

# NOUVELLES PARAGENÈSES A SULFATES D'ALUMINIUM, DE FER, ET DE MAGNESIUM, ET LEUR DISTRIBUTION DANS LES SOLS SULFATES ACIDES DU SENEGAL

J.Y. LE BRUSQ<sup>1</sup> - J.Y. LOYER<sup>1</sup> - B. MOUGENOT<sup>1</sup> - M. CARN<sup>2</sup>

## RESUME

*Au Sénégal, l'abaissement des nappes phréatiques consécutif à la sécheresse qui sévit actuellement a profondément affecté les sédiments côtiers issus des mangroves. Dans les vallées du Sine Saloum et de Casamance, en conditions tropicales sèches ou peu humides, différents sulfates d'aluminium, de fer ou de magnésium, dont certains inconnus jusqu'alors en milieu naturel, ont été observés et déterminés aux rayons X : Tamarujite, Pickéringite, Halotrichite, Bloedite, Hexahydrate, Rozenite...*

*Les deux types de sols sulfatés reconnus dans les paysages, l'un très salé à Jarosite, l'autre peu salé à sulfates mixtes, appartiennent à une même séquence d'évolution géochimique : L'oxydation par voie microbienne de la pyrite provoque d'abord la précipitation d'oxyhydroxydes ferriques, puis de Jarosite ; lorsque le pH atteint des valeurs suffisamment basses et dépasse le pouvoir tampon des sols, les protons produits par les diverses réactions d'oxydation provoquent une acidolyse des réseaux cristallins avec libération de silice, mais aussi d'aluminium et de magnésium dans le milieu. Sous les conditions sèches actuelles et évaporatoires, ces sulfates mixtes précipitent de façon spectaculaire à la surface des sols. En conditions plus humides, la Jarosite reste stable ou est remplacée par la Goëthite, et l'acidité aluminique est évacuée par lessivage.*

**A LA MEMOIRE DE JEAN-YVES LE BRUSQ,**

**auteur principal de ce texte**

**et brutalement décédé le 16 décembre 1986.**

**Il avait fait de ce thème le sujet de sa thèse.**

## INTRODUCTION

Le Sénégal, à l'instar de tous les pays du Sahel, a connu, ces dernières années, une période de sécheresse exceptionnelle par sa durée et sa rigueur. Ce pays côtier présente sur sa façade atlantique trois estuaires (Sénégal, Sine-Saloum, Casamance) auxquels s'ajoute celui de la Gambie qui y est enclavé. L'eau de mer remonte dans ces estuaires durant la saison sèche, en période d'étiage parfois sur plus de 200 km à l'intérieur des terres (Sénégal, Casamance). Les bords de ces formations sont (ou ont été) colonisés par une végétation de mangroves à palétuviers (*Rhizophora* et *Avicennia* sp.) installée sur des sédiments récents, argileux ou sableux.

En présence d'une matière organique abondante et en milieu anaérobie, les sulfates marins sont réduits par voie microbienne en sulfures, dont la réaction sur les oxyhydroxydes ferriques produit de la pyrite, accumulée dans les sédiments. La baisse des nappes consécutive à la sécheresse permet l'oxydation de la pyrite en acide sulfurique et oxyhydroxydes ferriques. L'acidification poussée du milieu libère

**MOTS CLEFS : Sénégal - Sulfates mixtes - Sols de mangrove.**

(1) Pédologues ORSTOM - B.P. 1386 - Dakar - Sénégal.

(2) Géologue ORSTOM - B.P. 1386 - Dakar - Sénégal.

de l'aluminium par attaque du réseau cristallin des argiles. L'aboutissement de cet ensemble de phénomènes est la formation de sulfates d'aluminium, de fer et de magnésium, dont la nature, la distribution dans le paysage et le mode d'apparition sont présentés ici.

## I. - OBSERVATIONS ET METHODOLOGIE DE L'ETUDE

### A) Les sites d'observation

Les observations de terrain de ces manifestations avec précipitations de sels particuliers ont été réalisées dans deux sites principaux du Sénégal :

— la vallée du Bao-Bolon, affluent en rive droite de la Gambie dans la région du Sine-Saloum ;

— les vallées de Koubalan et Djiginoum, affluents en rive droite de la Casamance (Fig. 1).

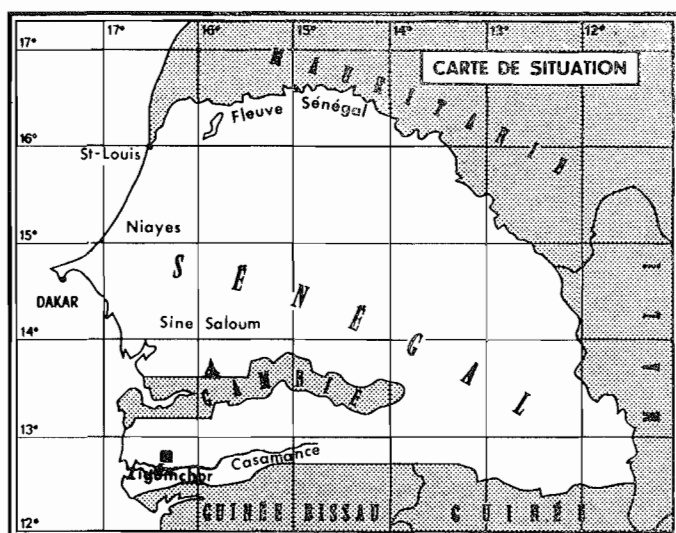


Fig. 1 : Emplacement des sites étudiés.

