

## Résumé de thèse

Claude MARIUS (1). — **Contribution à l'étude des mangroves du Sénégal et de la Gambie. Ecologie-Pédologie-Géochimie. Mise en valeur et aménagement.** Thèse de doctorat ès Sciences (domaine : sciences de la terre) (2).

### 1. Ecologie des Mangroves du Sénégal

Les mangroves du Sénégal et de la Gambie sont des mangroves de type atlantique, caractérisées par leur pauvreté en espèces végétales. Elles se sont installées et développées dans des milieux tidaux caractérisés par la présence de chenaux de marée nombreux et disséqués, dans lesquels le taux de sédimentation est faible.

Dans les estuaires de la Casamance et du Saloum, et en partie en Gambie, la marée a une influence nettement prédominante sur les apports d'eau douce des zones amonts. Ce sont donc des « estuaires inverses ».

La végétation présente une zonation caractéristique liée en grande partie à l'adaptation des espèces végétales aux conditions de salinité, mais d'une manière générale la séquence est de type : *Rhizophora racemosa* (ou mangle) — *Rh. mangle* + *Avicennia* — *Avicennia* — tanne inondé — tanne vif — tanne herbacé. Les tannes, paysages dénudés, liés à l'aridité climatique et à la sursalure des sols et des eaux, constituent une des originalités de la mangrove sénégalaise, en ce sens on peut dire qu'au Sénégal, il n'y a pas de mangrove sans tanne.

Le sédiment sur lequel se développe la mangrove est relativement homogène et sensiblement identique dans les 3 estuaires. Il se caractérise

- du point de vue minéralogique par l'abondance de quartz et d'argile, associés à de la halite, de la pyrite et un peu de feldspath. Les minéraux argileux sont essentiellement représentés par la smectite et la kaolinite, avec des traces d'illite (Gambie), la smectite est dominante dans les zones d'embouchures et la kaolinite, dans les zones internes.
- du point de vue chimique, par des teneurs très faibles en Ca, en bases et en éléments traces. L'eau qui baigne les mangroves, presque en permanence, a une composition chimique voisine de celle de l'eau de mer. C'est

une eau chlorurée-sodique, à pH neutre ou légèrement acide, dans laquelle toute l'alcalinité est déplacée par l'action de la marée.

On verra, par la suite, que toutes ces conditions sont favorables à la formation et à l'accumulation des sulfures — et notamment de la pyrite — dont l'excès sur les composés neutralisants (bases, alcalinité...) sera la cause essentielle de l'acidité potentielle des sols développés sur ces sédiments.

### 2. Les caractères morphologiques des sols de Mangroves

L'observation des profils des 6 séquences, ainsi que de très nombreux autres dans les mangroves du Saloum et de la Casamance montre que l'évolution morphologique des profils dans les séquences se manifeste essentiellement par les caractères suivants : couleur du sédiment, couleur des taches et consistance des horizons, ces caractères étant eux-mêmes liés au degré de maturation (ripening) physique et chimique des profils, comme on le verra par la suite. En effet, à partir d'un profil homogène — sous *Rhizophora* — généralement riche en matière organique peu décomposée, formée en grande partie de fibres et de radicelles de couleur foncée, sans tache et à consistance fluide qui constitue en quelque sorte le matériau originel, on observe que celui-ci se différencie de la manière suivante :

(a) A la base, le matériau fibreux, réduit, se retrouve dans toutes les séquences à moins d'un mètre de profondeur.

(b) Au-dessus, le développement des horizons subsuperficiels se traduit par l'apparition d'un horizon brun (purée de marron), à consistance semi-développée (de beurre) dans lequel les amas fibreux sont en voie de décomposition, avec parfois des taches de jarosite dans les gaines racinaires de *Rhizophora* (N'Dimsiroh, Bassid). C'est notamment le cas de la plupart des profils sous mangroves décadentes ou tannes inondés.

(c) En surface, on peut distinguer :

— d'une part, les profils sous *Avicennia*, caractérisés par un horizon de couleur très claire, sans tache et à consistance développée ;

— d'autre part, les profils des tannes vifs caractérisés soit par l'abondance de taches de jarosite dans un matériau à consistance développée (Balingore, Gambie), ou semi fluide (Bassid, Oussouye) et de couleur gris clair ou brun.

(1) Directeur de recherche à l'ORSTOM. Institut de Géologie, Strasbourg.

(2) Directeur de thèse : Jacques LUCAS, Professeur Institut de Géologie, U.L.P., Strasbourg.

