

Disparition du caractère sulfato-aluminique de la nappe des sols sulfatés acides dans une vallée aménagée de Basse-Casamance (Sénégal)

Jean-Pierre Montoroi et Michel Rieu

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 324, série II a, 1997
p. 301 à 308,
1997

Résumé De nombreuses vallées de Basse-Casamance ont été dotées d'un barrage antisel, afin de limiter la dégradation chimique des sols, due à la sécheresse actuelle. Le fonctionnement hydrologique de ces vallées en a été profondément modifié. En effet, la submersion, auparavant journalière, des sols par les marées ne se produit plus qu'une fois par an, avec les eaux de remplissage de la retenue. Selon leur position par rapport au lit de l'ancien marigot, les sols exondés pendant une longue période évoluent suivant la voie acide et sont affectés par la salinité. La nappe des sols, située en amont de la retenue, présente, selon son degré de concentration, plusieurs faciès chimiques, qui se côtoient dans la vallée. Le faciès est sulfaté-alumino-ferreux pour les eaux peu concentrées, situées en bordure de vallée, et chloruré-sodique pour les eaux les plus concentrées, réparties dans l'axe de la vallée. Par une étude des équilibres thermodynamiques, il est montré qu'en se concentrant et en précipitant un sulfate d'aluminium, une nappe sulfatée à l'origine acquiert un faciès chloruré. Si ce processus se produit au cours d'un lent déplacement latéral des eaux de nappe, on peut alors observer une juxtaposition dans l'espace de faciès intermédiaires entre les pôles sulfaté et chloruré.

Mots clés : Sulfate d'aluminium, Nappe, Géochimie, Salinité, Sol sulfaté acide, Casamance, Afrique de l'Ouest.

J.-P. M. : laboratoire des formations superficielles, ORSTOM, 32, av. Henri-Varagnat, 93143 Bondy cedex, France.

M. R. : département eaux continentales, ORSTOM, 209-213, rue Lafayette, 75480 Paris cedex 10, France.

Abstract Groundwater aluminium disappearance from acid sulphate soils of a Lower Casamance valley (Senegal) equipped with an anti-salt dam

Numerous valleys of the Lower Casamance were equipped with an anti-salt dam in order to prevent the chemical degradation of soils owing to the recent drought. The river hydrology has been modified and the daily tidal flooding has become seasonal when the dam fills with fresh water. Acid sulphate soils, formed during a period of oxidation are affected by salinization, the degree of influence depending on their location with regard to the old riverbed. Upstream, groundwater has different chemical compositions distributed according to its concentration level. It is sulphate, aluminous and ferrous when water is diluted close to the valley edge whereas it bears chloride and sodium in the more concentrated water in the central part of the valley. A study of thermodynamics equilibria shows that, during concentration and precipitation of aluminium sulphate, a sulphate groundwater becomes chloride. If such a process occurs during a lateral transfer of groundwater, we can observe a spatial distribution of the different types of groundwater.

Keywords: Aluminium sulphate, Groundwater, Geochemistry, Salinity, Acid sulphate soil, Casamance, West Africa.

**Abridged
English
Version**

THE drought in West Africa has salinized surface waters and acidified mangrove soils in the Lower Casamance. Huge bare surfaces of saline and acid sulphate soils have extended and mangrove vegetation has declined (Marius, 1979).

In valleys where an anti-salt dam was built (Boivin 1990; Albergel *et al.*, 1993; Montoroi, 1996), river hydrology has been modified. Valleys are no longer flooded daily with the tidal rhythm whereas run-off waters are stored by the dam in the rainy season. During the dry

Note

présentée par
Georges Pedro.

remise le 2 septembre 1996,
acceptée après révision
le 30 octobre 1996.



season, upstream sulphidic sediments were oxidized, undergoing biogeochemical acidification and acid sulphate soil formation. These lowland soils are also affected by salinization and the intensity of this process depends on soil location with regard to the old riverbed. In the dry season, saline efflorescences were formed close to the valley margin (Le Brusq *et al.*, 1987; Montoroi, 1996).

A previous article described the mineralogy and the distribution of salts in Djiguioum valley (Montoroi, 1995). These observations suggested that aluminium and iron sulphate salts precipitate first when dam water is evaporated. In this note, we propose to analyze the modification of groundwater chemistry during a transfer in acid sulphate soils.

MATERIALS AND METHODS

The situation and the environment of Djiguioum valley was described in the previous article by Montoroi (1995). Groundwaters were sampled with a piezometric network at the beginning and the end of the rainy season.

