
Soumis le : 16 Avril 2011
 Forme révisée acceptée le : 18 Mai 2012
 Email de l'auteur correspondant :
 bradai.hamid@gmail.com

Evolution géochimique de la solution des sols irrigués par les eaux à alcalinité résiduelle positive en conditions contrôlées. Application au Bas-Chélif

Abdelhamid BRADAÏ^a, Abdelkader DOUAOUI^b

a. Laboratoire Eau et Environnement, Institut des Sciences Agonomiques, Université Hassiba BENBOUALI de Chlef (Algérie).

b. Laboratoire de production Agricole et Préservation Durable de la ressource naturelle, Institut de Sciences de la nature et de la terre, Université de Khemis Miliana (Algérie)

Résumé

Le présent travail porte sur l'étude de l'évolution géochimique de la solution des sols au contact d'une eau à alcalinité résiduelle positive, en vue de prédire leur voie de salinisation et leur dégradation structurale sous l'effet de la concentration de l'eau par évaporation. Deux textures de sols, l'une équilibrée (S1) et l'autre argileuse (S2), sont distribués dans des pots fabriqués au laboratoire avec des tubes en PVC de 5 cm de diamètre et 12 cm de hauteur. L'eau à alcalinité résiduelle positive ($E : RSC > 0$) est apporté aux pots jusqu'à sur saturation du sol puis, et après 24 heures, l'excès d'eau est ressuyée naturellement pour que le sol arrive à sa capacité de rétention. La différence de poids entre le pot mouillé et sec détermine le volume d'eau nécessaire pour ramener le sol à sa capacité au champ. L'évaporation totale de ce volume d'eau ramené est un facteur de concentration (FC). La solution du sol contenue dans les pots est extraite en vue d'une analyse chimique. Quinze facteurs de concentration ont été réalisés. Il apparaît qu'au fur et à mesure que les eaux se concentrent, il y a précipitation des ions calcium et magnésium et un accroissement de la molalité du sodium dans la solution du sol. L'augmentation des facteurs de concentrations entraîne la désorption de l'ion sodium du complexe d'échange sous l'effet de l'épuisement des éléments de grandes solubilités (Ca et Mg). Il a été ainsi observé une augmentation du SAR, notamment pour les sols à texture argileuse, ce qui a conduit à la destruction de la structure.

Mots clés : géochimie ; solution du sol ; alcalinité résiduelle ; SAR ; dégradation des sols

Abstract

This paper studies the geochemical evolution of the soil solution in contact with water irrigation of a positive residual Alkalinity, in order to predict their salinization path and structural degradation under the effect of water concentration by evaporation. Two soil textures, one equilibrated (S1) and the other is clay (S2), are distributed in pots made by PVC tubes of 5 cm diameter and 12 cm high in the laboratory. The water with a positive residual alkalinity ($E: RSC > 0$) is brought up to pots till soil is oversaturated then, after 24 hours, the water excess is shipping dry naturally and the soil reaches his retention capacity. The weight difference between the wet pot and the dry one gives the necessary water volume to push the soil into his field capacity. The total evaporation of the brought volume water is the concentration factor (CF). Soil solution contained in the pots is extracted for chemical analysis. Fifteen concentration factors were performed. As far as the waters are concentrated, the calcium and magnesium ions were precipitates and an increase in the sodium molality in the soil solution. The increase of the concentrations factors leads to the desorption of sodium ion to the exchange complex under the effect of depletion of elements with big solubility's (Ca and Mg). It was thus observed an increase in the SAR, especially for clayey soils, which led to the destruction of the structure.

Keywords: geochemistry, soil solution, residual alkalinity, SAR, soil degradation

1. Introduction

La composition chimique des solutions naturelles dépend de trois principaux facteurs : la dissolution des

minéraux primaires, l'évolution ou la dilution des solutions et la néoformation de minéraux secondaires par précipitation lors d'une évaporation [1]. De ce fait, si une eau est mise en contact avec des minéraux du sol, de nombreuses réactions chimiques se produisent tant à

l'intérieur de la phase aqueuse qu'entre la solution du sol et les minéraux.

