

Aspects géochimiques de l'alcalinisation des sols dans la vallée du Dallol Bosso (République du Niger)

Laurent BARBIERO (1), Vincent VALLES (2)

(1) Allocataire de recherche Orstom Ensa/Inra, Sciences du sol, 65 rue de Saint-Brieuc, F35042 Rennes cedex, France.

(2) Inra, Station de sciences du sol, domaine Saint-Paul, BP 91, F84140 Montfavet cedex, France.

RÉSUMÉ

Les auteurs ont utilisé les données d'une prospection pédologique et hydrogéologique effectuée en 1963 par la Sogetah (1) dans la vallée du Dallol Bosso au Niger. Les analyses d'eau de mares, de nappes et de forages issues de ce rapport ont été traitées par le modèle « Aqua » pour la détermination des activités des ions majeurs et la simulation d'évaporation. L'interprétation de ces données montre que toutes les eaux appartiennent à la même famille chimique : elles sont carbonatées sodiques. De surcroît, ces eaux sont très douces et généralement sous-saturées par rapport à la calcite. Elles sont cependant responsables de l'alcalinisation des sols de cette région, sous l'influence de l'évaporation, par précipitation de la calcite au sein de la solution du sol. L'utilisation du modèle « Aqua » permet de faire le lien entre la qualité chimique des eaux régionales et la nature des sols développés dans les bas-fonds du Dallol en contact avec les eaux de nappe. La modélisation thermodynamique permet une prédiction quantitative des variations de concentration des éléments majeurs.

MOTS CLÉS : Analyses d'eau – Modèle « Aqua » – Évaporation – Calcite – Alcalinisation – Dallol Bosso – Niger.

ABSTRACT

GEOCHEMICAL ASPECT OF SOIL ALCALINISATION IN THE DALLOL BOSSO VALLEY (NIGER)

Data from a soil and hydrology survey realized in 1963 by Sogetah in the Dallol Bosso valley, Niger, are used to study the relationships between water quality and the properties of associated soils. These data comprise chemical analysis of water and groundwater. Major ions activities and evaporation simulation were computed using the thermodynamics "Aqua" model. The results showed that all the waters analysed belong to a same bicarbonated and sodic chemical family. They are very soft and generally under-saturated with respect to calcite. However, due to evaporation, they are responsible for the formation of alkaline soils in this area, by precipitation of calcite in the soil solution. The use of the "Aqua" model makes it possible to link the chemical quality of the regional waters with soil types developed in the valley bottom in contact with the groundwater. The thermodynamics modelling allows to predict quantitatively the concentration variation for major ions.

KEY WORDS: Water analysis – "Aqua" Model – Evaporation – Calcite precipitation – Alcalinisation – Dallol Bosso – Niger.

(1) Société générale des techniques hydro-agricoles.

INTRODUCTION

Les problèmes d'alcalinisation des sols ont été signalés sur de nombreux sites à travers le monde. En Afrique, les zones tropicales arides ou semi-arides du bouclier sont très fréquemment le siège de problèmes de ce type. Au nord de la zone soudano-sahélienne, sur les dépôts sédimentaires, on assiste généralement à des phénomènes de salinisation.

Les dépôts sédimentaires du Continental terminal, formation très étendue en Afrique, présentent un aquifère localement à faible profondeur, susceptible d'être utilisé pour des aménagements hydro-agricoles. Nous proposons de fournir des informations sur la géochimie de cet aquifère aux environs de Niamey et notamment de décrire les variations de concentration des éléments majeurs, de comprendre les mécanismes responsables de ces variations afin d'éviter des interprétations erronées concernant la qualité chimique de cette eau pour son utilisation en irrigation.

La comparaison entre les données de terrain et les simulations fournies par un modèle géochimique est possible. Ceci donne généralement des résultats convenables en ce qui concerne les ions majeurs dans les milieux évaporants et fournit un outil qualitatif pour l'interprétation des mécanismes, même si l'évolution des éléments mineurs reste trop complexe pour être approchée par ce biais. Nous proposons de voir dans quelle mesure les résultats de terrains peuvent être approchés de manière quantitative par les simulations.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Présentation du site

Le Dallol Bosso correspond à l'aval de la vallée de l'Azaouack, ancien affluent du fleuve Niger, qui drainait l'ouest et le sud du massif de l'Aïr au Niger ainsi que la partie sud du massif du Hoggar en Algérie. Aujourd'hui, le Dallol Bosso est une vallée « sèche » et suspendue par rapport au cours du fleuve Niger.

Le Dallol a été creusé au début du quaternaire dans les séries du Continental terminal, formations détritiques tertiaires qui ont comblé le vaste bassin sédimentaire des Iullemeden. Ces dépôts tertiaires reposent en discordance sur le socle précambrien dans la partie sud du Dallol. Plus au nord, le Continental terminal surmonte une série marine de l'éocène inférieur (GREIGERT, 1966).

