

Mise en évidence d'une séquence de précipitation des sels dans les sols sulfatés acides d'une vallée aménagée de Basse-Casamance (Sénégal)

Jean-Pierre Montoroi

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 320, série II a,
p. 395 à 402,
1995

ORSTOM, Laboratoire des Formations
Superficielles,
72, route d'Aulnay,
93143 Bondy Cedex, France.

Résumé Au cours de la sécheresse actuelle en Afrique de l'Ouest, de nombreuses efflorescences salines se sont formées à la surface des sols sulfatés acides de Basse-Casamance, notamment dans les vallées aménagées par un barrage anti-sel. Leur caractérisation minéralogique montre qu'elles sont constituées par une grande variété de sulfates d'aluminium et de fer. Les différentes paragenèses minérales s'ordonnent dans le paysage selon une séquence de précipitation.

Mots-clés : Efflorescences salines, Aluminium, Minéralogie, Sol sulfaté acide, Casamance, Afrique de l'Ouest.

Abstract Supply of an acid sulfate minerals sequence in a lower Casamance valley (Senegal)

During the recent drought in West Africa, saline efflorescences were formed on the surface of acid sulfate soils in Lower Casamance, especially in the valleys equipped with an anti-salt dam. Their mineralogy show various aluminium and iron sulfate minerals. They are distributed in a valley with a precipitation sequence.

Keywords : Saline efflorescences, Aluminium, Mineralogy, Acid sulfate soil, Casamance, West Africa.

**Abridged
English
Version**

MOST of Lower Casamance is flooded or waterlogged by seawater or seasonally by rain water. This region is occupied by a mangrove ecosystem which is historically exploited for rice culture and fishery. The recent drought in West Africa has affected the hydrology of the River Casamance (Dacosta, 1992). The significant decrease in rainfall has induced the concentration of surface waters which are more concentrated than seawater (Pages and Debenay, in the 1987). The drop in the groundwater tables away from tidal influence has caused the oxidation of pyritic layers in soils and the area of acid sulfate soils has considerably increased (Marius, 1985 ; Boivin *et al.*, 1986). The soils have become very saline and severely acid water and rain water is unable to drain off salts. Rice culture has slowly been abandoned by local population. The high levels of salinity in the rivers, occurring during the very dry years at the beginning of the 1980s, made it necessary to build small anti-salt dams

to protect the rice fields from salinization. However, high concentrations of dissolved aluminium were found in acid sulfate soil waters, especially in valleys equipped with an anti-salt dam (Le Brusq *et al.*, 1987; Vieillefon, 1977; Montoroi, 1994). In such a valley, the soils are submerged during the rainy season from June to October. During the evaporation period of the dam water, from November to May, saline efflorescences are formed on the soil surface.

This paper describes the occurrence of various sulfate minerals in a valley of the Casamance and highlights their spatial distribution.

MATERIALS AND METHODS

The Djigouinou valley is located on the right bank of the Casamance River, 15 km northeast of Ziguinchor. The annual rainfall is about 1,100 mm per year over the last 20 year period. The soils are hydromorphic and the central part of the valley is occupied by acid sulfate soils. They are highly acid (pH < 4) and saline with a wide range of salinity.

09 OCT. 1995

ORSTOM Fonds Documentaire

N° : 42-484 Ex 1

Cote : B

Note

présentée par
Georges Pédro.

remise le 11 juillet 1994,
acceptée après révision
le 8 décembre 1994.

They are clayey and the dominant clay mineral is kaolinite. Saline efflorescences were collected in different parts of the valley during the dry season.

Powder X-ray diffractometry and scanning electron microscopy were used for the identification of the minerals that composed the efflorescences. The X-ray data of thirty samples were determined with the system of mineralogy of Dana (Palache *et al.*, 1951). The most representative diffractogram patterns were selected for the scanning electron microscopy. This apparatus was used to obtain crystal images. An electron microprobe was used to analyze the observed crystals. X-ray spectra were obtained with this microprobe and have confirmed the X-ray diffraction identification.

MINERALOGY OF THE SALINE EFFLORESCENCES

The saline efflorescences form different types of microcrystalline crusts on the soil surface. They are located on bare areas where evaporation is intense. Some of them are continuous and have included soil particles. The evolution of these crusts in dry conditions transforms the soil surface into a layer of saline powder. Other crusts appear like irregular spots, often associated with ferric oxide deposit. Their colour is white, sometimes with a yellowish or reddish tinge. Their size is variable and is assumed to be related with the microtopography and the particle redistribution before flooding. Salts are very soluble.