Dans la plaine du Bas-Chélif (nord-ouest Algérien), en plus du déficit pluviométrique qui sévit depuis plusieurs années, la pénurie d'eau de surface s'est aggravée suite au transfert vers des villes côtières des eaux initialement destinées à l'irrigation [2]. Par ailleurs, la dégradation du réseau collectif ne permet pas à tous les agriculteurs d'accéder à l'eau d'irrigation. Ces conditions ont favorisé un recours accru des agriculteurs à la nappe permettant de sécuriser l'accès à l'eau et une gestion plus flexible des irrigations. Ces eaux sont caractérisées, en majeure partie, par une molalité de carbonate supérieure à la somme de la molalité des cations divalents (Ca et Mg) et une faible salinité [3] ou couramment appelé alcalinité résiduelle positive. En théorie, une eau à alcalinité résiduelle positive est marquée par une faible salinité et une molalité de carbonates supérieure à celle de la somme des ions divalents, en particulier Ca et Mg [4][5]. Si cette dernière est mise en contact avec un sol soumis à une évaporation, tous les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} apportés par l'eau précipiteront dans le sol sous forme de carbonates de calcium et de magnésium, l'excès de carbonates sera présent sous forme de carbonates et de bicarbonates de sodium dissous. Au fur et à mesure, l'excès de carbonates apportés va aussi précipiter le calcium et le magnésium échangeable du sol, jusqu'à ce que le complexe adsorbant soit presque ou complètement saturé par les cations monovalent en particulier en sodium [5]. L'addition continue d'eau d'irrigation finira par causer une accumulation de carbonates de sodium, entraînant ainsi une sodisation probable pour ces sols dont le résultat final est une dégradation physique. Ce concept d'alcalinité résiduelle a été introduit par Eaton, (1950) [3], sous le terme Résiduel sodium carbonates (RSC). Elle est calculée en soustrayant à l'alcalinité carbonatée les équivalents de cations divalents. Elle est le plus souvent considérée par rapport à la

précipitation de la calcite et de la sépiolite [5]. Le RSC est calculé comme suit :

$$RSC = Alc. - (Ca + Mg) \dots \dots \dots mmol_e / L \dots \dots \dots (1)$$

Les objectifs de ce travail sont : (i) simuler l'évolution de la solution des sols au contact d'une eau à alcalinité résiduelle positive ($RSC > 0$), (ii) identifier le devenir salin des sols irrigués par ces eaux, qui sont caractérisées par une faible salinité très demandée par les gestionnaires, et (iii) élucider le danger sur la dégradation physique des sols irrigués pour mieux préserver les aptitudes agronomiques de ces derniers.

2. Matériels et méthodes

2.1. Présentation des sols

Deux types de sols sont utilisés : le premier sol « S1 », de texture équilibrée, provient du périmètre d'Ouarizane, le deuxième « S2 », argileux, est issu d'une parcelle de H'madna. Les échantillons S1 et S2 ont été choisis à partir de la carte pédologique établie par McDonald et BNEDER, (1990), [6]. La composition chimique de la solution des sols S1 et S2 est montrée au tableau I.

2.2. Présentation de l'eau d'irrigation

L'eau utilisée (E) provient directement d'un forage utilisé habituellement en irrigation dans le périmètre irrigué du Bas-Chélif. Ce choix est basé essentiellement sur le signe de l'alcalinité résiduelle qui est positif ($RSC > 0$), objet de cette étude. La projection de E sur le diagramme de RIVERSIDE a montré qu'elle appartient à la classe C3S1, qui présente un danger de salinité modéré et un faible pouvoir alcalinisant sur le sol irrigué [7]. Les caractéristiques chimiques de l'eau (E) sont présentées dans le tableau II.

