

Le concept d'alcalinité résiduelle et évolution géochimique des processus. Application aux sols salés du lac Fetzara (Nord-Est algérien).

Rachid Djamaï¹, Djamel Fadel¹, Aziz Laïfa¹, Mohamed Benslama¹,
Youcef Daoud², & Vincent Vallès³

¹⁾ Laboratoire de Biologie Végétale et Environnement, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie.

²⁾ Ecole Nationale Supérieure Agronomique, Avenue Hacène Badi, El-Harrach, Alger, Algérie.

³⁾ Laboratoire d'Hydrogéologie, UAPV, 74 rue Louis Pasteur, F84000, Avignon, France.

Accepté le : 07/09/2011

ملخص

النتائج المحصلة على ترب بحيرة فزارة، تشير أن القلوية المتبقية كالسيت (ARC) تقل عندما تتركز المحاليل؛ نجدها قليلا سالبة في البداية لتصبح أكثر وضوحا فيما بعد في العينات الأكثر تركيزا. الكالسيوم يسود على القلوية، إنها الطريق الملحية المحايدة. نجدها تتطور في نفس المسار، لأنها ، ARC+g تقل عندما تتركز المحاليل تكون قليلا موجبة في البداية، ثم تصبح سالبة عندما يزيد تركيز المحلول، إنها كذلك الطريق الملحية المحايدة. يمكن أن يفسر بتثبيت قلب إشارة RC+g من الموجب إلى السالب يكون مربوط بظواهر تبادل بين المحلول و معقد ادمصاص التربة. بعكس ARC لتبين أهم المسارات الجيوكيميائية Na^+ ، K^+ و Mg^{2+} وتحرير Ca^{2+} . التطور نحو الإشارة السالبة من ARC+g و ARC معقد ادمصاص الدراسة الاحصائية عن طريق تحليل المكونات الأساسية تركيز محاليل التربة تحت تأثير التبخر (ACP) المسؤولة عن تطور الملوحة بتوضيح أن المكتف، الذي يسود المنطقة، يعتبر الظاهرة الأساسية. مساران أقل أهمية من الأول، يستحقان الاهتمام في هذا الوسط المشبع بالماء في أغلب الأحيان، يمكن أن تكون ظواهر التبادلات الأيونية بين محلول التربة و معقد ادمصاص من جهة و مسارات الاكسدة و الارجاع من جهة أخرى.

الكلمات المفتاحية: تربة مالحة - مسارات جيوكيميائية - قلوية متبقية - كالسيت - جيس - ACP .

Résumé

Les résultats obtenus sur les sols du lac Fetzara montrent que l'alcalinité résiduelle calcite (ARC) diminue lorsque les solutions se concentrent. Elle est légèrement négative au départ pour devenir plus franche par la suite dans les échantillons les plus concentrés. L'alcalinité est dominée par le Ca^{2+} , c'est la voie saline neutre. Concernant l'alcalinité résiduelle généralisée calcite+gypse (ARC+g), elle évolue également dans le même sens, puisqu'elle diminue lorsque les solutions se concentrent. Mais contrairement à ARC, ARC+g est légèrement positive au départ, puis devient négative au fur et à mesure que la concentration de la solution augmente, c'est également la voie saline neutre. L'inversion du signe de ARC+g serait attribuée à des phénomènes d'échange entre la solution et le complexe adsorbant du sol. L'évolution vers le signe négatif de ARC et ARC+g peut être expliquée par la fixation du complexe argilo-humique du Na^+ , K^+ et Mg^{2+} et libération de Ca^{2+} . L'étude sur l'approche statistique établie à partir de l'ACP afin de déterminer les principaux processus géochimiques responsables de l'évolution de la salinité, montre que la concentration des solutions de sols sous l'effet de l'intense évaporation qui caractérise la région est le principal phénomène. Deux autres processus de moindre importance par rapport au premier, méritent d'être confirmés dans ce milieu très souvent saturé d'eau, il s'agirait certainement des phénomènes d'échanges ioniques entre la solution du sol et le complexe adsorbant et les processus d'oxydo-réduction.