The minerals which composed the saline efflorescences are listed in table I. Alunogen, rozenite, halotrichite, tamarugite/soda alum and several other sulfate minerals have been found. Halotrichite, pickeringite and apjohnite appear as acicular or fibrous crystals with a 1 mm diameter. The tamarugite/soda alum crystals are tabular like "dishes" with variable dimensions (a diameter between 10 and 30 mm; a thickness of 0.5 mm). Alunogen forms irregular plates with a thin section (0.5 to 1 mm). The rozenite looks like aggregates of granular crystals with a smooth shape (1 to 3 mm in diameter).

I. INTRODUCTION

La Basse-Casamance, située dans la partie méridionale du Sénégal, comprend l'estuaire du fleuve Casamance qui forme un vaste do-

maine fluvio-marin. Les sols y sont périodiquement inondés ou engorgés par les eaux marines et/ou par les eaux météoriques. Ils sont occupés par la mangrove qui est historiquement exploitée pour la culture du riz et la pêche. La sèche-

SPATIAL DISTRIBUTION OF EFFLORESCENCES

Efflorescences observed during the dry season form different types of aluminium (alunogen) and ferrous (rozenite) sulfates which are bordering on the valley (figure 1). Both these minerals are associated with mixed aluminium sulfates such as halotrichite, pickeringite and apjohnite (table II).

In the central part of the valley where soil water is more concentrated, another aluminium sulfate, the tamarugite or the soda alum, has been found and is associated with gypsum, halite and magnesium sulfates such as starkeyite or hexahydrate. Jarosite can precipitate in this area under favourable redox conditions (figure 1 and table II).

CONCLUSION

Several aluminium sulfates have been found, especially alunogen, and are associated with ferrous or ferric sulfates. The formation of these minerals is also observed in different parts of the lowlands of the Casamance catchment. We can propose the precipitation sequence as shown in table III.

This interpretation needs to be validated with geochemical arguments, although the mechanisms controlling the solubility of aluminium are very complex.

maine fluvio-marin. Les sols y sont périodiquement inondés ou engorgés par les eaux marines et/ou par les eaux météoriques. Ils sont occupés par la mangrove qui est historiquement exploitée pour la culture du riz et la pêche. La sèche-

resse qui sévit en Afrique de l'Ouest depuis un quart de siècle a eu des répercussions considérables sur l'hydrologie du fleuve Casamance (Dacosta, 1992). Le déficit pluviométrique s'est manifesté par une diminution de l'écoulement de surface sur l'ensemble du bassin versant et par une baisse régionale du niveau de la nappe superficielle. Dans le premier cas, les eaux marines ont pénétré dans tout le réseau hydrographique et se sont concentrées dans les parties amont durant la longue saison sèche (Pages et Debenay, 1987). Dans le second cas, les horizons de sol contenant des sulfures de fer (pyrite) se sont oxydés. L'aire de répartition des sols sulfatés acides ainsi formés s'est régulièrement accrue (Marius, 1985; Boivin *et al.*, 1986). Les sols se sont dégradés chimiquement car ils sont devenus très salés et fortement acides, les pluies n'étant plus suffisamment abondantes pour pouvoir les dessaler. La riziculture, historiquement implantée, est peu à peu délaissée par les populations locales. Pour protéger les rizières contre la salinité des rivières devenues trop élevée durant les années très déficitaires, des barrages anti-sel ont été réalisés au début des années 80. De fortes teneurs en aluminium ont été observées dans les sols sulfatés acides, notamment en amont des barrages anti-sel (Le Brusq *et al.*, 1987; Vieillefon, 1977; Montoroi, 1994). De février à juillet, ces vallées sont totalement asséchées. Le bas-fond se remplit durant toute la saison des pluies qui se répartit de juin à octobre, le trop-plein étant évacué au cours des ouvertures du barrage. Ensuite, les eaux de la retenue se concentrent par évaporation durant les premiers mois de la saison sèche (novembre à février) et, au cours de leur retrait par évaporation, des efflorescences salines particulières apparaissent.