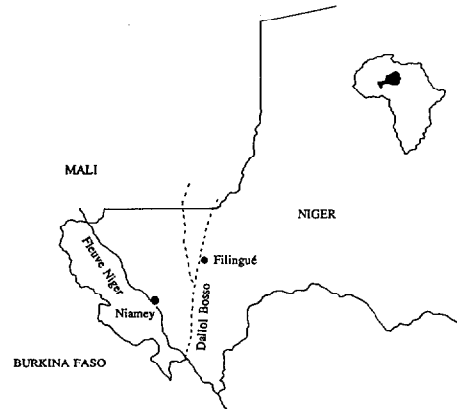


FIG. 1 – Carte de localisation du Dallol Bosso.
Map showing the location of Dallol Bosso.

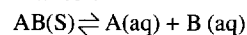
Le Dallol Bosso recoupe deux séries du Continental terminal : dans sa partie supérieure, la série argilo-sableuse à lignite, et dans son cours inférieur la série des grès argileux du moyen Niger.

En territoire nigérien, la vallée, orientée nord-sud, s'étale sur une distance de 340 km (fig. 1). La région est soumise à un climat de type sahélien qui varie considérablement d'une extrémité de la vallée à l'autre : la pluviométrie évolue régulièrement de 320 mm à la frontière malienne jusqu'à 700 mm à la confluence avec le fleuve Niger.

La nappe du Continental terminal affleure fréquemment au niveau des grandes vallées qui entaillent cette formation. C'est le cas dans le Dallol Bosso où elle provoque çà et là la formation de mares permanentes ou temporaires. Les sols, imbibés par ces eaux durant la saison des pluies, présentent des caractéristiques de sols à alcali. Ils sont alcalins (pH voisin de 9), compacts, se prennent en masse et le taux de sodium échangeable est élevé (40 % à 50 %, Sogetah, 1963).

Concepts utilisés dans cette étude

La dissolution ou la précipitation d'un minéral AB au sein d'une solution se fait suivant la relation suivante :



à l'équilibre, cette relation est régie par l'équation :

$$(A) \cdot (B) / (AB) = K$$

avec () représentant les activités.

En considérant l'activité du cristal pur comme étant égale à 1, on obtient :

$$(A) \cdot (B) = K \quad (1)$$

Lorsque l'équilibre avec le minéral AB est atteint et que la solution se concentre sous l'influence de l'évaporation, les activités en A et en B ne peuvent croître simultanément : le produit des activités de A et de B étant constant d'après (1), toute augmentation de l'activité de l'une des formes ioniques entraîne la diminution simultanée de l'autre.

La prévision de la forme ionique dont l'activité va croître ou diminuer s'effectue par analyse de l'alcalinité résiduelle.

L'alcalinité résiduelle :

L'alcalinité résiduelle AB se définit comme la différence entre les équivalents de A et les équivalents de B présents dans la solution. Si l'on considère le cas de la précipitation de la calcite, l'alcalinité résiduelle calcite (VAN BEEK et VAN BREEMEN, 1973) ou carbonates résiduels (EATON, 1950) est définie par :

alc. res. cal. = alc. carbonatée - calcium (en eq/l)

Deux cas peuvent se produire :

- s'il y a dans la solution du sol davantage d'équivalents de carbonates ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{--}$) que de calcium, l'alcalinité résiduelle calcite est positive, au cours de l'évaporation, après avoir atteint l'équilibre avec la calcite, l'activité en carbonates va continuer de croître et l'activité en calcium va diminuer ;

- dans le cas contraire, si l'alcalinité résiduelle calcite est négative, après avoir atteint l'équilibre avec la calcite, l'activité en calcium va continuer de croître et l'activité en carbonates va diminuer.

Ce concept a été appliqué à la précipitation successive ou simultanée de plusieurs minéraux : c'est le concept d'alcalinité résiduelle généralisée (DROUBI, 1976).

Les analyses d'eau

LES SOURCES

Les données utilisées dans ce travail proviennent d'une étude hydrogéologique de la Sogetah en 1963. Elles concernent des eaux de nappes, de mares et de forages prélevées entre la ville de Filingue et le fleuve Niger (fig. 1).

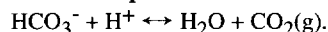
TRAITEMENT DES DONNÉES

Les analyses d'eau ont été traitées par le modèle « Aqua » dérivé de gypsol (VALLES et DE COCKBORNE, 1992). Il s'agit d'un modèle d'association ionique utilisant la loi de DEBYE-HÜCKEL étendue aux solutions salées. Ce modèle intègre la formation de complexe ou de paires d'ions tels que

CaHCO_3^+ ou CaCO_3^0 par exemple. À partir de la mesure du pH et des concentrations totales, il permet de calculer les activités des éléments majeurs et leur répartition entre les formes libres ou complexes.

Les mesures de pH n'ont pas été réalisées sur le terrain. Elles ont donc probablement été perturbées par des phénomènes de dégazage en CO_2 des solutions. Les calculs ont été réalisés en se rapportant à une valeur de la PCO_2 régnant habituellement dans les sols et les nappes : $\text{PCO}_2 = 10^{-1,8}$.

Le pH équilibrant les solutions est alors calculé à partir de l'équilibre :



CLASSEMENT DES ANALYSES

Les analyses ont ensuite été ordonnées suivant leur teneur en ion chlorure (GALLALI, 1980). On peut en effet penser que le chlorure est un bon indicateur de l'état de concentration d'une eau, puisque cet ion ne précipite qu'à des forces ioniques élevées. Il doit se concentrer proportionnellement à l'eau dans le domaine qui nous intéresse.

