

Estimation et signification de la capacité d'échange cationique des sols salés du Cheliff (Algérie)

D. Saidi⁽¹⁾, Y. Le Bissonais⁽²⁾⁽³⁾, O. Duval⁽²⁾, Y. Daoud⁽⁴⁾ et D. Tessier⁽⁵⁾

- 1) Faculté des Sciences Agronomiques et des Sciences Biologiques, BP151, Chlef, Algérie
- 2) INRA d'Orléans, UR 0272 Science du Sol BP 20619, 45160 Olivet cedex, France
- 3) INRA Lisah, 2, Place Viala 34060 Montpellier cedex 02, France
- 4) INA, Département de Science du sol, El-Harrach, Alger, Algérie
- 5) INRA Versailles, unité de science du sol, Route de St-Cyr, 78026 Versailles cedex, France

RÉSUMÉ

Les mesures de la capacité d'échange cationique (CEC) renseignent sur d'importantes propriétés du sol, notamment son aptitude à retenir les cations et à raisonner leur mobilité dans le sol. Nous avons analysé treize échantillons de sols riches en électrolytes de la plaine du Cheliff (Algérie) en mesurant leur CEC et en établissant ses rapports éventuels avec la texture, la teneur en carbone organique et le pH des sols. Dans les sols calcaires, la valeur de la CEC du sol obtenue par la méthode au chlorure de cobaltihexammine est toujours supérieure à celle mesurée à pH = 7,0. Des équations de régression utilisant les teneurs en carbone organique et en argile comme variables indépendantes permettraient de justifier 90 % de la variabilité de la CEC mesurée dans l'acétate d'ammonium tamponnée à pH 7,0 et 89 % pour celle mesurée au pH proche de celui du sol. Ces rapports sont particulièrement utiles du fait qu'ils permettent d'estimer la CEC du sol en fonction des teneurs en carbone organique et en argile. Les essais de corrélation entre les indices de salinité, les paramètres de la phase saline et les propriétés physiques montrent que la méthode de mesure de la CEC au chlorure de cobaltihexammine permet de mieux caractériser les sols du Cheliff que la méthode Metson. Cette valeur de la CEC constitue un critère pour le suivi de la qualité chimique des sols. La mesure de la CEC à pH égal à 7 selon la méthode Metson permet de prévoir la teneur en eau au point de flétrissement permanent. Avec les hauts potentiels de l'eau, c'est la densité apparente qui en est la mieux corrélée.

Enfin, nous notons que la salinité rencontrée dans ces types de sols s'accompagne toujours d'une sodisation du complexe adsorbant, ce qui engendre par conséquent une diminution de la stabilité structurale et de l'infiltration.

Mots clés

CEC₇, CEC_{sol}, indices de salinité, salinité, sodicité, propriétés physiques.

SUMMARY

ESTIMATION AND SIGNIFICATION OF CATION EXCHANGE CAPACITY OF CHELIFF SALINE SOILS (ALGERIA)

Measurements of the cation exchange capacity (CEC), inform us about important soils properties, particularly its ability to retain the cations and to motive their movement in the soil. Thirteen samples of saline soil, taken from the area of Cheliff, were analyzed, in order to measure their CEC and to establish the eventual relationship among the texture, the content of organic carbon and the pH of soils. In calcareous soils, the value of soil CEC with the cobalt hexamine trichloride is always higher than the one measured with pH = 7.0. Regression equations, using the content of organic carbon and clay as independent variables, permit to justify 90 % of CEC variability measured at pH = 7.0 and 89 % for the one measured at pH value close to the soil pH. These ratios are particularly useful since they permit to estimate the CEC of soil according to the content of organic carbon and clay. The correlation tests among salinity indices, salinity phase parameters and physics properties, show that soils, in the Cheliff area, are better characterized with the CEC method using the cobalt hexamine trichloride than Metson method. These values of CEC constitute criteria for the follow up of the chemical quality of soils. The measure of CEC at pH = 7.0, with the Metson method, allows to calculate the content of water at permanent fading point of plants. For the high potentials of water, the bulk density is best correlated.

Finally, we note that the salinity of these soils is always accompanied with sodisation of an absorbing complex, which generates, therefore, a decrease in structural stability and infiltration.

Key-words

CEC₇, CEC_{soil}, salinity index, salinity, sodicity, physical properties.

RESUMEN

ESTIMACIÓN Y SIGNIFICACIÓN DE LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO DE LOS SUELOS SALADOS DEL CHELIFF (ARGELIA)

Las medidas de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) informan sobre importantes propiedades del suelo, en particular su aptitud para retener los cationes y razonar su movilidad en el suelo. Analizamos trece muestras de suelos ricos en electrolitos en la planicie del Cheliff (Argelia) midiendo su CIC y estableciendo sus relaciones eventuales con la textura, el contenido en carbono y el pH de los suelos. En los suelos calcáreos, el valor de la CIC del suelo obtenido por el método al cloruro de hexamina-cobalto es siempre superior a la medida a pH = 7,0. Ecuaciones de regresión que usan contenidos en carbono orgánico y en arcilla como variables independientes permitirían justificar 90 % de la variabilidad de la CIC medida en acetato de amonio amortiguado a pH 7,0 y 89 % para las medidas al pH cerca de lo del suelo. Estas relaciones están particularmente muy útiles por el hecho que permitan estimar la CIC del suelo en función de los contenidos en carbono orgánico y en arcilla. Los ensayos de correlación entre los índices de salinidad, los parámetros de la fase salina y las propiedades físicas muestran que el método de medida de la CIC al cloruro de hexamina-cobalto permite de caracterizar mejor los suelos del Cheliff que el método Metson. Este valor de la CIC constituye un criterio para el seguimiento de la calidad química de los suelos. La medida de la CIC a pH = 7 según el método Metson permite de prever el contenido en agua al punto de marchitez permanente. Con los altos potenciales del agua, la densidad aparente esta mejor correlacionada.

En fin, observamos que la salinidad en estos suelos se acompaña siempre de una sodización del complejo adsorbante, lo que genera en consecuencia una disminución de la estabilidad estructural y de la infiltración.

Palabras clave

CIC₇, CIC_{suelos}, índices de salinidad, sodicidad, propiedades físicas.

Il est actuellement admis que la réaction des sols aux conditions salines dépend de la teneur et de la nature de la fraction argileuse du sol, de la concentration saline de la solution du sol et de la nature de la garniture cationique et anionique du complexe adsorbant (Mc Neal et Coleman, 1966; El Swaify, 1973; Cass et Sumner, 1982; Halitim *et al.*, 1984; Daoud et Robert, 1992; Tessier *et al.*, 1999; Saïdi, 2005). Dans les sols, c'est la fraction argileuse fine qui assure, pour l'essentiel, la régulation des phénomènes physico-chimiques. Celle-ci joue notamment un rôle dans la rétention de l'eau, la structuration des sols, mais aussi dans la rétention et la biodisponibilité des éléments chimiques indispensables aux plantes. Les propriétés de surface des constituants des sols peuvent être caractérisées de manière globale à l'aide de deux grands types de données, à savoir la capacité d'échange en cations (CEC) et la surface spécifique du sol (SS). On détermine généralement la surface totale développée par les constituants par l'adsorption de molécules organiques fortement polaires comme l'éthylène glycol monoéthylether (EGME) (Heilmann *et al.*, 1965; Cihacek et Bremner, 1979). La capacité d'échange en cations mesure la charge électrique de surface des constituants du sol (Ciesielski et Sterckemann, 1997; Charlet, *et al.*, 1999). La CEC et la surface spécifique sont souvent utilisées comme des outils de prédiction et d'évaluation des propriétés des constituants des sols. Il a ainsi été montré que la rétention de l'eau dans les argiles est étroitement liée à la capacité d'échange et à la surface spécifique (Tessier *et al.*, 1999). Bruand et Zimmer (1992) ont aussi constaté que la capacité d'échange en cations était un bon estimateur des propriétés de rétention de l'eau dans les horizons argileux de faible teneur en matière organique.