Tableau I :

Composition chimique des solutions des sols S1 et S2

paramètres	CE	pH	Ca	Mg	Na	Cl	SO ₄	HCO ₃
Unité	dS/m		mmol _e /L					
S1	3,51	7,84	10,2	5,36	24,24	8,4	20,54	4,4
S2	7,6	7,23	8,02	5,94	59,6	34,4	42,43	4

Tableau I :

Paramètres chimiques de l'eau utilisée.

paramètres	CE*	pH	Ca	Mg	Na	Cl	SO ₄	HCO ₃	SAR*	RSC**
Unité	dS/m		mmol _e /L						(mmol _e /L) ^{0,5}	mmol _e /L
E	1,4	8,20	2,28	1,57	7,92	5,40	1,20	5,95	5,72	2,10

$$*SAR = Na / \sqrt{(Ca + Mg) / 2} \dots (mmol_e / L)$$

$$**RSC = Alc. - (Ca + Mg) \dots mmol_e / L$$

2.3. Présentation du dispositif

Les pots utilisés ont un diamètre de 5 cm et une hauteur de 12 cm, soit un volume d'environ 230 cm³ (fig. 1a). Ces pots ont été fabriqués à partir de morceaux de PVC dont la partie inférieure est obstruée à l'aide

d'une toile. Ils sont remplis de 200 g de sol. Pour éviter le colmatage des pots, nous avons garni leur fond de gravier (fig. 1).

2.4. Protocole de mesure.

L'eau et le sol sont ramenés à l'équilibre. Au départ, on apporte une quantité d'eau supérieure de 4 à 5 fois l'espace interstitiel du contenu des pots. Après 24 heures de ressuyage, le sol est à sa capacité au champ, ce qui est considéré comme un état initial. La différence entre le poids du pot après ressuyage et avant irrigation détermine la quantité d'eau nécessaire pour ramener le sol à sa capacité de rétention.

L'eau évaporée est mesurée par la méthode de la double pesée. Notre but, ici, est d'évaporer l'eau et d'apporter la même quantité perdue dans la journée. Une fois le pot ramené à sa capacité au champ, nous avons alors un facteur de concentration (FC). L'opération est réalisée tout en évitant le lessivage des sels (en évitant le déclenchement du drainage). Une fois chaque facteur de concentration atteint, un pot est détruit pour que le sol soit analysé.

On a retenu 15 facteurs de concentration, qui sont jugés suffisants pour caractériser les tendances évolutives des processus de salinisation des sols irrigués. L'eau (E) irrigue 15 pots pour un même type de sol. Comme il y a deux essais, le nombre de pots est de 30. Un pot est rajouté pour l'état de mise à l'équilibre afin de pouvoir caractériser l'état initial de l'eau (E) avec les sols S1 et S2. La figure 1b montre la répartition des pots dans le dispositif expérimental.