Le facteur de concentration des eaux a été estimé à partir du rapport entre la teneur en chlorure d'une eau et la plus petite teneur en chlorure observée dans l'ensemble des échantillons. Ceci permet un classement relatif des échantillons les uns par rapport aux autres.

LES REPRÉSENTATIONS

Les analyses ont été replacées dans des diagrammes présentant en ordonnée le logarithme de la molalité et en abscisse le logarithme du facteur de concentration. Dans ces diagrammes, les molalités des ions chlorures apparaissent alignées suivant une droite de pente égale à 1 puisqu'elles ont servi à l'élaboration du facteur de concentration.

Les résultats sont présentés sur les figures 2, 3, 4, 5 et 6.

Les sols

Les sols à alcali se forment dans les dépôts de décantation et les niveaux les plus bas du Dallol (lit mineur). Les sites sont de faible extension et de forme allongée.

D'un point de vue morphologique, les sols à alcali se caractérisent par une texture argileuse ; le dépôt argileux surmonte, à une profondeur variable (60 à 100 cm) un niveau sableux grossier dans lequel fluctue la nappe phréatique. L'horizon de

surface est peu humifère, gris sombre, marqué par une hydromorphie de surface. Ce niveau devient massif et très compact par dessèchement. Sa structure polyédrique grossière est constituée de prismes de quelques décimètres à sous-structure grossièrement cubique ou massive. Au-dessous, on observe un niveau gris sombre, généralement massif mais parfois prismatique ou cubique avec des inflorescences salines, principalement de la calcite déposée en voiles pseudomycéliens.

Les analyses de sol sont issues de l'étude pédologique également réalisée par la Sogetah en 1963. Elles ont été effectuées sur des sols à alcali de bas-fonds, saturés d'eau durant la saison des pluies mais s'asséchant plus ou moins rapidement en saison sèche.

Des analyses du complexe d'échange ont été réalisées. Nous avons repris quatre profils de sols à alcali. Ces sols sont situés pour trois d'entre eux dans le lit mineur du Dallol ; l'autre correspond à une mare temporaire de saison des pluies. Les résultats figurent dans le tableau I.

La solution du sol

Lorsque les eaux de nappes imbibent les sols en contact, la composition de l'eau de nappe devient

celle de la solution du sol. On peut simuler le devenir de la solution par évaporation et du sol en contact avec cette solution à l'aide du modèle « Aqua ». Nous avons pris pour cela une eau très diluée parmi l'ensemble des échantillons traités (mare de Falmey).

Le modèle « Aqua » permet de prévoir l'évolution des modalités des différents ions par concentration, simulant ainsi une évaporation de la solution considérée. L'état du complexe adsorbant à l'équilibre avec la solution du sol est également simulé ; les coefficients de sélectivité du complexe d'échange sont issus de VALLES (1987). Comme on l'a signalé, en raison de l'absence de mesures du pH sur le terrain, la valeur de la pression en CO₂ équilibrant la solution a été estimée à $P_{CO_2} = 10^{-1,8}$. Cette valeur a été reprise pour la simulation qui a été réalisée en supposant constante cette pression en CO₂ au cours de l'évaporation.

Les résultats de la simulation sont présentés dans les diagrammes 7 et 8 mais également reportés sur les diagrammes de concentration 2 à 6, en association avec les données expérimentales.

TABLEAU I

Caractéristiques du complexe d'échange de quatre sols à alcali des bas-fonds du Dallol Bosso (source : Sogetah, 1963-b)
Characteristics of the exchange complex of 4 alkali soils of Dallol Bosso bottom land (source : Sogetah, 1963-b)

Échantillon	MS25	MS30	MS54	MS66
Localisation	Niabere bela lit mineur	petite mare lit mineur	baleyara-tabla lit mineur	lossoubango mare d'hivernage
Type de sol	sol à alcali	sol à alcali	sol à alcali	sol à alcali
pH	10,2	9,2	9,1	9,1
Ca échangeable cmol/kg sol	4,5	10,9	7,5	13,9
Mg échangeable cmol/kg sol	0,3	2,7	5,9	6,8
K échangeable cmol/kg sol	0,45	0,26	0,93	0,93
Na échangeable cmol/kg sol	8,5	7,3	10,6	22,0
T cmol/kg sol	16,6	22,5	29,2	48,0
Na/T (%)	51,2	32,4	46,3	45,8

RÉSULTATS

Caractéristiques chimiques des solutions prélevées

Les diagrammes 2 à 6 montrent, en fonction du classement des analyses opéré, que pour chaque ion considéré, le nuage de points représentant les données de terrain ne s'oriente jamais suivant une pente supérieure à l'unité. Si des ions chlorures avaient été prélevés de la solution pour participer à des précipitations, ceux-ci servant de traceur pour les diagrammes, les molalités de certains ions se seraient alignées en nuages suivant des droites de pente

supérieure à 1. Cela indique que la détermination du facteur de concentration des solutions à partir de leur molalité en ions chlorures est acceptable.