Nous nous proposons de caractériser minéralogiquement ces efflorescences dans une vallée aménagée de Basse-Casamance et d'étudier leur distribution spatiale.

II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

La vallée de Djiguinoum est située sur la rive droite du fleuve Casamance, à 15 km au NE de la principale ville Ziguinchor. La pluviosité annuelle moyenne est d'environ 1 100 mm sur les 20 dernières années. Les sols sont hydro-

morphes et la partie axiale de la vallée est occupée par les sols sulfatés acides qui se sont formés immédiatement après la construction du barrage anti-sel (1983). Leur acidité est très forte ($\text{pH} < 4$) et leur salinité très élevée ($\text{CE} < 100 \text{ dS m}^{-1}$). Ils sont argileux, le minéral argileux dominant étant la kaolinite. Les efflorescences salines sont collectées en différents lieux de la vallée durant la saison sèche.

L'identification des minéraux composant ces efflorescences a été réalisée par diffractométrie aux rayons X et par microscopie électronique à balayage (MEB). Les diagrammes de trente échantillons ont été interprétés en se référant au système de Dana (Palache *et al.*, 1951). Les diffractogrammes les plus représentatifs ont été alors sélectionnés et les échantillons correspondants ont été observés au MEB afin d'obtenir des images des cristaux identifiés. Leur analyse qualitative à la microsonde a permis de confirmer les résultats obtenus par diffractométrie RX.

III. CARACTÉRISATION DES DIFFÉRENTES EFFLORESCENCES SALINES

Les efflorescences salines apparaissent sur l'ensemble de la vallée sous forme de croûtes superficielles que l'on peut rassembler en deux types:

- *croûtes salines continues*: Elles sont plus ou moins fragiles selon l'épaisseur ($< 1 \text{ cm}$) et peuvent inclure des particules du sol (sables). La surface épouse la micro-topographie plus ou moins régulière, les cristaux formant des aiguilles fines individualisées et/ou un ciment induré. Sous la croûte, on observe une micro-agrégation de la surface du sol sur une épaisseur de quelques centimètres. Les micro-agrégats sont de taille millimétrique et sont associés à des cristaux en aiguilles fines. Au cours de la dessiccation, la croûte se soufle, se fendille et se désagrège sous l'effet du vent et du piétinement (animaux ou individus). La déflation éolienne dissémine et redistribue les sels dans le paysage.

Les croûtes continues se répartissent dans la partie axiale de la vallée, notamment sur les zones dénudées. Une végétation homogène (*Eleocharis mutata*, famille des Cypéracées) s'est développée sur les sols des anciennes rizières laissées en friche: elle est adaptée aux milieux saumâtres.

- *croûtes salines discontinues*: Elles forment des amas et des placages irréguliers de taille centimétrique à décimétrique ayant un aspect soufflé; les amas reposent souvent sur une

Tableau I Détermination des minéraux de la vallée de Djiguinoum par diffractométrie RX.
Minerals of the Djiguinoum valley determined by X-ray diffractometry.