*Map of situation*

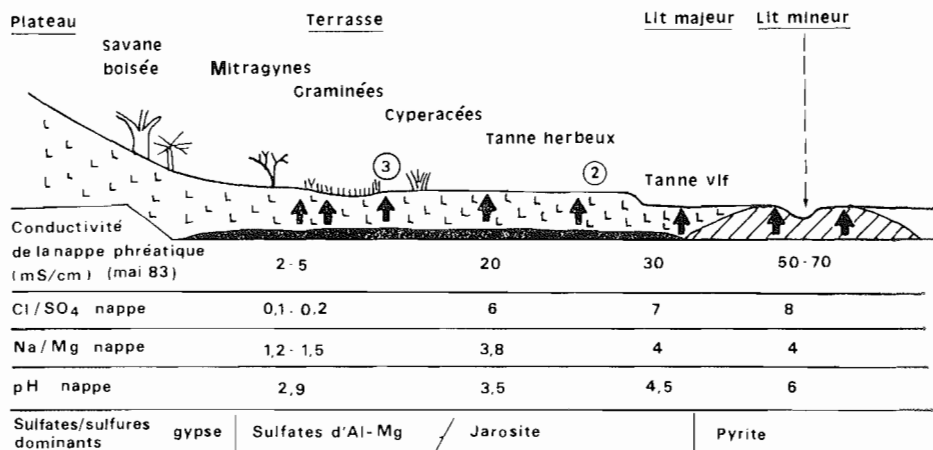
- ▲ Vallée du Bao-Bolon
- Vallée de Koubalan

La vallée du Bao-Bolon ne reçoit depuis la période de sécheresse actuelle (1968 à nos jours), qu'une pluviométrie annuelle de 700 mm environ, contre 1000 mm antérieurement. Les sols, plus ou moins salés à l'origine, de texture argileuse, deviennent très salés dans les parties basses de la vallée, lits mineurs et majeurs, (extrait 1/5° : 5 à 14 mS/cm), et moyennement salés sur les terrasses de bordure de vallée (extraits 1/5 à 3 mS/cm) (Fig. 2).

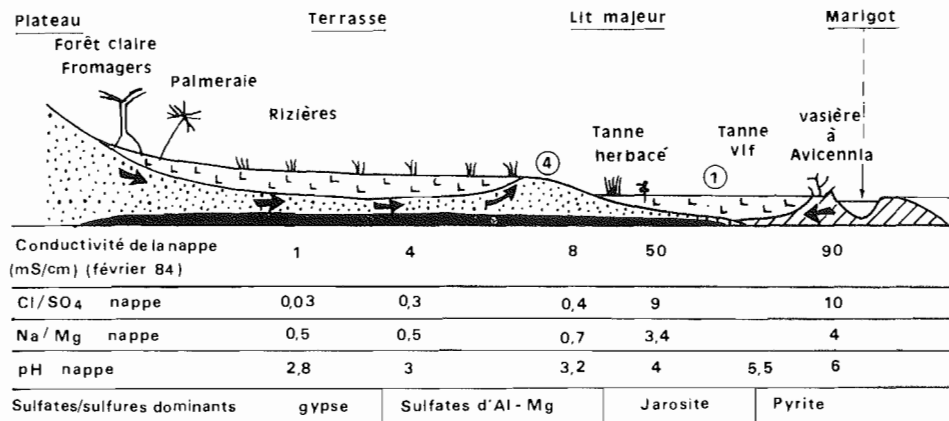
Les vallées de Koubalan et Djiginoum, reçoivent depuis la période de sécheresse, une pluviométrie voisine de 1000 mm, contre 1400 mm en période « normale ». Les sols y sont soit argileux jusqu'à 60-120 cm, puis sableux, soit sableux dès la surface ; ils sont aujourd'hui très salés dans les parties basses de la vallée (extrait 1/5 : 5 à 20 mS/cm), non ou peu salés sur les terrasses (extrait 1/5 : 0,5 à 2 mS/cm) (Fig. 2).

\* Extrait 1/5 : 10 g de sol sec dans 50 ml d'eau distillée, agitation 1 heure. Mesure de la conductivité à 20° C exprimée en milliSiemens/cm ou mmhos/cm.

En dehors de ces deux sites, des observations sur le terrain de manifestations sulfatées acides ont également été faites dans certaines dépressions interdunaires (Niayes) de la côte septentrionale entre Dakar et Saint-Louis, en milieu tourbeux, relativement peu salés (J.Y. LOYER), ainsi qu'en Guinée Bissau (Pfr. PONS).



Vallée du Bao-Bolon



Vallée de Koubalan

- ① ② Localisation des profils décrits
- ➔ ➔ Mouvement des nappes
- ▨ Mangrove fossile
- //// Mangrove actuelle (matériau pyriteux)
- Sable
- L L L L Argile

Fig. 2 : Coupes transversales des vallées étudiées.

Cross-section of two valleys.