Complete chemical analyses for 63 samples were made by atomic absorption spectrophotometry for Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Al^{3+} and Fe^{3+} and colorimetry for Cl^- , SO_4^{2-} and Fe^{2+} . Field measurements were carried out for pH and electrical conductivity (EC) at 25 °C.

Concentration and ionic activities were calculated at 25 °C with the Wateq software adapted for personal computer (Truesdell and Jones, 1974). Ionic activity coefficients were determined with the Davies equation.

CHEMICAL COMPOSITION OF GROUNDWATER

The salinity of groundwaters increased from the limit of the lowlands and the uplands to the river axis and reached high values of EC close to 100 dS m^{-1} . Three types of groundwaters are identified by the chemical analyses (fig. 1 and table I).

The first type (F1) is highly concentrated (EC > 4 dS m^{-1}). The chloride ion is dominant with an anionic ratio higher than 80% and the sodium ratio ranges from 60 to 80%. The pH is very acid with the acid sulphate influence (values close to 3 or 3.5) but can reach values of 6.5 with the tidal influence. This

groundwater is located in the central part of the valley occupied by acid sulphate soils.

The second type (F2) is moderately concentrated (0.35 dS m^{-1} < EC < 7 dS m^{-1}) and characterized by the sulphate ion. Its anionic ratio is higher than 75% and the sodium ratio has decreased (< 25%). The aluminium ratio varies from 1 to 55% and the iron ratio from 3 to 50%. The pH is very acid and ranges from 3 to 4. It is localized on the edge of the valley.

The third type (F3) contains the most diluted groundwaters (EC < 0.6 dS m^{-1}) which belong to the continental part of the watershed. The bicarbonate ion is present with an anionic ratio varying from 1 to 60%. The chloride ratio is higher than 50% and the sulphate ratio is lower than 25%. Groundwaters weather and drain the ferrallitic soils which surround the Djiguioum valley. The pH is higher than 4.5 and can reach 6.5.

CHEMICAL BEHAVIOUR OF GROUNDWATER

The three groundwater types are presented in figure 2. Type F3 is representative of continental groundwater which drains ferrallitic soils and flows towards valleys in Casamance (Chauvel, 1977). When flow reaches acid sulphate soils, sulphate, aluminium and iron contents are richer and groundwater becomes type F2.

In the dry season, groundwater transfer in these soils is associated with an evaporation process. Water concentration induces aluminium and iron mineral precipitation. We find them in the type F2 groundwater area. Therefore we want to show how type F2 evolves during a concentration process.

We have simulated the concentration of a sulphate groundwater (type F2, table II) which is saturated with respect to a basic aluminium sulphate (BAS) and undersaturated with respect to other sulphate minerals, especially gypsum.

During solution concentration, BAS precipitate and Al^{3+} , OH^- , SO_4^{2-} activities have evolved according to the T law (Tardy and Gac, 1979). We have fixed the concentration factor so as to avoid any precipitation of other sulphate minerals and we have considered that there are no other processes, such as clay or organic matter adsorption, than precipitation.

Al^{3+} , OH^- , SO_4^{2-} activities were calculated for the oversaturated solution. As OH^- does not vary, we have determined the amount of sulphate and aluminium consumed during BAS precipitation, considering the final solution to be saturated with respect to BAS.

Thermodynamic calculations were carried out with the F2 groundwater which was concentrated four times: results are presented in table III. We observe that the final solution is chloride and sodic (type F1) because of the sulphate and aluminium consumption during the concentration phase. Such a concentration process occurs when a sulphate groundwater flows slowly with a lateral transfer from the valley edge.

Figure 3 shows the solubility diagram of a basic aluminium sulphate (BAS) with a stoichiometric formula as AlOHSO_4 . All groundwaters are saturated with respect to this mineral proposed by Van Breemen (1973, 1976) and assumed to be the jurbanite by Nordstrom (1982). However, no mineralogical argument has enhanced the existence of such an aluminium sulphate (Vieillefon, 1977; Montoroi, 1996). In Djigunoum valley, we have only identified alunogen as an aluminium sul-

phate with a formula as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 17\text{H}_2\text{O}$ (Montoroi, 1995). Equilibrium reactions and different precipitation kinetics can explain the non-formation of jurbanite in acid sulphate soils (Nordstrom, 1982).

CONCLUSION

In Djigunoum valley, where an anti-salt dam was built, three types of groundwater were identified in relation to its concentration level and biogeochemical evolution of acid sulphate soils. However, this diversity can be interpreted as a geochemical evolution of continental groundwater which flows through acid sulphate soils.