L'ordre des éléments classés par molalité est toujours le même : par ordre de concentration décroissante, on observe pour chaque échantillon Na^+ et Alcalinité carbonatée > Cl^- > Ca^{++} > Mg^{++} et SO_4^{--} .

Toutes les eaux récoltées sont de la même famille chimique : elles sont carbonatées sodiques. On peut penser que ce sont les mêmes phénomènes qui ont donné aux eaux du Dallol Bosso leurs caractéristiques chimiques. Ces eaux semblent être

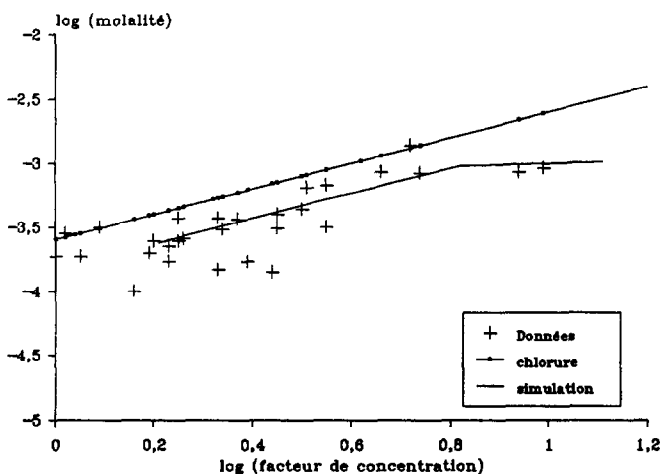


FIG. 2 – Diagramme de concentration du calcium.
Calcium concentration diagram.

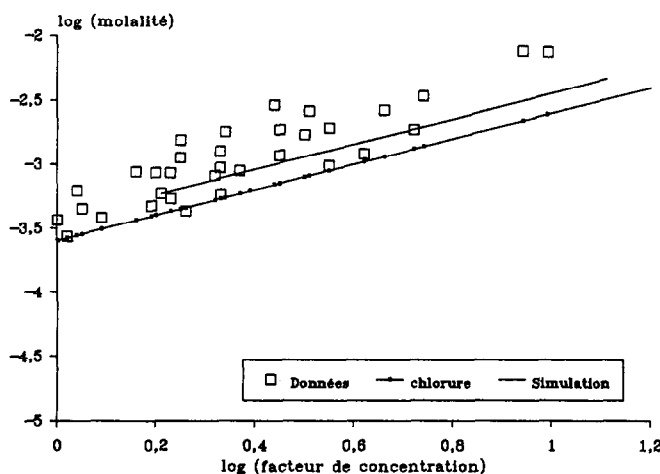


FIG. 4 – Diagramme de concentration du magnésium.
Magnésium concentration diagram.

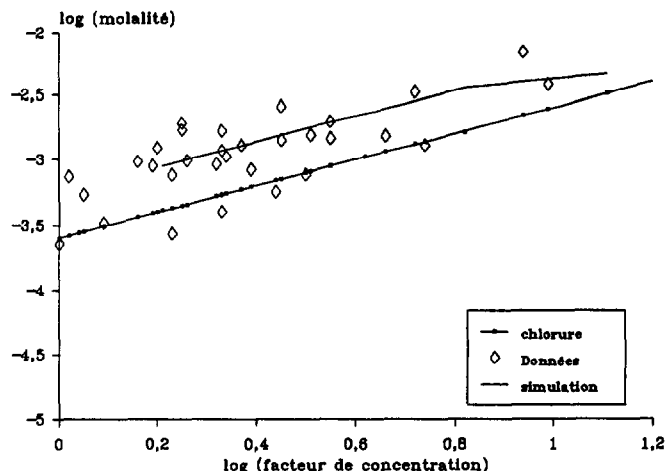


FIG. 3 – Diagramme de concentration de l'alcalinité carbonatée.
Carbonate alkalinity concentration diagram.

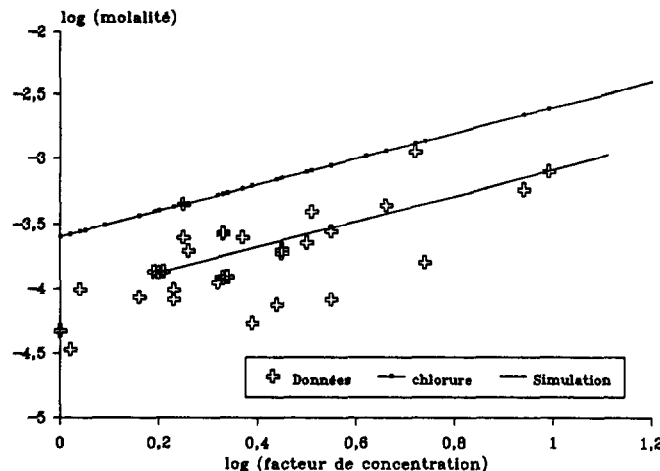


FIG. 5 – Diagramme de concentration du sodium.
Sodium concentration diagram.

de même origine mais plus ou moins concentrées en fonction de leur localisation. L'auteur de la prospection hydrogéologique (Sogetah, 1963-a) a d'ailleurs fait remarquer, en se basant sur les mesures de conductivité électrique, que les eaux sont plus concentrées au nord, ce qui peut être relié à une pluviométrie plus faible ; il s'agirait alors

d'un phénomène de dilution des eaux par les pluies d'hivernage vers le sud. Parmi les échantillons récoltés en 1963, le facteur de concentration varie de 1 à 10. La mare de Falmey, correspondant à une eau très diluée parmi l'ensemble des échantillons de la prospection, est localisée dans la partie sud du Dallol, presque à la confluence avec le fleuve.