En conséquence, on peut dire que l'observation morphologique des profils sous mangroves et tannes met surtout en évidence la transformation des composés soufrés par l'apparition de la jarosite et que, dans le cas particulier des sols du Sénégal, les caractères liés à la salinité n'y apparaissent pas du tout. Et ce sont les observations micromorphologiques qui permettront de mettre en évidence l'abondance de la pyrite framboïdale sous mangroves et dans les horizons profonds des tannes et sa transformation en jarosite et en oxydes ferriques dans les horizons supérieurs mais aussi la présence des sels : halite et gypse, ainsi que celle des diatomées.

On remarquera enfin que l'évolution de ces caractères peut être très rapide et liée à un accident climatique (sécheresse) posant ainsi des problèmes à la classification de ces sols.

### 3. Les caractères physiques des sols de mangroves

Le matériau originel des estuaires de la Casamance et de la Gambie est essentiellement formé d'une argile lourde avec de nombreux débris de matière organique peu décomposés. La fraction minérale contient généralement plus de 50 % d'argile. Les densités apparentes de 0,3 à 0,6 sont fréquentes et la teneur en eau est généralement supérieure à 100 %.

Par suite d'une macroporosité élevée due en particulier au système racinaire des *Rhizophora*, la perméabilité latérale et verticale de ces sols est aussi élevée, d'où il en résulte que l'influence de la marée se fait sentir sur plusieurs centaines de mètres, freinant ainsi en partie les effets de l'évapotranspiration potentielle. La maturation physique dans les zones inondées (mangroves et tannes inondés) ne dépasse pas les stades peu développés à semi développés correspondant aux indices compris entre 1 et 2. Dans les tannes vifs, la maturation des horizons supérieurs à jarosite atteint le stade presque développé ( $n = 0,7 - 1,0$ ) bien que la densité apparente soit souvent inférieure à 1.

La teneur en eau des horizons superficiels des sols argileux peut s'abaisser au-dessous de 40 %, mais la structure reste massive avec peu ou pas de fissuration en surface qui est, par ailleurs, recouverte d'une croûte saline ou d'une moquette qui constitue une sorte de « mulch » naturel permettant le maintien d'une certaine humidité dans le profil.

Dans l'Estuaire du Saloum et dans l'Embouchure de la Casamance, l'hétérogénéité de la texture conduit à une hétérogénéité de la maturation, de la teneur en eau, de la densité apparente et il est fréquent d'observer comme à Bassid, des horizons argilo-sableux plus ou moins tourbeux, à consistance semi développée, insérés entre deux horizons — de surface et de profondeur — très consistants et secs. Mais, au total, la maturation « physique » de ces sols est moins avancée que leur maturation chimique.

### 4. Le soufre et ses composés dans les sols de mangroves

Le milieu naturel des mangroves du Sénégal, caractérisé par une sédimentation faible et lente due à la morphologie disséquée des chenaux de marée est favorable à la formation et à l'accumulation de la pyrite. En effet, tous les ingrédients nécessaires à la formation de la pyrite sont présents :

- les sulfates qui sont continuellement fournis par l'eau de mer ;
  - les minéraux ferriques présents dans les formations du Continental Terminal qui constituent les bassins versants ;
  - la matière organique métabolisable fournie par l'accumulation des fibres et des racines de palétuviers (*Rhizophora*) ;
  - les bactéries sulfato-réductrices toujours présentes ;
  - un environnement anaérobique ;
  - une aération limitée, résultant de l'action de la marée, nécessaire à l'oxydation des sulfures en disulfures.
- Ces ingrédients étant réunis, la pyrite se forme par :
- la réduction des sulfates en sulfures par l'action des bactéries sulfato-réductrices ;
  - l'oxydation partielle des sulfures en polysulfures ou en S élémentaire et il y a :
    - . soit formation de FeS (à partir des oxydes de fer ou des smectites ferrifères) suivi d'une combinaison du FeS avec S pour former FeS<sub>2</sub> ;
    - . soit précipitation directe de FeS<sub>2</sub> à partir du fer ferreux et des polysulfures.

La pyrite ne représente cependant qu'environ 30 à 50 % du soufre total — dont le taux est relativement élevé (5 à 10 %) — le reste étant sous forme organique.

Rien ne s'oppose donc, en principe, au développement de l'acidité potentielle puisque non seulement la plus grande partie de l'alcalinité est évacuée mais, de plus, les sédiments formés en grande partie de quartz et d'argile ne contiennent ni carbonates, ni minéraux altérables susceptibles de neutraliser l'acidité naissante. De fait, les déterminations effectuées sur les sols séchés — ainsi que des expériences d'assèchement et de réhumectation des sols — montrent d'assez bonnes corrélations entre le pH et le soufre total, mais surtout entre le pH et les sulfates solubles. L'acidité potentielle des horizons réduits à pyrite est élevée et les sols de mangroves sont tous des sols potentiellement sulfatés-acides.