## B) Caractérisation des minéraux reconnus

### 1. Méthode de préparation des échantillons et protocole d'analyse minéralogique aux rayons X

Les échantillons, fragments de fines croûtes et d'enduits blanchâtres à jaunes, ont été préalablement séchés très lentement afin d'éviter le plus possible toute transformation des phases salines naturellement hydratées ; ils ont ainsi été exposés plusieurs jours en atmosphère propre, à température ( $20^{\circ} \pm 2^{\circ}$ ) et taux d'humidité relative ( $60 \% \pm 5 \%$ ) régulés, puis finement broyés manuellement au mortier d'agate.

L'analyse par diffractométrie X de l'ensemble des échantillons a été réalisée sur un appareil Rigaku Geigerflex 4032, dans les conditions instrumentales suivantes : rayonnement Cu K $\alpha$ , vitesse angulaire 0,5°/mn (goniomètre 2  $\theta$ ), tube compteur proportionnel à argon/méthane.

### 2. Les minéraux reconnus

La liste des sulfates de fer, d'aluminium et de magnésium identifiés est décrite dans le tableau 1 ; la figure 3 présente les diffractogrammes des principaux sels rencontrés. On remarquera l'important bruit de fond des diagrammes B5 et BDJ16, provoqué par la teneur élevée en fer des échantillons correspondants.

Ces minéraux sont fréquemment accompagnés dans les échantillons par la halite, le gypse, la goethite, l'hématite, le quartz et des argiles (essentiellement la kaolinite).

NOM DU MINERAL ET FORMULE	SYSTEME CRISTAL.	PRINCIPALES RAIES DE DIFFRACTION EN Å ET INTENSITES I/I.					N° CARTE JCPDS
JAROSITE $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$	Hexagonal	3,08	3,11	5,09	5,93	1,977	10-443
		100	75	70	45	45	
NATROJAROSITE $NaFe_3(SO_4)_2(OH)_6$	Hexagonal	5,06	3,06	3,12	2,24	1,98	11-302
		100	80	70	60	60	
ALUNITE $(K,NA)Al_3(SO_4)_2(OH)_6$	Hexagonal	2,99	2,89	2,29	1,926	4,96	14-136
		100	100	80	70	50	
TAMARUGITE $NaAl(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$	Monoclinic	4,22	4,21	3,65	3,96	12,50	19-1186
		100	80	60	30	16	
PICKERINGITE $MgAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$	Monoclinic	4,82	3,51	4,32	4,12	10,60	12-299
		100	90	35	30	6	
HALOTRICHITE $FeAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$	Monoclinic	4,77	3,48	4,29	4,09	10,40	11-506
		100	100	55	45	15	
BLOEDITE $Na_2Mg(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$	Monoclinic	3,25	4,56	3,29	2,97	2,73	19-1025
		100	95	95	40	40	
HEXAHYDRITE $MgSO_4 \cdot 6H_2O$	Monoclinic	4,43	4,04	2,94	2,91	5,86	13-101
		100	90	80	80	20	
ROZENITE $FeSO_4 \cdot 4H_2O$	Monoclinic	4,47	5,46	3,97	3,40	6,85	16-699
		100	90	70	60	50	
COQUIMBITE $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$	Hexagonal	8,26	2,76	5,45	3,36	9,44	06-040
		100	75	65	60	40	

Tableau 1 : Liste des sulfates identifiés  
List of identified sulphate components.

Un échantillon des « Niayes » (Fig. 1) présente le diffractogramme complet de la Coquimbite,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ , mais avec un décalage pratiquement constant de toutes les raies, d'environ  $0,3^\circ$  ; il pourrait s'agir d'un effet de solution solide dans laquelle le fer serait partiellement remplacé.