Mots clés : Sols salés - Processus géochimiques - Alcalinité résiduelle - Calcite - Gypse - ACP.

Abstract

The results obtained on the grounds of the lake Fetzara soils show that the residual calcite alkalinity (ARC) decreases when the solutions concentrate. It's slightly negative at first to become more obvious afterward in the most concentrated samples. The alkalinity is dominated by Ca^{2+} it is the neutral salt way. Concerning the generalized residual alkalinity calcite+gypse (ARC+g), it also evolves in the same sense, because it decreases when the solutions concentrate. But contrary to ARC, ARC+g is slightly positive at first, then becomes negative as the concentration of the solution increases, it is also the neutral salt path. The inversion of the sign of ARC+g

Auteur correspondant : djamaï_rachid@yahoo.fr

would be attributed an exchange phenomenon between the solution and the complex adsorbing of the ground. The evolution of ARc and ARc+g to the negative sign could be explained by the fixation of the argilo-humic complex of Na^+ , K^+ and Mg^{2+} and liberation of Ca^{2+} . The study on statistical approach set from the PCA in order to define the principal geochemical process responsible for the evolution of the salinity, shows that the soil's solutions concentration under the effect of the intense evaporation, typical of the area, is the principal phenomenon. Two other processes of minor importance compared to the first, worth to be confirmed in this environment mostly saturated by water, it could concern certainly phenomenon of ionic exchanges between the soil's solution and the adsorption complex and the oxydo-reduction process.

Keywords: Salty grounds- Geochemical process- Residual alkalinity- Calcite- Gypsum- PCA.

1. INTRODUCTION

La salinisation est une résultante globale de plusieurs processus géochimiques et hydrologiques qui se produisent dans les sols. Ces processus dépendent de l'environnement physique et bio-géochimique ainsi que des pratiques hydro-agricoles [1, 2]. La salinisation est considérée comme un processus général regroupant trois grands types de phénomènes, la salinisation neutre, la salinisation alcaline ou alcalinisation et la sodisation. Ces trois mécanismes peuvent apparaître lorsque la solution du sol se concentre, son faciès chimique déterminera alors la voie empruntée, soit la voie saline neutre ou soit la voie alcaline. La sodisation est une résultante de ces deux dernières et traduit le phénomène de fixation d'ions sodium sur le complexe adsorbant du sol [3].

Les critères de qualité d'une solution sont en général la conductivité électrique (CE) et le pourcentage de sodium adsorbé (SAR). Mais ces deux paramètres sont de moins en moins utilisés car on leur préfère actuellement le concept d'alcalinité résiduelle qui permet de prévoir l'évolution géochimique des solutions durant leur concentration par évaporation et estimer le sens de l'évolution, soit vers une voie saline neutre ou vers une voie alcaline [4, 5]. L'alcalinité résiduelle calcite (ARc) d'une solution est définie comme étant la différence entre l'alcalinité carbonatée et la quantité de calcium (1) :

$$\text{Alcalinité résiduelle calcite (ARc)} = \text{Alcalinité carbonatée} - \text{Ca}^{2+} \text{ (}\mu\text{g/l)} \quad (1)$$

En effet lorsqu'une solution se concentre et atteint le point de saturation avec la calcite, il y a deux évolutions possibles :

- Si la quantité de $\text{Ca}^{2+} >$ alcalinité carbonatée ; $\text{ARc} < 0$: c'est la voie saline neutre.
- Si la quantité de $\text{Ca}^{2+} <$ alcalinité carbonatée ; $\text{ARc} > 0$: c'est la voie alcaline.

Le concept de ARc a été étendu par la suite à la précipitation successive de plusieurs minéraux à la fois [6, 7], c'est ce qu'on appelle l'alcalinité résiduelle généralisée (ARG). Les eaux du lac Fetzara sont soumises à une évaporation très intense pendant la période estivale et ont tendance à se concentrer provoquant ainsi la salinisation des sols pouvant être accompagnée d'une alcalinisation du complexe adsorbant, pour ce dernier cas l'utilisation des sols à des fins agricoles peut devenir très problématique même à faibles facteurs de concentration des solutions [8, 9].

