ; ainsi lorsqu'on considère uniquement la fraction supérieure à 20 μm , l'écart entre matériaux augmente avec la salinité globale. La sensibilité des sols au mécanisme de désagrégation par énergie mécanique est différente et évolue avec la salinité et

la sodicité.

La dispersion physico-chimique constitue le principal mécanisme responsable de la désagrégation qui entraîne une diminution de l'infiltration sous les conditions de la salinité globale. Ce phénomène de dispersion jouerait un rôle significatif et déterminant lorsque le SAR dépasse 2. Nos résultats confirment la forte instabilité structurale des sols du Cheliff. Sous l'effet de la salinisation, les sols manifestent une évolution structurale défavorable qui influence le comportement hydrodynamique de surface car la salinité des sols étudiés s'accompagne d'une sodisation du complexe d'échange. La mise en valeur agricole de ces sols posera des problèmes difficiles à maîtriser ; elle nécessite une meilleure connaissance du fonctionnement de ces sols.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Messieurs H. Gaillard et B. Renaux du laboratoire de physique du sol de l'INRA d'Orléans pour leur assistance technique.

BIBLIOGRAPHIE

- Abu-Sharar T. M., Bingham F. t. & Rhoades J. D., 1987 - Reduction in hydraulic conductivity in relation to clay dispersion and disaggregation. *Soil Science Society of America Journal*, 51, pp. 342-346.
- Asseline J. et Valentin C., 1978 - Le simulateur de pluies de l'ORSTOM. *Cahier Hydrologique de l'ORSTOM.*, Paris, 4, pp. 321-347.
- Aubert G., 1975 - Les sols sodiques en Afrique du Nord. *Annale de l'Institut National. Agronomique. Alger, Algérie*, VI, pp. 185 - 195.
- Aubert G., 1983 - Observations sur les caractéristiques, la dénomination et la classification des sols dits (salés) ou salsodiques. *Cahier d'ORSTOM, série. Pédologie*, XX, 1, pp. 73 -78.
- Ben-Hur M., Stern, R. Van Der Merwe A. J. & Shainberg I. , 1992) – Slope and gypsum effects on infiltration and erodibility of dispersive and non dispersive soils. *Soil Science Society of America Journal*, 56, pp. 1571-1576.
- Chiang S. C., Radcliffe D. E., Miller W. P. & Newman, K. D., 1987) – Hydraulic conductivity of three south-eastern soils as affected by sodium, electrolyte concentration, and pH. *Soil Science Society of American Journal*, 51: pp. 1293 - 1299
- Daoud Y., 1993 - Contribution à l'étude des sols des plaines du Cheliff. Thèse de Doctorat d'Etat, INA Alger, 223 p.
- Draz-zouita M., Perfect E., Grove J.H., 2002 - Descriptive methods for assessing soil structure. *Soil and Tillage Research – Volume 64, Issues 1-2*, pp. 3-22
- Halitim A., Robert M., Tessier D. et Prost R., 1984 - Influence de cations échangeables (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) et de la concentration saline sur le comportement physique (rétention en eau et conductivité hydraulique) de la montmorillonite. *Agronomie*, 4, pp. 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 de Doctorat d'Etat, Université de Rennes, 383 p.
- Le Bissonnais Y., 1988 - Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terres sous l'action des pluies. Thèse de Doctorat, Université d'Orléans

- Le Bissonnais Y., 1996 - Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility. I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47, pp. 425 - 437.
- Lebron I., Suarez D.L., Yashida T., 2002 - Gypsum affect on the aggregate size and geometry of three sodic soils under reclamation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66 (1), pp. 92-98.
- McIntyre D., S., 1979 - Exchange sodium, subplasticity and hydraulic conductivity of some Australian soils. *Australian Journal of soil research* 17, pp. 115-120.
- 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.*, 25 (4), pp. 533 – 545.
- Morshedi A., and Sameni A. M. - 2000 - Hydraulic conductivity of calcareous soils as affected by salinity and sodicity. I. Effect of concentration and composition of leaching solution and type and amount of clay minerals of tested soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 31(1&2), pp. 51-67.
- Northcote K. H., and Skene J. K. M., 1972 - Australian soil with saline and sodic properties. *CSIRO Aust. Soil Publ.* 27
- Saidi D., 1992 - Etude expérimentale de la stabilité structurale des sols des plaines du Chélif, Thèse de Magister, INA, Alger, Algérie, 138 p
- Saidi D., Douaoui A., Le Bissonnais Y., Walter C., 1999 - Sensibilité de la surface des sols des plaines du Chélif à la dégradation structurale. *Etude et gestion des sols*, 6, 1, pp. 15 - 25.
- Shaggs M.G., Arya L.M., Shouse P.J., Mohanty B.P., (2001 - Estimating particle size distribution from limited soil texture data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65 (4), pp. 1038-1044.
- Shainberg I., J. D. Rhoades, D. L. Suarez, and R. J., Prather., 1981 - Effect of mineral weathering on clay dispersion and hydraulic conductivity of sodic soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45, pp. 287-291.
- Shainberg I., Letey J., 1984 - Response of soil to sodic and saline conditions. *Hilgardia*, 52, pp. 1-57
- Suarez D.L., 2001 - Sodic soil reclamation : modelling and field study. *Aust. J. Soil Res.* 39, pp. 1225-1246
- Sumner, M. E., 1993) - Sodic soils : *Aust. J. Soil Res.* 31, pp. 683-750
- 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, pp. 67- 82.
- Tessier D., 1984 - Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et saturation au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Thèse Doctorat ès-Sciences, Université de Paris, VII, 361 p.
- U.S.Salinity Laboratory Staff, 1954 - Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, U.S.D.A. Handbook n° 60, 160 p.
- USDA, Soil Survey Staff., 1979 - Soil Taxonomy. USA, Dept. Agr. Govt. Print. Office Washington, USA.
- Whelan B.M., Koffi A.J., McBratney A.B., Drougherty W.J., 1995 - An instrument for *in situ* characterisation of soil structural stability based on the relative intrinsic permeabilities to air and water. *Geoderma*, Volume 65, Issues 3-4, pp. 209-222