Initially bicarbonated (type F3), groundwater is enriched in sulphate, aluminium and iron ions and evolves into type F2. Then, during its flow towards the river axis, groundwater concentrates by evaporation which encourages aluminium sulphate precipitation and type F1 formation.

The evolution from type F2 to F1 is shown by thermodynamic calculations that consider solubility of a hypothetical mineral, jurbanite.

I. INTRODUCTION

La sécheresse qui sévit en Afrique de l'Ouest depuis un quart de siècle a entraîné la salinisation et l'acidification des eaux de surface et des sols de mangrove en Basse-Casamance. Des sols nus, sulfatés acides et sursalés (tannes), se développent naturellement, au détriment de la végétation de mangrove (Marius, 1979).

Dans les vallées aménagées par un barrage « antisel » (Boivin 1990 ; Albergel *et al.*, 1993 ; Montoroi, 1996), la submersion quotidienne des sols par les marées ne se produit plus, tandis que les eaux de ruissellement peuvent s'accumuler à l'amont du barrage. En saison sèche, les sols, situés en amont du barrage, subissent des périodes d'exondation prolongées, qui favorisent les processus d'acidification liés à l'oxydation des sédiments pyriteux. En saison des pluies, leur submersion crée

temporairement de nouvelles conditions réductrices. L'alternance saisonnière des phases d'inondation et d'exondation favorise la transformation physique et biochimique des sols de mangrove en sols sulfatés acides. Les sols du bas-fond sont affectés par la salinité, à des degrés divers, selon leur position par rapport à l'ancien lit du marigot. Des efflorescences salines se forment durant la saison sèche, notamment des sels d'aluminium et/ou de fer en bordure de la vallée (Le Brusq *et al.*, 1987 ; Montoroi, 1996).

Un précédent article a présenté la nature minéralogique de ces efflorescences et leur distribution spatiale dans la vallée aménagée de Djigunoum (Montoroi, 1995). Les observations suggèrent que les sels d'aluminium et/ou de fer sont les premiers à précipiter, selon une séquence minéralogique décrite dans cet article, lorsque les eaux de la retenue s'évaporent. Dans cette note, nous proposons

Fig. 1 Distribution spatiale des eaux de nappe dans la vallée de Djigouinour.

-  Eaux très concentrées et très acides : faciès chloruré sodique (F1).
 Eaux modérément concentrées et très acides : faciès sulfaté ferro-aluminique (F2).
 Eaux faiblement concentrées et acides : faciès chloruré et bicarbonaté sodique (F3).

Spatial distribution of groundwaters in the Djigouinour valley.

-  Highly concentrated and strongly acid waters: sodic chloride type (F1).
 Moderately concentrated and strongly acid waters: ferrous and aluminous sulphate type (F2).
 Weakly concentrated and acid waters: sodic chloride and bicarbonate type (F3).

d'analyser la modification du faciès chimique de la nappe lorsque celle-ci s'enrichit ou se concentre.

II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

La situation géographique et le contexte environnemental de la vallée de Djigouinour ont été décrits dans l'étude précédente de Montoroi (1995).

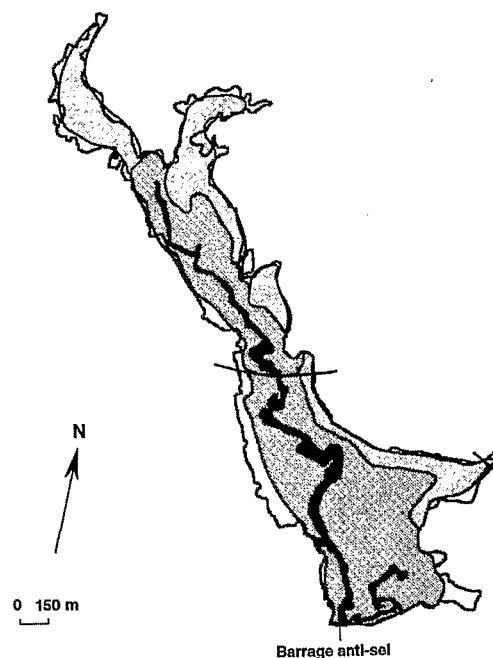
Des analyses complètes ont été réalisées sur 63 échantillons d'eau de nappe, prélevés dans un réseau piézométrique couvrant toute la vallée, au début (eaux diluées) et à la fin de la saison sèche (eaux concentrées).