L'objectif de cette étude est d'utiliser un modèle appelé «AQUA» qui permet de prédire par simulation la voie de l'évolution géochimique des solutions de sol du lac Fetzara à partir de leur composition chimique, de ARc et ARG (ARc+g) [10]. Pour cette dernière, c'est la calcite et le gypse qui ont été choisis, car ces deux minéraux sont non seulement abondants en milieux salés mais présentent également un côté très pratique en ayant un élément chimique commun (Ca^{2+}).

différentes sources de variation de la composition chimique des solutions, une analyse en composantes principales (ACP) a été conduite à partir de la matrice des corrélations. Cette méthode de traitement des données multi-paramètres permet d'étudier les sources indépendantes de la variabilité de tous les paramètres confondus et de hiérarchiser les processus qui prédominent dans ce milieu. Les valeurs propres recherchées permettent d'accéder aux axes factoriels présentant un maximum d'inertie [15].

3. Résultats et discussion

3.1. Approche géochimique

3.1.1 Diagrammes de concentration

Dans un milieu évaporitique littoral comme celui du lac Fetzara, le chlorure est un élément abondant et soluble ; il peut donc être utilisé comme traceur hydrochimique. Seuls les cas de faciès chimiques pauvres en Cl^- et affectés par de forts processus d'oxydo-réduction sont inadaptés à l'utilisation du chlorure comme traceur à cause des phénomènes de sorption ou de co-précipitation du chlorure par des oxydes et hydroxydes ferreux et ferriques [16]. Il est alors possible d'estimer un facteur de concentration (FC) global d'une solution par le rapport entre la teneur en Cl^- de cet échantillon et la teneur en Cl^- de l'échantillon le plus dilué.

Les calculs et les graphiques ont été réalisés pour l'ensemble des solutions de sols. Les diagrammes obtenus montrent une dispersion notable des points, ce qui signifie que les solutions de sols du lac Fetzara ne peuvent pas être considérées comme un système hydrochimique unique. Au delà du phénomène de salinisation par concentration des solutions, il existe une autre source de variabilité de la composition chimique (fig. 2).

Le Ca^{2+} augmente, mais moins fortement que Cl^- , cet écart montre que des ions Ca^{2+} sont soustraits à la solution de sol. L'évolution du Na^+ est quant à elle comparable au Cl^- , sauf pour les solutions diluées à cause de la fixation de cet

élément sur les argiles. Le K^+ est très stable car il est très contrôlé par les minéraux argileux [17]. Les SO_4^{2-} augmentent également puis ralentissent au même titre que le Ca^{2+} , ceci est dû certainement à la précipitation du gypse. L'alcalinité est stable et elle a même tendance à diminuer. Ce résultat conforte l'hypothèse de la précipitation de calcite avec alcalinité $< \text{Ca}^{2+}$, c'est-à-dire dans le cadre d'une alcalinité résiduelle calcite négative.