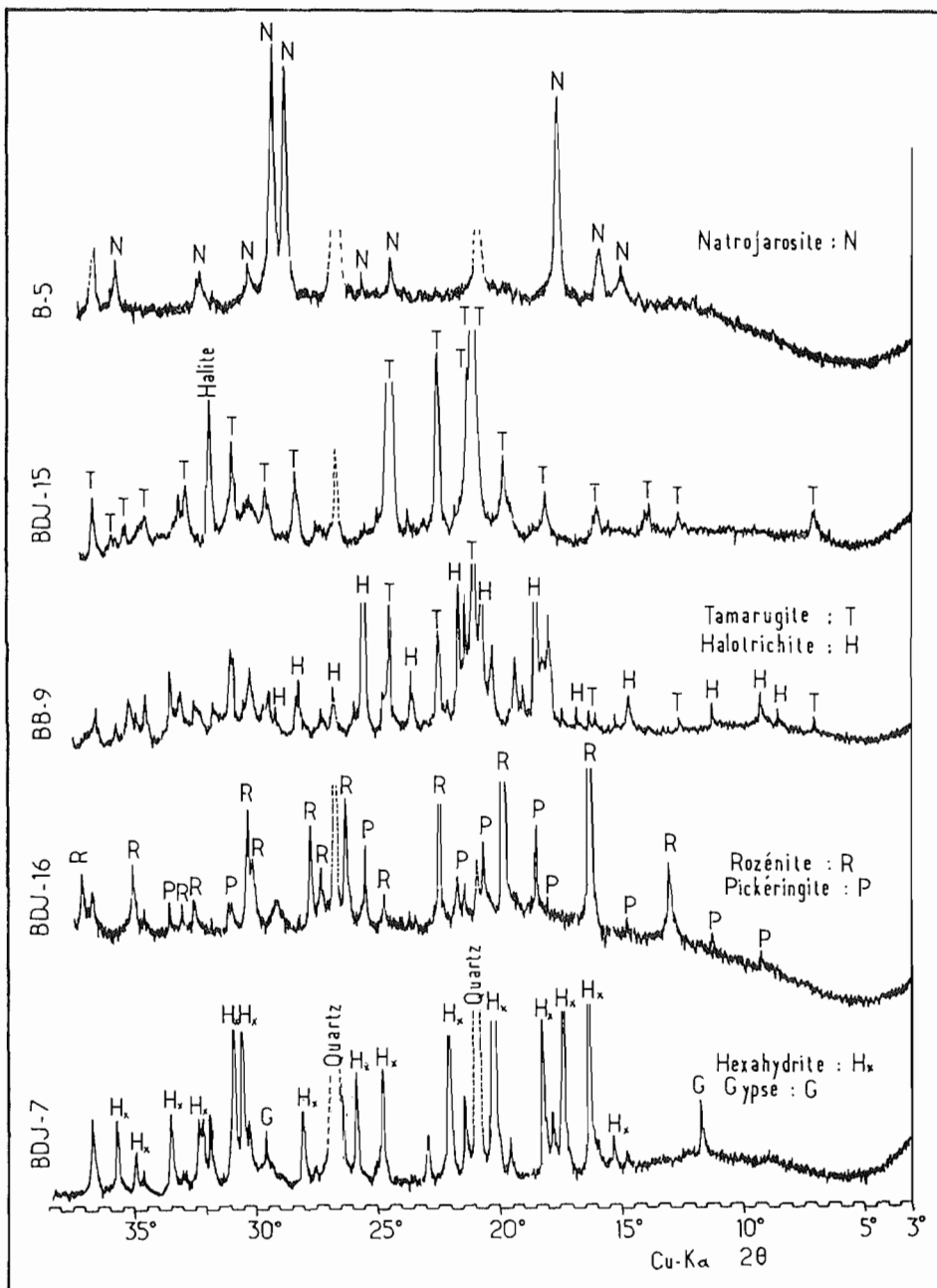


Fig. 3 : Principaux diffractogrammes de RX.

Main X-ray diagrams.

## C) Distribution des minéraux dans les sols et le paysage

La distribution de ces minéraux dans le paysage est ordonnée et correspond à des faciès géochimiques particuliers. Deux unités aux caractéristiques bien distinctes ont été reconnues dans la zone des sols sulfatés acides au sens large (Fig. 2) :

— Une unité caractérisée par la présence de *Jarosite*. Les sols et la nappe sont très salés (conductivité de la nappe : 20-90 mS/cm). Les sols acides (pH de 3 à 4), les nappes moyennement à peu acides (pH de 4 à 5,5). Sodium et chlorure dominant parmi les sels solubles présents dans les eaux de nappe (Na/Mg ~ 4, Cl/SO<sub>4</sub> 6 à 10) ; l'Aluminium est peu abondant (1-2 méq/l maximum) ; le Fer Ferreux présent (~ 10 méq/l).

Les sols peuvent être différenciés par la distribution de la *Jarosite* dans le profil :

Dans d'autres profils (profil 2 annexe), la *Jarosite* n'apparaît qu'en profondeur, surface, jusqu'à 50-100 cm de profondeur, localisée dans d'anciens conduits racinaires et sur les faces des agrégats.

Dans d'autres profils (profil 2 annexe), la *Jarosite* n'apparaît qu'en profondeur, sous un horizon à tâches rouge, ocre-rouge. Dans ce cas, la nappe est plus acide, le sol plus riche en aluminium échangeable, 2-5 méq/100 g, contre 1-2 méq/100 g.

Cette plus grande richesse en acidité échangeable apparaît par une différence pH extrait eau-pH extrait KCl N, plus importante dans le profil 2 que dans le profil 1. En outre, le matériau du profil 2 présente une maturation plus avancée et une structure mieux développée que celles du profil 1.

— Une unité caractérisée par la présence de *sulfates d'aluminium et de magnésium*, sous forme d'efflorescences superficielles, formant des croûtes (*Tamarugite*, *Pickéringite*...), des amas d'aiguilles fines (*Hexahydrite*), des couches poudreuses (*Rozenite*). La *Jarosite* peut être encore présente, mais elle n'apparaît alors qu'en profondeur (cf. profil 3). La *Natrojarosite* a également été observée dans cette unité, soit en croûte superficielle très mince, soit en imprégnation diffuse du sol immédiatement à la base des croûtes de *Tamarugite*. Parfois, les sulfates de magnésium (*Hexahydrite*, *Bloedite*) forment une auréole distincte entre la zone à sulfates d'Aluminium et la zone salée à *Jarosite* (*Casamance*).