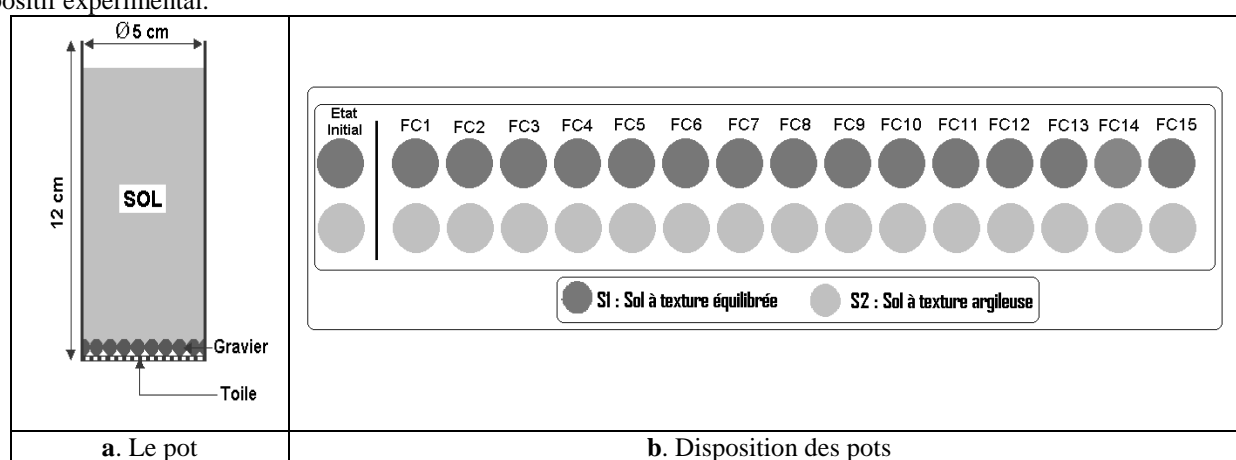


Fig. 1. Dispositif expérimental

3. Résultats

3.1. Evolution du sol à texture équilibrée (S1)

Les évolutions géochimiques de Ca et Mg, relatives à la formation de calcite et de la sépiolite, sont représentées sur la figure 2a, qui montre qu'il y a effectivement précipitation du Calcium et du Magnésium. L'éloignement des points de la courbe d'équilibre est révélateur de la précipitation de ces deux éléments. Les carbonates (fig. 2b) suivent la même tendance que Ca et

2.5. Protocole d'analyses.

Dans notre travail, nous avons réalisé deux suivis : un suivi géochimique des sols irrigués et un autre relatif à la stabilité structurale.

Après récupération du sol du pot constituant un facteur de concentration, il est séché à l'air libre, une quantité est tamisée à 2 mm pour procéder à l'extraction de la solution du sol par le procédé de la pâte saturée. Les agrégats sont utilisés pour le suivi de la stabilité structurale.

La solution du sol récupérée, relative à un facteur de concentration donné, fera l'objet de plusieurs analyses. On détermine d'abord la conductivité électrique (CE), puis les anions : chlorures (Cl^-), sulfates (SO_4^{2-}), carbonates et bicarbonates (CO_3^{2-} , HCO_3^-), et enfin les cations : calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}) et sodium (Na^+).

2.6. Présentation des résultats géochimiques

Les diagrammes de la concentration ionique, issus de l'analyse de la solution du sol, sont représentés par rapport aux chlorures (Cl^-). L'ion chlorure est utilisé à la fois comme traceur et indicateur du facteur de concentration par rapport à l'eau de contact (E).

Mg, ce qui confirme la précipitation des trois éléments (Ca, Mg et HCO_3^-) sous forme de calcite et de sépiolite.

Contrairement aux ions divalents (Ca et Mg), le Na présente un accroissement de molalité. La figure 2c illustre l'évolution du sodium, qui ne précipite pas et reste dans la solution du sol. Ce taux de sodium, s'élevant dans la solution du sol, a eu des répercussions directes sur le SAR, dont la valeur passe de 5,4 à près de 13 (mmol_c/L)^{0,5}.