La mesure de la CEC des sols doit se faire au pH de la solution du sol pour éviter la modification des charges variables (Charlet *et al.*, 1999). Dans les méthodes habituelles, la CEC est mesurée soit à pH 7 (méthode Metson) pour les sols faiblement acides à neutres, soit à pH 8,2 (méthode Bower) pour les sols alcalins. Par ailleurs, en présence de sels diversement solubles, ces méthodes ne semblent pas précises dans la mesure où il est difficile de rendre le complexe adsorbant monoionique (Orsini et Rémy, 1976; Ciesielski *et al.*, 1997).

Ce travail a pour but de mesurer la CEC des sols calcaires, sal-sodiques et de texture argilo-limoneuse de la région du Bas Cheliff d'Algérie par une méthode simple et fiable afin de mieux caractériser la salinité totale. Les résultats obtenus seront rapprochés de certaines propriétés des sols pour discuter de leur validité.

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 structure non dégradée, salins et à efflorescences salines (CPCS, 1967) ou Fluviosols et Salisols selon le Référentiel Pédologique (AFES, 1995). Les sols sont développés sur des alluvions du Quaternaire riches en argiles et en calcaire (Boulaïne, 1956, 1957; Saïdi, 1985). La fraction inférieure à $2\ \mu\text{m}$ est essentiellement constituée d'illites avec une prédominance des interstratifiés gonflants et irréguliers de type smectite / illite (Daoud, 1993; Saïdi, 2005).

Pour étudier le comportement physique (rétention en eau, stabilité structurale, infiltration sous pluie simulée) des sols de la région, 13 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 $25\ ^\circ\text{C}$ et de la sodicité (exprimée par le pourcentage de sodium fixé sur le complexe adsorbant (ESP) et le rapport d'adsorption du sodium de la solution du sol (SAR)).

Compte tenu de l'influence des carbonates des différentes fractions granulométriques sur les propriétés physiques des sols (Halitim, 1985; Daoud, 1993; Saïdi *et al.*, 2004), 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 surfaces spécifiques ont été mesurées par adsorption de l'Éthylène Glycol Mono Ethyle Ether (EGME), suivant le protocole développé par Heilmann *et al.* (1965). La capacité d'échange cationique et l'extraction des cations échangeables ont été déterminées à la fois au pH du sol par échange avec une solution de chlorure de cobalthexammine $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_3$ (Ciesielski et Sterckeman, 1997) et à pH égal à 7 par échange avec une solution d'acétate d'ammonium (méthode Metson). Ils ont été réalisés dans le laboratoire d'analyse des sols de l'INRA d'Arras (France). On notera que ces méthodes sont normalisées (AFNOR, 1996). L'extraction diluée a été réalisée au rapport sol/eau de 1/25.

La rétention en eau

Les déterminations ont porté sur des mottes de dimensions centimétriques ($5\ \text{à}\ 10\ \text{cm}^3$) 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 $pF=2.5$), -1000 hPa ($W_{3,0}$ à $pF=3.0$), -3300 hPa ($W_{3,5}$ à $pF=3.5$), -10000 hPa ($W_{4,0}$ à $pF=4.0$), -15000 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 h.

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 est un indice représentant le taux de désagrégation des particules. 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 oeuvre 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 Le Bissonnais *et al.*, (1989-1990), Fiès et Panini (1995) et Saidi *et al.*, (2004). 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. (En considérant que la densité moyenne de la fraction solide du sol est de 2,65 g.cm⁻³, le volume des pores du lot d'agrégats dans le cylindre serait de 45 cm³). 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 standards du fonctionnement du simulateur pour chaque épisode pluvieux sont étalonnées et vérifiées. Trois répétitions ont été utilisées pour chaque échantillon traité.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Caractérisation statistique de la population étudiée

Les statistiques générales des caractéristiques physico-chimiques des treize sols étudiés sont données dans le *tableau 1*. Elles indiquent des sols à pH basique, calcaires, avec des teneurs en matière organique comprises entre 0,5 et 3,3 % et une texture

Tableau 1 - Statistiques générales de différentes caractéristiques physico-chimiques des échantillons étudiés.

Table 1 - Relationship between the cation exchange capacity measured with the cobalt hexamine trichloride method and with the Metson method.

Caractéristiques	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
pH (1/2,5)	8	8,33	8,17	0,009
SAR ^a	0,8	6,27	2,09	1,64
CE ^b (dS.m ⁻¹)	1,93	41,33	12,48	12,73
CaCO ₃ (%)	17,53	22,1	19,77	1,42
MO ^c (%)	0,53	3,38	2,37	0,68
Argile (%)	40,8	55,37	46,14	4,35
Limon (%)	35,49	52,15	42,21	4,02
Sable (%)	4,01	18,6	11,65	5,08
ESP ^d (%)	3,24	52,16	14,03	14,36
Densité apparente (g.cm ³)	1,32	1,79	1,66	0,12
CIF ^e (%)	3,51	7,02	4,39	1,01
MWD ^f (mm)	0,26	0,72	0,41	0,15
CEC ^g (*) (Cmol _c .kg ⁻¹)	17,1	24,6	19,58	1,89
CEC ^g (**) (Cmol _c .kg ⁻¹)	12,5	19,7	15,13	1,93
SS ^h (m ² .g ⁻¹)	310,08	359,79	327,8	15,46
Cations totaux (*) (Cmol _c .kg ⁻¹)	19,1	107,69	38,7	28,61
Cations totaux (**) (Cmol _c .kg ⁻¹)	53,6	227,85	85,29	55,86

a : Rapport d'adsorption de sodium
 $SAR = Na^+ / ((Ca^{2+} + Mg^{2+})/2)$, [] : meq.l⁻¹,
 b : Conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée (CE),
 c : Matière organique (MO),
 d : Pourcentage du sodium échangeable
 $ESP = Na^+ \times 100 / CEC$, [Na⁺] : sodium adsorbé en Cmol_c.100g⁻¹,
 CEC : capacité d'échange cationique en Cmol_c.100g⁻¹,
 e : Coefficient d'infiltration final,
 f : Diamètre moyen pondéral (Mean Weight Diameter)
 g : Capacité d'échange cationique
 h : Surface Spécifique (SS)
 (*) Méthode au chlorure de cobalthexammine,
 (**) Méthode Metson,

argilo-limoneuse. Ces sols ont une évolution dominée par la présence de fortes quantités de sels plus solubles que le gypse et par la richesse de leur complexe adsorbant en ions sodiques provenant de ces sels. En effet, ces échantillons se distinguent par des moyennes élevées pour la conductivité électrique (12,48 dS.m⁻¹) et par la quantité de cations extraite traduisant une forte variabilité des résultats dans cette région. Le taux de sodium échangeable moyen est élevé (ESP, soit Exchangeable Sodium Percent) (14,03 %). Dans ces sols calcaires, la valeur de la CEC au chlorure de cobalthexammine est toujours supérieure à celle mesurée à pH = 7,0.