Les sols de cette unité sont moyennement à peu salés, mais très acides (pH de 3,8 à 2,5). Localement, des pH de 1 ont été mesurés sous des croûtes de *Tamarugite*. La nappe phréatique a un pH voisin de 3, (localement 2), une conductivité de 1 à 10 mS/cm. Parmi les ions solubles, SO<sub>4</sub>, Na, Mg, Al, Fe y sont les plus importants ; Cl/SO<sub>4</sub> est en général inférieur à 1, ainsi que parfois Na/Mg ; L'aluminium soluble peut atteindre 50 méq/l, le fer ferreux 20 méq/l. La présence d'aluminium soluble élimine la végétation herbacée, qui prend, après dessèchement une teinte brun-noir caractéristique.

Dans le Bao-Bolon, les sols à sulfates d'Al-Mg superficiels sont en général argileux (cf. Profil 3 annexe), tandis qu'ils sont sableux en *Casamance* (cf. Profil 4 annexe).

Le déficit hydrique très important dans le Bao-Bolon permet la remontée des sel solubles depuis la nappe, par capillarité, tandis qu'en *Casamance*, un transfert latéral des nappes depuis le plateau continental et la terrasse, vers le marigot, suivi d'un effet « mèche » dans les sols sableux, interviennent certainement (cf. Fig. 2).

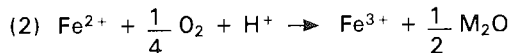
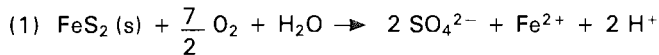
L'ensemble de ces observations permet d'élaborer un schéma d'évolution des sols sulfatés acides en conditions tropicales sèches.

## II. - INTERPRETATION

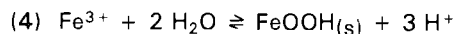
### A) Evolution géochimique des sols sulfatés acides

Dès que les sédiments pyriteux formés dans la mangrove sont mis au contact de l'oxygène de l'air par baisse du niveau des nappes phréatiques liée à la sécheresse,

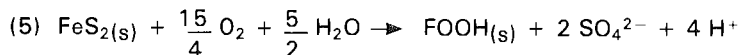
le sulfure de fer est directement oxydé en Goethite par voie biochimique avec production d'acidité, selon un ensemble de réactions complexes dont la stoechiométrie s'écrit :



Le fer ferrique produit par la réaction (2), peut réagir avec la pyrite et catalyser la réaction (1) :

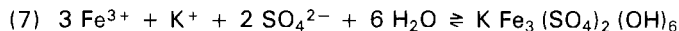
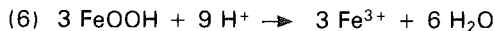


soit globalement :

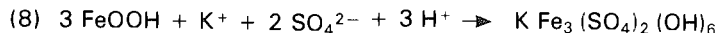


On observe alors une baisse parfois très importante du pH du matériau (jusqu'à 1,5-2) et une précipitation d'oxyhydroxydes ferriques sous forme d'iron-pipes, sur les voies de pénétration de l'oxygène dans le sol encore peu « mûré » (canaux racinaires).

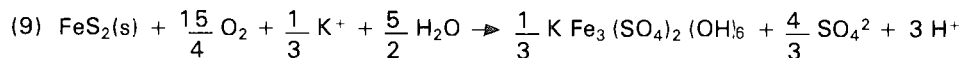
Lorsque le pH atteint des valeurs suffisamment basses, inférieures à 1,7 (VAN BREEMEN et HARMSEN, 1975 - NORDSTROM, 1982) et que les solutions sont suffisamment concentrées par évaporation, soit de la jarosite potassique, soit de la Natrojarosite précipite, selon la composition des solutions, au lieu de la Goethite, forme directement à partir de la solution ionique selon la réaction :



soit globalement :



Si le niveau d'acidité du milieu est suffisamment bas, car constamment alimenté par l'oxydation de la pyrite consécutive à l'abaissement des nappes, la Jarosite se forme directement à partir de la solution ionique selon la réaction :



En remplaçant K par Na, on peut écrire les mêmes réactions avec la Natrojarosite.

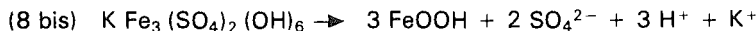
Les ions H<sup>+</sup> produits par les réactions (5) (7) (9), vont remplacer les bases échangeables fixées sur les argiles. SAYLES et MANGELSDORF (1977) ont montré qu'en milieu marin, ces bases étaient essentiellement Na<sup>+</sup> (50 %, en méq/100 g) et Mg<sup>2+</sup> (35 %).



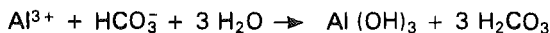
Mais on a montré (LOW, 1955, LAUDELOUT et EECKMAN, 1958) que les argiles protonées sont instables : H<sup>+</sup> attaque le réseau cristallin et libère les ions Al<sup>3+</sup> et Mg<sup>2+</sup> de la couche octaédrique. Ces ions occupent tout d'abord les sites d'échange, puis passent en solution si l'acidité totale produite par (5), (7), (9), dépasse le pouvoir tampon du sol, exprimé notamment par (10). Le réseau argileux libère aussi de la silice de la couche tétraédrique. (Des teneurs en silice de 240 mg/l de SiO<sub>2</sub> ont été mesurées dans la zone à sulfate d'aluminium, des valeurs supérieures à 100 mg/l étant fréquentes). Cette silice peut précipiter en fossilisant d'anciennes racines (Profil 2) (VAN BREEMEN, 1976).

