

Évolution des propriétés physiques et physico-chimiques de sols salés de la basse vallée de l'Euphrate (Syrie)

S. Salim⁽¹⁾ et D. Tessier

INRA, Science du Sol, Route de Saint-Cyr, 78026 Versailles, France.

(1) adresse permanente : Université Agronomique de Damas, département de Science du Sol, Damas, Syrie

RÉSUMÉ

Cette étude a été réalisée sur les sols de la ferme expérimentale dite du "7 avril", à Deir Ezzor dans la Basse Vallée de l'Euphrate (Syrie). Trois profils ont été comparés correspondant à un sol salé témoin non irrigué et à deux sols irrigués, drainés et cultivés.

Les sols sont de composition granulométrique argilo-limoneuse à limono-argileuse et les variations verticales de granulométrie apparaissent largement fonction des conditions de mise en place de l'alluvion. La composition minéralogique des argiles est homogène avec la présence de kaolinite, d'illite et de minéraux 2:1 à caractère smectitique en proportion similaire. Le sodium échangeable est présent en quantité importante dans l'ensemble des horizons. Le sol salé non cultivé contient de fortes accumulations en sels et NaCl domine. On note la présence de Bassanite ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$), mais aussi d'un minéral très hydrophile constitué de chlorure de calcium et de magnésium (tachyhydrite, $\text{Ca, Mg}_2, \text{Cl}_6, 12\text{H}_2\text{O}$).

A partir d'échantillons de sols prélevés après la période de mise en culture (pivot central et solid set), des mottes (~10 cm³) ont été extraites du sol et étudiées à l'état non remanié. L'étude de la rétention de l'eau a été faite en contrôlant le potentiel matriciel ($\psi_m > -1,6$ MPa) et le potentiel total ψ_t de -2,8 à -100 MPa). Pour le sol salé, à l'équilibre avec des humidités relatives élevées (ψ_t de -2,8 MPa à -6,9 MPa), les résultats montrent un accroissement considérable de la rétention de l'eau liée à l'importance des sels présents dans le sol et à la composante osmotique dans la rétention de l'eau du sol. Dans les sols cultivés et irrigués, il existe aux hauts potentiels (~ -1 kPa) une porosité de drainage et des pores accessibles aux racines des plantes. Les opérations d'irrigation-drainage ont donc conduit à améliorer les propriétés physiques des sols par rapport au sol témoin salé.

Des études de lessivage des sels ont été réalisées au laboratoire sur des échantillons de sols de l'ordre de 200 cm³. A cet effet, un appareil triaxial modifié a été utilisé afin de contrôler les déformations radiales et axiales de l'échantillon au cours de l'humectation. Après saturation, on étudie la perméabilité et on analyse la composition des solutions ayant percolé au travers de l'échantillon. L'appareillage permet donc de suivre simultanément la salinité des sols, de la corrélérer avec la conductivité hydraulique et en même temps d'étudier la déformation du sol (gonflement, retrait, dispersion). Des changements importants, à la fois de la nature et de la concentration des divers anions et cations, ont été observés. Les solutions extraites montrent une évolution de la concentration entre les cations et les anions au cours de la dilution des sels avec diminution ou augmentation du volume. Suivant les cas, la conductivité hydraulique reste importante, ou au contraire, chute spectaculairement au cours du lessivage. Des conclusions quant aux conditions de maintien de la stabilité de la structure en fonction de la composition de l'eau sont envisagées.

Mots clés

Sols, salinité, irrigation, propriétés physiques

SUMMARY

EVOLUTION OF PHYSICAL AND PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF SALT AFFECTED SOILS OF THE EUPHRATE LOWER VALLEY (SYRIA)

This study was carried out on soils of the experimental farm of 7 th April at Deir Ezzor in the lower valley of Euphrate river (Syria). Three soil profiles corresponding to a salt affected soil and of two irrigated, drained and cultivated soils, were compared.

The soils have mechanical analysis (silty-loam and loamy-clay) and their particle size distribution varied mainly as a function of the conditions where the sediments took place. Their mineralogical composition is rather homogeneous with a mixture of kaolinite, illite and 2:1 minerals, the later having a smectitic character. The salt affected horizons contained strong accumulations of salt dominated by NaCl. The presence on Bassanite ($\text{CaSO}_4, 0,5 \text{ H}_2\text{O}$) and of a hydrophilic mineral composed of magnesium and calcium chloride (Tachyhydrite, $\text{Ca, Mg}_2, \text{Cl}_6, 12 \text{ H}_2\text{O}$) was detected.

Soil clods ($\sim 10 \text{ cm}^3$) were extracted from the soils and were studied in their undisturbed state. Water retention curves were made by controlling matric potential for $\psi_m > -1.6 \text{ MPa}$ and total water potential for ψ_t ranging from -2.8 MPa to -100 MPa . When the samples were equilibrated with ψ_t ranging from -2.8 MPa to -6.9 MPa , the results showed a considerable increase in the water retention. This indicates the importance of the osmotic component in soil water retention properties. In the range of very high water potentials ($\sim -1 \text{ kPa}$), there is evidence of drainage porosity and of pores available for plant roots. Irrigation and drainage techniques allowed to improve soil physical properties compared to that of the salt affected soil.

From the samples collected during the crop period (pivot central and solid set), salt leaching studies were carried out on soil samples of about 200 cm^3 . A triaxial apparatus was used in order to control radial and axial deformations of the sample during wetting. After saturating with water, soil permeability was measured and the chemical composition of the solution passing through was analysed. The apparatus allowed to follow simultaneously soil salinity, hydraulic conductivity and at the same time soil deformation (shrink-swell phenomena, dispersion). Important changes in nature and salt concentration of cations and anions were observed. The solutions showed a rapid change in relative salt concentration during salt dilution. Depending on the sample, the hydraulic conductivity remained important (cultivated soils) or decreased rapidly during salt leaching (salt affected soil). Some conclusions for maintaining soil structure stability and salt and water management are envisaged.

Key-words

Soils, salinity, irrigation, physical properties

RESUMEN

EVOLUCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS SUELOS SALINOS DEL VALLE BAJO DEL EUFRATES (SIRIA)

Este Estudio se realizó en los suelos de la granja experimental "7 de abril", situada en Deir Ezzor en el Valle Bajo del Eufrates (Siria). Se compararon tres perfiles correspondientes a un suelo salino testigo no irrigado y a dos suelos irrigados, drenados y cultivados. Los suelos tienen una composición granulométrica que va de arcillo-limosa a limono-arcillosa y las variaciones verticales de granulometría parecen función de las condiciones de depósito del aluvión. La composición mineralógica de las arcillas es homogénea, existe la presencia de kaolinita, illita y minerales 2:1 con características esmectíticas en proporción similar. El sodio intercambiable se encontró en cantidad importante en todos los horizontes. El suelo salino no cultivado contiene fuertes acumulaciones de sales, el NaCl domina. Se observa la presencia de Basanita ($\text{CuSO}_4, 0,5\text{H}_2\text{O}$), también de un mineral muy hidrófilo constituido de cloruro de calcio y de magnesio (taquihídrita, $\text{Ca, Mg}_2, \text{Cl}_6, 12\text{H}_2\text{O}$).