Minéral, formule chimique	Cs	Principaux pics de diffraction (en angströms et en intensité, %)	N° JCPDS
<i>Minéraux sulfatés</i> Sulfates hydratés			
Type AB (SO ₄) ₂ · x H ₂ O			
Tamarugite NaAl(SO ₄) ₂ · 6H ₂ O	M	4,22 4,21 3,65 3,96 2,90 100 80 60 30 25	19-1186
Alun de soude NaAl(SO ₄) ₂ · 12H ₂ O	C	4,23 3,65 3,98 2,72 3,15 100 50 40 12 8	1-0397
Type A (SO ₄) ₂ · x H ₂ O			
Gypse Ca SO ₄ · 2H ₂ O	M	7,63 4,28 3,07 2,87 2,69 100 100 75 45 35	33-0311
Rozénite Fe ^{II} (SO ₄) · 4H ₂ O	M	4,49 5,48 3,99 3,40 2,98 100 80 65 40 35	19-0632
Starkeyite Mg (SO ₄) · 4H ₂ O	M	4,46 5,43 3,95 2,95 3,40 100 75 65 55 45	24-0720
Pentahydrate Mg (SO ₄) · 5H ₂ O	T	4,93 3,26 5,15 3,65 2,95 100 40 30 30 30	25-0532
Hexahydrate Mg (SO ₄) · 6H ₂ O	M	4,39 5,45 5,10 4,04 2,90 100 50 45 45 30	24-0719
Type A ₂ B (SO ₄) ₄ · x H ₂ O			
Pickéringite MgAl ₂ (SO ₄) ₄ · 22H ₂ O	M	4,82 3,51 4,32 4,12 3,79 100 90 35 30 30	12-0299
Apjohnite Mn ^{II} Al ₂ (SO ₄) ₄ · 22H ₂ O	M	4,82 3,79 4,34 4,32 3,97 90 35 30 30 25	29-0886
Halotrichite Fe ^{III} Al ₂ (SO ₄) ₄ · 22H ₂ O	M	4,81 4,30 3,50 4,97 15,9 100 100 100 50 30	26-1425
Type A ₂ (SO ₄) ₃ · x H ₂ O			
Alunogène Al ₂ (SO ₄) ₃ · 17H ₂ O	T	4,49 4,39 3,97 4,33 13,5 100 80 80 75 55	26-1010
Sulfates anhydres hydroxylés			
Type AB ₃ (SO ₄) ₂ (OH) _x			
Jarosite KFe ^{III} ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	R	3,08 3,11 2,29 5,09 5,94 100 60 50 40 30	10-0443
<i>Minéraux chlorurés</i>			
Halite NaCl	C	2,82 1,99 1,63 1,26 1,15 100 55 15 11 7	05-0628

Cs = Système cristallin :
(M) monoclinique ; (C) cubique ;
(T) triclinique ; (R) rhomboédrique

JCPDS = Joint Committee on Powder
Diffraction Standards

croûte saline continue. Elles sont en général blanchâtres, mais peuvent prendre une coloration brune à jaune selon le degré d'impuretés. Elles peuvent être soit individualisées mais facilement friables, soit pulvérulentes (poudre plus ou moins fine). La présence d'efflorescences sur des débris végétaux (feuille de palmier) jonchant le sol a été observée.

Les croûtes discontinues constituent des auréoles à la périphérie des zones dénudées ou bien se développent à l'emplacement d'anciennes zones cultivées, où les sels se forment au sommet d'anciens billons arasés par

l'érosion hydrique. Elles semblent en étroite relation avec les réorganisations superficielles (minérales et organiques), provoquées notamment par les pluies et le cheminement de l'eau en surface dans des micro-dépressions naturelles ou anthropiques ; les croûtes structurales, qui se sont formées, prennent un aspect persillé au cours de leur destruction par l'alternance des phases d'humectation et de dessiccation.

Ces croûtes se localisent sur le pourtour de la vallée, dans des zones qui semblent correspondre au débouché des eaux de ruissellement et des eaux souterraines (sources)

provenant des parties hautes du bassin versant. Une végétation spécifique est associée à ces zones d'accumulation des eaux et contraste avec celle colonisant la partie axiale de la vallée. Les espèces observées appartiennent à la famille des Cypéracées (*Pycreus intactus*, *Mariscus ligularis* et *Fuirena umbellata*), sont halotolérantes et colonisent les sols humides temporairement inondés, situés en lisière de terres salées. *Fuirena umbellata* développe une pelouse de couleur vert olive qui semble caractériser les zones fortement acides.

IV. INVENTAIRE MINÉRALOGIQUE DES EFFLORESCENCES SALINES

Les minéraux, qui composent les différentes efflorescences, sont essentiellement des sulfates. Ils sont extrêmement variés comme on peut le voir sur le tableau I. Leurs caractéristiques morphologiques sont d'ailleurs très typées :