Signification des mesures de la CEC

Les résultats du *tableau 1* montrent qu'en moyenne les valeurs de la CEC varient de 17 à 25 Cmol_c.kg⁻¹ lorsqu'elle est mesurée au pH du sol, et elles varient de 12 à 20 Cmol_c.kg⁻¹ lorsqu'elle est mesurée au pH égal à 7. La différence entre la méthode au chlorure de cobalthexammine de Orsini et Rémy (1976) et la méthode Metson (1956) tient compte du pH atteint lors de la saturation initiale des échantillons (Charlet *et al.*, 1999). Dans la première méthode il

s'agit bien du pH qui se rapproche de celui du sol et dans la seconde d'un pH égal à 7.

La comparaison des résultats des CEC par les deux méthodes (*figure 1*), révèle que les valeurs des CEC sont linéairement dépendantes selon l'équation $Y=1,12X + 2,17$. Le coefficient directeur de la droite étant supérieur à 1, cela traduit clairement des valeurs de CEC plus élevées par la méthode au chlorure de cobalthexammine. Cependant, les résultats du *tableau 1* montrent que les valeurs des cations échangeables extraits par la méthode au chlorure de cobalthexammine sont plus faibles que ceux extraits par la méthode Metson. Cette différence réside dans le fait que lors de la mesure de la CEC à pH 7, une partie des carbonates est dissoute (Julien et Turpin, 1999). Il en résulte que les cations extraits proviennent en partie notamment de la solubilisation du carbonate de calcium. En revanche, La CEC à la cobalthexammine, mesurée sans solution tampon, c'est-à-dire au pH du sol, permet d'extraire les cations échangeables et ceux présents dans la solution du sol sans un effet de dissolution des carbonates (Ciesielski et Sterckeman, 1997).

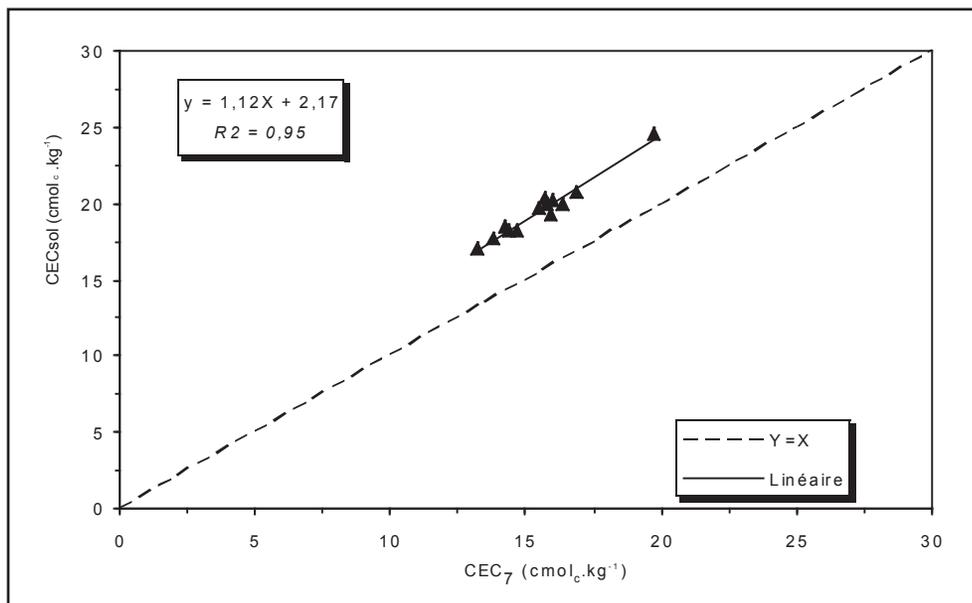


Figure 1 - Relation entre la capacité d'échange cationique mesurée par la méthode à la cobaltihexammine et celle mesurée par la méthode Metson à pH 7.

Figure 1 - Relationship between the cation exchange capacity measured with the cobalt hexamine trichloride method and with the Metson method.

Nous savons par ailleurs que les valeurs de la CEC du sol dépendent à la fois de la nature minéralogique des argiles et des charges électriques superficielles développées par les matières organiques. La régression linéaire multiple de type :

$$Y = \text{CEC}_{\text{sol}} = a x_1 + b x_2 + c x_3 \text{ (tableau 2)}$$

montre bien que les CEC des argiles et des matières organiques sont considérées comme additives comme l'ont déjà montré Helling *et al.* (1964); Yuan *et al.* (1967); Parfitt *et al.* (1995); Curtin et Rostad (1997) et Bigorre *et al.* (2000).

Une CEC moyenne de 41,26 $\text{Cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ est obtenue pour les argiles du Chelif. Cette valeur explique 65 % de la variabilité de la CEC du sol mesurée par la méthode au chlorure de cobaltihexammine. Par contre, lorsqu'on utilise la méthode à l'acétate d'ammonium (Metson), la valeur de la CEC moyenne de l'argile est de 39,94 $\text{Cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ et explique uniquement 60 % de la variance de la CEC.

La matière organique intervient donc plus dans la variation de CEC que l'argile. Nous obtenons aussi une différence entre les valeurs de CEC des matières organiques (tableau 2). Les valeurs de carbone organique sont évaluées à 295,46 $\text{Cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ pour la méthode Metson et à 281,24 $\text{Cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ pour celle au chlorure de cobaltihexammine. Cependant comme la teneur en matière organique est faible, son poids n'est pas aussi important que celui des argiles. Elle explique en effet, 0,4 % et 15 % de la CEC par la méthode au chlorure de cobaltihexammine et par la méthode à l'acétate d'ammonium respectivement.

Il apparaît que la valeur de la CEC résulte des propriétés cumulées des argiles et des matières organiques, mais le fait qu'il existe un écart entre les méthodes de mesure suivant leur mise en œuvre (pH du sol, CEC_{sol} et pH = 7,0 CEC_7), permet de

caractériser grossièrement l'état des surfaces réactives et leur contribution au pH de l'échantillon. Dans ce sens, nous avons introduit un paramètre (ΔpH) dans la régression linéaire multiple. Pour la méthode Metson, le ΔpH correspond à l'écart entre le pH du sol et le pH de la solution d'extraction. En ce qui concerne la méthode cobaltihexammine, le ΔpH utilisé correspond à l'écart entre le pH réel et le pH minimum rencontré dans les sols étudiés. Les équations de régression utilisent en effet un facteur de différenciation du pH (ΔpH) comme variable indépendante pour justifier 23 % et 15 % de la variabilité de la CEC_{sol} et CEC_7 respectivement. Cette variation de la CEC due au (ΔpH) est attribuée à l'action de protonation / déprotonation.