A partir de las muestras de suelos tomadas después del periodo de cultivo (pivote central y solid set), se extrajeron y estudiaron motas del suelo del estado no perturbado. El estudio de la retención en agua se realizó controlando el potencial matricial ($y > -1,6 \text{ MPa}$ y el potencial total y de $-2,8$ a $-6,9 \text{ MPa}$). En el suelo salino, al equilibrio con humedades relativas elevadas (y de $-2,8 \text{ Mpa}$ a $-6,9 \text{ Mpa}$), los resultados muestran un aumento considerable de la retención en agua debido a la importancia de las sales presentes en el suelo y al componente osmótico en la retención del agua del suelo. Los suelos cultivados e irrigados existe en altos potenciales ($\sim -1 \text{ Kpa}$) presentan una porosidad de drenaje y poros accesibles a las raíces de las plantas. De esta forma las operaciones de irrigación-drenaje han conducido a mejorar las propiedades físicas de los suelos en comparación con el suelo testigo salino.

Estudios de lixiviación de las sales se realizaron en el laboratorio sobre muestras de suelos del orden de 200 cm^3 . Para ello un aparato triaxial modificado fue usado con la finalidad de controlar las deformaciones radiales y axiales de la muestra durante la humidificación. Después de la saturación, se estudió la permeabilidad y se analizó la composición de las soluciones que percolan a través de la muestra. El material permitió seguir simultáneamente la salinidad de los suelos, de correlacionarla a la conductividad hidráulica y al mismo

tiempo de estudiar la deformación del suelo (expansión, retractación, dispersión). Cambios importantes se observaron tanto en la naturaleza como en la concentración de diversos aniones y cationes. Las soluciones extraídas muestran una evolución de la concentración entre los aniones y los cationes en el curso de la dilución de las sales con disminución o aumento del volumen. Según el caso, la conductividad hidráulica puede seguir importante, o al contrario, disminuir rápidamente en el transcurso de la lixiviación. Ciertas conclusiones sobre las condiciones de mantenimiento de la estabilidad de la estructura en relación con la composición del agua se discuten.

Palabras claves

Suelos, salinidad, irrigación propiedades físicas.

Dans les régions arides, le climat rend l'irrigation nécessaire à toute mise en culture, ce qui exige une maîtrise des ressources en eaux et en sols. Suivant les cas et en fonction des conditions environnementales, les sols contiennent des sels en quantité plus ou moins importante. Dans les sols, la présence d'éléments en solution est la source des éléments nutritifs pour les plantes. Cependant, avec l'augmentation de quantité de sels dissous apportés par les eaux, aussi bien en quantité qu'en qualité, le développement des plantes est affecté, induisant une baisse des récoltes.

Les facteurs de la formation des sols salés sont nombreux. Ils peuvent être purement climatiques (température, niveau des précipitations, absence du drainage, composition de la roche mère) ou induits par l'homme (utilisation de l'eau saline dans l'irrigation, amendements excessifs). En Syrie, pays méditerranéen aride à drainage climatique déficient, des dizaines de milliers d'hectares de terres de la Basse Vallée de l'Euphrate sont affectées par la salinité. Dans cette région, une opération de lessivage des sels du sol a été effectuée dans la ferme expérimentale dite du "7 avril". Différentes pratiques d'irrigation ont été testées et ont permis de diminuer la salure des sols, et ainsi, de les rendre à nouveau fertiles.

Le but de cet article est de porter un diagnostic de l'évolution de sols irrigués et/ou salés de la Vallée de l'Euphrate. A cet effet, trois sols ont été sélectionnés correspondant à deux sols irrigués et un sol salé non irrigué qui servira de témoin. On étudiera l'évolution des propriétés physiques et chimiques dans les différentes situations.

CADRE DE L'ÉTUDE ET DONNÉES GÉNÉRALES SUR LES SOLS

Présentation

L'irrigation dans la Basse Vallée de l'Euphrate, ainsi que les premières manifestations de la salinité ont existé depuis plus de 2500 ans avant J. C. comme en témoignent les écrits de la bibliothèque de Marie pour la ville d'Abu Kemal (Dosso, 1980).

Dans cette ville, les terres étaient gérées par le temple de Girsu et étaient cultivées depuis 3500 avant J. C. en orge et en blé à parts égales. Par la suite, la proportion de la surface en blé a diminué au profit de l'orge, jusqu'à 15 % en 2400 avant J. C., à 2 % en 2100 avant J. C., pour disparaître complètement en 1700 avant J. C. Déjà à cette époque, l'agriculture a dû s'adapter aux problèmes de sels dans les sols (Job, 1992).

Jusqu'à la dernière guerre mondiale, seuls les sols d'alluvions récentes étaient cultivés et les problèmes de la salinité étaient limités à la bordure de la terrasse inférieure. A partir de la fin des années 40, avec le développement des moyens de l'irrigation, des milliers de stations de pompage équipées des motopompes ont été installées alimentant des réseaux d'irrigation gravitaires. Cette irrigation par submersion était la seule technique utilisée. Elle nécessite le nivellement des parcelles et l'entretien de nombreux canaux d'irrigation. Cela a conduit à une extension très rapide des surfaces cultivées et des terres irrigables pour le coton et les céréales. Dès lors, avec l'irrigation, la totalité des terres irrigables a été mise en valeur (Dosso, 1980; Bouteyre, 1992). Jusqu'à 200.000 ha de terres ont été irriguées dans la Vallée de l'Euphrate vers le milieu des années 50 (Métral, 1987).

A cette époque, les stations de pompage alimentaient généralement des canaux creusés à même la terre, sans compactage et sans drainage préalables, et ce, sur des centaines de kilomètres, d'où des pertes d'eau considérables représentant jusqu'à 25 % de l'eau d'irrigation (Bouteyre, 1992). L'irrigation mal maîtrisée, l'absence de drainage, l'aridité du climat accompagnée d'une forte évaporation de l'eau avec une culture d'été comme le coton, ont provoqué une salinisation secondaire des sols et la remontée de la nappe phréatique. Lorsque tel est le cas, la conductivité électrique de la nappe phréatique varie entre 1 mS.cm⁻¹ et plus de 100 mS.cm⁻¹. La salinité ayant affecté des surfaces importantes, plus de la moitié des terres sont devenues impropres à l'agriculture et ont donc été abandonnées. C'est le cas lorsque la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée dépasse 30 mS.cm⁻¹. En 1982 l'Organisation Générale pour la Gestion et le Développement de la Vallée de l'Euphrate a estimé que la surface en terres qui devient stérile à cause de la salinité était

de 10 ha par jour. Bouteyre (1992) a indiqué que l'élévation du stock de sels peut être estimée à 250 kilotonnes par an, pour l'ensemble de la Basse Vallée de l'Euphrate. Ce chiffre est à rapprocher des apports par les eaux d'irrigation, soit environ 350 kilotonnes par an. Le drainage naturel, estimé à 100 kilotonnes par an, évacuerait moins du tiers des sels apportés par l'irrigation.