Les concentrations ioniques totales sont mesurées par spectrométrie d'absorption atomique pour Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Al^{3+} et Fe^{3+} et par colorimétrie pour Cl^- , SO_4^{2-} et Fe^{2+} . Le pH et la conductivité électrique (CE) ont été déterminés directement sur le terrain à la température de 25° C.

Les concentrations et les activités ioniques ont été calculées à 25 °C par une version micro-informatique du logiciel de spéciation Wateq (Truesdell et Jones, 1974). Les coefficients d'activité ionique sont déterminés à partir de l'équation de Davies.

III. COMPOSITION CHIMIQUE DE LA NAPPE

La nappe présente un gradient de concentration depuis la bordure de la vallée vers le



marigot, la CE pouvant atteindre 100 dS m⁻¹. Trois types de faciès chimiques ont été identifiés par les analyses chimiques (fig. 1 et tableau I).

Le premier type (F1) est relatif à des eaux de nappe très concentrées (CE > 4 dS m⁻¹). L'anion dominant est le chlorure, avec un rapport anionique supérieur à 80 %. Pour les cations, Na^+ est compris entre 60 et 80 % du total des cations, Al^{3+} est inférieur à 5 % et $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ est compris entre 20 et 30 %, avec une prédominance de Mg^{2+} . Le pH est le plus souvent très acide (valeurs voisines de 3-3,5).

Tableau I Composition chimique moyenne des eaux de nappe à deux périodes de l'année (en pourcentage anionique et cationique).

Average chemical composition of groundwaters at two periods of the year (in anionic and cationic ratio).

Faciès chimique	CE	pH	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	H ⁺	Al ³⁺	Fe ^{3+/2+}	Ca + Mg	Na + K	Al + Fe + H
	(dS m ⁻¹)			(%)									(%)		
Fin de la saison sèche															
F3	0,2	5,1	67,3	17,2	15,5	21,4	14,0	44,6	2,7	1,5	7,1	8,5	35,4	47,4	17,2
F2	3,1	3,7	12,2	87,0	0,8	24,6	17,7	9,0	0,9	1,4	20,7	25,7	42,3	9,9	47,8
F1	44,8	4,2	87,3	12,7	0,0	5,2	20,8	69,9	1,2	0,1	1,2	1,6	25,9	71,1	2,9
Début de la saison sèche															
F3	0,4	4,9	62,6	22,2	15,2	20,9	12,9	47,7	3,4	1,6	8,4	5,1	33,8	51,1	15,1
F2	2,1	3,5	14,5	85,3	0,2	29,1	16,2	11,3	1,0	3,1	24,0	15,3	45,4	12,3	42,4
F1	25,4	3,6	84,0	16,0	0,0	5,5	19,2	70,0	1,5	0,4	2,7	0,7	24,7	71,5	3,8

Il peut varier entre 3 (influence des sols sulfatés acides) et 6,5 (influence des eaux marines). Ce type de nappe se localise à faible profondeur (moins de 1 m), dans la partie centrale de la vallée occupée par les sols sulfatés acides.

La nappe de faciès F2 est modérément salée ($0,35 \text{ dS m}^{-1} < \text{CE} < 7 \text{ dS m}^{-1}$) et se caractérise par une prédominance de l'ion sulfate ($\text{SO}_4^{2-} > 75 \%$). Pour les anions, Al^{3+} varie de 1 à 55 % et $\text{Fe}^{2+/3+}$ de 3 à 50 %, la somme de ces ions métalliques allant de 10 à 80 %. Il n'y a pas de différenciation nette entre les teneurs en Ca^{2+} et Mg^{2+} , la somme variant de 15 à 80 %. La somme $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ reste inférieure à 25 %. Le pH est compris entre 3 et 4. On localise nettement cette nappe dans la partie médiane de la vallée comprise entre le bas des versants et le lit mineur, la profondeur étant de l'ordre de 1 à 2 m.

Le troisième type de nappe (F3) correspond aux eaux les plus diluées ($\text{CE} < 0,6 \text{ dS m}^{-1}$) et est marqué par la présence de bicarbonates, dont le pourcentage est variable et compris entre 1 et 60 %. Bien que les teneurs absolues soient faibles, le pourcentage de Cl^- est en général supérieur à 50 % et celui de SO_4^{2-} est inférieur à 25 %. Pour les cations, Na^+ est supérieur à 20 % et $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ est compris entre 20 et 30 %. Al^{3+} varie de 2 à 25 % et $\text{Fe}^{2+/3+}$ de 3 à 55 %, la somme $\text{Al}^{3+} + \text{Fe}^{2+/3+}$ étant comprise entre 6 et 65 %. Le pH est moins acide et il varie de 4,5 à 6,5. Cette nappe, située sous les versants, est alimentée par les eaux drainant les sols ferrallitiques qui entourent la vallée de Dji-guinoum.