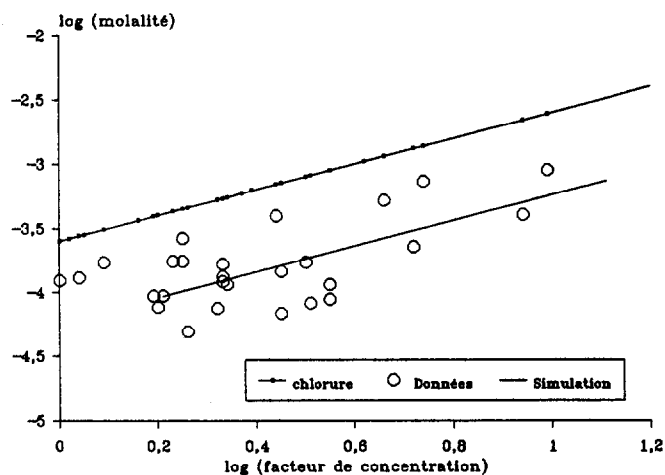


FIG. 6 - Diagramme de concentration des sulfates. Sulphate concentration diagram.

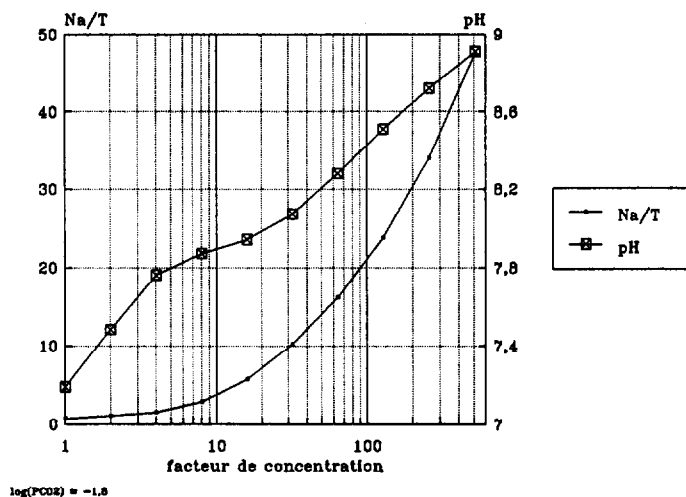


FIG. 8 - Simulation de l'évaporation de la mare de Falmey, évolution des concentrations en Ca, Na, Cl et alcalinité carbonatée. Simulation of evaporation in Falmey pond; variation of Ca, Na and Cl concentrations and of carbonate alkalinity.

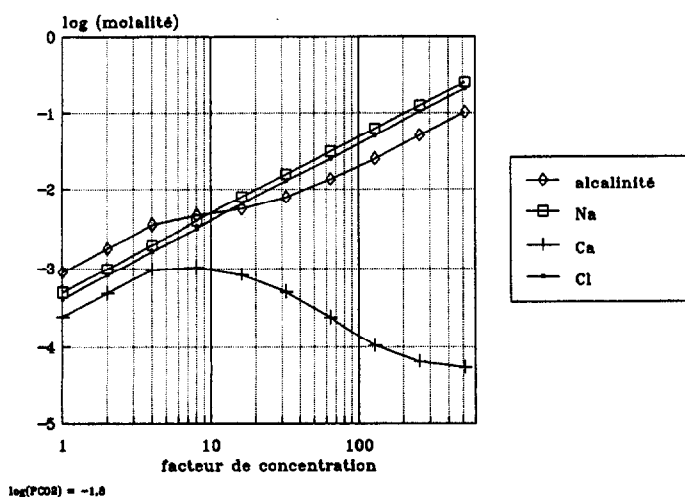


FIG. 7 - Diagramme de saturation par rapport à la calcite. Diagram of saturation relatively to calcite.

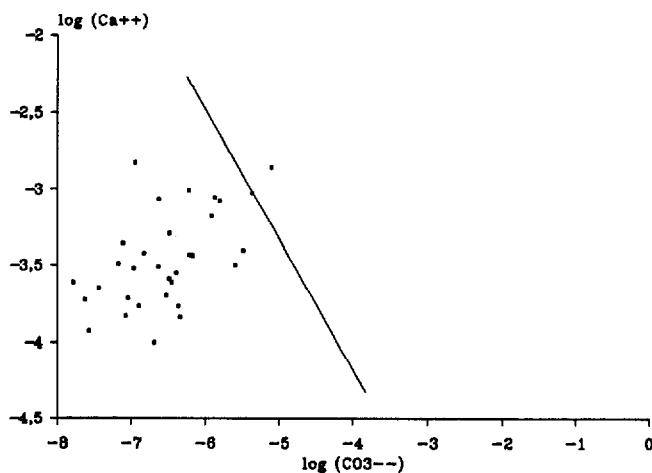


FIG. 9 - Simulation de l'évaporation de la mare de Falmey, évolution du pH et du sodium échangeable. Simulation of evaporation in Falmey pond; variation of pH and exchangeable sodium.