Actuellement, la conductivité de l'extrait des pâtes saturées révèle que la salinité est principalement localisée dans les alluvions récentes limono-argileuses. Les sols abandonnés ont une salinité supérieure à 30 mS.cm^{-1} qui peut atteindre jusqu'à 200 mS.cm^{-1} dans les horizons supérieurs. Les sols de salinité inférieure à 30 mS.cm^{-1} subissent une baisse de rendement de l'ordre de 75 % pour les espèces sensibles comme le blé, et une diminution de 50 % pour les espèces résistantes comme le coton pour des conductivités électriques de 16 mS.cm^{-1} (Arnal, 1994).

L'eau d'irrigation vient du fleuve Euphrate dont la conductivité électrique varie entre $0,5\text{-}0,8 \text{ mS.cm}^{-1}$ eau selon la saison, avec un faciès bicarbonaté calcique. Le rapport d'adsorption du sodium (SAR) est compris entre 0,7 et 1,4. D'après les critères du laboratoire régional de la salinité des Etats-Unis (U. S. Salinity Laboratory Staff, 1954), cette eau est classée C2-S1 à C3-S1. Elle est donc de qualité moyenne par rapport à sa conductivité électrique et de très bonne qualité en ce qui concerne son alcalinité, avec un risque d'alcalinisation faible des sols irrigués et un risque de salinisation moyen.

L'aménagement de ces sols a été effectué par le Groupement d'Etudes et de la Réalisation des Sociétés d'Aménagement Régional (GERSAR), la Société Centrale pour l'Équipement du territoire (SECT) et la Compagnie Nationale d'Aménagement de la Région du Bas-Rhône et du Languedoc (BRL) entre les années 1975-1985 sur 50.000 ha. Avec une couche caillouteuse de 10 m d'épaisseur, la structure géologique de la vallée permet le drainage à partir de forages. L'eau pompée est déversée dans des canaux puis évacuée vers l'Euphrate. Le travail de GERSAR-SECT a été couronné en 1986 par le projet pilote de la ferme expérimentale du «7 Avril». Il s'agit d'un périmètre irrigué de 1000 ha, qui est représentatif des problèmes de salinité, ainsi que des problèmes de la mise en valeur des sols salés de la Basse Vallée de l'Euphrate. Dans cette ferme, 50 % des terres étaient au départ excessivement salées avec une conductivité électrique dépassant 30 mS.cm^{-1} , 10-15 % très salées avec une conductivité électrique entre 16 et 32 mS.cm^{-1} et enfin 35-40 % de terres légèrement salées avaient une conductivité électrique inférieure à 16 mS.cm^{-1} .

Le projet pilote de la ferme du «7 Avril» est basé sur la combinaison de différents systèmes d'irrigation avec un système de drainage vertical. Ce système devait permettre de supprimer la salinisation des sols par le rabattement de la nappe en maintenant son niveau à une profondeur stable de

2,5 m. A cet effet, il fallait tester le fonctionnement et l'efficacité de différents systèmes sur la désalinisation des sols en mettant en place des cultures irriguées, parmi lesquelles des arbres fruitiers et des céréales comme le blé et l'orge. Une superficie de 625 ha a été équipée de huit systèmes modernes d'irrigation par aspersion avec une parcelle témoin irriguée par submersion.

Sites d'étude et climat

La ferme de «7 avril» se trouve dans la Basse Vallée de l'Euphrate dans la partie nord-est de la Syrie à 35 km de Deir-Ezzor sous une longitude de $35\text{-}36^\circ$ nord et une latitude de $40\text{-}41^\circ$ est. L'altitude moyenne est de 203 m. La Basse Vallée de l'Euphrate est formée de matériaux alluvionnaires de plusieurs mètres d'épaisseur, contenant notamment de la calcite et du gypse du Plio-Miocène. A la base des sols, on trouve un horizon grossier avec des galets, des graviers et des sables (Muir, 1951, Dubetret, 1979, Dosso, 1980).

Deir-Ezzor se trouve dans la partie la plus chaude de la Syrie et reçoit des précipitations très faibles, avec une moyenne annuelle 164 mm. La saison des pluies s'étend de novembre à mai, avec une moyenne mensuelle supérieure à 10 mm /mois. Les mois de juin à septembre sont très secs. Les précipitations sont caractérisées par leur irrégularité au cours du temps et la plupart des pluies tombent pendant la période hivernale. La température moyenne annuelle est de $19,8^\circ\text{C}$ avec une variation saisonnière et mensuelle considérables ; froid en hiver, sec et chaud en été : c'est un climat continental. Les mois les plus frais se prolongent de novembre jusqu'en avril, avec une moyenne annuelle de 13°C . La température minimale peut descendre à $2,1^\circ\text{C}$ en janvier. Les mois les plus chauds concernent la période de mai à octobre où on note une température très élevée en juillet, de l'ordre de 40 à 45°C . L'évapotranspiration potentielle annuelle, calculée selon la formule de Penman modifiée, est de 2 100 mm par an (Dosso, 1980). Le bilan hydrique est négatif et le déficit hydrique est quasi-permanent. A Deir-Ezzor la période sèche dure 7 mois environ et joue un rôle très important sur le statut salin des sels.

Trois profils de sols ont été sélectionnés et sont représentatifs de chacun des systèmes étudiés. Le premier correspond à un sol initialement salé. Il est équipé d'un système de drainage et cultivé avec un système d'irrigation à pivot central (pivot system). Le deuxième est équipé d'un système d'irrigation fixe avec le même système de drainage (solid set). Le troisième correspond au sol salé abandonné qui n'a été ni cultivé, ni drainé et sur lequel domine la végétation naturelle halophile (témoin).

Matériaux et méthodes d'étude

Dans chacun des périmètres un profil a été creusé à l'automne après la période de végétation sans que les sels accumulés

aient été lessivés. Des blocs de sol non remaniés ont été échantillonnés et nous avons veillé à conserver la structure, notamment en vue de l'étude des propriétés physiques.

Les analyses granulométriques ont été effectuées à la pipette après tamisage à sec. La capacité d'échange en cations et les cations échangeables ont été déterminés après échange à la cobalthexamine suivant la méthode décrite par Ciesielski et Sterckeman (1997 b) à un pH très proche de celui du sol.

Des échantillons non remaniés ont été portés à différents potentiels hydriques. Les mesures de la rétention en eau ont été faites sur des mottes ($\sim 10 \text{ cm}^3$) extraites des blocs par fragmentation manuelle. Pour les potentiels matriciels (ψ_m) de $-1,0 \text{ kPa}$ à -100 kPa , on a utilisé le dispositif de filtration proposé par Tessier et Berrier (1979). Pour ψ_m allant de -320 à -1600 kPa , on a utilisé la cellule de Richards (1947). De $-2,8 \text{ MPa}$ et jusqu'à -100 MPa on a contrôlé le potentiel total ψ_t en plaçant les échantillons en équilibre avec des humidités relatives contrôlées (Tessier, 1975; Tavares-Filho, 1994). Les mesures de masse volumique humide de mottes ont été faites en mesurant la poussée d'Archimède dans du kérosène (Monnier et al., 1973). Chaque point sur la courbe a fait l'objet de 5 répétitions. Les résultats concernant l'évolution de la teneur en eau et du volume poral sont présentés par des courbes donnant l'évolution de l'indice des vides (e) en fonction de l'indice d'eau (θ), sachant que :

$$e = V_v/V_s,$$

$$\theta = V_w/V_s,$$

avec V_v , V_w et V_s respectivement les volumes de vide, d'eau et de solide.