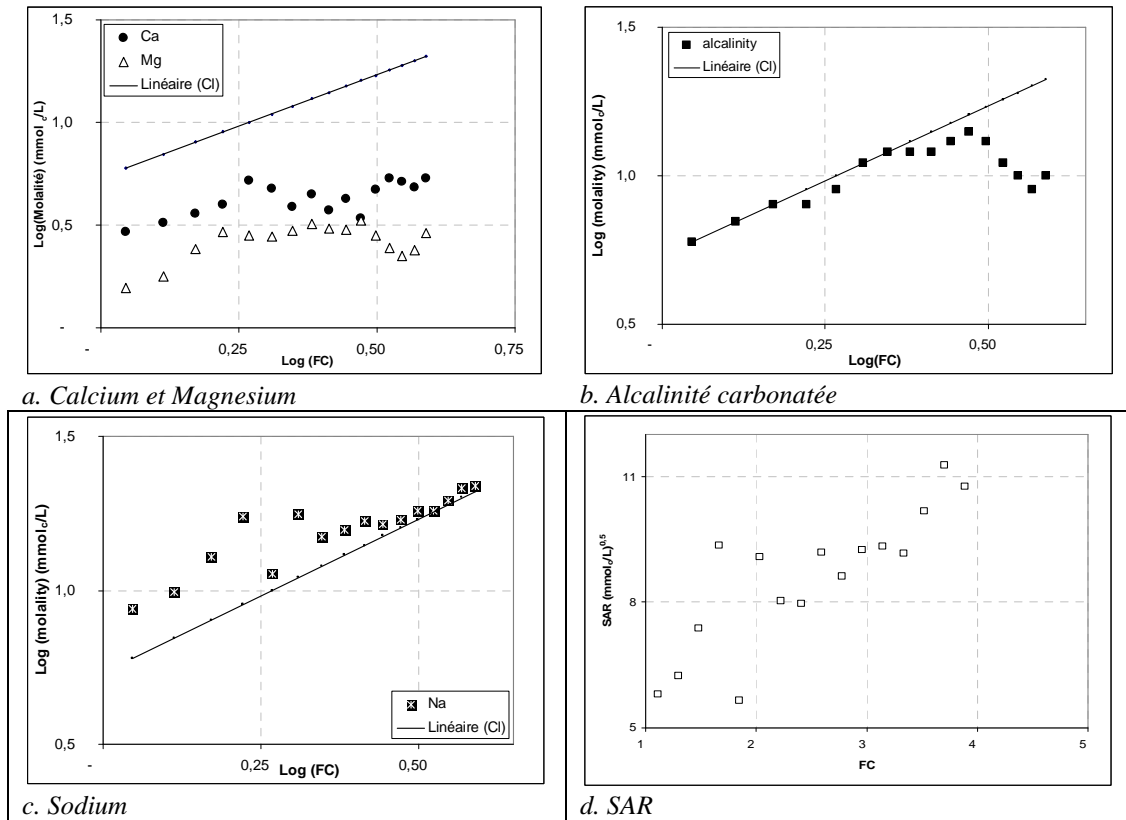
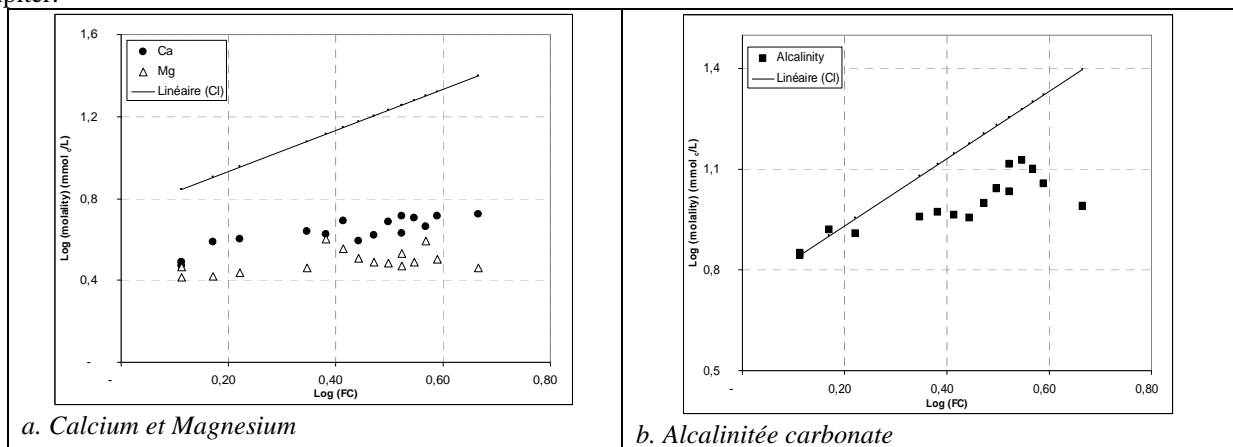


Fig.2. Diagramme de concentration ionique de la solution du sol S1 au contact d'une eau à alcalinité résiduelle Positive (E).

3.2. Evolution du sol à texture argileuse (S2)

Le sol à texture argileuse présente la même évolution que celle du sol à texture équilibrée (S1) (fig. 3). Cette ressemblance se situe surtout au niveau de la précipitation de la calcite et sépiolite comme le montre la figure 3a. L'éloignement des points sous la courbe d'équilibre est révélateur de la précipitation de Ca^{2+} et Mg^{2+} dans la solution. C'est également le cas pour les carbonates (fig. 3b), qui évoluent suivant les chlorures avant de précipiter.