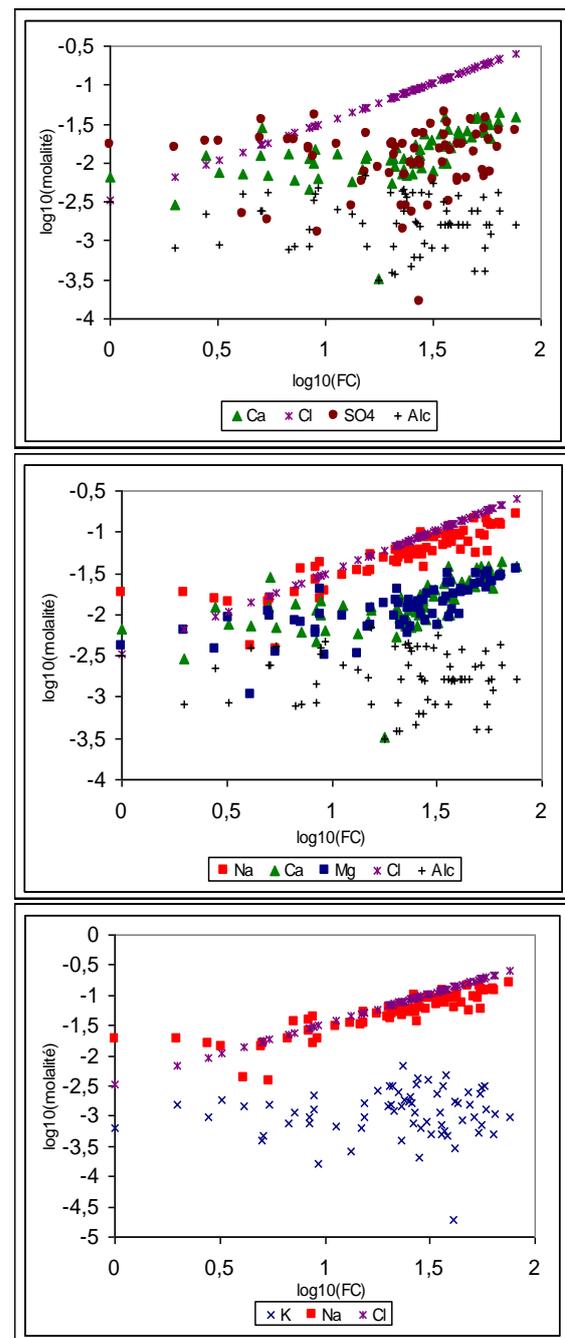


Figure 2. Diagrammes de concentration des solutions de sols (Traceur hydrochimique : Cl^-)

Par ailleurs, le nuage de points représentatifs des teneurs en alcalinité présente une très forte dispersion. Ce résultat traduit une forte variabilité des teneurs en CO_2 de ces solutions. Des processus d'oxydo-réduction sont donc probables dans ce système [18, 19, 20].

3.2 Alcalinité résiduelle calcite (ARc)

Lorsqu'une solution se concentre par évaporation et atteint le point de saturation avec la calcite, il y a deux évolutions possibles : si les équivalents de Ca^{2+} excèdent l'alcalinité carbonatée ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$) dans la solution, l'alcalinité va diminuer et la molalité en Ca^{2+} va continuer de croître aboutissant à une ARc négative (voie saline neutre) ; par contre si l'alcalinité est supérieure au Ca^{2+} , elle va continuer à augmenter et le Ca^{2+} va diminuer, dans ce cas la ARc est positive (voie alcaline). Selon le cas, la concentration des solutions mène à des sols salins neutres ou bien à des sols alcalins [6, 9, 21].

Dans le cas des solutions de sols du lac Fetzara, le diagramme montre que l'alcalinité résiduelle calcite (ARc) est d'une manière générale légèrement négative au départ dans les solutions les plus diluées, puis diminue et devient franchement négative par la suite dans les échantillons les plus concentrés indiquant ainsi l'intervention d'un processus géochimique pouvant changer le signe de l'alcalinité résiduelle calcite (fig. 3) ; il s'agirait probablement d'une réaction de précipitation de la calcite [14, 22]. Avec la précipitation de la calcite, la teneur en calcium devrait augmenter et l'alcalinité diminuer, ces variations sont confirmées par les diagrammes de concentration des solutions ainsi que la loi du «T» qui signifie que lorsque $\text{Ca}^{2+} > \text{alcalinité}$, c'est la voie saline neutre [23, 24]. Le calcium sera abondant sur le complexe adsorbant, les argiles resteront floculer et le milieu perméable. Ce cas est très fréquent sur les sols se développant sur des roches sédimentaires marines [25].

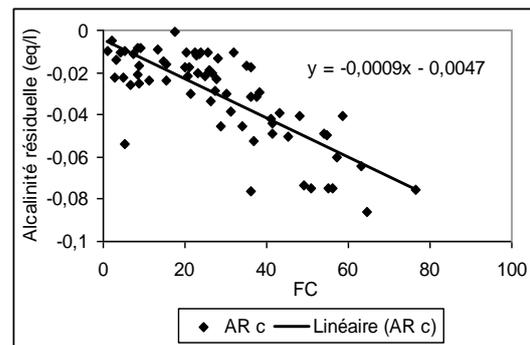


Figure 3. Evolution de l'alcalinité résiduelle calcite des solutions de sols.