En résumé, lorsqu'on évalue la CEC par les deux méthodes, on s'aperçoit que les variables indépendantes expliquent 89 et 90 % de la variabilité de la CEC. Celle effectuée au pH proche du sol est certainement peu influencée par la matière organique puisque sa contribution est, dans ce type de sol, souvent non significative. Quant à la CEC mesurée au pH 7 (méthode Metson), le poids de 15 % s'explique par la protonation des groupements phénoliques des constituants organiques à pH = 7,0. Selon les équations de régression, ces différents rapports sont utiles car elles permettent d'estimer la CEC du sol à partir de la texture, de la matière organique et du pH. Ces valeurs concordent dans une large mesure avec les données de Curtin et Rostad (1997); Tessier *et al.* (1999) et Bigorre (2000).

Détermination des indices de salinité

A travers les différents résultats obtenus de la CEC et des cations échangeables, qui sont extraits à l'aide de l'acétate d'ammonium et du chlorure de cobaltihexammine, nous pouvons définir deux indices

Tableau 2 - Les équations de régression linéaire entre la CEC et les caractéristiques physico - chimiques.**Table 2** - Linear regression equations between the CEC and the physico-chemical characteristics.

Δ pH	Droites de régression	r^2	Erreur type d'estimation	Erreur standard sur r^2
Δ pH = (pH _{sol} - 8)	CEC cobalthexammine	0,89	0,96	0,143
	$CEC_{sol} = 41,26 \cdot 10^{-2} A + 281,24 \cdot 10^{-2} C - 1942,23 \cdot 10^{-2} \Delta$ pH			
	Avec $r^2 = 0,89$ (dont $A = 0,65$; $C = 0,004$ et Δ pH = 0,23)			
Δ pH = (pH _{sol} - 7)	CEC Metson	0,90	0,93	0,139
	$CEC_7 = 39,94 \cdot 10^{-2} A + 295,46 \cdot 10^{-2} C - 628,88 \cdot 10^{-2} \Delta$ pH			
	Avec $r^2 = 0,90$ (dont $A = 0,60$; $C = 0,15$ et Δ pH = 0,15)			

(A : argile ; C : carbone organique)

de salinité. Ces deux indices seront appliqués aux deux méthodes de mesure de la CEC et des cations échangeables.

$$\text{Indice de salinité 1 } IS_1 = \Sigma \text{ cations} / CEC \quad (1)$$

$$\text{Indice de salinité 2 (Cmol}_C \text{ kg}^{-1}) IS_2 = \Sigma \text{ cations} - CEC \quad (2)$$

IS_1 et IS_2 sont destinés à la méthode à la cobalthexammine, alors que pour la méthode Metson on utilise IS_3 et IS_4 . La conductivité électrique de la pâte saturée, le sodium adsorption ratio, le pourcentage du sodium échangeable mesuré et estimé à partir de l'équation universelle (USSS, Staff, 1954) ont été modélisés par les relations linéaires 3, 4, 5 et 6 suivantes :

$$Y = a IS_1 + b \quad (3)$$

$$Y = a IS_2 + b \quad (4)$$

$$Y = a IS_3 + b \quad (5)$$

$$Y = a IS_4 + b \quad (6)$$

Les relations linéaires établies entre les indices de salinité et les paramètres de la phase saline (salinité, sodicité) montrent des différences significatives selon la méthode de mesure de la CEC. Les équations de régression du *tableau 3* montrent que IS_1 , IS_2 et IS_3 expliquent 87 % de la variance de la conductivité électrique, tandis que IS_4 en explique par contre 80 % uniquement).

Nous remarquons par ailleurs, que lorsque la somme des cations échangeables extraits à la cobalthexammine est égale à la capacité d'échange cationique, les indices IS_1 et IS_2 prennent respectivement les valeurs de 1 et 0 $Cmol_C \cdot kg^{-1}$, alors que la salinité qui s'exprime par la conductivité électrique est supérieure à 4 dS/m. Les cations présents en excès par rapport à la CEC correspondent aux cations solubles et échangeables extraits à la cobalthexammine. Ceci confirme bien la présence de sels, y compris les sels de calcium et de magnésium.

Dans notre contexte, la somme des cations échangeables n'est jamais égale à la capacité d'échange cationique lors de l'extraction

par l'acétate d'ammonium. Les résultats du *tableau 1* montrent que la valeur moyenne de la somme des cations échangeables ($85,29 \text{ Cmol}_C \cdot kg^{-1}$) représente environ six fois la valeur moyenne de la CEC_7 ($15,13 \text{ Cmol}_C \cdot kg^{-1}$), soit un rapport de 6/1 pour l'indice IS_3 ($IS_3 = \Sigma \text{ cation} / CEC_7$) et une différence de $70 \text{ Cmol}_C \cdot kg^{-1}$ pour l'indice IS_4 ($IS_4 = \Sigma \text{ cations} - CEC_7$). Ces valeurs permettent de résoudre d'une part les équations de régression entre ces indices de salinité et les paramètres de la salinité globale et d'autre part de classer les échantillons dans la catégorie des sols très salés et attribuent à la conductivité électrique une valeur supérieure à 12,00 dS/m. Cela montre clairement que la quantité de cations extraite au pH proche du sol est plus faible que celle extraite au pH égal à 7. Pour cette dernière méthode (Metson), la conductivité électrique exprime à la fois la charge électrolytique de la solution et celle qui provient du phénomène de dissolution des carbonates à pH=7 par l'ion acétate. Alors, nous pouvons considérer aussi que la méthode de mesure de la CEC et les cations échangeables au chlorure de cobalthexammine est un indicateur qui nous renseigne sur l'état de la salinité des sols (*tableau 3*).

La qualité de la relation obtenue entre les indices de salinité est aussi dépendante du SAR de la solution du sol. Ces indices expliquent 60 à 85 % de la variance de la sodicité des sols du Cheliff. Le *tableau 3* montre que les valeurs du coefficient de détermination du SAR, de l'ESP et de l'ESPeq estimé par l'équation universelle (équation 10) sont plus élevées lorsque les variables explicatives utilisent les données de la méthode au chlorure de cobalthexammine. Pour la méthode Metson, la qualité de la relation entre les indices de salinité et les paramètres de sodicité n'est pas significative. Elle se justifie par l'erreur type et l'erreur standard sur r^2 qui sont sensiblement plus élevés par rapport aux autres.

Les coefficients de corrélation estimés entre les indices de salinité et la phase saline (*tableau 4*) indiquent des relations très

Tableau 3 - Les équations de régression entre les paramètres de salinité - sodicité et les indices de salinité. Les données en caractères gras correspondent aux régressions obtenues sur les mesures de la CEC à la méthode au chlorure de cobaltihexammine).

Table 3 - Regression equations between the salinity-sodicity parameters and the salinity indexes. The data in bold characters correspond to the regressions obtained for the CEC measurements with the cobalt hexamine trichloride method.