Deux voies d'évolution sont alors possibles selon les conditions du milieu :

— En conditions humides, l'attaque ménagée des argiles permettant une légère remontée du pH, la Jarosite devient instable vis-à-vis de la Goethite. Les ions  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$  sont éliminés par lessivage et la Jarosite disparaît peu à peu du sommet des profils, remplacée par les oxyhydroxydes ferriques (VAN BREEMEN et HARMSEN, 1975), qui précipitent sur les faces des agrégats, tandis que des protons supplémentaires (puis Al et Mg) sont libérés dans le milieu :



Dans la plupart des cas, tout au moins dans les conditions suffisamment humides qui prévalaient au Sud Sénégal antérieurement à la sécheresse, l'acidité soluble représentée par l'aluminium dissous était évacuée des sols par les eaux de lessivage jusqu'à la mer, où l'acidité aluminique était neutralisée par les bicarbonates marins :



— En conditions sèches, sous les conditions pédoclimatiques qui prévalent actuellement au Sénégal, en milieu confiné évaporatoire, les sulfates sont maintenus dans la solution du sol, et à la faveur des remontées capillaires facilitées par la topographie ou la texture des sols, ils se concentrent à la surface et le pH baisse fortement. Des sels sulfatés mixtes précipitent en surface sous forme d'encroûtements blancs pulvérulents plus ou moins étendus où ont été identifiés l'Alunite, la Tamarugite, la Pickéringite, l'Halotrichite, l'Hexahydrate, la Rozénite (cf. tableau 1).

En saison des pluies, ces sels sulfatés très solubles, sont lessivés vers les zones basses endoréiques dont ils acidifient fortement les eaux (pH de l'ordre de 3), et où ils reprécipitent après évaporation en sels sulfatés secondaires à la surface des sols.

## B) Essai d'interprétation dans les sites du Sénégal

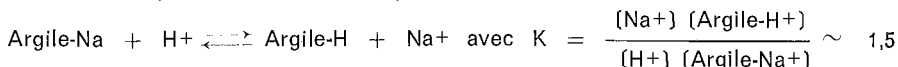
Si dans le Bao-Bolon à la faveur d'une évolution lente et progressive, il semble bien que la phase à Jarosite ait précédé dans le temps la phase à sulfates d'aluminium apparue plus récemment (Jarosite « résiduelle » en profondeur, iron-pipes abondants), ceci n'est pas certain en Casamance. Il se pourrait que la forte acidité libérée par les réactions (3) et (5) sous l'effet de la sécheresse actuelle, ait rapidement attaqué les argiles, sans laisser le temps à la Jarosite de se former, au moins au niveau des terrasses où se trouve une mangrove fossile dessalée, enterrée sous des alluvions colluvions récentes.

En effet :

— On ne trouve sous ces terrasses que peu de Jarosite résiduelle et très peu d'iron-pipes ;

— Par contre, la nappe est très riche en Fer Ferreux (jusqu'à 40 méq/l), qui peut être produit par la réaction (1).

Par ailleurs, la faible salure de ces sols, limite les concentrations en K et Na nécessaires à la formation de Jarosite (ou Natrojarosite) ; d'autre part, l'échange  $\text{H}^+ - \text{Na}^+$  est plus facile en milieu pauvre en cations :



GILBERT et LAUDELOUT (1965) ont montré que  $\text{H}^+$  et  $\text{Na}^+$  sont retenus par le complexe avec à peu près la même force (ce qui n'est pas le cas de  $\text{Al}^{3+}$ , énergiquement adsorbé), ce qui signifie qu'à pH3,  $(\text{H}^+) \sim 1$  méq/l, et en présence de 500 méq/l de sodium (valeur courante dans les zones salées), on aurait argile-H/Argile-Na  $\sim 0,003$ . L'attaque des argiles par  $\text{H}^+$  et leur dégradation dont le mode est en cours d'étude, serait donc facilitées en milieu peu salé ( $\text{Na}^+$ )  $\sim 2-50$  méq/l où (Argile-H)/Argile-Na) serait d'environ 0,1.

Notons enfin qu'après deux années (1984-1985) de pluviosité moyenne et pas trop déficitaire au Sud Sénégal, en Casamance, on a assisté à un lessivage relative-



ment rapide des sels d'aluminium et de magnésium à partir des zones de terrasses où ils forment des efflorescences, vers les marigots et la mer où ils sont neutralisés. Ces eaux par contre, lorsqu'elles sont retenues par les barrages anti-sels actuellement développés, peuvent atteindre des pH très bas (2,7 à 3,5) et nourrir des réprécipitations de sulfates secondaires dans ces retenues après évaporation.

Ainsi, bien que le stade final d'évolution des sols sulfatés acides en milieu tropical sec ou peu humide soit le sol à aluminium/magnésium échangeables et solubles, riche en sulfate dissous, les étapes y conduisant ne sont pas nécessairement les mêmes et on peut distinguer :

— Une voie d'évolution lente, correspondant à la période humide antérieure, où l'acidité produite est partiellement éliminée, l'acidolyse ménagée, et où apparaît le sulfate basique de type Jarosite, celui-ci pouvant évoluer secondairement si les conditions climatiques se dégradent, en sulfates mixtes se formant en milieu plus acide.