3.3. Alcalinité résiduelle généralisée (ARc+g)

Ce concept est applicable à la succession des équilibres qui contrôlent la composition d'une solution lorsque sa concentration augmente au contact d'une source d'éléments minéraux.

La calcite et le gypse sont deux minéraux dont la précipitation successive permet de distinguer plusieurs phases dans l'évolution de la composition chimique des éléments dissous de la solution du sol [2, 7].

La présentation graphique de l'alcalinité résiduelle calcite+gypse (ARc+g) montre qu'elle est positive au départ, elle diminue ensuite et devient franchement négative lorsque les solutions de sols se concentrent (figure 4). Cette évolution ne peut être attribuée ni à la précipitation de la calcite ni à celle du gypse, qui ne survient qu'à partir du moment où l'état de saturation avec l'un des minéraux est atteint. L'inversion du signe de cette alcalinité résiduelle doit être attribuée à la désorption du Ca^{2+} par le complexe argilo-humique, au profit d'autres éléments, particulièrement des monovalents tel que le Na^+ . En effet, lorsque les solutions se concentrent, le Na^+ se fixe sur le complexe adsorbant en déplaçant le Ca^{2+} , ce qui modifie le signe de l'alcalinité résiduelle calcite + gypse [2, 23, 24].

D'une manière générale, lorsque l'alcalinité résiduelle calcite + gypse est positive au départ, comme dans le cas des

solutions les plus diluées, le signe de ce paramètre ne peut changer tant que n'intervient pas un processus de réaction autre que la précipitation ou la dissolution de la calcite ou du gypse. Ce résultat montre que probablement un autre processus impliquant Ca^{2+} , SO_4^{2-} ou encore l'alcalinité, intervenant dès le début de la concentration des solutions. Ce paramètre peut servir d'indicateur lors de la rencontre d'eaux ayant une origine très différente entrant en contact avec les sols [6].

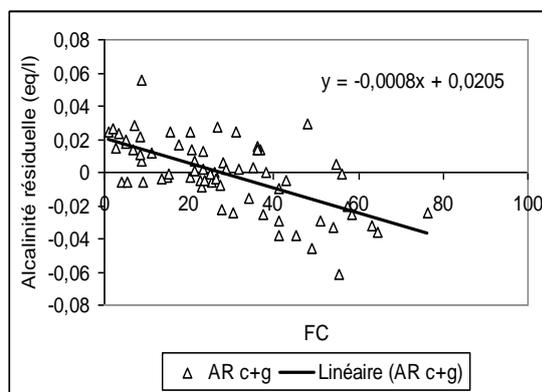


Figure 4. Evolution de l'alcalinité calcite+gypse des solutions de sols.

4. APPROCHE STATISTIQUE

4.1 Analyse en composantes principales (ACP)

L'étude statistique de l'ACP montre un premier axe factoriel représentant seul 41% de la variabilité totale, tous paramètres confondus ; c'est un processus important qui devrait être facilement identifié. Il est suivi ensuite par un second, un troisième et un quatrième axe avec respectivement des inerties sensiblement proches de 14%, 12% et 11%. Les autres axes, avec des pourcentages de variance inférieurs à 8% peuvent être considérés comme négligeables et portent probablement sur des imprécisions analytiques (fig.5).

Pour les sols du lac Fetzara, un mécanisme semble être prédominant pour la chimie

des solutions des sols, puis viennent ensuite trois processus à peu près d'égale importance. Il convient maintenant de tenter de déterminer quels sont ces processus ou sources de variation de la composition chimique des solutions des sols. Pour cela, les deux premiers plans factoriels seront examinés successivement.