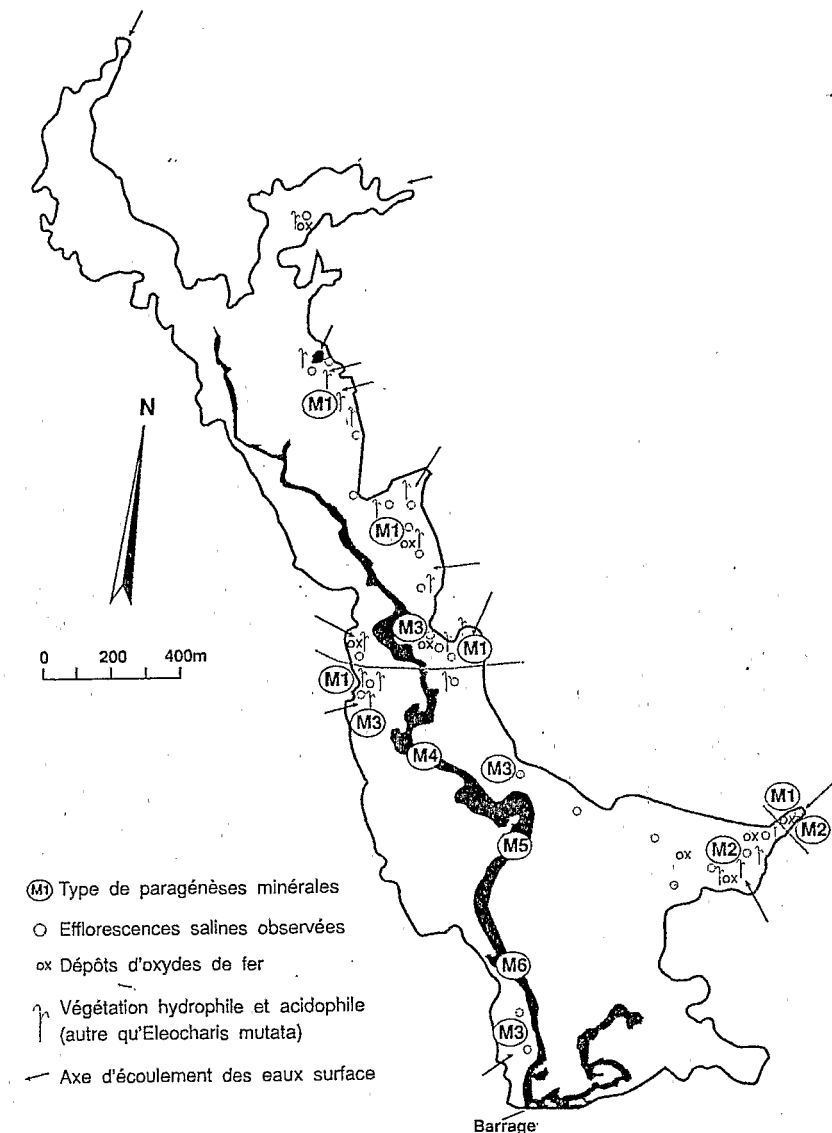
- l'*halotrichite* a un aspect en aiguilles soit isolées, soit soudées entre elles qui peuvent être enchevêtrées ou disposées selon une orientation privilégiée; ces aiguilles présentent des striations longitudinales sur leur surface et parfois des cavités arrondies; elles ont une section d'environ 1 μm lorsqu'elles sont individualisées (photographie 1).

- la *pickeringite* et l'*apjohnite* présentent également un aspect aciculaire. Ils sont toujours associés à l'*halotrichite*, mais leur visualisation précise est difficile, sans doute à cause de leur rareté dans les échantillons étudiés.

- des ensembles plans, plus ou moins individualisés, caractérisent les cristaux de l'*alunogène* et de la *tamarugite/alun de soude*:

- les cristaux d'*alunogène* forment un réseau de petites plaques plus ou moins connectées, chaque élément pouvant être constitué de plusieurs feuillettes plus ou moins soudées; l'épaisseur de ces plaques varie de 0,5 à 1 μm ; cette disposition détermine une porosité relativement fermée, l'efflorescence saline étudiée ayant un aspect compact (photographie 2);

- en revanche pour la *tamarugite/alun de soude*, les cristaux sont plus individualisés formant un ensemble homogène d'« assiettes », parfois empilées; celles-ci sont irrégulières,



- (M) Type de paragenèses minérales
- Efflorescences salines observées
- ox Dépôts d'oxydes de fer
- ↑ Végétation hydrophile et acidophile (autre qu'*Eleocharis mutata*)
- Axe d'écoulement des eaux surface

leur diamètre étant compris entre 10 et 30 μm et leur épaisseur de l'ordre de 0,5 μm ; à faible grossissement, les cristaux sont disposés sans orientation préférentielle et peuvent parfois être soudés; une forte porosité est ainsi créée, donnant à l'efflorescence saline son aspect soufflé et pulvérulent (photographie 3).