Paramètres	Droites de régression	R	Erreur type d'estimation	Erreur standard sur R
CE	CE=15,26 IS1 - 10,23 (3)	0,87	4,79	0,012
	CE=0,80 IS2 + 4,90 (4)	0,87	4,84	0,012
	CE=3,31 IS3 - 6,31 (5)	0,87	4,85	0,012
	CE=0,20 IS4 - 1,85 (6)	0,80	5,94	0,018
SAR	SAR=1,94 IS1 - 0,79 (3)	0,85	0,67	0,014
	SAR =0,10 IS2 + 1,23 (4)	0,84	0,68	0,014
	SA R=0,36 IS3 + 0,07 (5)	0,61	1,07	0,036
	SA R=0,02 IS4 + 0,67 (6)	0,47	1,24	0,048
ESP eq	ESP=2,61 IS1 - 0,94 (3)	0,85	0,91	0,014
	ESP=0,14 IS2 + 1,65 (4)	0,84	0,91	0,014
	ESP=0,48 IS3 + 0,21 (5)	0,61	1,44	0,036
	ESP=0,03 IS4 + 1,03 (6)	0,48	1,67	0,048
ESP	ESP=15,69 IS1 - 9,32 (3)	0,72	7,91	0,025
	ESP=0,82 IS2 + 6,27 (4)	0,72	8,01	0,026
	ESP=2,66 IS3 - 1,04 (5)	0,44	11,25	0,051
	ESP=0,14 IS4 + 4,66 (6)	0,30	12,51	0,063

$$ESP_{eq} = 1.475 \cdot SAR / (1 + 0.0147 \cdot SAR) \text{ (USSL Staff, 1954).}$$

fortes entre l'ensemble des paramètres mesurés. La matrice de corrélation montre que les liaisons sont significatives au seuil de 5 % pour l'ensemble des paramètres. On constate que le pourcentage du sodium échangeable présente de nombreuses corrélations significatives au seuil de 5 % allant de 0,55 avec IS_4 et 0,66 pour IS_3 . Il présente aussi des corrélations significatives au seuil de 1 % avec 0,85 pour IS_1 et IS_2 . Ce résultat, confirme l'idée selon laquelle la méthode de mesure de la CEC au chlorure de cobaltihexammine est plus appropriée que celle de l'acétate d'ammonium pour le calcul de l'ESP dans les sols salés du Cheliff.

Par ailleurs, le pouvoir de sodisation (SAR) ainsi que l'ESPeq sont intimement liés entre eux. Ils indiquent une forte liaison avec ces indices de salinité par des coefficients de corrélation qui varient de 0,69 à 0,92 pour IS_4 , IS_3 , IS_2 et IS_1 respectivement. La salinité des sols du Cheliff se manifeste bien entendu par une relation significative avec la sodicité. Dans ce cas de la salinité de l'extrait de pâte saturée, ce qui est extrait correspond à une bonne partie des sels solubles.

La figure 2 montre la relation entre l'indice de salinité 2 qui représente la quantité de cations en solution et les cations solubles totaux de l'extrait de pâte saturée. L'équation de la droite de régression montre que la valeur de la pente est inférieure à 1, ce qui explique que la somme des cations solubles totaux extraite de la pâte saturée soit légèrement supérieure à celle de ceux extraits à la cobaltihexammine.

Nous pouvons en conclure dès lors que le rapport de dilution (1/10) utilisé dans l'eau lors de l'extraction à la cobaltihexammine n'était pas suffisant pour extraire tous les cations présents dans les sols salés du Cheliff.

Il s'avère que pour caractériser les sols salés du Cheliff, la CEC et les cations échangeables extraits au pH du sol doivent être utilisés comme un critère d'évaluation bien approprié par rapport à ceux extraits à pH 7 standard.

C'est à travers les cations totaux et la CEC que nous pouvons regrouper les sols de la région du Cheliff. Il est aussi nécessaire de définir les paramètres de la phase saline par les équations suivantes :

Tableau 4 - Matrice de corrélation entre les indices de salinité et les paramètres de salinité et de sodicité (Les corrélations significatives au seuil de 0,05 sont soulignées).

Table 4 - Matrix of correlations between the salinity indexes and the parameters of salinity and sodicity. (the significant correlations at P=0.05 are underlined).

	IS ₁	IS ₂	IS ₃	IS ₄	CE	SCE	ESP	ESP _{eq}	SCS	SAR
IS ₁	1,00									
IS ₂	<u>0,99</u>	1,00								
IS ₃	<u>0,87</u>	<u>0,86</u>	1,00							
IS ₄	<u>0,80</u>	<u>0,79</u>	<u>0,99</u>	1,00						
CE	<u>0,93</u>	<u>0,93</u>	<u>0,93</u>	<u>0,89</u>	1,00					
SCE	<u>0,99</u>	<u>0,99</u>	<u>0,84</u>	<u>0,78</u>	<u>0,94</u>	1,00				
ESP	<u>0,85</u>	<u>0,85</u>	<u>0,66</u>	<u>0,55</u>	<u>0,83</u>	<u>0,84</u>	1,00			
ESP _{eq}	<u>0,92</u>	<u>0,92</u>	<u>0,78</u>	<u>0,69</u>	<u>0,92</u>	<u>0,91</u>	<u>0,97</u>	1,00		
SCS	<u>0,87</u>	<u>0,87</u>	<u>0,99</u>	<u>0,97</u>	<u>0,94</u>	<u>0,85</u>	<u>0,70</u>	<u>0,80</u>	1,00	
SAR	<u>0,92</u>	<u>0,92</u>	<u>0,78</u>	<u>0,69</u>	<u>0,92</u>	<u>0,91</u>	<u>0,97</u>	<u>1,00</u>	<u>0,81</u>	1,00

$ESP_{eq} = 1.475 \cdot SAR / (1 + 0.0147 \cdot SAR)$ (USSL Staff, 1954).

(r théorique = 0,5529 et 0,6835 pour p = 0,950 et 0,990 et n = 13)

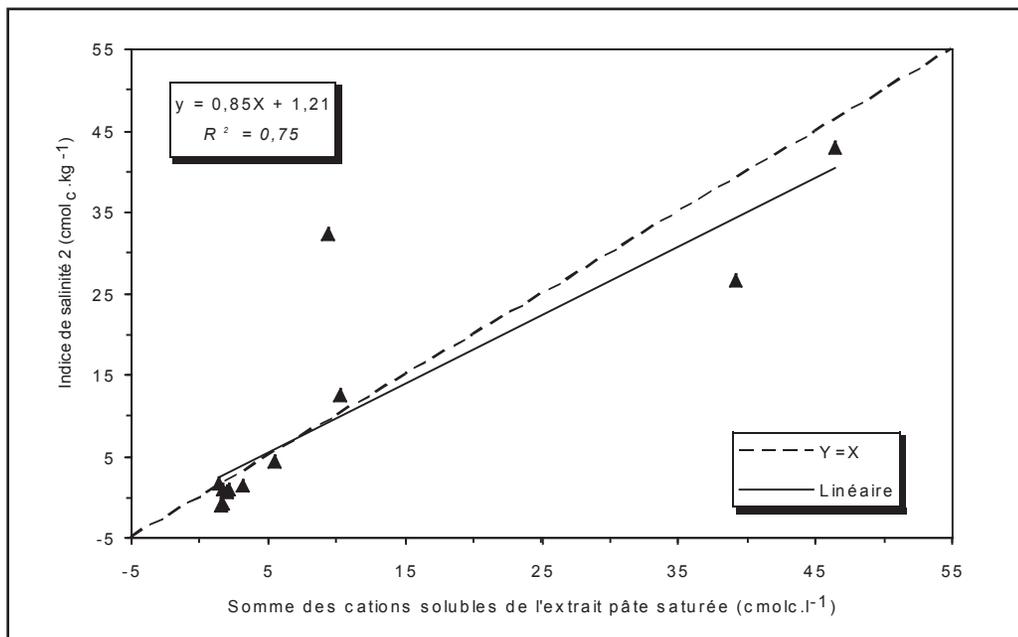


Figure 2 - Relation entre l'indice de salinité 2 estimé par la méthode au chlorure de cobalthexammine et les cations solubles totaux de l'extrait de pâte saturée.