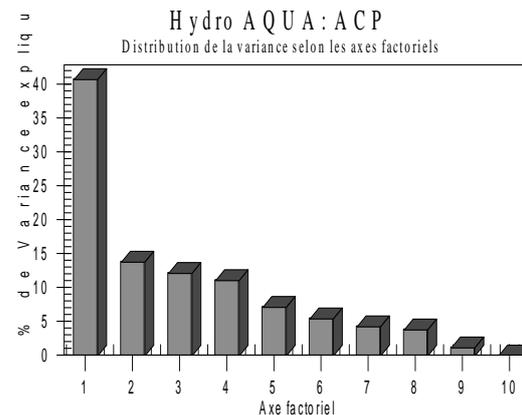


Figure 5. Taux de variance expliquée selon les différents axes factoriels.

4.1.1 Premier plan factoriel

Il comprend les axes factoriels N°1 et N°2. Le premier axe factoriel oppose les éléments solubles dont la concentration augmente fortement avec la salinité, à savoir Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} et accessoirement Ca^{2+} avec les éléments dont la concentration est contrôlée par la précipitation de minéraux comme l'alcalinité et le pH. Ce cas de figure est habituel pour les sols salés. Ce premier axe traduit la concentration globale des solutions sous l'effet de l'évaporation et donc du climat. Habituellement cet axe porte 65 à 75% de la variance. Sa relativement faible inertie traduit la complexité de notre système.

Pour déterminer la source de variabilité représentée par le second axe, on constate que SO_4^{2-} s'oppose au K^+ et à CE. Il pourrait s'agir d'une opposition dans les phénomènes de sulfato-réduction, processus extrêmes de réduction dans ce type de milieu, souvent inondé par les eaux durant une grande partie de l'année et de

fixation de K^+ très énergique par certains minéraux argileux (figure 6).

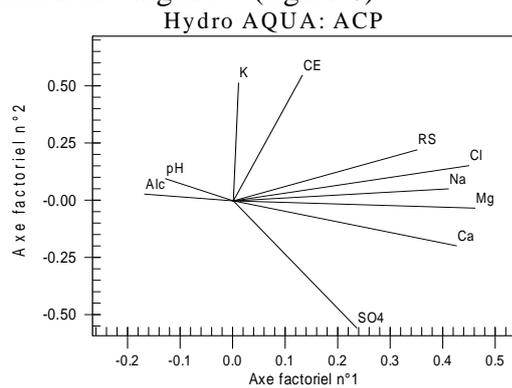


Figure 6. Premier plan factoriel : contribution des différentes variables

4.1.2 Second plan factoriel

Il est constitué des axes factoriels N°2 et N°3. Le deuxième axe a été discuté précédemment, seul le troisième axe sera donc étudié. Ce troisième axe factoriel, oppose SO_4^{2-} et CE à l'alcalinité et au pH (figure 7). Cette opposition sulfates-alcalinité se rencontre parfois en hydrochimie et peut correspondre à deux cas possibles :

- Dans certains cas, deux origines de solutions conduisent à des mélanges, lorsque les eaux sont riches en sulfates par dissolution du gypse par exemple, elles sont plus minéralisées (corrélation positive SO_4^{2-}/CE) et l'apport de Ca^{2+} par la dissolution du gypse conduit à une précipitation de la calcite qui diminue l'alcalinité (opposition $SO_4^{2-}/alcalinité$).
- Dans d'autres cas, lorsque les processus d'oxydo-réduction sont très actifs ou bien lorsque la lithologie renferme des pyrites, c'est-à-dire du sulfure de fer (FeS_2), l'oxydation de cette dernière conduit à la libération d'acide qui provoque une diminution de l'alcalinité et une augmentation de la conductivité électrique (CE).