- d'autres cristaux possèdent un aspect tourmenté à faible grossissement et une forme en chou à fort grossissement:

- les cristaux de *rozénite* s'agrègent en amas de taille variable déterminant une porosité

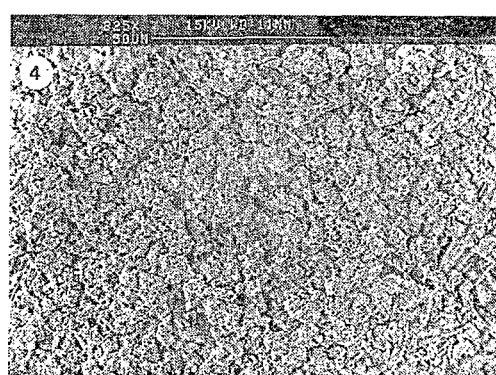
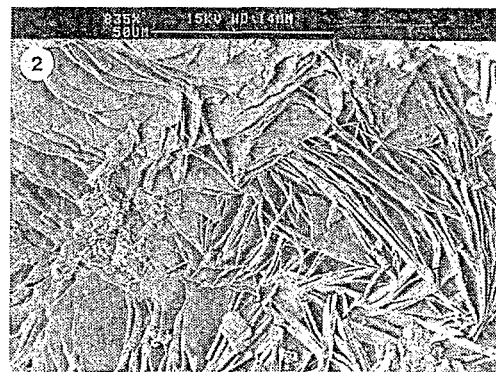
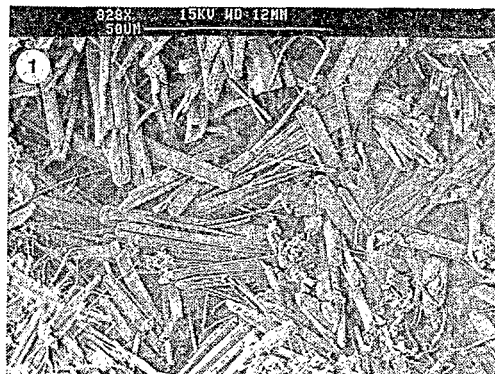
Distribution spatiale des paragenèses minérales dans la vallée de Djiguinoum (se reporter au tableau II pour la signification des types de paragenèses).

Spatial distribution of the saline efflorescences in the Djiguinoum valley (see table II for the meaning of the efflorescence types).

Photographies 1 à 4 Morphologie cristalline de plusieurs sulfates d'aluminium et de fer. 1. Halotrichite. 2. Alunogène. 3. Tamarugite-Alun de soude. 4. Rozénite.

Crystalline morphology of several aluminium and ferrous sulfates.

1. Halotrichite. 2. Alunogen.
3. Tamarugite-Soda alum. 4. Rozenite.



importante ; ils présentent un aspect arrondi, leur taille variant de 1 à 3 μm ; à un grossissement plus faible, l'aspect globulaire reste dominant (photographie 4) ;

– les cristaux de *jarosite* sont plus anguleux, avec des faces assez nettes, et ont une taille voisine des cristaux de rozénite ;

– les sulfates magnésiens (*starkéite*, *hexahydrate*...) ont été difficiles à mettre en évidence, sans doute à cause de l'abondance de la tamarugite/alun de soude : ils semblent constituer des cristaux arrondis, agglomérés en amas informes.

La plupart des minéraux contenant de l'aluminium et du fer sont communément observés dans les efflorescences et les produits d'altération de dépôts pyriteux mis à l'air libre (Nordstrom, 1982). Les sulfates hydratés sont fréquemment identifiés comme des minéraux secondaires formés dans des gisements ligniteux (Baltatzis *et al.*, 1986) et des dépôts volcaniques traversés par des sources hydrothermales sulfurées (Stamatakis *et al.*, 1987 ; Velinov *et al.*, 1970). En revanche, ils sont très rares dans les sols sulfatés acides, même lorsque ceux-ci sont soumis à de

longues périodes de dessiccation (Marius, 1985 ; Le Brusq *et al.*, 1987 ; Van Breemen, 1973 ; Mougénot, 1991). L'alunogène n'a jamais été identifié dans ces sols.