Figure 2 - Relationship between the salinity index 2 estimated by the cobalt hexamine trichloride method and the total soluble cations from the saturated paste extract.

$$ESP = (100 * Na^+ \text{ Echangeable}) / CEC_{\text{sol}} \quad (7)$$

$$ESP = (100 * Na^+ \text{ Echangeable}) / \sum (Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+) \quad (8)$$

$$SAR = [Na^+] / ([Ca^{2+} + Mg^{2+}] / 2)^{1/2} \quad (9)$$

$$ESP_{\text{eq}} = 1,475 * SAR / (1 + 0,0147 * SAR) \text{ USSS Staff (1954)} \quad (10)$$

Les sols non salés regroupent les sols dont la conductivité électrique est inférieure à 4 dS.m⁻¹ et la quantité des cations totaux est presque identique à la CEC, donc sans cations en excès dans la solution du sol. Ce sont des sols saturés en cations. L'ESP sera donc évalué sur la base de la CEC_{sol} (équation 7).

Les sols salés regroupent les sols dont la conductivité électrique est supérieure à 4 dS/m et la quantité des cations totaux est supérieure à la CEC. Dans ce cas, les cations échangeables sont obtenus par la différence entre les cations totaux et les cations solubles de la pâte saturée. L'ESP sera donc évalué par rapport au cation de référence (Na) sur la base de la somme des cations échangeables (équation 8).

Les sols salés ont une évolution dominée par la présence de fortes quantités de sels plus solubles que le gypse. En général, on mesure la salinité par la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée (CE). La richesse du complexe adsorbant des sols en ions sodiques 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) (équation 9) lorsqu'ils dépassent respectivement les valeurs de 15 et 10 %. Ils sont couramment utilisés pour prévoir l'évolution de la composition du complexe d'échange et pour définir le terme de sodicité.

Nous constatons selon la matrice de corrélation (tableau 4), que le SAR et l'ESP augmentent en fonction de la conductivité électrique avec un coefficient de corrélation supérieur à 0,90. Ceci indique que la salinité des sols s'accompagne toujours d'une sodisation du complexe adsorbant (Saidi *et al.*, 2004). Notons aussi que les deux indices de salinité (IS₁ et IS₂) permettent de mieux caractériser la phase saline (sodicité et salinité) et pourraient estimer le niveau de salinisation et de sodisation.

INFLUENCES DES INDICES DE SALINITÉ SUR LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

La rétention en eau

Aux bas potentiels de l'eau (pF=4.2), la rétention de l'eau apparaît très fortement corrélée au seuil de 1 % à la capacité d'échange lorsque celle-ci est mesurée à pH7 (CEC₇) et à la surface spécifique. En revanche, la relation obtenue avec la CEC mesurée à pH proche du sol est moins importante avec un coefficient de corrélation $r = 0,68$ (tableau 5).

Il apparaît ainsi que la prise en compte de la CEC déterminée au pH7 et la surface spécifique (SS) soient des critères appropriés

d'évaluation de la rétention de l'eau du sol. Nos résultats concordent avec ceux de Tessier *et al.* (1999) et Bigorre *et al.* (2000).

Pour des hauts potentiels de l'eau, au voisinage de la capacité aux champs (pF entre 1 et 3), les coefficients de corrélation obtenus entre la CEC et la teneur en eau sont statistiquement non significatifs. Par contre les meilleures relations sont obtenues avec l'inverse de la densité apparente.

Précisons que la densité apparente varie de 1,3 à 1,8 pour les matériaux étudiés. Ceci rend compte que la densité apparente du sol est aussi un indicateur de la rétention de l'eau à la capacité au champ car la variation de teneur en eau est essentiellement liée à l'évolution de la porosité structurale et donc à la structure du sol. Nos résultats rejoignent les travaux de Bruand *et al.* (1996) qui ont montré que la rétention d'eau à pF 2,5 est mieux corrélée avec l'inverse de la densité apparente.

La stabilité structurale et le comportement hydrodynamique des sols

Nous constatons à travers la matrice de corrélation du tableau 6 que les indices de salinité calculés à l'aide des résultats de mesure à la cobalthexammine, sont bien corrélés à l'inverse du diamètre moyen pondéral (1/MWD) et au coefficient d'infiltration final (CIF). Nous pouvons constater aussi que la relation est meilleure entre les indices IS₁ et IS₂ et la désagrégation structurale sous une agitation pendant une durée de 5 minutes (MWD bis).

La stabilité structurale et l'infiltration des sols restent les méthodes les plus mieux adaptées pour évaluer la sensibilité des sols aux mécanismes de désagrégation (Saidi, 1999). Les coefficients de corrélation linéaire estimés entre ces différents tests (1/MWD et CIF) et les paramètres de la phase saline (tableau 6) indiquent des relations significatives au seuil de 5 %. La conductivité électrique (CE), la somme des cations échangeables (SCE), le pourcentage du sodium échangeable (ESP) et le sodium absorption ratio (SAR) sont significativement corrélés de façon négative au coefficient d'infiltration final (CIF) et positivement à l'inverse du diamètre moyen pondéral (1/MWD). Ceci traduit grossièrement que la salinité globale exerce un effet négatif sur l'état structural des sols.

Nous constatons que l'inverse du diamètre moyen pondéral (1/MWD) et le coefficient d'infiltration final (CIF) présentent des coefficients de corrélation plus élevés avec la sodicité qu'avec la salinité. Cela signifie que la teneur en sodium échangeable déclenche le mécanisme de dispersion physico-chimique lors de la désagrégation, ce qui entraîne la production de particules fines. Cette influence est expliquée par le rôle que joue l'ion sodium dans la dispersion des particules d'une part (Halitim *et al.*, 1984; Shainberg et Letey, 1984; Saidi, 1992; Saidi *et al.*, 2004) et la réduction de l'infiltration d'autre part, ce qui a pour effet principal de contribuer fortement à la fermeture de l'état de surface lorsque les échantillons sont soumis aux pluies simulées de 30 mm.h⁻¹ (Yousaf *et al.*, 1987; Le Bissonnais, 1996; Saidi *et al.*, 1999; Saidi, 2005).

Tableau 5 - Matrice de corrélation linéaire entre les indices de salinité et les propriétés de rétention en eau (les corrélations significatives au seuil de 0,05 sont soulignées).