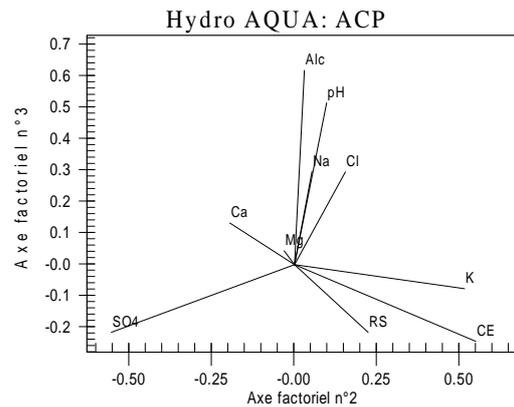


Figure 7. Second plan factoriel : contribution des différentes variables

5. CONCLUSION

La dynamique des sels solubles des sols du lac Fetzara semble être contrôlée par un certain nombre de processus géochimiques. En effet, lorsque les eaux se concentrent par évaporation, des phénomènes d'échange ioniques entre le complexe adsorbant et la solution de sols affectent l'évolution de certains éléments. Les résultats obtenus sur les solutions de sols du lac Fetzara peuvent être expliqués en partie par l'intervention du complexe argilo-humique du sol qui fixe certains ions tels que Na^+ , K^+ et probablement du Mg^{2+} et libère Ca^{2+} , ceci devient suffisant pour inverser le signe des alcalinités résiduelles calcite (ARc) et calcite+gypse (ARc+g), qui deviennent franchement négatives à mesure que les solutions de sols se concentrent, conduisant l'évolution géochimique des sols vers la voie saline neutre qui est un phénomène assez fréquent en Afrique du Nord.

L'approche statistique par ACP établie afin de déterminer les mécanismes géochimiques prédominant dans ce milieu assez complexe, montre que la concentration des solutions sous l'effet de l'intense évaporation qui caractérise la région de Annaba, est le principal processus de salinisation des sols. Mais il n'est pas le seul, deux autres processus sont certainement responsables de l'évolution de la dynamique des sels sur les sols du lac Fetzara, mais à cause du faible

pourcentage d'inertie qu'ils représentent, leur identification est délicate. Il pourrait s'agir des phénomènes d'échanges ioniques entre la solution et le complexe argilo-humique du sol d'une part et d'autre part la forte variabilité des conditions d'anoxie et de pression partielle en CO₂ engendrées par l'engorgement du milieu par l'eau, provoquant des processus d'oxydo-réduction affectant probablement la variabilité spatiale de la chimie des sulfates avec présence du gypse ou de pyrites [14, 20]. Ces deux processus doivent être pris en considération afin de confirmer leur rôle dans ce milieu.

REFERENCES

- [1] Aubert G., 1983. Observations sur les caractéristiques, la dénomination et la classification des sols salés ou salsodiques. *Cahiers de l'ORSTOM, Série Pédologie*, Vol. 20 (1), 73-78.
- [2] Hamdi-Aissa B., Vallès V., Avanturier A. & Ribozi O., 2004. Soils and brine geochemistry and mineralogy of hyperarid desert playa, Ouargla basin, algerian sahara. *Arid Land Research and Rehabilitation*, Vol. 18 (2), 103-126.
- [3] Amrhein C. & Suarez D.L., 1990. A procedure for determining sodium-calcium selectivity in calcareous and gypsiferous soils. *Soil Science Society American Journal*, Vol. 54, 999-1007.
- [4] Debièche T.H., 2002. Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Application à la basse plaine de la Seybouse, Nord-Est algérien. Thèse de Doctorat., Université Franche-Comte, Besançon. 235p.
- [5] Djamaï R., 2007. Contribution à l'étude de la salinité des sols et des eaux du système endoréique du lac Fetzara (Nord-Est algérien). Approche géochimique et évolution spatio-temporelle des phénomènes. Thèse de Doctorat d'Etat, Institut National Agronomique d'Alger. 167p.
- [6] Barbiéro L., Vallès V. & Régeard A., 1995. Précipitation de la fluorine et contrôle géochimique du calcium dans des sols alcalins du Niger. Conséquences pour une estimation quantitative de l'évolution géochimique des sols. *Géosciences de Surface, C.R. Acad. Sci.*, Vol. 321 (2), 1147-1157.
- [7] Droubi A., Fritz B., Gac J.Y. & Tardy Y., 1980. Generalized residual alkalinity concept : application to prediction of the chemical evolution of natural waters by evaporation. *American Journal of Science*, Vol. 280, 560-572.
- [8] Cheverry C., 1974. Contribution à l'étude pédologique des polders du lac Tchad. Dynamique des sels lors de la transformation des sédiments argileux et organiques en milieu continental subaride dans des sédiments argileux et organiques. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg. 175 p.
- [9] Cheverry C. & Robert M., 1993. Salure des sols Maghrébins. Influence sur les propriétés physiques et physico-chimiques des sols. Rapport Projet CEE. 41p.
- [10] Vallès V. & de Cockborne A.M., 1992. Élaboration d'un logiciel de géochimie appliquée à l'étude de la qualité des eaux. Colloque : Altération et restauration de la qualité des eaux continentales'92, Port-Leucate, France, 27-30.
- [11] Debye P. & Hückel E., 1923. On the theory of electrolytes. *Phys. Z. (Leipzig)*, Vol. 24, 185-208.
- [12] Condom N., 2000. Analyse et modélisation couplée des processus hydro-géochimiques de la salinisation des sols. Application aux sols rizicoles irrigués de l'Office du Niger (Mali). Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Agronomique de Montpellier. 240 p.