Dans ce milieu, le minéral non silicaté le moins soluble et qui précipiterait en premier serait la calcite. Or, si l'on replace les eaux prélevées dans le diagramme de saturation par rapport à la calcite, à l'aide du modèle « Aqua », on constate qu'elles sont sous-saturées par rapport au minéral à l'exception de deux échantillons qui atteignent l'équilibre (fig. 7).

Pour l'ensemble des ions étudiés, le nuage de points s'allonge suivant une droite parallèle au facteur de concentration de pente égale à 1. Les proportions des ions restent sensiblement les mêmes dans la gamme de concentration qui nous intéresse.

On note toutefois, en ce qui concerne les deux points les plus concentrés et qui atteignent la saturation avec la calcite, que le nuage de points de la figure 3, représentant l'évolution des ions calcium lorsque les solutions sont plus concentrées, semble s'incurver légèrement à partir d'un facteur de concentration d'environ 6,3 ($\log[FC] = 0,8$). Ce phénomène doit être attribué à la précipitation de la calcite.

En conclusion, toutes les eaux sont de la même famille chimique, plus ou moins concentrées en fonction de leur localisation. À l'exception des deux échantillons qui atteignent juste la saturation avec la calcite, on n'observe pas, parmi les ions majeurs, une évolution des molalités (telle qu'une diminution de celles-ci) qui traduirait le départ d'ions de la phase liquide pour participer à des précipitations.

Évolution chimique de la solution du sol

La simulation d'évaporation de l'eau de la mare de Falmey montre que le faciès chimique de la solution du sol évolue au cours de l'évaporation. Tous les ions ne se concentrent pas proportionnellement au facteur de concentration.

Concernant le sodium pour ce qui est des cations, les sulfates et les chlorures pour ce qui est des anions, la simulation reflète une augmentation des molalités proportionnelle au facteur de concentration. Il n'y a donc pas de départs de ces ions de la solution du sol vers une éventuelle phase solide.

Entre les facteurs de concentration 4 et 8, on constate que les droites de simulation des carbonates et du calcium s'incurvent vers le bas, traduisant une consommation de ces ions dans la solution. Le domaine de saturation par rapport à la calcite est atteint. La molalité en calcium diminue alors tout au long de la simulation. La courbe représentant l'évolution des carbonates passe rapidement

par un point d'inflexion puis augmente à nouveau parallèlement au facteur de concentration (fig. 8).

Les eaux du Dallol Bosso présentent une alcalinité résiduelle calcite positive. Au sein de la solution du sol, sous l'effet de l'évaporation, on constate la précipitation de la calcite avec un appauvrissement de la solution en ions calcium et un enrichissement en carbonates, même si des ions carbonates participent à l'élaboration de la calcite. Le stock de calcium de la solution s'épuise rapidement et les quantités de calcite se formant à partir du facteur de concentration de 40 sont infimes. C'est pourquoi l'évolution de la molalité en carbonates se fait alors proportionnellement au facteur de concentration.

La molalité en calcium diminuant, le complexe adsorbant du sol en contact avec cette solution s'enrichit alors en sodium (fig. 9).

Cela ne constitue cependant pas un contrôle sévère du sodium par le complexe adsorbant du sol. En effet, ce phénomène ne se traduit pas sur la figure 7, où l'on voit le sodium augmenter proportionnellement au facteur de concentration. Cela s'explique par les faibles quantités mises en jeu par ces échanges de cations entre la solution du sol et le complexe.

Les molalités des autres ions augmentent proportionnellement au facteur de concentration, car les domaines de saturation des sels plus solubles ne sont pas atteints.

Conséquences sur les sols

Le complexe d'échange tend à s'équilibrer avec la solution et fournit du calcium qui participe alors à la précipitation. L'ion sodium prend progressivement place sur le complexe. L'alcalinité carbonatée continue de croître bien que des ions carbonates soient prélevés de la solution pour l'élaboration de la calcite ; le pH de la solution et donc du sol augmente.

La concentration en électrolytes, qui reste modérée, et le pourcentage important de sodium sur le complexe d'échange ($Na/T = 40$ à 50%) correspondent à des conditions propices à une forte déstructuration des argiles, menant à une compaction du sol, phénomène décrit sur le terrain.

Comparaison entre les résultats obtenus avec le modèle et avec les données de terrain

Le modèle apporte des informations en accord avec les observations de terrain faites sur les sols des bas-fonds du Dallol Bosso, en contact avec les

eaux étudiées. Il simule l'évolution des concentrations en magnésium, en sulfates, et en chlorures selon des droites proportionnelles au facteur de concentration, puisque ces ions demeurent dans la phase liquide. Cette évolution est conforme aux données de terrain reportées dans les diagrammes de concentration 4 et 6, où l'on observe des nuages de points allongés parallèlement au facteur de concentration dans la gamme de concentration représentée.