L'étude de la nature des constituants des sols a été effectuée en diffraction des rayons X sur la poudre du sol total et sur la fraction $< 2 \mu\text{m}$. La séparation de l'argile du sol et la préparation des échantillons ont été effectués en suivant des protocoles décrits par Robert et al. (1974), Robert (1975).

L'étude de la déformation du sol et de la conductivité hydraulique ont été effectuées en utilisant un appareillage de contrôle des contraintes adapté à Versailles par Michel (1993), Michel et al. (1998) à partir d'une cellule triaxiale de Bishops et Wesley (1975) modifiée. Le principe de cet appareil est basé sur l'essai triaxial pour contrôler la déformation tridimensionnelle du sol à partir d'une éprouvette cylindrique dont le diamètre est de 5 cm et la hauteur de $\sim 8 \text{ cm}$.

L'expérimentation a été faite sur des éprouvettes d'agrégats préparés à partir des horizons des sols étudiés. Les agrégats ont été tamisés à 4 mm , hydratés avec de l'eau distillée à $\psi_m = -32 \text{ kPa}$, puis compactés sous une pression mécanique de 100 kPa . Chaque éprouvette a été placée dans une membrane en caoutchouc de façon à appliquer à sa périphérie une pression de confinement isotrope constante de 5 kPa .

Au cours des expériences, l'échantillon est hydraté en contrôlant ses déformations (positives ou négatives). En même temps on mesure la pression d'injection de l'eau pénétrant dans l'échantillon ce qui permet de déterminer la conductivité hydraulique. Les humectations ont été effectuées avec de l'eau distillée à la vitesse de $0,25 \text{ mm}^3$ par seconde. A saturation, la solution percolant au travers des éprouvettes a été recueillie et analysée. Pour les chlorures on a utilisé la méthode de Mohr avec une solution de AgNO_3 (N/50). Le dosage des sulfates a été effectué par turbidimétrie en utilisant des cristaux de BaCl_2 tamisés à $0,25 \text{ mm}$. Les bicarbonates ont été analysés par la méthode d'acidimétrie avec H_2SO_4 (N/50). Le calcium et le magnésium ont été dosés par absorption atomique et le sodium et le potassium par la spectrométrie de flamme d'émission.

CONSTITUTION ET PROPRIETES DES SOLS

Données physiques et physico-chimiques classiques

Les résultats des analyses granulométriques sont présentés dans le tableau 1.

- Le profil de la parcelle irriguée avec le pivot central présente un taux d'argile qui atteint un maximum de $50,3 \%$ dans l'horizon profond ($70-85 \text{ cm}$) et un minimum de $30,4 \%$ dans l'horizon intermédiaire ($30-55 \text{ cm}$). La proportion d'argile dans l'horizon superficiel remonte à $34,4 \%$. La teneur en limons fins augmente avec la profondeur, mais la teneur en limons grossiers reste hétérogène.

- Dans le profil irrigué avec le solid set la teneur en argile est de $45,7 \%$ dans l'horizon superficiel ($25-40 \text{ cm}$) et de $38,5 \%$ dans l'horizon profond ($80-95 \text{ cm}$). La teneur en limons fins est de 41% à la surface et de $51,7 \%$ en profondeur. Cette augmentation correspond à la diminution de la teneur en argile et on remarque que la teneur en limons grossiers est aussi hétérogène.

- Dans le sol salé témoin, on note une augmentation de la teneur en argile de l'horizon de surface ($15-35 \text{ cm}$) vers l'horizon profond ($50-60 \text{ cm}$), et ceci de $35,7 \%$ à $47,9 \%$. On remarque aussi une augmentation de la teneur en limon fin avec la profondeur. En revanche, la teneur en limons grossiers décroît. Les teneurs en sables sont faibles sur l'ensemble des profils.

Ces résultats montrent que la texture limono-argileuse à argilo-limoneuse des sols formés à partir de dépôts récents est assez hétérogène et que le changement de texture d'un horizon à un autre et d'un profil à un autre est dû principalement à la nature et à la variabilité en composition des alluvions.

Les résultats d'analyses chimiques sont présentés dans les tableaux 2 et 3. Nous constatons que la teneur en carbonate

de calcium (CaCO_3) est à peu près la même pour les trois profils (21,7 % en moyenne). Leur teneur en carbone organique ne dépasse pas 1 % avec cependant une teneur plus importante pour le profil du sol irrigué avec le pivot central. Dans tous les sols, les teneurs en carbone organique et le rapport C/N diminuent depuis les horizons superficiels vers les horizons profonds. Les valeurs du pH des sols sont similaires et légèrement alcalines (8,2 en moyenne), elles sont cependant un peu plus élevées en profondeur qu'en surface.

La CEC moyenne est de $26 \text{ cmol}^+/\text{kg}$. On remarque que la somme des cations Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ extraite du sol est toujours supérieure à la CEC (tableau 3). Elle correspond en fait aux ions échangeables adsorbés à la surface des argiles et aux sels présents dans la solution d'extraction. Comme l'extraction des cations a été effectuée au pH du sol, la présence de cations en excès par rapport à la CEC ne peut être attribuée à la dissolution du carbonate de calcium (Ciesielski et

Sterckeman, 1997 a; Ciesielski et Sterckeman, 1997 b). La présence de cations en excès par rapport à la CEC confirme donc la présence de sels, y compris de calcium. Il en est ainsi dans les deux horizons du sol salé témoin et de l'horizon profond du sol irrigué avec le solid set. On note aussi que l'horizon de surface du sol irrigué sous pivot est, après récolte des céréales, fortement salé.

Par ailleurs, nous voyons que les teneurs en calcium sont voisines dans les profils des sols irrigués avec le pivot central et solid set. Ainsi, la teneur en calcium occupe la moitié des cations totaux sauf dans l'horizon intermédiaire du profil du sol irrigué avec le solid set. Par contre, dans le sol témoin salé, c'est la teneur en sodium qui domine, de telle sorte qu'il couvre la moitié des cations totaux. De plus, la quantité de Na^+ dans l'horizon profond du sol salé ($56 \text{ cmol}^+/\text{kg}$) est 2-3 fois supérieure à celle des autres horizons.

Tableau 1 - Analyses granulométriques des sols

Table 1 - Mechanical analysis of the soils

| Profil | Hz (cm) | Granulométrie (g/100 g) | | | | | Σ limons | Σ sables |
|-----------|---------|-------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-----------------|-----------------|
| | | argiles | limons fins | limons gros. | sables fins | sables gros. | | |
| pivot c. | 0-30 | 34,7 | 34,4 | 21,1 | 9 | 0,8 | 55,5 | 9,8 |
| | 30-55 | 30,4 | 41,3 | 23,5 | 4,7 | 0,1 | 64,8 | 4,8 |
| | 70-85 | 50,3 | 44,7 | 4,7 | 0,3 | 0 | 49,4 | 0,3 |
| solid set | 25-40 | 45,7 | 41 | 9,2 | 3,7 | 0,4 | 50,2 | 4,1 |
| | 55-70 | 44,1 | 49,4 | 5,6 | 0,8 | 0,1 | 55 | 0,9 |
| | 80-95 | 38,5 | 51,7 | 8,9 | 0,6 | 0,3 | 60,6 | 0,9 |
| témoin | 15-35 | 35,7 | 34,2 | 7,4 | 19,4 | 3,3 | 41,6 | 22,7 |
| | 50-65 | 47,9 | 39,5 | 5,4 | 6,1 | 1,1 | 44,9 | 7,2 |

Tableau 2 - Teneurs en carbonate de calcium, valeurs du carbone et de l'azote organique, du pH des trois profils de sols étudiés.