Table 5 - Matrix of linear correlations between the salinity indexes and the water retention properties (the significant correlations at $P=0.05$ are underlined).

	pF1	pF2,5	pF3	pF3,5	pF4	pF4,2	1/Da	CEC _{co}	CEC _m	SS
pF1	1,00									
pF2,5	<u>0,85</u>	1,00								
pF3	<u>0,79</u>	<u>0,95</u>	1,00							
pF3,5	<u>0,65</u>	<u>0,83</u>	<u>0,93</u>	1,00						
pF4	<u>0,71</u>	<u>0,84</u>	<u>0,93</u>	<u>0,97</u>	1,00					
pF4,2	0,34	<u>0,44</u>	<u>0,55</u>	0,50	0,53	1,00				
1/Da	<u>0,80</u>	<u>0,98</u>	<u>0,90</u>	<u>0,76</u>	<u>0,76</u>	<u>0,38</u>	1,00			
CEC _{co}	0,15	0,20	0,40	<u>0,58</u>	0,53	<u>0,68</u>	0,09	1,00		
CEC _m	0,38	0,44	<u>0,59</u>	<u>0,70</u>	<u>0,68</u>	<u>0,80</u>	0,33	<u>0,97</u>	1,00	
SS	0,52	<u>0,69</u>	<u>0,69</u>	<u>0,56</u>	<u>0,59</u>	<u>0,86</u>	<u>0,66</u>	0,43	<u>0,65</u>	1,00
IS1	0,15	0,31	0,23	0,15	0,00	-0,29	0,33	-0,11	-0,08	-0,07
IS2	0,17	0,33	0,25	0,17	0,03	-0,29	0,34	-0,09	-0,06	-0,07
IS3	0,31	0,54	0,42	0,24	0,13	-0,03	<u>0,59</u>	-0,16	-0,05	0,23
IS4	0,39	<u>0,62</u>	0,51	0,32	0,22	0,10	<u>0,67</u>	-0,09	0,04	0,35

$ESP_{eq} = 1.475 \cdot SAR / (1 + 0.0147 \cdot SAR)$ (USSL Staff, 1954).

(r théorique = 0,5529 et 0,6835 pour $p = 0,950$ et $0,990$ et $n = 13$)

CONCLUSION

Nos résultats montrent qu'au sein de la région du Cheliff, les propriétés des sols peuvent évoluer de façon considérable en fonction des caractéristiques physico-chimiques. Ce travail montre qu'il est particulièrement utile d'estimer la capacité d'échange cationique des sols du Cheliff en fonction des teneurs en argile, en carbone organique, et du pH réel du sol. La CEC résulte bien sûr des propriétés cumulées des argiles et des matières organiques qui fait référence en science du sol à la notion de complexe argilo humique. A travers la régression linéaire multiple, les propriétés des argiles et des matières organiques des sols du Cheliff apparaissent être indépendantes et additives. Les calculs statistiques révèlent aussi des corrélations hautement significatives entre les paramètres de la phase saline (salinité et sodicité) et les indices de salinité IS1 et IS2. Ce qui signifie que les mesures de la CEC et des cations totaux effectués au pH du sol avec le cation cobalthexammine, permettent de mieux approcher la qualité chimique des sols. Ces corrélations soulignent encore l'importance de la CEC mesurée au pH du sol dans les propriétés physiques du sol (stabilité structurale et infiltration). En revanche, la rétention de l'eau aux bas potentiels de l'eau (pF = 4,2) apparaît très fortement corrélée à la capacité d'échange lorsqu'elle est mesurée à pH7 standard (CEC₇) et à la surface spécifique.

La relation obtenue avec la CEC mesurée à pH proche du sol est moins importante. La mesure de la CEC à pH = 7,0 présente l'inconvénient de dissoudre une partie des carbonates et n'est donc pas adaptée pour mesurer la CEC et les cations échangeables dans les sols salés et calcaires. Cependant, elle apparaît comme un indicateur des propriétés d'hydratation des sols aux bas potentiels de l'eau, en relation avec la surface spécifique.

L'inverse de la densité apparente et la surface spécifique apparaissent aussi comme de meilleurs indicateurs pour estimer respectivement les propriétés de rétention en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent. L'importance de la densité apparente et la surface spécifique indiquent qu'il est nécessaire de tenir compte à la fois de la nature et de l'organisation des constituants élémentaires.

La présentation de telles données contribue à la réflexion sur la recherche de meilleurs critères de caractérisation de la qualité des sols affectés par les sels, et à l'élaboration des fonctions de pédotransfert.

Tableau 6 - Matrice de corrélation linéaire entre les indices de salinité, les paramètres de salinité et de sodicité et les propriétés physiques (les corrélations significatives au seuil de 0,05 sont soulignées).

Table 6 - Matrix of linear correlations between the salinity indexes, the salinity and sodicity parameters, and the physical properties (the significant correlations at $P=0.05$ are underlined).

	IS ₁	IS ₂	IS ₃	IS ₄	CE	SCS	SCE	ESP	SAR	ESP _{eq}	1/MWD	1/MWD bis	CIF
IS ₁	1,00												
IS ₂	<u>0,99</u>	1,00											
IS ₃	<u>0,87</u>	<u>0,86</u>	1,00										
IS ₄	<u>0,80</u>	<u>0,79</u>	<u>0,99</u>	1,00									
CE	<u>0,93</u>	<u>0,93</u>	<u>0,93</u>	<u>0,89</u>	1,00								
SCS	<u>0,87</u>	<u>0,87</u>	<u>0,99</u>	<u>0,97</u>	<u>0,94</u>	1,00							
SCE	<u>0,98</u>	<u>0,98</u>	<u>0,90</u>	<u>0,84</u>	<u>0,98</u>	<u>0,91</u>	1,00						
ESP	<u>0,93</u>	<u>0,92</u>	<u>0,84</u>	<u>0,76</u>	<u>0,94</u>	<u>0,85</u>	<u>0,96</u>	1,00					
SAR	<u>0,92</u>	<u>0,92</u>	<u>0,78</u>	<u>0,69</u>	<u>0,92</u>	<u>0,81</u>	<u>0,94</u>	<u>0,98</u>	1,00				
ESP _{eq}	<u>0,92</u>	<u>0,92</u>	<u>0,78</u>	<u>0,69</u>	<u>0,92</u>	<u>0,80</u>	<u>0,95</u>	<u>0,98</u>	<u>1,00</u>	1,00			
1/MWD	<u>0,72</u>	<u>0,72</u>	0,53	0,45	<u>0,61</u>	0,52	<u>0,68</u>	<u>0,70</u>	<u>0,67</u>	<u>0,67</u>	1,00		
1/MWD bis	<u>0,73</u>	<u>0,73</u>	0,47	0,37	<u>0,57</u>	0,45	<u>0,67</u>	<u>0,67</u>	<u>0,66</u>	<u>0,67</u>	<u>0,98</u>	1,00	
CIF	<u>-0,58</u>	<u>-0,59</u>	-0,51	-0,47	<u>-0,62</u>	-0,48	<u>-0,62</u>	<u>-0,67</u>	<u>-0,64</u>	<u>-0,65</u>	<u>-0,77</u>	<u>-0,73</u>	1,00

$ESP_{eq} = 1.475 * SAR / (1 + 0.0147 * SAR)$ (USSL Staff, 1954)..