Seul le domaine de saturation avec la calcite est atteint et ce à l'extrémité du nuage de points, pour les deux échantillons les plus concentrés. Les courbes de simulation évoluent au sein des nuages de points des données expérimentales. La précipitation de la calcite au cours de la concentration provoque une diminution importante de la molalité en calcium, phénomène qui se fait sentir à l'extrémité du diagramme de concentration du calcium des eaux du Dallol prélevées lors de la prospection.

Selon la simulation, le sodium se fixe sur le complexe adsorbant du sol mais les quantités mises en jeu sont infimes, en comparaison avec les quantités présentes en solution, et n'apparaissent pas sur le diagramme de simulation.

DISCUSSION

La précipitation de la calcite et les échanges avec le complexe d'échange permettent d'expliquer l'essentiel des caractéristiques des sols. Il est cependant probable que les ions magnésium n'évoluent pas proportionnellement au facteur de concentration sur l'ensemble de la gamme de concentration qui n'est pas représentée ici, d'après les données issues de la prospection. On a observé à plusieurs reprises, au Sahel, la précipitation d'argiles magnésiennes (N'DIAYE, 1987 ; GAC, 1979 ; BARBIERO, 1994) au cours de la concentration des solutions. Une simulation plus complexe qui ferait intervenir la précipitation de silicates magnésiens, dans un système comprenant initialement un stock de silice important (le sol) donnerait des résultats très proches (BARBIERO, 1994) avec un contrôle du magnésium.

Il est également possible que la précipitation de la fluorine vienne renforcer le contrôle du calcium, comme cela a été décelé sur un site voisin dans la vallée du fleuve Niger (BARBIERO, 1994).

La simulation présente des résultats conformes aux données de terrain lorsque l'on attribue au sol une très faible valeur de la CEC (ici inférieure à

10^{-6} eq) pour l'évaporation initiale d'un litre de solution. Cette opération consiste ainsi à minimiser fortement l'action du sol et des échanges sur la solution. Ce problème a été soulevé par VALLES (1987) et BARBIERO (1994) et fait appel à la notion de système ouvert du milieu naturel par opposition au système fermé considéré lors de la simulation (évaporation d'un litre d'eau en contact avec une quantité déterminée de sol). Dans un bas-fond comme celui du Dallol, l'état du sol ne résulte pas de l'évaporation d'un litre d'eau comme cela est représenté lors de la simulation mais d'une grande quantité d'eau au fil des années. Pour se rapprocher des conditions naturelles, il est nécessaire soit d'augmenter considérablement la quantité d'eau évaporée dans le sol, soit de diminuer la quantité de sol concernée par un litre de solution. Le même phénomène a été observé par VALLES (1987) le long de toposéquences. En un point (x) donné du versant (fig. 10), les eaux (1) circulent vers l'aval. Si le sol n'est pas à l'équilibre avec la solution, des échanges vont se produire. Le volume d'eau suivant (2) présentant une composition très voisine du précédent ne subira pratiquement pas d'échanges avec le sol en ce point. Ainsi, sur un versant à l'équilibre, les échanges ont eu lieu principalement avec les premières eaux rencontrées, sorties du système depuis longtemps. Ces interprétations qualitatives peuvent expliquer le faible rôle que joue le complexe d'échange dans un système équilibré et la nécessité de minimiser son intervention lors de simulations.

Les sols observés dans les bas-fonds du Dallol présentent des caractéristiques qualitativement et quantitativement en accord avec les simulations effectuées, qui aboutissent à des solutions présentant un pH voisin de 9, et à un complexe adsorbant saturé à 40 ou 50 % par le sodium s'il évolue en contact avec cette solution.

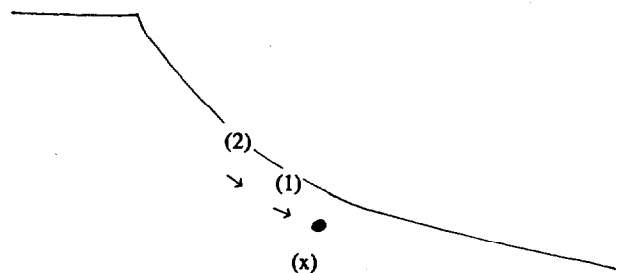


FIG. 10 – Mise à l'équilibre « Solution du sol / complexe adsorbant » sur un versant considéré comme système ouvert.

Soil solution / adsorbing complex equilibrium on a slope considered as an open system.

Les caractéristiques des sols de bas-fonds présentées dans le tableau I sont similaires. Ces sols se sont alcalinisés au contact des eaux de mares et de nappes, sous l'influence de l'évaporation.

CONCLUSION

Les eaux prélevées en 1963 par la Sogetah appartiennent toutes à la même famille chimique. Elles sont très diluées, carbonatées sodiques, sous-saturées par rapport à la calcite, ou atteignant juste par endroit la saturation.

Sous l'influence de l'évaporation, les sols en contact avec ces eaux évoluent vers des sols sodiques alcalins. La solution du sol s'appauvrit en calcium, mais continue de s'enrichir en sodium et en carbonates au cours de l'évaporation et de la précipitation de la calcite.