La jarosite — principal produit d'oxydation de la pyrite — est présente non seulement dans les horizons superficiels des profils des tannes vifs, mais parfois dans des horizons sub-superficiels où elle est encore associée à la pyrite. Par rapport aux diagrammes d'équilibres qui lui assignent un pH très acide < 1,7 et un Eh très élevé > 400 mV, la jarosite, au Sénégal semble être stable dans des milieux variés, caractérisés, soit par un pH acide < 4 et un Eh < 400 mV (Balینگore), soit par un Eh très élevé et un pH supérieur à 4 (Bassid).

Le gypse — autre minéral d'oxydation de la pyrite et caractéristique des milieux arides — est présent, non seulement dans les tannes de l'Estuaire du Saloum, mais aussi en abondance dans tous les tannes de la Casamance depuis la sécheresse de 1972.

En définitive, malgré la présence d'un stock important de soufre dans les mangroves, sous forme de pyrite et qui leur confère une acidité potentielle élevée, le développement de cette acidité dans les tannes vifs par suite de l'oxydation de la pyrite est, en partie, limitée par les éléments neutralisants fournis par l'eau de mer et 2 voies sont possibles.

Dans les zones soumises à l'influence quasi permanente de la marée (Estuaire du Saloum, bras principal de la Casamance et partie aval de ses affluents), l'acidité résultant de l'oxydation de la pyrite est, en grande partie, neutralisée et le pH des sols reste, dans l'ensemble supérieur à 4.

Dans la partie amont des affluents de la Casamance, ainsi qu'en Gambie où les eaux superficielles et les nappes sont déssalées pendant une partie de l'année il y a un développement général de l'acidité dans les horizons superficiels des tannes.

Mais ce qui distingue les sols de mangroves du Sénégal des autres sols de mangroves dans le monde, c'est qu'ils contiennent tous des quantités notables de soufre, sous forme de pyrite, et qu'ils sont donc tous potentiellement sulfatés-acides. En effet dans toutes les régions où les sols de mangroves ont été étudiés, on observe que :

soit, les sols potentiellement sulfatés-acides coexistent avec des sols non acides (Guyanes, Sierra Leone, Thaïlande, Indonésie)

soit même que, parfois, ce sont les sols non acides qui sont prédominants (Côte Orientale de l'Inde).

Dans les 2 cas, la différence est à attribuer, soit à la végétation pionnière : sols non acides sous *Avicennia* et sols acides sous *Rhizophora* soit à la nature des minéraux argileux (présence de minéraux verts dans le cas des sols non acides).

Le caractère particulier des sols de mangroves du Sénégal est à attribuer d'une part, à leur situation géomorphologique dans les lagunes abritées et sursalées donc riches en sulfate, d'autre part à la végétation à *Rhizophora* pionnier et dominant dont le système racinaire constitue un véritable piège à stocker les sulfures. L'évolution ultérieure de ces sols sera liée à la salinité, d'une part (chapitre IX) et au mode d'aménagement, d'autre part (chapitre XIII).

## 5. La matière organique des sols de mangroves

En résumé, il apparaît que la matière organique dans les sols de mangroves du Sénégal est essentiellement d'origine continentale et, en grande partie, formée de débris végétaux provenant de la décomposition des feuilles, racines, radicales, fibres des palétuviers et plus particulièrement des *Rhizophora*. Cette matière organique dont la teneur, dans l'ensemble, est relativement forte, est peu humifiée, et en grande partie (56 — 90 %) composée d'humine, alors que la fraction humifiée est à dominance d'acides fulviques.

Dans ces milieux gorgés d'eau en permanence et de surcroît, sursalés, l'activité microbienne est fortement réduite. Il en résulte que dans la mangrove et les horizons profonds des tannes la décomposition de la matière organique est considérablement ralentie provoquant ainsi la formation et le maintien d'une tourbe, généralement fibreuse (fibriste) à rapport C/N élevé, supérieur à 30 et dont l'évolution liée aux alternances climatiques saisonnières conduit à la formation d'un humus de type anmoor, dans les tannes à rapport C/N encore élevé, compris entre 15 et 25.

L'étude des corrélations carbone-densité apparente, carbone-argile, carbone-soufre montre que la teneur en

matière organique n'est liée ni, à la teneur en argile, ni à la teneur en soufre total, et si comme nous l'avons vu précédemment, une certaine fraction du soufre est liée à la matière organique, il semble que la plus grande partie du soufre soit plutôt sous forme minérale, car le rapport C/S est le plus souvent inférieur à 1.

Par contre, il y a entre la matière organique et la teneur en eau, et donc la densité apparente, une très bonne corrélation qui permet notamment d'expliquer la formation de certains horizons intermédiaires, à taches « purée de marron » et à consistance « de beurre » dans lesquels a lieu une humification plus rapide et plus poussée de la matière organique.