Table 2 - Calcium carbonate content, carbon and organic nitrogen content and pH of the three soil profiles.

| Profil | Hz (cm) | CaCO_3 (g/100g) | C.O. g/kg | N.O. g/kg | C/N | pH (eau) |
|-----------|---------|--------------------------|-----------|-----------|------|----------|
| pivot c. | 0-30 | 21,2 | 5,7 | 0,55 | 10,4 | 8,1 |
| | 30-55 | 21,9 | 4,5 | 0,26 | 10,0 | 8,4 |
| | 70-85 | 21,5 | 2,4 | 0,31 | 7,7 | 8,4 |
| solid set | 25-40 | 21,9 | 4,5 | 0,46 | 9,8 | 8,2 |
| | 55-70 | 23,7 | 3,1 | 0,37 | 8,4 | 8,3 |
| | 80-95 | 22,9 | 2,6 | 0,33 | 7,9 | 8,3 |
| témoin | 15-35 | 19,0 | 4,9 | 0,43 | 11,4 | 7,8 |
| | 50-65 | 21,8 | 4,6 | 0,44 | 10,5 | 8,4 |

Tableau 3 - Analyses physico-chimiques des sols. La cobalthexamine a été utilisée pour extraire les cations totaux (solution + échangeables) et mesurer la capacité d'échange au pH du sol.

Table 3 - Physico-chemical analysis of the soils. The cobalthexamine cation was used in order to extract soil cations (exchangeable

| Profil | Hz(cm) | CEC (Cm/kg sol) | Cations totaux du sol (Cm/kg) | | | | Σ cations |
|---------------|--------|--------------------|-------------------------------|------|------|-----|------------------|
| | | | Ca | Mg | Na | K | |
| pivot central | 0-30 | 21,5 | 23,4 | 7,6 | 11,3 | 0,8 | 43,1 |
| | 30-55 | 22,9 | 15,2 | 6,7 | 7,8 | 0,3 | 29,9 |
| | 70-85 | 31,1 | 17,4 | 10,5 | 6,6 | 0,3 | 34,7 |
| solid set | 25-40 | 27,1 | 23,8 | 10,9 | 5,9 | 0,3 | 41,1 |
| | 55-70 | 27,3 | 14,8 | 12,0 | 10,6 | 0,4 | 37,8 |
| | 80-95 | 28,3 | 29,5 | 11,9 | 11,0 | 0,3 | 52,7 |
| témoin | 15-35 | 22,0 | 27,4 | 15,5 | 35,7 | 0,6 | 79,2 |
| | 50-65 | 28,0 | 14,3 | 17,8 | 42,0 | 0,4 | 74,5 |

Données sur les constituants des sols

La diffraction des rayons X donne des informations sur la nature des constituants et des sels présents dans le sol total. Outre la calcite, les diagrammes révèlent essentiellement la présence de Halite (NaCl) et Bassanite ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$). On note la présence de Loewite $\text{Na}_{12}\text{Mg}_7(\text{SO}_4)_{13} \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ dans le profil solid set et de Tachyhydrite ($\text{CaMg}_2\text{Cl}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) dans le sol salé témoin.

Les argiles sont de nature similaire dans les trois profils. On note la présence d'un pic à 7 Å, 10 Å et 14 Å. Avec le test à l'éthylène glycol, le pic à 14 Å passe à 17 Å. Par contre l'argile Ca humide donne un pic à 19,2 Å ce qui est en accord avec les résultats de Tessier (1984). Avec le chauffage à 300°C et à 550°C, un pic à 14 Å reste stable. Ces résultats nous permettent de conclure que les sols sont composés de quatre minéraux argileux : illite, kaolinite, chlorite et surtout smectite.

COMPORTEMENT PHYSIQUE DES SOLS

Porosité et rétention de l'eau

Nous donnerons ici les résultats obtenus sur des prélèvements effectués à l'intérieur de chaque horizon sur une épaisseur de 15 cm en nous limitant ici à un seul horizon de chaque profil. Les courbes donnent l'évolution de l'indice de vides, d'eau et d'air (figure 1a, b et c).

- Le profil du sol irrigué avec le pivot central est relativement poreux puisque e atteint 0,9 à 1,15. On voit que l'indice des

vides est constant traduisant la rigidité du matériau. Ce sol est quasi saturé d'eau à $-3,2$ kPa, ce qui indique que la porosité de drainage et d'aération est faible.

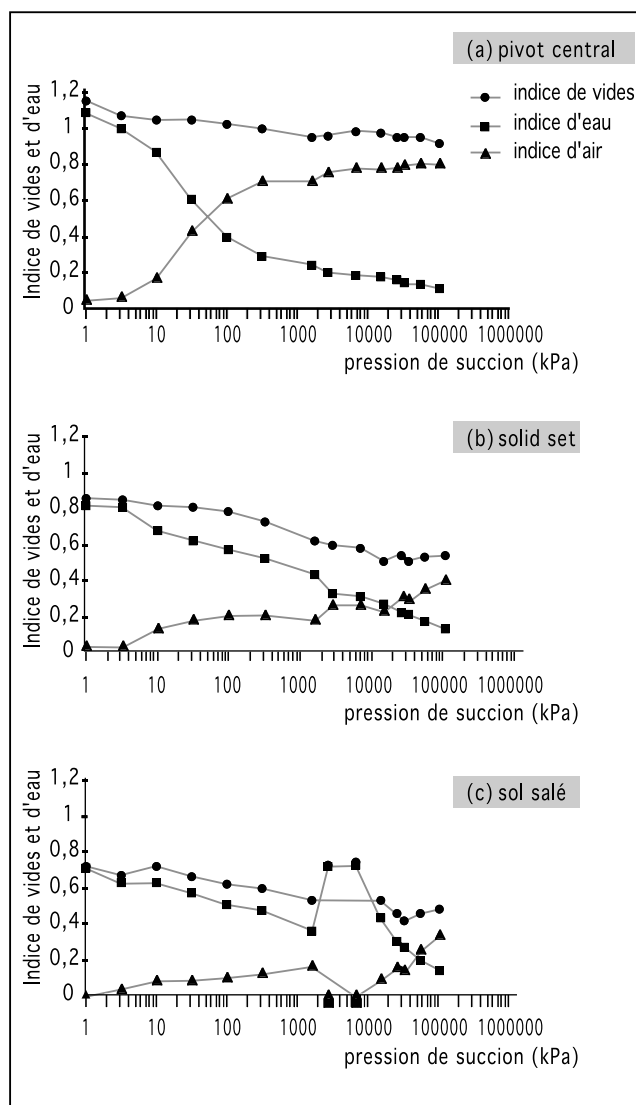
- Le sol du profil solid set est moins poreux que le sol précédent ($e \# 0,9$). On remarque que le volume poral du sol change peu au cours de la dessiccation.