Le sodium, dans ce cas, évolue aussi sans précipiter mais différemment du sol S1 (fig. 2c). La molalité de l'ion sodium est beaucoup plus importante que dans le cas du sol précédent (S1) (fig. 3d). La valeur du SAR ainsi obtenue pour le sol à texture argileuse (S2) est nettement plus élevée que celle du sol à texture équilibrée (S1), avec une valeur dépassant de quatre fois la valeur initiale, soit : $22,63 \text{ (mmol}_e/\text{l})^{0,5}$.



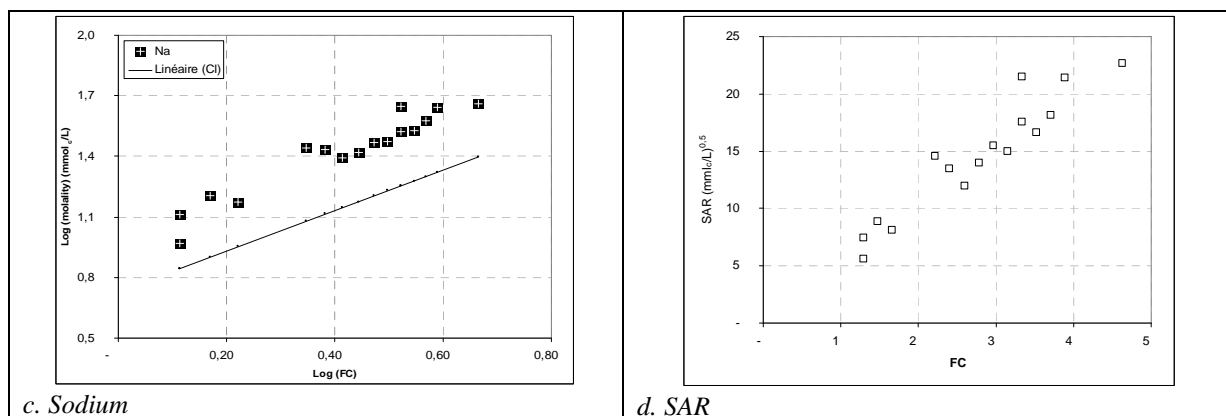


Fig. 3. Diagramme de la concentration ionique de la solution du sol S2 au contact d'une eau à alcalinité résiduelle positive (E).

4. Discussion

L'analyse des diagrammes présentés montre un accroissement du sodium dans la solution du sol et une précipitation des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} dans les deux d'étude. Ces résultats rendent plausible l'hypothèse de l'adsorption du sodium, et de la désorption du calcium et du magnésium pour neutraliser l'alcalinité au travers de la précipitation de la calcite et de la sépiolite [8],[10], [11]. Ces évolutions sont caractéristiques de la voie alcaline de la salinisation (alcalinisation) et une sodisation par la suite [3], [5], [12].

En général, l'évaluation du risque de sodicité et d'alcalinité d'une eau d'irrigation est estimée par le SAR. Ce paramètre, introduit par Richards (1954) [13], est souvent critiqué d'une part, par son calcul qui se fait par des concentrations statiques, ce qui ne prend pas en compte l'évolution géochimique de l'eau [8], [11] et d'autres parts, son évaluation est faite sur les eaux d'Amérique du Nord uniquement qui présentaient des signes d'alcalinité résiduelle négative ce qui est pas le cas des régions semi-arides et arides où l'alcalinité résiduelle pourrait être positive [8]. Le calcul du SAR ajusté au lieu du SAR [14], [15] a également été utilisé dans le but de tenir compte de l'effet des carbonates par la formule théorique pHc :

$$SAR_{aj} = SAR [1 + 8,4 - pHc] \dots\dots\dots (2)$$

Où pHc correspond à la valeur du pH que doit avoir l'eau pour dissoudre les carbonates de calcium [14]. L'approche considère que la solution est en équilibre avec la calcite alors que la formation de ce minéral peut continuer si, toutes fois, la molalité des carbonates reste importante. Ce qui fait qu'il ne prend pas en compte la manière d'évolution au cours du processus de concentration et le risque de sodicité reste sous-estimé en utilisant cet indicateur dans les cas où les solutions évoluent vers la voie alcaline [10], [11].