— Une voie d'évolution plus rapide, induite par des conditions climatiques plus sèches et un milieu plus confiné où l'acidité produite est forte et maintenue dans les sols et les paysages, permettant la formation directe de sulfates mixtes d'aluminium, de fer ou de magnésium.

## CONCLUSION

La distribution des sulfates d'aluminium, de fer et de magnésium dans le paysage renseigne sur l'évolution géochimique des sols sulfatés acides. Après la libération d'acide sulfurique dans le milieu, par oxydation de la pyrite, on observe la précipitation de sulfates ferriques (Jarosite), puis la solubilisation de sulfates d'aluminium et de magnésium après l'attaque des argiles par les acides produits lors des premières phases. Le cycle est bouclé lorsque l'acidité libérée, sous diverses formes ( $H^+$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ ) est neutralisée par les bicarbonates marins : une partie de ces bicarbonates provenaient d'ailleurs de la réduction des sulfates marins par la matière organique. Il ressort aussi des observations présentées ici que la définition des sols sulfatés acides par la présence de Jarosite et/ou d'acide sulfurique (pH bas) ne saurait être suffisante. Les sols à sulfates d'aluminium et de magnésium ainsi que certains sols riches en aluminium échangeable, appartiennent indiscutablement à une même famille géochimique dont on peut résumer ainsi la séquence évolutive : matériau pyriteux  $\rightarrow$  libération d' $H_2SO_4$   $\rightarrow$  précipitation de Jarosite  $\rightarrow$  libération d'aluminium et magnésium solubles  $\rightarrow$  sols à aluminium échangeable.

Reçu pour publication : Avril 1987

Accepté pour publication : Juillet 1987

### Remerciements :

Une partie de cet article a été rédigée dans le laboratoire de Science du Sol de l'I.N.R.A. à Rennes avec les critiques constructives de G. BOURRIE.

## SOME NEW ALUMINIUM, IRON, MAGNESIUM SULPHATE PARAGENESSES AND THEIR DISTRIBUTION IN ACID SULPHATE SOILS OF SENEGAL

*In Senegal, the lowering of the water table level following on the present acute drought, has strongly affected the coastal sediments stemmed from mangroves. In Sine Saloum and Casamance valleys (Fig. 1), under dry or not very wet conditions, different aluminium, iron or magnesium sulphates, including some of them unknown until now in natural environment, were studied and determined by X ray diffraction : Tamarujite, Pickeringite, Halotrichite, Bloedite, Hexahydrite, Rozenite... (Table 1, fig. 3).*

Both kinds of sulphate soils which were identified in the landscapes, (Fig. 2) either saline with Jarosite, or not much saline with mixed sulphates, belong to the same geochemical sequence : The microbiological oxidation of Pyrite first results in the precipitation of ferric oxyhydroxides and then, of Jarosite ; when pH reaches low enough values and exceeds the buffer capacity of soils, the protons that are produced by different reactions of oxidation, lead to the acidolysis of the crystalline system and the release of silica, aluminium and magnesium. Under the arid actual conditions, these mixed sulphates obviously precipitate on the surface of soils. Under wetter conditions, Jarosite remains stable or is substituted by Goethite, and aluminic acidity is evacuated by leaching.

#### BIBLIOGRAPHIE

- GILBERT M., LAUDELOUT H., 1965. — Exchange properties of hydrogen ions in clays. Soil Science 100, p. 157-162.
- LAUDELOUT H., EECKMAN J.-P., 1958. — La stabilité chimique des suspensions d'argile saturées par l'ion Hydrogène. Int. Soc. Soil Sc. Trans. II, IV Comm. Hamburg 2 : 193-199.
- LOW P.F., 1955. — The role of aluminium in the titration of bentonite. Soil Sc. Soc. of Am. Pr. 19, 135-139.
- NORDSTROM D.K., 1982. — Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals. In Acid Sulfate Weathering SSSA Spec. Pub. 10, p. 37-56.
- SAYLES F.L., MANGELSDORF P.C., 1977. — The equilibration of clay minerals with seawater : exchange reactions. Geochimica et Cosmochimica Acta 41, 951-960.
- VAN BREEMEN N., HARMSEN K., 1975. — Translocation of iron in acid sulfate soils : 1 soil morphology, and the chemistry and mineralogy of iron in a chronosequence of acid sulphate soils. Soil Sc. Soc. of Am. Proc. 39, p. 1140-1148.
- VAN BREEMEN N., 1976. — Genesis and solution chemistry of Acid sulphate soils in Thailand. Agr. Res. 848 - Pudoc - Wageningen.

## Annexe - Principaux types de sols observés

PROFIL 1 : KOUBALAN : SOL SALIN, TRES SALE, ACIDIFIE A JAROSITE.

*HALIC SULFAQUEPT*

- 0 - 5 cm : Horizon argileux, brun-gris, non taché — sec — structure « poudreuse », caractéristique des sols très salés.
- 5 - 26 cm : Horizon argileux, gris-clair, frais — conduits racinaires fins, gainés d'oxyhydroxydes de fer rouille, contenant de la Jarosite — Structure polyédrique.
- 26 - 90 cm : Horizon argileux, gris-beige — très humide à saturé — conduits racinaires (diamètre 1 cm) gainés d'oxyhydroxydes de fer ocre-jaune, remplis de Jarosite — consistance pâteuse — pas de structure.
- 90 - 105 cm : Horizon de gley gris foncé, argileux — racines et fibres de palétuviers en décomposition, contenant parfois de la Jarosite.
- Nappe phréatique à 100 cm — pH 4,6 — Conductivité 80 mS/cm (Avril 1985).