- [13] Lahlou M., Badraoui M., Souidi B., Goumari A. & Tessier D., 2002. Modélisation de l'impact de l'irrigation sur le devenir salin et sodique des sols. Actes de l'atelier du PCSI'02, Montpellier, 1-19.
- [14] Ouardi J., 2006. Dégradation des sols et de la nappe des périmètres irrigués du Tadla marocain par salinisation et sodisation. Thèse de Doctorat, Université Cadi Ayyad, Marrakech. 155 p.
- [15] Talla Diagne M. & Cescas M.P., 1997. Les méthodes d'analyses multidimensionnelles pour l'évaluation des sols de Basse-Casamance (Sénégal). *Cahiers Agricultures*, Vol. 6 (1), 45-53.
- [16] Boivin P., Favre F., Hammecker C, Saejjew A. & Tessier D., 1999. Ion transfers, iron reduction and mineralogical implications in irrigated fields : new results for soil and water quality management under irrigation. Proceedings of 2nd Inter-regional Conference on Environment-Water'99, Lausanne, Switzerland.
- [17] Wang J.J., Harrel D.L. & Bell P.F., 2004. Potassium buffering characteristics of three soils low in exchangeable potassium. *Soil Science Society American Journal*, Vol. 68, 654-661.
- [18] Marlet S., Vallès V., Lafolie F. & Condom N., 1998. Hydrogeochemical modeling : a suitable approach to predict the effect of irrigation on soil salinity, sodicity and alkalinity. 16th ISSS World Congress'98, Montpellier, Symposium 29, Paper 537, 1-9.
- [19] Favre F., 2000. Interactions entre oxydo-réduction et dynamiques salines dans un vertisol irrigué par submersion. Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 179p.
- [20] Kirk G., 2004. The biogeochemistry of submerged soils. Ed. John Wiley & Sons, London, 304p.
- [21] Barbiéro L. & Van Vliet-Lanoe B., 1998. The alkali soils of the middle Niger valley : origins, formation and present evolution. *Geoderma*, Vol. 84 (4), 323-343.
- [22] Ribolzi O., Vallès V. & Barbiéro L., 1993. Contrôle géochimique des eaux par la formation de calcite en milieu méditerranéen et en milieu tropical. Arguments d'équilibre et argument de bilan. *Science du Sol*, Vol. 31 (1/2), 77-95.
- [23] Barbiéro L., Vallès V., Régeard A. & Cheverry C., 2001. Residual alkalinity as a tracer to estimate the changes induced by a forage cultivation in a non saline sodic soil. *Agricultural Water Management*, Vol. 50 (3), 229-241.
- [24] Vallès V., Bertrand R., Bourgeat F., & N'Diaye M.K., 1989. Le concept d'alcalinité résiduelle généralisée et l'irrigation des sols sodiques. Application aux sols du Kouroumari (Mali) et de la vallée de l'oued Medjerda (Tunisie). *L'Agronomie Tropicale*, Vol. 44 (3), 157-163.
- [25] Barbiéro L. & Vallès V., 1992. Aspects géochimiques de l'alcalinisation des sols dans la vallée du Dallol Bosso (république du Niger). *Cahiers de l'ORSTOM, Série Pédologie*, Vol. 27(2), 143-152.