IV. FILIATION CHIMIQUE DES EAUX DE NAPPE

Une coupe schématique transversale de la vallée permet de visualiser les relations entre les différents faciès géochimiques (fig. 2).

Les eaux de faciès F3 sont caractéristiques des eaux que l'on retrouve couramment dans les nappes des plateaux ferrallitiques de la Casamance (Chauvel, 1977). Lorsque ces eaux très peu chargées entrent en contact avec les sols sulfatés acides du bas-fond, elles

s'enrichissent fortement en éléments provenant de l'altération des minéraux de ces sols et notamment en sulfates, aluminium et fer, accessoirement en magnésium et calcium. Elles acquièrent ainsi un faciès de type F2.

Au cours de leur lent déplacement à travers les sols du bas-fond en direction de l'axe de drainage, les eaux de faciès F2 sont soumises à une évaporation qui va croissante à mesure que la profondeur de la nappe s'amenuise. Cet effet évaporatoire est cumulatif pendant la durée du transit entre le bas du versant et l'axe de drainage. Cette évaporation concentre les eaux et provoque la précipitation d'un cortège de minéraux sulfatés aluminiques et/ou ferreux que l'on retrouve en surface des sols, dans la zone intermédiaire correspondant à l'aire occupée par les eaux de faciès F2.

La précipitation de ces minéraux produit une modification du faciès chimique des eaux, telle que l'on passe du faciès F2 au faciès F1 ?

Afin de vérifier ce point, une modélisation numérique a été réalisée dans le but de simuler la concentration d'une eau de faciès F2 (tableau II), initialement en équilibre avec un sulfate basique d'aluminium AlOHSO_4 (on le nommera SBA dans ce qui suit), mais sous-saturée vis-à-vis des autres minéraux sulfatés, notamment du gypse.

Pendant la concentration, le SBA précipite et les activités des ions formant ce minéral évoluent selon la loi du « T » (Tardy et

Fig. 2 Mode de formation des sulfates d'aluminium et de fer au cours du transfert latéral de la nappe.

- ① Concentration et remontée capillaire par évaporation : précipitation des premiers sulfates d'aluminium et/ou de fer.
- ② Homogénéisation des eaux de surface et de nappe par diffusion chimique.

Formation mode of aluminium and iron sulphates during lateral transfer of groundwater.

- ① Concentration and upward capillary motion by evaporation: first aluminium and/or iron sulphate precipitation.
- ② Homogenized surface and groundwaters by chemical diffusion.

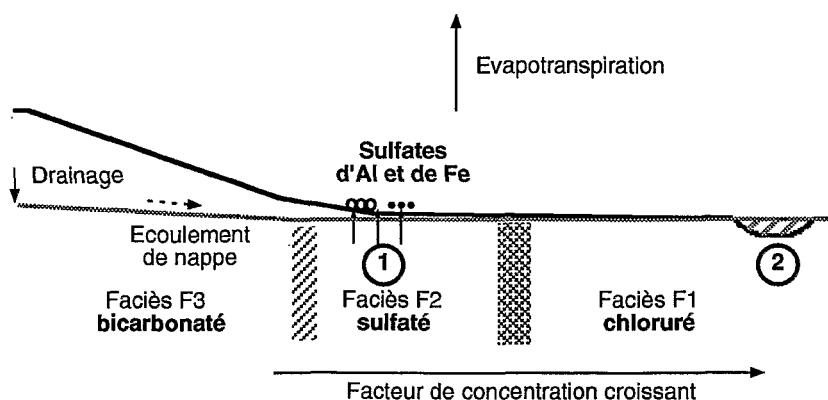


Tableau II Composition chimique d'une eau de nappe sulfatée (faciès F2), prélevée à la fin de la saison sèche.
Chemical composition of sulphate groundwater (F2 type), sampled at the end of dry season

CE (dS m ⁻¹)	pH	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	H ⁺	Al ³⁺	Fe ^{3+/2+}	SiO ₂ (mg L ⁻¹)
(mmol _c L ⁻¹)											
4,4	2,7	14,0	61,0	5,0	13,0	9,0	0,12	1,66	48,8	11,8	159,0

Gac, 1979). Le processus est arrêté avant que le seuil de précipitation d'autres minéraux que le SBA ne soit atteint.