Dans les zones dépressionnaires qui sont caractérisées par une végétation spécifique et où viennent se concentrer les eaux de ruissellement et/ou suinter les eaux de nappe, on observe également des dépôts d'oxyhydroxydes de fer amorphes. Ils forment un voile rouille continu en surface des sols et de la végétation lorsque les eaux s'évaporent.

V. LOGIQUE DE LA DISTRIBUTION DES SELS DANS LA VALLÉE

Indépendamment de la variété minéralogique observée, ce sont les paragénèses et leur distribution dans l'espace qu'il faut considérer, car celles-ci témoignent de l'évolution chimique des eaux au cours de leur concentration.

Les minéraux sulfatés et chlorurés se regroupent en plusieurs types d'associations salines qui ont été répertoriées de M1 à M6 (tableau II). La figure I présente la distribution

des efflorescences étudiées dans la vallée de Djiguinoum.

Les efflorescences de type M2, contenant de la rozénite, se localisent uniquement au débouché de la petite vallée adjacente: des observations hydrologiques ont montré que les eaux de ruissellement, provenant d'un sous-bassin dont une grande partie est occupée par des sols ferrallitiques, sont riches en fer et des dépôts d'oxydes de fer se forment annuellement. Après la période d'inondation saisonnière, favorable aux processus de réduction, ces dépôts semblent être le lieu de formation du sulfate ferreux (rozénite) qui est parfois presque pur. Ce minéral est le plus souvent associé à l'ensemble halotrichite-pickéringite-apjohnite et à des traces de gypse.

Dans tout le reste de la bordure externe de la vallée, c'est l'aluminium qui est le cation dominant et qui permet la formation de l'alunogène, lié au même groupe de sulfates (halotrichite-pickéringite-apjohnite). Cette association constitue le type M1.

Une troisième association de minéraux (M3) occupe toute la partie centrale de la vallée. Elle comprend des sulfates magnésiens et aluminosodiques, associés à du gypse et de la halite.

Les familles M4, M5 et M6 ont été observées localement dans la partie aval du marigot. On distingue, d'amont en aval, la formation dominante de la jarosite constituant une poudre jaune ocre, du gypse formant de fines aiguilles et de la halite bien cristallisée dans les cuvettes résiduelles. Elles se forment à la faveur de conditions oxydantes et fortement évaporatoires.

VI. CONCLUSION

La caractérisation des efflorescences salines a révélé la présence de sulfates d'aluminium et de fer variés. La formation de ces minéraux a été également observé dans d'autres bas-fonds de Basse-Casamance, aménagés ou non par un barrage anti-sel.

La distribution spatiale des efflorescences salines dans la vallée de Djiguinoum nous permet de proposer une séquence de précipitation des minéraux sulfatés et chlorurés (tableau III).

Tableau II Nature et localisation des efflorescences salines dans la vallée de Djiguinoum
Nature and localization of the saline efflorescences in the Djiguinoum valley

Type d'efflorescence	Minéraux	Localisation	Cation dominant
M1	Alunogène + Halotrichite Pickéringite Apjohnite) + Gypse (traces)	Bordure de vallée	Al ³⁺ Fe ²⁺ , Al ³⁺ Mg ²⁺ , Al ³⁺ Mn ²⁺ , Al ³⁺ (Ca ²⁺)
M2	Rozénite + Halotrichite Pickéringite Apjohnite) + Gypse (traces)	Bordure de vallée	Fe ²⁺ Fe ²⁺ , Al ³⁺ Mg ²⁺ , Al ³⁺ Mn ²⁺ , Al ³⁺ (Ca ²⁺)
M3	Tamarugite ou Alun de soude + Starkeyite Pentahydrate Hexahydrate + Gypse + Halite	Vallée	Na ⁺ , Al ³⁺ Mg ²⁺ Ca ²⁺ Na ⁺
M4	Jarosite + Gypse + Halite	Lit du marigot	K ⁺ , Fe ³⁺ Ca ²⁺ Na ⁺
M5	Gypse + Halite + Jarosite (traces)	Lit du marigot	Ca ²⁺ Na ⁺ (K ⁺ , Fe ³⁺)
M6	Halite	Lit du marigot (aval)	Na ⁺

Tableau III Séquence de précipitation des paragenèses minérales dans la vallée de Djiguinoum.

Precipitation sequence of the saline efflorescences in the Djiguinoum valley.