Profondeur (cm)	Extrait 1/5 - Sels solubles - m <sup>é</sup> q/l							E 1/5	pH extrait 1/2,5	
	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO <sub>4</sub>	pH	Conduct mS/cm	Extr eau	Extr KCl N
0-5	4,3	35	162	3,1	180	29	5,3	19,5	5,1	4,8
5-26	3,5	34	164	2,3	186	18,5	3,9	19,5	3,5	3,3
26-90	3,8	28	169	2,8	191	17	3,3	20,5	3,4	3,2
90-110	2,6	15,5	79	1,6	91	15,8	3	11	3,1	2,9

PROFIL 2 : BAO-BOLON : SOL SALIN ACIDIFIE A JAROSITE.

*HALIC SULFAQUEPT*

Croûte de sel en surface.

- 0 - 30 cm : Horizon argileux gris-brun foncé, sec à frais — nombreuses taches ocre-rouille et rouge — structure prismatique grossière.
- 30 - 50 cm : Horizon argileux — gris-brun foncé — frais — pellicules de Jarosite sur les faces des agrégats — structure polyédrique.
- 50 - 60 cm : Horizon argileux gris. Frais à humide. Pellicules d'oxyhydroxydes de fer ocre sur les faces des agrégats — Structure polyédrique.
- 60 - 140 cm : Horizon argileux gris moyen — Humide. Pellicules d'oxyhydroxydes de fer et de Jarosite sur les faces des agrégats et fossilisant des racines (iron-pipes) — Quelques racines silicifiées — Structure polyédrique anguleuse.
- Nappe à 140 cm - pH 3,3 (Mai 1983).

Profondeur (cm)	Extrait 1/5 - Sels solubles - m <sup>é</sup> q/l							E 1/5	pH extrait 1/2,5	
	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO <sub>4</sub>	pH	Conduct mS/cm	Extr eau	Extr. KCl N
2-10	0,6	7,3	26	1	30	5	4,1	3,9	3,8	3,4
30-40	0,3	1,7	25	0,6	18,5	9	3,8	2,8	3,6	3
60-80	0,9	3,6	30	0,7	29	6,5	3,6	3,7	3,4	2,9
100-120	2,6	10	48	0,9	53	11	3,3	6,4	3,4	3
Nappe Mai 1983	9	54	217	3,2	255	46	3,3	27,3	-	-

**PROFIL 3 : BAO-BOLON : SOL SALIN, PEU SALE, ACIDIFIE A SULFATES D'ALUMINIUM ET DE MAGNESIUM.  
SULFIC HALAQUEPT**

En surface, efflorescences blanches, en croûte et poudre, de minéraux sulfatés (Bloedite et Tamarugite).

0 - 20 cm : Argile brun-gris — sec. Quelques taches ocre d'oxyhydroxydes — structure polyédrique fine.

20 - 50 cm : Argile grise très tachée d'oxyhydroxydes ocre et rouille. Frais. Quelques iron-pipes. Structure polyédrique fine.

50 - 70 cm : Argile grise avec taches ocre-rouille. Frais. Quelques taches de Jarosite.

70 - 90 cm : Argile grise, quelques taches brunes et rouge, diffuses — consistance pâteuse — Pas de structure.

90 - 140 cm : Argileux, avec quelques niveaux sableux minces, à sables fins gris. Jarosite en traînées verticales, gainées d'oxyhydroxydes ocre (Goethite, Hematite) — Consistance pâteuse.

Profondeur (cm)	Extrait 1/5 - Sels solubles - méq/l								E 1/5	pH extrait 1/2,5	
	Al	Ca	Mg	K	Na	Cl	SO <sub>4</sub>	pH	Conduct mS/cm	Extr. eau	Extr. KCl N
0-10	1	2,2	4	0,04	8,5	4	11,5	3,3	1,6	3,2	3
40-50	0,8	1,4	2,7	0,1	3,4	4,6	4,8	3,3	1	3,1	2,9
90-100	2,4	2,8	6,4	0,16	8	7,8	12	3,3	2	3,2	3
130-140	3	3,3	7,1	0,13	8,6	4	18	3,2	2,2	3,1	3

**PROFIL 4 : KOUBALAN : SOL PEU EVOLUE, SALE, ACIDIFIE A SULFATES D'ALUMINIUM ET MAGNESIUM  
SULFIC TROPAQUEPT**

En surface, efflorescences blanches (Tamarugite, Hexahydrate).

0 - 25 cm : Sable argileux gris foncé — Sec — Massif. Quelques racines mortes.

25 - 65 cm : Sable blanc frais à humide. Très nombreuses taches ocre — Structure particulaire.

65 - 105 cm : Sable argileux humide, gris. Quelques traces de Jarosite. Structure polyédrique peu nette.

105 - 125 cm : Sable argileux gris très humide — Restes de racines en décomposition. Consistance pâteuse.

Sels solubles méq/l							CE mS/cm	pH
Al <sup>++</sup>	Fe <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>		
20	21	35	24	3,6	29	76	8	2,9