(r théorique = 0,5529 et 0,6835 pour $p = 0,950$ et $0,990$ et $n = 13$)

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

- AFES, (1995) - Référentiel pédologique de France (RPF), Ed. INRA., 332 p.
- AFNOR, (1996) - Qualité des sols. Recueil de normes Françaises, AFNOR, Paris, France, 533 p.
- Asseline J. et Valentin C., (1978) - Le simulateur de pluies de l'ORSTOM. Cahier Hydrologique de l'ORSTOM., Paris, 4 : pp. 321-347.
- Bigorre F., (2000) - Influence de la pédogenèse et de l'usage des sols sur leurs propriétés physiques. Mécanismes d'évolution et éléments de prévision. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy I, 148 pages
- Bigorre F., Tessier D. & Pedro G., (2000) - Contribution des argiles et des matières organiques à la rétention de l'eau dans les sols. Signification et rôle fondamental de la capacité d'échange en cations. Comptes-Rendus d'Académie des Sciences, Paris, Sciences de la terre et des planètes, 330, pp. 245-250.
- Boulaine J. (1956) - Carte des sols des plaines du Cheliff au 1/50.000^e, feuilles 1 à 5. Inspection générale de l'Agriculture du Gouvernement Général de l'Algérie.
- Boulaine J., (1957) - Etude des sols des plaines du Cheliff. Thèse d'Etat de l'Université d'Alger, 582 p.
- Bower C.A., Reitemeier, R.F. and Fireman, M., (1952) - Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. Soil Sci. 73: pp. 251-261
- Bower C.A., (1959) - Cation-exchange equilibria in soils affected by sodium salts. Soil Science, Vol. 88, pp. 32-35.
- Bruand A. & Zimmer D., (1992) - Relation entre la capacité d'échange cationique et le volume poral dans les sols argileux : incidences sur la morphologie de la phase argileuse à l'échelle des assemblages élémentaires, Comptes-Rendus d'Académie des Sciences, Paris, série II, 315, pp. 223-229.
- Bruand A., Duval O., Gaillard H., Darhout R., & Jamagne M., (1996) - Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols. Importance de la densité apparente. Etude et Gestion des sols, 3, 1, pp. 27-40.
- Cass A. & Sumner M. E., (1982) - Soil pore structural stability and irrigation water quality. I. Empirical sodium stability model. Soil Science Society of America Journal, 46, pp. 503-506.
- Charlet I. & Schlegel M.I., (1999) - La capacité d'échange des sols. Structures et charges à l'interface eau / particule, Compte Rendu d'Académie d'Agriculture. Paris, France, 85 (2), pp. 7-24.
- Ciesielski H. & Sterckeman T., (1997) - Determination of exchange capacity and exchangeable cations in soils by means of cobalt hexamine trichloride. Effects of experimental conditions, Agronomie, 17, pp. 1-7.

- Cihacek I. J. & Bremner J.M., (1979) - A simplified ethylene glycol Mono Ethyl Ether for assessment of surface area, *Soil Science Society of America Journal*, 43, pp. 821-822.
- C. P. C. S., (1967) - Commission de Pédologie et Cartographie des Sols. Classification française des sols, 87 p.
- Curtin O. & Rostad H.P.W., (1997) - Cation exchange and buffer potential of Saskatchewan soils estimated from texture, organic matter and pH, *Canadian Journal of Soil Science*, 77, pp. 621-626.
- Daoud Y. & Robert M., (1992) - Influence of particle size and clay organisation on hydraulic conductivity and moisture retention of clays from saline soils. *Applied Clay Science*, 6, pp. 293-299.
- Daoud Y., (1993) - Contribution à l'étude des sols des plaines du Cheliff. Le phénomène de salinisation, conséquences sur les propriétés physiques des sols argileux. Thèse de Doctorat d'Etat, INA, Alger, 233 p.
- El-Swaify S. A., (1973) - Structural change in tropical soils due to anions in irrigation water. *Soil Science*, 115 (1), pp. 64 -72.
- Fiès J. C. et Panini T., (1995) - Infiltrabilité et caractéristiques physiques de croûtes formées sur massifs d'agrégats initialement secs ou humides soumis à des pluies simulées. *Agronomie*, 15, pp. 205-220.
- 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.
- Heilman M.O., Carter O.L. & Gonzalez C.L., (1965) - Ethylene glycol Mono Ethyl Ether for determining surface area of silicate minerals, *Soil Science*, 100, pp. 356-360.
- Helling, C. S., Chesters, G. & Corey, R. B., (1964) - Contribution of organic matter and clay to soil cation exchange capacity as affected by pH of the saturating solution. *Soil Science Society of America Journal*, 28, pp. 517-520.
- Julien J.L. & Turpin A., (1999) - Surfaces réactives et raisonnement de quelques propriétés chimiques des sols acides. *Comptes-Rendus d'Académie d'Agriculture. France*. 85 (2), pp. 25-35.
- Le Bissonnais Y., Bruand A. et Jamagne M., (1989) - Etude expérimentale sous pluie simulée de la formation des croûtes superficielles - Apport à la notion d'érodibilité des sols. *Cah. ORSTOM, Ser. Pédol.*, vol. 27, N°1 - 2, pp. 31-40.
- Le Bissonnais Y., Bruand A. et Jamagne M., (1990) - Laboratory experimental study of soil crusting: relation between aggregates breakdown and crust structure. *Catena*, 16, pp. 377-392.
- 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.
- McNeal B. L. & Coleman N. T., (1966) - Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Proceedings*, 20, pp. 308-312.
- Metson A.J., (1956) - Methods of chemical analysis for soil survey samples. *N Z Soil Bur Bull n° 12*.
- 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.*, 25 (4), pp. 533 - 545.
- Orsini L., Remy J. C., (1976) - Utilisation du chlorure de cobalthexammine pour la détermination simultanée de la capacité d'échange et des bases échangeables des sols. *Bulletin de l'AFES Science du Sol*. 4, pp. 269-275.
- Parfitt R.L., Giltrap O.J. & Whitton J.S., (1995) - Contribution of organic matter and clay mineral to the cation exchange capacity of soils. *Soil Science & Plant Analysis*. 26 pp. 1343-1355.
- Saidi D., (1985) - Etude agropédologique de la plaine de la Mina (Relizane) et évaluation des propriétés physiques des sols. Thèse Ing., INA., Alger 80 p.
- Saidi D., (1992) - Etude expérimentale de la stabilité structurale des sols des plaines du Cheliff, 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 Cheliff à la dégradation structurale. *Etude et gestion des sols*, Volume 6, 1, pp. 15 à 25.
- Saidi D., Le Bissonnais Y., Duval O., Daoud Y., et Halitim A., (2004) - Effet du sodium échangeable et de la concentration saline sur les propriétés physiques des sols de la plaine du Cheliff (Algérie). *Etude et gestion des sols*, Volume 11, 2, pages 137 à 148.
- Saidi D., (2005) - Influence de la phase saline sur les propriétés physiques des matériaux argileux du Bas Cheliff, Thèse de Doctorat d'Etat, INA, Alger, Algérie, 200 p.
- Shainberg I., Letey J., (1984) - Response of soil to sodic and saline conditions. *Hilgardia*, 52 (2): pp. 1- 57.
- 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, Biggore F. & Bruand H., (1999) - La capacité d'échange: Outil de prévision des propriétés physiques des sols. *Comptes-Rendus d'Académie des Sciences Paris*, 85, n°2, pp 37-46. Séance du 10 février 1999.
- U.S. Salinity Laboratory Staff, (1954) - Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, U.S.D.A. Handbook n° 60, 160 p.
- Van Bavel C. H. M., (1949) - Mean weight diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 14: pp. 20-23.
- Youker R. L., McGuinness J. L., (1956) - A short method of obtaining mean weight diameter values of aggregate analysis of soils. *Soil Sci.*, 83: pp. 291-294.
- Yousaf M., Ali, O. M. and Rhoades J. D., (1987) - Clay dispersion and hydraulic conductivity of some salt-affected arid land soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51, pp. 905-907.
- Yuan T.L., Gammon N. & Leighty R.G., (1967) - Relative contribution of organic clay fractions to cation exchange capacity of sandy soils from several groups, *Soil Science*, 104, pp. 123-129.