Rozénite ou alunogène + Sulfates d'aluminium associés + Gypse	Bordure de la vallée
↓	
Tamarugite/Alun de soude + Sulfates magnésiens + Gypse + Halite	↓
↓	
Gypse + Halite + (Jarosite)*	Axe de la vallée
↓	
Halite	

* selon les conditions redox

Cette interprétation devra être complétée par des arguments géochimiques qui expliciteront notamment le mode de formation des sulfates d'aluminium et de fer en milieu très acide.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BALTATZIS, E.G., STAMATAKIS, M.G. et KYRIAKOPOULOS, K.G., 1986. Rozenite and melanterite in lignitic layers from the Voras mountain, western Macedonia, Greece, *Mineral. Mag.*, 50, p. 737-738.
- BOIVIN, P., LOYER, J.Y., MOUGENOT, B. et ZANTE, P., 1986. Sécheresse et évolution des sédiments fluvio-marins au Sénégal; cas de la Basse-Casamance. In *Symp. Int. INQUA-ASEQUA Changements globaux en Afrique durant le Quaternaire*, Trav. et Doc. ORSTOM, Paris, 197, p. 43-48.
- DACOSTA, H., 1992. Pluviométrie et écoulement de surface sur le bassin versant de la Casamance. In GREPIN, G., POMERLEAU, C. et PIROT, J.Y., éd., *Conservation et utilisation durable des ressources naturelles du bassin hydrographique de la Casamance*, AJAC-ZG/ISRA/ORSTOM/UICN, Ziguinchor-Dakar, p. 107-124.
- 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, *Science du Sol*, 25, 3, p. 173-184.
- MARIUS, C., 1985. Mangroves du Sénégal et de la Gambie. Écologie, Pédologie, Géochimie, Mise en valeur et aménagement, *Trav. et Doc. ORSTOM*, Paris, 193, 368 p.
- MONTOROI J.P., 1994. La dynamique de l'eau et la géochimie des sels du bassin versant de Djiguinoum (Casamance, Sénégal). Conséquences sur la gestion durable de l'écosystème de mangrove en période de sécheresse, *Thèse Doct. Univ.*, Henri Poincaré, Nancy-I, multigr., 349 p.
- MOUGENOT, B., 1991. Caractéristiques spectrales de surfaces salées à chlorures et sulfates (Sénégal). In POUGET, M., éd., *Deuxièmes journées de télédétection. Caractérisation et suivi des milieux terrestres en régions arides et tropicales*, 4-6 décembre 1990, Coll. Colloques et Séminaires, ORSTOM, Paris, p. 49-70.
- NORDSTROM, D.K., 1982. The effect of sulfate on aluminium concentrations in natural waters: some stability-relations in the system $Al_2-SO_4-H_2O$ at 298 K, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 46, 4, p. 681-692.
- PAGES, J. et DEBENAY, J.P., 1987. Évolution saisonnière de la salinité de la Casamance. Description et essai de modélisation, *Rev. Hydrobiol. Trop.*, 20, 3-4, p. 203-217.
- PALACHE, C., BERMAN, H. et FRONDEL, C., 1951. *The system of mineralogy of Dana*. II: halides, nitrates, borates, carbonates, sulfates, phosphates, arsenates, tungstates, molybdates, etc. John Wiley and sons, 7th ed., New-York-London-Sydney, 1124 p.
- STAMATAKIS, M.G., BALTATZIS, E.G. et SKOUNAKIS, S.B., 1987. Sulfate minerals from a mud volcano in the Katakolo area, western Peloponnesus, Greece, *Am. Mineral.*, 72, p. 839-841.
- Van BREEMEN, N., 1973. Dissolved aluminium in acid sulfate soils and in acid mine waters, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 37, p. 694-697.
- VELINOV, I., ASLANYAN, S., PUNEV, L. et VELINOVA, M., 1970. Ferrosulfates, halotrichite and alunogen from the oxidized zone of the hydrothermally altered volcanic rocks, near the village of Krusha, district of Sofia, *Bull. Geol. Inst., Bulg. Acad. Sci., Series geoch., mineral. and petrogr.*, 19, p. 243-264.
- VIEILLEFON, J., 1977. Les sols des mangroves et des tannes de Basse-Casamance (Sénégal). Importance du comportement géochimique du soufre dans leur pédogénèse, *Mém. ORSTOM*, 83, Paris, 291 p.