- Le sol témoin salé est particulièrement dense puisque e atteint 0,72 en surface (porosité égale à 40 %). Dans ce profil, la présence d'air à $-1,0$ kPa est très faible. En se référant à la loi de Jurin-Laplace, ceci indique que le volume des pores supérieurs ou égaux à 150 μm est très faible. On note en outre qu'un gonflement se produit entre $\psi = -2,8$ MPa et $\psi = -6,9$ kPa, c'est à dire lorsque le sol est en équilibre avec des humidités relatives comprises en 98 et 95 %. Le sol devient alors saturé d'eau. Cette hydratation et le gonflement qui en résultent apparaissent ici liés à la présence des sels fortement hygroscopiques identifiés précédemment notamment du chlorure mixte de calcium et magnésium.

Entre $\psi = -3,2$ kPa et $\psi = -1,6$ MPa on peut estimer la réserve en eau utile (R.U.) caractéristique de chaque horizon (tableau 4). Les résultats sont donnés en mm d'eau par cm de sol. Les réserves en eau sont proches. Cependant pour le sol du site Pivot Central l'horizon intermédiaire retient une forte quantité d'eau et sa faible masse volumique en fait un horizon favorable à l'enracinement. Dans le profil du sol irrigué avec le solid set, l'horizon équivalent est relativement dégradé, en accord avec nos observations de terrain. Dans le sol salé, la réserve en eau de chacun des horizons est faible et la concentration en sels de la solution est tellement forte que les plantes ne peuvent certainement pas bénéficier de cette eau puisqu'el-

Figure 1 - Courbes de rétention d'eau et de changement de volume obtenues sur les horizons des sols.

Figure 1 - Water retention and volume change curves obtained on soil horizons.



le est à un potentiel osmotique très élevé.

Désalinisation et conséquences

Rappelons que ces expériences ont été effectuées avec de l'eau distillée. Dans les sols des périmètres irrigués, on constate que l'humectation provoque progressivement un tassement des échantillons (figures 2a et b). Pour le sol salé, on observe un retrait dans une première phase suivi, dans une deuxième phase, d'un gonflement (figure. 2c). Le comportement du sol salé est donc totalement différent de celui des sols irrigués.

Tableau 4 - Estimation de la réserve en eau utilisable (R.U.) déduite des mesures de rétention d'eau et masse volumique apparente (Mv) des sols.

Table 4 - Estimation of the available water (R.U.) deduced from water retention curves and bulk density (Mv) of the soils.

| Profil | Horizon (cm) | Mv apparente (cm ³ /g) | R.U. mm/cm |
|---------------|--------------|-----------------------------------|------------|
| pivot central | 0-30 | 1,50 | 1,8 |
| | 30-55 | 1,34 | 3,7 |
| | 70-85 | 1,39 | 1,8 |
| solid set | 25-40 | 1,45 | 2,4 |
| | 55-70 | 1,49 | 2,0 |
| | 80-95 | 1,43 | 2,0 |
| témoin | 15-35 | 1,64 | 1,6 |
| | 50-65 | 1,47 | 1,9 |

Sur les éprouvettes de sols irrigués, les données indiquent que la conductivité hydraulique est très stable au cours du temps. Elle est de $4,5 \cdot 10^{-3}$ cm/s pour le profil pivot central et de $4,3 \cdot 10^{-3}$ cm/s pour solid set à la fin de l'essai. Cette valeur n'évolue pas au cours de la dilution des sels. En revanche, pour le sol salé, la conductivité hydraulique varie considérablement au cours des essais. Elle varie de $5 \cdot 10^{-4}$ à $1,5 \cdot 10^{-3}$, traduisant une évolution considérable de la structure au cours de la dilution des sels.

Les résultats des analyses chimiques effectuées sur l'eau ayant percolé au travers des éprouvettes sont présentés dans la figure 3a, b et c, respectivement pour les profils de sols irrigués avec le pivot central et solid set, ainsi que pour le sol salé. Les teneurs en cations solubles diminuent au fur et à mesure de l'injection de l'eau. Les teneurs en sodium sont toujours plus élevées que celles de Ca et Mg. Néanmoins les teneurs en Ca et Mg sont relativement importantes, traduisant la présence de sels solubles de calcium et de magnésium. Les données concernant les cations confirment donc les résultats des analyses physico-chimiques sur la nature et la quantité des cations solubles. Le chlore est l'anion le plus présent et nous avons constaté que sa teneur diminue d'un facteur de l'ordre de 3,5 au cours des essais. La présence de sulfates est confirmée.

DISCUSSION

Les résultats précédents indiquent que la salinité des sols

Figure 2 - Changement de volume du sol au cours de la percolation d'eau (eau distillée)

Figure 2 - Volume change of the soil samples during water percolation (distilled water).

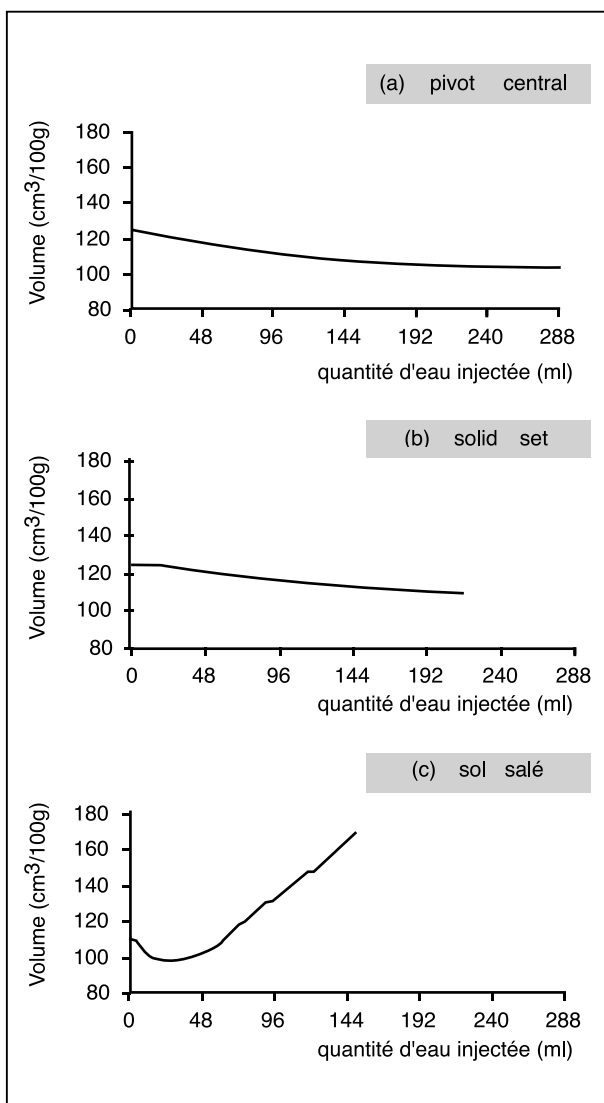
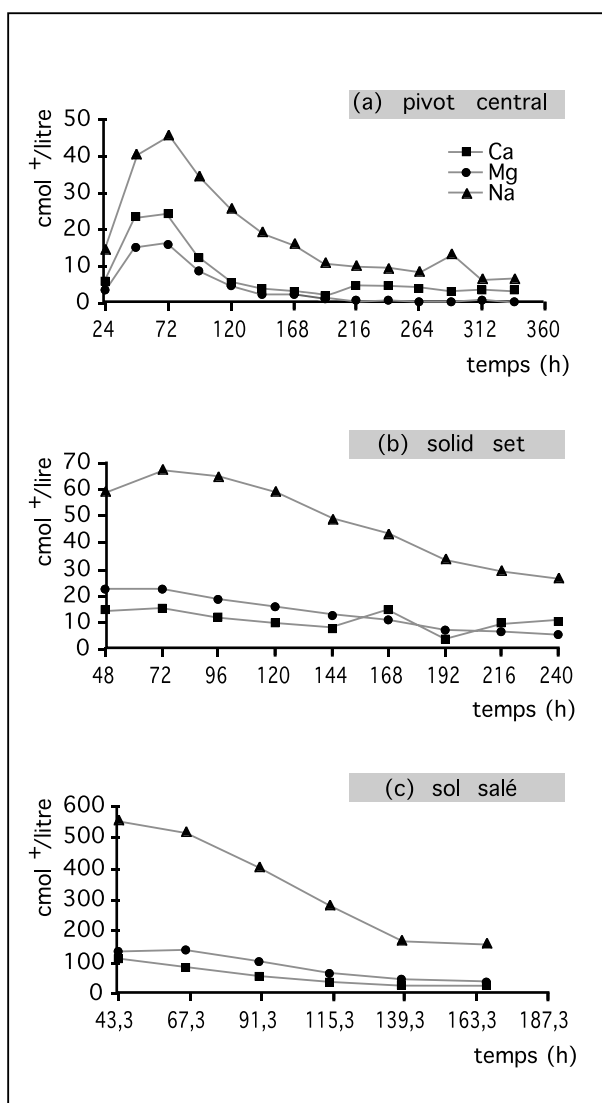