En faisant l'hypothèse qu'il n'y a pas d'autre possibilité de piégeage de l'ion sulfate (saturation de la solution vis-à-vis d'autres minéraux sulfatés, adsorption sur les minéraux argileux ou la matière organique), la quantité de sulfates consommés par la précipitation du SBA est déduite de la teneur en sulfates de la solution et un calcul de spéciation permet la détermination du faciès chimique de la solution finale.

Dans la solution initiale, on a les produits d'activités ioniques suivants (tableau III) :

$$\{Ca^{2+}\} \{SO_4^{2-}\} = 10^{-5,42}$$

$$\{Al^{3+}\} \{SO_4^{2-}\} \{OH^{-}\} = 10^{-16,34}$$

Les produits de solubilité, considérés à 25 °C, étant $K = 10^{-4,64}$ (Lindsay, 1979) pour le gypse et $K = 10^{-17,23}$ (Van Breemen, 1976) pour le SBA, l'eau choisie est bien sous-

saturée vis-à-vis du gypse et quasiment saturée par rapport au SBA.

Après avoir concentré la solution quatre fois, les produits des activités ioniques indiquent que l'eau reste légèrement sous-saturée vis-à-vis du gypse et devient nettement sursaturée vis-à-vis du SBA (tableau III) :

$$\{Ca^{2+}\} \{SO_4^{2-}\} = 10^{-4,72}$$

$$\{Al^{3+}\} \{SO_4^{2-}\} \{OH^{-}\} = 10^{-15,79}$$

Le retour à l'équilibre de la solution concentrée se fera de manière à ce que :

$$\begin{aligned} \{Al^{3+}\} \{SO_4^{2-}\} \{OH^{-}\} 10^{-1,44} &= \\ &= 10^{-15,79} 10^{-1,44} = 10^{-17,23} \end{aligned}$$

En supposant que OH^{-} ne varie pratiquement pas et que Al^{3+} et SO_4^{2-} évoluent de façon stoechiométrique, les activités ioniques de la solution à l'équilibre (f) sont obtenues à partir des activités ioniques de la solution sursaturée

Tableau III Concentration ionique (en molalité) et activité ionique à 25 °C, au cours de la concentration d'une nappe sulfatée.

Ionic concentration (in molality) and ionic activity at 25 °C during sulphate groundwater concentration.

	Activité ionique					γ (L ⁻¹ mol)		Molalité (mol _c L ⁻¹)		
	Ca ²⁺	Al ³⁺	OH ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Al ³⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Al ³⁺
Solution initiale à l'équilibre	10 ^{-3,16}	10 ^{-3,09}	10 ^{-10,99}	10 ^{-2,26}	10 ^{-1,97}	3,733 10 ⁻¹	1,086 10 ⁻¹	2,943 10 ⁻²	1,404 10 ⁻²	2,274 10 ⁻²
Solution sursaturée avant précipitation (i)	10 ^{-2,74}	10 ^{-2,82}	10 ^{-10,99}	10 ^{-1,98}	10 ^{-1,42}	2,393 10 ⁻¹	5,969 10 ⁻²	8,698 10 ⁻²	5,690 10 ⁻²	7,544 10 ⁻²
Solution concentrée à l'équilibre (f)	—	—	—	—	—	—	—	1,674 10 ⁻²	5,690 10 ⁻²	1,452 10 ⁻²

γ : Coefficient d'activité.

turée (i), moyennant un facteur multiplicatif :

$$\begin{aligned} \{Al^{3+}\}_f &= \{Al^{3+}\}_i 10^{(-1,44/2)} \\ &= \{Al^{3+}\}_i 10^{-0,72} = 10^{-2,82} 10^{-0,72} = 10^{-3,54} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \{SO_4^{2-}\}_f &= \{SO_4^{2-}\}_i 10^{(-1,44/2)} \\ &= \{SO_4^{2-}\}_i 10^{-0,72} = 10^{-1,98} 10^{-0,72} = 10^{-2,70} \end{aligned}$$

En considérant les coefficients d'activité de la solution concentrée, on exprime les résultats en molalité :

$$\begin{aligned} [Al^{3+}]_f &= 10^{-3,54} / 5,969 10^{-2} \\ &= 4,84 10^{-3} \text{ mol L}^{-1}, \text{ soit } 1,452 10^{-2} \text{ mol}_c \text{ L}^{-1} \\ [SO_4^{2-}]_f &= 10^{-2,70} / 2,393 10^{-1} \\ &= 8,37 10^{-3} \text{ mol L}^{-1}, \text{ soit } 1,674 10^{-2} \text{ mol}_c \text{ L}^{-1} \end{aligned}$$

La précipitation du SBA a consommé des ions Al^{3+} et SO_4^{2-} , tandis que l'ion Cl^- s'est concentré quatre fois. La solution finale à l'équilibre présente ainsi un faciès chloruré-sodique de type F1.