Les eaux sont responsables de l'alcalinisation des sols de bas-fond de la vallée du Dallol Bosso, et peuvent contribuer à l'alcalinisation d'autres surfaces si elles sont utilisées pour l'irrigation en raison de la faible profondeur de la nappe.

Il est nécessaire d'inverser le signe de l'alcalinité résiduelle calcite de ces eaux, méthode déjà préconisée par VALLES *et al.* (1989), si l'on souhaite les utiliser pour l'irrigation, afin d'éviter à plus ou moins long terme l'alcalinisation des sols comme on a pu le voir au Mali (N'DIAYE, 1987), ou même au Niger sur les terrasses du fleuve (GUERO, 1987).

Cette étude montre une nouvelle fois qu'il est insuffisant de se fier à la quantité totale de sels que

comporte une eau pour estimer le danger qu'elle représente sur un sol. L'étude de son faciès chimique, et de l'évolution de son faciès au cours de l'évaporation, grâce au concept dynamique de l'alcalinité résiduelle généralisée, est un outil indispensable.

La connaissance plus fine, suite à une étude scientifique, avec les moyens et les techniques modernes d'analyse, des mécanismes géochimiques intervenant tout au long de la gamme de concentration doit permettre de développer des outils pour un suivi quantitatif de gestion de parcelles irriguées sur ce site, selon la méthode proposée par RIBOLZI *et al.*, 1993 et BARBIERO, 1994.

Le modèle d'association ionique, confronté aux données de terrain, a donné de bons résultats. Il permet une prévision qualitative du risque encouru par un sol qui évolue au contact d'une solution donnée dans un milieu évaporant. Il permet de surcroît une estimation quantitative des problèmes concernant l'évolution des ions majeurs, surtout dans le cas des systèmes à anions complexants. Ceci débouche sur les prédictions de l'évolution du SAR (Sodium Adsorption Ratio) et du rapport Na/T.

Le modèle n'est donc plus seulement un outil pour comprendre qualitativement les problèmes mais franchit une étape supplémentaire. Pour les ions majeurs et dans ce type de milieu, il devient réaliste de l'utiliser à des fins prédictives quantitatives.

Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 17 mars 1994.

BIBLIOGRAPHIE

- BARBIERO (L.), 1994. – *Les sols alcalinisés sur socle dans la vallée du fleuve Niger - Origines de l'alcalinisation et évolution des sols sous irrigation*. Th. Doct. Ensar, 210 p.
- DROUBI (A.), 1976. – *Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation - Modèle thermodynamique de simulation - Application aux sols salés du Tchad*. *Mémoire des Sciences Géologiques*, 46, 177 p.
- EATON (F.M.), 1950. – *Significance of carbonates in irrigation waters*. *Soil Science*, 69 : 123-133.
- GAC (J.Y.), 1979. – *Géochimie du bassin du lac Tchad - Bilan de l'altération, de l'érosion et de la sédimentation*. Th. Doct. es Science, ULP Strasbourg, 249 p.
- GALLATI (T.), 1980. – *Transfert sels-matière organique en zones arides méditerranéennes - Contribution à l'étude pédo-biologique des sols salsodiques formés sur matériaux sédimentaires*. Th. Doct. d'Ét. univ. Nancy-I, 202 p. + annexes.
- GREIGERT (J.), 1966. – *Description des formations crétacées et tertiaires du bassin des lullemeden (Afrique occidentale)*. *Publ. Dir. Mines et Géol., Rép. du Niger*, n° 2, 234 p.
- GUERO (Y.), 1987. – *Organisation et propriétés fonctionnelles des sols de la vallée du moyen Niger*. Th. Doct. des universités de Niamey et Tunis, 239 p.
- N'DIAYE (M.K.), 1987. – *L'évaluation de la fertilité des sols à l'office du Niger (Mali) - Contribution à la recherche des causes et origines de la dégradation des sols dans le Kouroumari*. Th. Doct. ing., INP Toulouse, 133 p.

- RIBOLZI (O.), VALLES (V.) et BARBIERO (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.
- Sogetah, 1963-a. – *Étude hydrogéologique dans la vallée du Dallol Bosso*. « *Étude de reconnaissance* ». 83 p. + annexes, nombreuses fig. h.t.
- Sogetah, 1963-b. – *Étude pédologique dans la vallée du Dallol Bosso*. « *Étude de reconnaissance* ». 25 + 50 p., nombreuses fig. h.t.
- VALLES (V.), 1987. – Modélisation des transferts d'eau et de sels dans un sol argileux - Application aux doses d'irrigation. *Mémoire des Sciences Géologiques*, 79, 148 p.
- VALLES (V.), BERTRAND (R.), BOURGEAT (F.) et 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 Medjerdah (Tunisie). *L'agronomie tropicale*, 44-3 : 157-163.
- VALLES (V.) et 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 ». Port Leucate, 1^{er} et 2 oct. 1992 : 27-30.
- VAN BEEK (C.G.E.M.) et VAN BREEMEN (N.), 1973. – The alkalinity of alkali soils. *Journal of Soil Science*, vol. 24, n° 1 : 129-136.