Figure 3 - Evolution de la composition chimique des solutions ayant percolé au travers des échantillons.

Figure 3 - Evolution of the chemical composition of solutions percolating through the samples.



de la ferme du «7 Avril» est de type neutre, sans que l'on puisse mettre en évidence une élévation du pH au cours de phases de salinisation et désalinisation des sols. Le pH de 8,3 à 8,5 indique la présence en quantité appréciable de sodium échangeable avec absence de carbonates solubles comme le carbonate de sodium, dans un milieu riche en carbonate de calcium (Gaucher, 1968).

Dans les sols irrigués, les techniques d'irrigation et de lessivage des sels permettent de maintenir un état salin correct pour le développement des cultures. Les sols étudiés sont

pendant riches en limons, ce qui est en faveur d'une certaine instabilité physique. Si les sols sont hétérogènes verticalement et entre eux au plan granulométrique, cette hétérogénéité semble liée à la variabilité de composition de l'alluvion plutôt qu'à un processus de lessivage.

A composition granulométrique similaire, le sol irrigué avec le système de pivot central et drainé possède des caractéristiques physiques plus favorables au développement de l'activité biologique que le système d'irrigation par aspersion classique (solid set). L'effet de l'irrigation a été d'éliminer les sels en excès même

si les concentrations en sels dans l'horizon profond, au-dessous du système racinaire des plantes, peuvent rester importantes.

Les études sur les constituants indiquent qu'il n'y a pas de différence minéralogique entre les horizons profonds et les horizons sus-jacents des sols où domine la calcite. La nature des argiles apparaît très constante d'un profil à l'autre et la présence des minéraux gonflants de type smectite est vérifiée dans tous les horizons. Cette dernière pourrait se former à partir des smectites en présence d'une solution saline très riche en Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} (Trauth, 1977 ; Halitim, 1985). L'existence de sels neutres comme NaCl et CaSO_4 est confirmée dans tous les profils. Dans les sols irrigués, en fin de période végétative, une certaine accumulation des sels s'est produite, mais elle est beaucoup moins importante que dans le sol salé.

Dans le sol salé, la composition chimique des solutions est en accord avec la nature des sels trouvés en diffraction des rayons X soit NaCl , CaSO_4 et $(\text{CaMg}_2)\text{Cl}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (Tachyhydrite) et confirme les résultats sur les cations totaux présents dans le sol. On note que le Sodium Adsorption Ratio (SAR) calculé à partir de la solution percolant au travers des échantillons diminue au cours de la percolation. On passe d'une valeur de 60 à 30 dans le sol salé, de 16,5 à 9,5 dans le sol irrigué avec le solid set et de 4,5 à 1,4 dans le pivot central. Ces résultats indiquent donc que la dilution des sels, en changeant les équilibres géochimiques du milieu, tend à diminuer la salinité et la sodicité des sols.

En ce qui concerne les sels et leur effet sur le gonflement et sur la perméabilité du sol, on peut mettre en évidence les points suivants :

- Dans les sols irrigués, la dilution des sels ne provoque pas de changement important du volume total, ni de la conductivité hydraulique. Nous en déduisons que, dans ce cas de figure, le pourcentage de sodium échangeable est insuffisant pour que les phénomènes de dispersion se produisent ;

- Dans le sol salé témoin, il existe une relation entre la concentration saline et la conductivité hydraulique. La perméabilité du sol à l'eau diminue avec la dilution des sels. Dans ce cas de figure la dilution de la solution provoque une dispersion des argiles et un gonflement du matériau. Ceci est conforme aux résultats de McNeal et al. , 1966 ; Frenkel et al., 1978 ; Pupisky et Shainberg, 1979 ; Keren et O' Connor, 1982 ; Keren et Singer, 1988). McNeal et al. (1966) estime que la réduction de la conductivité hydraulique est due au blocage des pores de transmission, soit par le gonflement des minéraux, soit par la migration des feuillettes d'argile qui s'accumulent et diminuent la taille des pores.

Pour expliquer ce comportement il faut faire intervenir la géométrie de l'espace inter agrégats en relation avec leur réorganisation interne (gonflement de l'agrégat) et externe (réorganisation des agrégats) sous l'influence de la pression de confinement. Dans un premier temps, le tassement est grand

bien que la concentration en sels reste élevée. La chute de la conductivité hydraulique peut être due au rapprochement des agrégats qui sont encore peu gonflés. Ensuite, quand le matériau devient plus hydraté, tout se passe comme si le gonflement des agrégats entraînait leur éloignement. Enfin, lorsque la solution devient plus diluée, la taille et la continuité des pores diminuent à nouveau. Il y aurait alors quasi dispersion de l'argile lorsque la concentration en sels de la solution est faible.

Toutes choses étant égales par ailleurs, la conductivité hydraulique apparaît en relation avec le pourcentage de sodium échangeable (ESP) estimé (US. Salinity Laboratory Staff, 1954). Il apparaît que plus l'ESP est élevé, plus la conductivité hydraulique est faible. Ceci est en accord avec les résultats de Halitim et al. (1984). Corrélativement on constate que le gonflement diminue avec l'augmentation de la concentration saline et augmente avec l'ESP. En conséquence, le sol salé apparaît, dans les conditions expérimentales de laboratoire, moins perméable que les sols irrigués.