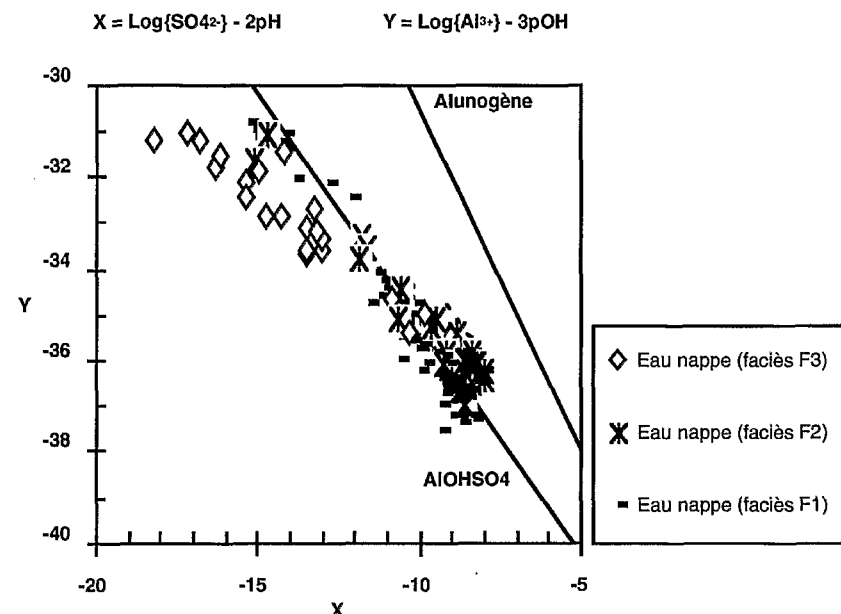
Ce calcul, relativement sommaire, met en évidence le fait que les eaux de faciès F1 et F2 n'ont pas forcément une origine différente. Il suffit que les eaux de faciès F2 se concentrent en formant du sulfate d'aluminium, pour qu'elles acquièrent un faciès de type F1.

C'est ce mécanisme qui nous paraît à l'origine du passage progressif du faciès F2 au faciès F1, au cours du lent déplacement des eaux de nappe à travers les sols du bas-fond.

Le minéral de type SBA, pris en considération dans la simulation, présente une composition et une solubilité très proches d'un sulfate d'aluminium, la jurbanite, de formule $AlOHSO_4 \cdot 5H_2O$ et de produit de solubilité à 25 °C $K = 10^{-17,8}$ (Nordstrom, 1982).

La figure 3 montre l'état de saturation des eaux de nappe vis-à-vis de ce minéral. On observe qu'hormis les eaux de nappe de faciès F3, qui sont sous-saturées, toutes les eaux sont proches de l'équilibre.

La probabilité de l'existence de ce sulfate d'aluminium a déjà été signalée par Vieillefont (1977), pour des solutions de sols sulfatés



acides situés dans une autre vallée de Basse-Casamance. Mais, comme cet auteur le souligne, « aucun minéral cristallisé correspondant à cette formule n'a été observé, ni en Thaïlande, ni au Sénégal ».

Dans le cadre de cette étude, un tel minéral n'a pas non plus été identifié dans les efflorescences salines qui ont été prélevées. Le seul sulfate d'aluminium observé est l'alunogène (Montoroi, 1995), dont la formule est $Al_2(SO_4)_3 \cdot 17H_2O$ et la constante d'équilibre K à 25 °C est égale à $10^{-7,0}$ (fig. 3). Des réactions d'équilibre entre les phases solides et des cinétiques différentes de précipitation expliqueraient la non-formation de la jurbanite dans les sols sulfatés acides (Nordstrom, 1982).

V. CONCLUSION

Dans la vallée de Djiginoum, en Basse-Casamance, la nappe présente plusieurs faciès chimiques, qui se distribuent dans l'espace selon le degré de concentration des eaux, au point que l'on peut se demander s'il ne s'agit pas de plusieurs nappes. Mais, cette diversité peut aussi être interprétée comme

Fig. 3 Diagramme d'équilibre de $AlOHSO_4$ ($K = 10^{-17,23}$ à 25 °C d'après Van Breemen, 1973). La droite d'équilibre de l'alunogène $Al_2(SO_4)_3 \cdot 17H_2O$ a été ajoutée ($K = 10^{-7,0}$ à 25 °C, d'après Nordstrom, 1982).