L'effet de l'eau à alcalinité résiduelle positive a conduit à une évolution vers la voie saline alcaline des deux types de sol, avec toutefois une évolution plus marquée pour le sol argileux, où le SAR a atteint de fortes

valeurs. Cela peut s'expliquer par la CEC élevée des sols argileux, qui ont la capacité de retenir plus de cations, notamment le sodium [8].

L'accroissement du SAR, en particulier pour les sols argileux, n'est pas sans conséquences sur la dégradation physique des sols. En effet, l'évolution de l'état structural des sols traités par chaque type d'eau a été suivie en mesurant la stabilité structurale. Le test d'humectation rapide, selon la méthode de *Le Bissonais* (1995) [16], [17], a été retenu pour réaliser le suivi sur les pots à facteurs de concentration 1, 5, 10 et 15, en plus de la mesure de l'état initial du sol (sans traitement). Cette dernière mesure est réalisée dans le but de comparer l'état final à l'état initial (fig. 4).

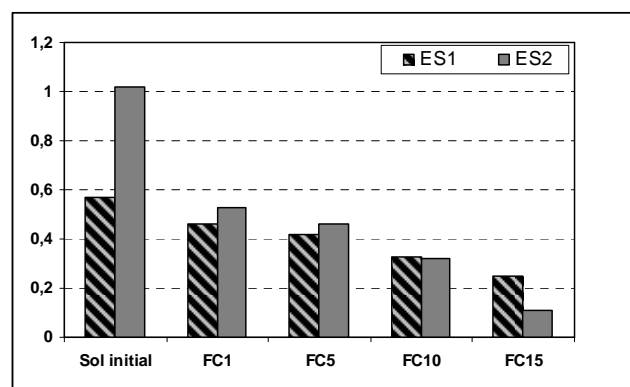


Fig. 4. Évolution structurale des sols S1 et S2 sous l'effet de (E)

L'eau à alcalinité résiduelle positive a un effet destructif sur les deux textures traitées, ceci est d'autant plus visible que le facteur de concentration augmente. Ce type d'eau a un effet beaucoup plus dégradant pour les sols à texture argileuse, qui montrent une stabilité structurale plus faible aux facteurs de concentrations élevés, et ce, malgré une meilleure stabilité structurale de ce type de sol à l'état initial.

Cette importante dégradation structurale de la texture argileuse, sous l'effet de ce type d'eau, peut être expliquée à la fois par : (i) le signe positif du RSC de l'eau dont l'évolution géochimique permet une concentration élevée

en Na de la solution du sol ; (ii) La CEC élevée, en présence d'argile, est dominée par le Na, ce qui permet d'aboutir à un ESP élevé ; (iii) une salinité plus faible, avec ses conséquences sur la double couche diffuse [5], [10], [18].

5. Conclusion

Les résultats obtenus montrent que la concentration d'une eau à alcalinité résiduelle positive entraîne une augmentation du SAR, à la fois dans les sols à texture équilibrée ou argileuse, alors qu'elles ne montrent pas de risque de sodisation selon les méthodes de classification classiques (telle que celle de Richards (1954) [18]). L'alcalinité résiduelle (RSC) constitue un indicateur de la qualité des eaux d'irrigation, alors que le SAR peut ne pas l'être dans certains cas particuliers, c'est-à-dire lorsque le signe du RSC est positif.

En plus de la qualité des eaux d'irrigation, la nature du sol est un facteur déterminant dans le processus de salinisation des sols. En effet, il a été trouvé que les eaux à alcalinité résiduelle carbonatée positive ($RSC > 0$) ont un effet plus marqué sur l'augmentation du SAR lorsque la texture est argileuse.