Dans tous les cas, que les sols soient plus ou moins salés, la rétention de l'eau est à $\psi = -1,6$ MPa fortement corrélée à la capacité d'échange, comme cela a d'ailleurs pu être vérifié par d'autres auteurs dans les régions tempérées (Bruand et al., 1992). Le fait que les sols soient salés n'affecte pas la rétention de l'eau si on la réfère au seul potentiel matriciel (suction). En revanche, dès lors que le sol est en équilibre avec une humidité relative donnée, l'hydratation du matériau prend un caractère exceptionnel que traduit l'affinité des sels pour l'eau. Seul le sol salé témoin présente ce type de comportement de toute évidence en relation avec la présence d'un sel mixte de calcium et magnésium très hydrophile comme la Tachyhydrite ($(\text{CaMg}_2)\text{Cl}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, 780 g/l environ).

CONCLUSION

Ce travail montre que l'on peut, sur un sol donné, porter un diagnostic sur son évolution en étudiant simultanément les changements de porosité et de conductivité hydraulique et en se référant au statut salin des sols. Il est ainsi possible d'identifier des seuils de comportement en fonction des sels et des ions échangeables sur la rétention de l'eau, la porosité et la conductivité hydraulique. Cette approche semble une contribution intéressante dans l'étude des sols en milieu aride sujets à la salinisation.

Dans un travail futur l'effort devrait porter sur une connaissance plus précise des sels (gypse, sulfate de magnésium, etc.) et de leur influence sur les propriétés en fonction de la nature des constituants, notamment la nature minéralogique des argiles, en considérant leur charge électrique superficielle et la localisation des charges, pour raisonner la sélectivité d'échange et les propriétés, en vue d'une gestion à long terme de

la fertilité des sols salés.

BIBLIOGRAPHIE

- Arnal H., 1994 - La salinisation des terres irriguées dans la Basse Vallée de l'Euphrate (République Arabe Syrienne), sa maîtrise par drainage verticale en grand. Coopération Franco-Syrienne, rapport d'activité sur la réhabilitation des sols salés et leur gestion pour la période 1992-1995, I. N. R. A. , Versailles, éd.
- Bishop A. W. and Wesley L. D., 1975 - A hydraulique triaxial apparatus for controlled stress path testing. *Géotechnique* 25, N° 4, 657-670.
- Bouteyre G., 1992 - Une calamité pour l'agriculture en zone aride : la salinisation des terres irriguées en basse vallée de l'Euphrate (République arabe syrienne). L'aridité, une contrainte au développement, caractérisation, réponses biologiques, stratégies des sociétés. éd. ORSTOM, Paris, pp 401-417
- Bruand A. , et 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. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 315, Série II, 223-229.
- Ciesielski H., and Sterckeman with the technical help of Santerne M., and Willery JP, 1997 a-A comparaison between three methods for determination of cation exchange capacity and exchangeable cations in soil. *Agronomie* 17 : 9-16.
- Ciesielski H., and Sterckeman with the technical help of Santerne M., and Willery JP, 1997 b-Determination of cation exchange capacity and exchangeable cations in soils by means of cobalt hexamine trichloride. Effects of experimental conditions. *Agronomie* 17 : 1-7.
- Dosso M., 1980 - Géochimie des sols salés et des eaux d'irrigation. Aménagement de la Basse Vallée de l'Euphrate en Syrie. Thèse: Univ Paul Sabatier de Toulouse (science), 180 p.
- Dubertret L., 1979 - Commission de la carte géologique du monde; sous-commission de la carte métallogénique, feuille n°9, maquette lithologique.
- Frenkel H., Goertzen J. O. And Rhoades J. D., 1978 - Effect of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulique conductivity. *Soil sci. Soc. Am. J.*, 42: 32-39.
- Gaucher G., 1968 - Traité de pédologie agricole. Le sol et ses caractéristiques agronomiques. DUNOD, Paris 368 p.
- Halitim A., 1985 - Contribution à l'étude des sols des zones arides(Hautes plaines steppiques de l'Algérie). Morphologie, distribution et rôle des sels. Thèse: Univ de Rennes 384 p.
- Halitim A., Robert M., Tessier D., et Prost R., 1984 - Influence des cations échangeables (Na⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺) et de la concentration saline sur le comportement physique (rétention en eau, conductivité hydraulique) de la montmorillonite. *Agronomie*, 4-5, 451-459.
- Job J-O., 1992 - les premiers aménagements hydroagricoles en Mésopotamie et les problèmes de sels. L'aridité, une contrainte au développement, caractérisation, réponses biologiques, stratégies des sociétés. éd. ORSTOM, Paris, pp 473-480.
- Keren R. , et O'Connor G. A. , 1982 - Gypsum dissolution and sodic soil reclamation as affected by water flow velocity. *Soil sci. soc. Am.* 46: 726-732.
- Keren R., et Singer M. J.,-1988 - Effet of low electrolyte concentration on hydraulique conductivity of sodium/calcium-Montmorillonite-sand system. *Soil sci. soc. Am. J.*, 52 :368-373.
- McNeaL B. L. et Coleman N. T., 1966 - Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity. *Soil sci. Am. porc.*30 : 308-312.
- Michel J. C., Beaumont A., and Tessier D., 1998 - A method for measuring the isotropic character of soil swelling in laboratory. *E. J. S. S.* (soumis).
- Michel J. C., 1993 - Les sols dans les écosystèmes continentaux. Mémoire de DEA, pédologie. Univ. de Nancy, I. N. R. A., Versailles éd., 58 p.
- Métral F., 1997 - Périmètres irrigués d'état sur l'Euphrate syrien : mode de gestion et politique agricole. L'homme et l'eau IV : L'eau dans l'agriculture, tome 14, lyon, pp 111-145.
- Monnier G., Stengel P., et Fies J.C., 1973 - Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Ann. Agron.*, 24, 5 : 533-545.
- Muir A., 1951 - Note on the soils of Syria. *J. Soil sci*, 2, 2 : 162-182.
- Pupisky H., et Shainberg I., 1979 - Salt effects on the hydraulique conductivity of a sandy soil. *soil sci. soc. Am. J.* 43 : 429-433.
- Richards L.A., 1947 - A pressure membrane apparatus construction and use. *Agric. Eng.*, 28 : 451-454.
- Robert M., 1975 - Principes de détermination qualitative des minéraux argileux à l'aide des rayons X. *Ann. Agron.* ,26, 4 : 363-399.
- Robert M., et Tessier D., 1974 - Méthode de préparation des argiles des sols pour des études minéralogiques. *Ann. Agron.* 25, 6 : 859-882.
- Tavares-Filho J., 1994 - Organisation et comportement de latosols du Parana (Brésil), influence de leur mise en culture. Thèse pédologie. Univ. de Nancy , I. N. R. A. éd., 231p.
- Tessier D., 1975 - Recherche expérimentale sur l'organisation des particules dans les argiles. Thèse Ing. : C N A M, Paris, 230 p.
- Tessier D., 1984 - Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Thèse Docteur ès Sci. Univ. Paris VII, I. N. R. A. éd., 361 p.
- Tessier D., et Berrier J., 1979 - Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude des sol. *Science du Sol*, 1 : 67-82.
- U. S. Salinity Laboratory Staff, 1954 - Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U. S. D. A. hand book n°60, 160 p.