Solubility diagram of $AlOHSO_4$ ($K = 10^{-17,23}$ at 25 °C by Van Breemen, 1973). The equilibrium line of alunogen $Al_2(SO_4)_3 \cdot 17H_2O$ was added ($K = 10^{-7,0}$ at 25 °C by Nordstrom, 1982).

l'évolution géochimique progressive de la nappe des plateaux, qui s'écoule dans les bas-fonds et rejoint l'axe de drainage.

Initialement bicarbonatée calcique (faciès F3), l'eau s'enrichit en sulfate, en fer et en aluminium, en atteignant les sols sulfatés acides du bas-fond (faciès F2).

Au cours de son transit vers l'axe de drainage, elle est soumise à une concentration par évaporation, qui entraîne la précipitation

d'un sulfate d'aluminium et le développement d'un faciès chloruré-sodique (F1).

La démonstration de la transition du faciès F2 vers le faciès F1 s'appuie sur une simulation numérique faisant intervenir un minéral hypothétique, la jurbanite, qui contrôlerait la concentration des ions aluminium et sulfate présents dans la nappe. Elle suit en cela des hypothèses formulées antérieurement par Van Breemen (1973, 1976) et Vieillefon (1977).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALBERGEL, J., LAMACHERE, J.M., LIDON, B., MOKADEM, A.I. et van DRIEL, W., 1993. Mise en valeur agricole des bas-fonds au Sahel. Typologie, fonctionnement hydrologique, potentialités agricoles, Rapport final du projet CORAF-R3S, CIEH, Ouagadougou, 335 p.
- BOIVIN, P., 1990. Caractérisation physique des sols sulfatés acides de la vallée de Katouré (Basse-Casamance, Sénégal). Étude de la variabilité spatiale et relations avec les caractéristiques pédologiques, *Études et Thèses, ORSTOM*, Paris, 231 p.
- CHAUVEL, A., 1977. Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées, *Trav. et Doc., ORSTOM*, Paris, 62, 532 p.
- LE BRUSQ, J.Y., LOYER, J.Y., MOUGENOT, B. et CARN, M., 1987. Nouvelles paragenèses à sulfates d'aluminium, de fer et de magnésium, et de leur distribution dans les sols sulfatés acides du Sénégal, *Sci. Sol*, 25, 3, p. 173-184.
- LINDSAY, W. L., 1979. *Chemical equilibria in soils*, John Wiley and Sons, New York, 448 p.
- MARIUS, C., 1979. Effets de la sécheresse sur l'évolution phytogéographique et pédologique de la mangrove en Basse-Casamance, *Bull. IFAN*, 41, sér. A, 4, p. 669-691.
- MONTOROI, J.P., 1995. Mise en évidence d'une séquence de précipitation des sels dans les sols sulfatés acides d'une vallée aménagée de Basse-Casamance (Sénégal), *C.R. Acad. Sci. Paris*, 320, série II a, p. 395-402.
- MONTOROI, J.P., 1996. Gestion durable des sols de l'écosystème de mangrove en Casamance (Sénégal). Dynamique de l'eau et des sels en période de sécheresse, *Études et Thèses, ORSTOM*, Paris, 263 p.
- NORDSTROM, D.K., 1982. The effect of sulfate on aluminum concentrations in natural waters : some stability relations in the system $Al_2-SO_3-H_2O$ at 298 K, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, 4, p. 681-692.
- TARDY, Y. et GAC, J.Y., 1979. Contrôle de la composition chimique des solutions par la précipitation des minéraux dans le sol. Ébauche d'un modèle thermodynamique pour la formation des argiles, *Sci. Sol*, 2-3, p. 107-112.
- TRUESDALL, A. H. et JONES, B.F., 1974. Wateq, a computer program for calculating chemical equilibria of natural waters, *J. Res. U.S. Geol. Survey*, 2, (2), p. 233-248.
- Van BREEMEN, N., 1973. Dissolved aluminium in acid sulfate soils and in acid mine waters, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37, p. 694-697.
- Van BREEMEN, N., 1976. Genesis and solution chemistry of acid sulfate soils in Thailand, *Agric. Res., Rep.* 848, Pudoc, Wageningen, 263 p.
- VIEILLEFON, J., 1977. Les sols des mangroves et des tannes de Basse-Casamance (Sénégal). Importance du comportement géochimique du soufre dans leur pédogenèse, *Mém. ORSTOM*, 83, Paris, 291 p.