Enfin, la dégradation des propriétés physiques des sols est imputable à ces eaux, qui altèrent la stabilité structurale suivant les facteurs de concentration. Dans ce cas, également, l'action des eaux à alcalinité résiduelles positive a un effet plus marqué sur le sol à texture argileuse.

Références

- [1] Zouggari H., (1996). Modélisation des interactions ioniques dans les solutions concentrées d'électrolytes à partir de l'étude expérimentale de la solubilité des sulfates de sodium et de magnésium. Application aux saumures et aux sols salés en zone aride. Thèse de Doc. ENSA, Rennes (France). 184p.
- [2] Bouarfa S., Marlet S., Douaoui A., Hartani T., Mekki I., Ghazouani W., Ben Aïssa I., Vincent B., Hassani F. and Kuper M. Salinity patterns in irrigation systems: A threat to be demystified, a constraint to be managed: Field evidence from Algeria and Tunisia, *Irrigation and Drainage* 58 (2009) 273-284.
- [3] Eaton, F.M., (1950). Significance of carbonates in irrigation waters. *Soil Sci.* 69, 123-133.
- [4] Al Droubi A. (1976). Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad. PhD Thesis, University of Strasbourg.
- [5] Marlet S., et Job J.O., (2006). Processus et gestion de la salinité des sols. In : Tiercelin, J.R. *Traité d'irrigation*, seconde édition. Tec. et Doc. Lavoisier. pp.797 – 822.
- [6] McDonald et BNEIDER, 1990. Etude de l'avant-projet détaillé des extensions de Guerouaou et de Sebket Benziene et du réaménagement du Bas-Chélif.
- [7] Richards, L.A., (1954). *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. USDA Agricultural Handbook 60, Washington, 160 pp.
- [8] Cheverry C., (1974). Contribution à l'étude pédologique des polders du lac Tchad. Dynamique des sels en milieu continental subaride dans les sédiments argileux et organiques. Thèse. Sciences, U.L.P. Strasbourg, 257 p.
- [9] Cheverry J. C. et Bourrie G., (1995). La salinisation des sols. "Sols C2 : interfaces fragiles". 3^e Partie : Conséquences de l'utilisation des sols par l'homme. Co-édition INRA/Nathan, 24 p.
- [10] Prasad A., D. Kumar, Singh D.V., (2001). Effect of residual sodium carbonate in irrigation water on the soil sodication and yield of palmarosa (*Cymbopogon martinii*) and lemongrass (*Cymbopogon flexuosus*). *Agricultural Water Management* 50 (2001). 161-172.
- [11] Barbiero L., Vallès V. et Cheverry C., (2004). Reply to J.W. Van Hoorn "Some observations with respect to sodicity hazard of irrigation waters". Letter to the Editor. *Agricultural Water Management* 68 : 177-184.
- [12] Barbiero L. et Valles V., (1992). Aspects géochimiques de l'alcalinisation des sols dans la vallée du Dall101 Bosso (République du Niger). *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXVII, no 2, 1992 : 143-152.
- [13] Richards L.A, *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. USDA, in: *Agricultural Handbook* 60, Washington, (1954), p. 160.
- [14] Suarez, D.L., (1981). Relations between pHc and sodium adsorption ratio (SAR), and an alternative method for estimating SAR of soil and drainage waters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45, 469-475.
- [15] Ayers, R.S., Westcot, D.W., 1985. *Water Quality for Agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper 29. Rome, 174 pp.
- [16] Le Bissonnais Y. et Le Souder Ch., (1995). Mesure de la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Etude et Gestion des Sols*, 2, 1, pp 43 – 55.
- [17] Le Bissonnais, Y.; (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*.
- [18] Condom N., (2000). Analyse et modélisation couplée des processus hydrogéochimiques de la salinisation des sols. Application aux sols rizicoles irrigués de l'Office du Niger (Mali). Thèse Doctorat, Ecole National Supérieur d'Agronomie de Montpellier. 240p.