## 6. La salinité des sols et des eaux dans les mangroves

L'eau qui inonde quotidiennement les mangroves et très exceptionnellement les tannes est une eau salée chlorurée sodique. Sa circulation dans la nappe phréatique se fait latéralement du marigot jusqu'à la limite mangrove-tanne et retour au marigot et de ce fait, sa salinité suit les variations saisonnières de la salinité du marigot et du fleuve. Dans le tanne, par contre, le déplacement de la nappe phréatique se fait verticalement et semble être en grande partie, indépendant de la nappe de la mangrove. Sa salinité, très élevée par rapport à celle de la mangrove varie très peu en cours d'année. C'est cette rupture marquée entre la salinité de la nappe de la mangrove et celle du tanne qui est à l'origine de la formation du tanne et de son développement ultérieur. En effet, dans la mangrove, le dessalement temporaire de la nappe permet la croissance d'une certaine végétation halophyte, alors que la sursalure permanente de la nappe du tanne, associée à une forte acidité, inhibe de manière définitive la possibilité de développement de toute végétation.

L'étude de l'évolution géochimique des nappes et des eaux interstitielles (solutions du sol) confirme l'existence de 2 zones de déséquilibre :

— A la limite marigot-mangrove à palétuviers,  $\text{SO}_4^{=}$  et  $\text{SiO}_2$  sont piégés pour former respectivement de la pyrite et des diatomées, tandis que  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  précipitent rapidement sous forme de calcite, de talc et de magnésite.

— Au passage mangrove-tanne, il y a un enrichissement en  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Mg}^{++}$  et  $\text{SO}_4^{=}$  et un déficit en  $\text{K}^+$  et  $\text{Ca}^{++}$  dus à des transformations minéralogiques : dissolution du quartz et, sans doute, de l'argile, précipitation de gypse et de silice amorphe.

L'évaporation simulée de 2 eaux de nappes de la Casamance, l'une à salinité proche de l'eau de mer (Tobor), l'autre formée d'un mélange d'eau douce de l'amont des marigots et d'eau de mer (Balingore) conduit à une paragenèse minérale identique qui est la suivante : talc, calcite, gypse halite, avec cependant une très nette prédominance en quantité, de la halite par rapport aux autres sels dans la saumure résiduelle.

Les effets de la sécheresse climatique qui s'est abattue sur la zone sahélienne depuis plus d'une dizaine d'années ont été étudiés de manière détaillée sur une séquence mangrove-tanne de Casamance. Ils se traduisent par une augmentation importante de la salinité des nappes et des sols avec pour conséquence une modification considérable de la zonation végétale notamment la disparition de certaines espèces végétales (*Rhizophoras*, *Scirpus*, *Paspalum*) et leur remplacement par des espèces adaptées aux fortes salinités (*Avicennia*, *Sesuvium*), une très nette extension du tanne aux dépens de la mangrove et une évolution marquée des caractères morphologiques et géochimiques des sols (apparition de taches brunes et acidification des horizons subsuperficiels, développement d'une consistance « de beurre », silicification des racines, apparition de gypse...).

En conclusion, on retiendra que le milieu des mangroves du Sénégal est — plus qu'un milieu estuarien ou deltaïque — un milieu lagunaire évaporitique, où les sels — et plus particulièrement le chlorure de sodium — jouent un rôle aussi important dans la pédogenèse que le soufre.

De ce fait, et comme pour le soufre, les mangroves du Sénégal se distinguent de toutes les autres mangroves du monde par le caractère généralisé de leur salinité, d'autant que si beaucoup de sols de mangroves sont potentiellement sulfaté-acides, très peu d'entre eux sont salés. Enfin, dans cet environnement particulier le tanne constitue le milieu dans lequel les 2 caractères, acidité et salinité, sont, à la fois liés et exacerbés au point de provoquer les transformations minéralogiques et chimiques du matériau.

## 8. La séquence mangrove tanne caractéristique de milieux littoraux tropicaux variés

Ce tour d'horizon des séquences mangroves-tannes montre que les zones nues associées aux mangroves ont une extension mondiale beaucoup plus importante qu'on ne pourrait le supposer. FOSBERG (1961) signale la présence de ces zones nues dans les mangroves d'Equateur, du Salvador et du Honduras, sous des climats à saisons sèches marquées, avec des pluviométries allant de 970 mm (Equateur) à 2016 mm (Salvador).

Toutes ces zones nues, associées aux mangroves et qui ressemblent aux tannes du Sénégal correspondent généralement à des zones inondées par les marées exceptionnelles et où subsiste une nappe salée permanente qui se concentre par évaporation. Mais si le climat joue un rôle important dans la formation de ces tannes, plus d'ailleurs par la durée de la saison sèche que par la hauteur d'eau tombée, d'autres facteurs sont à prendre en considération, notamment la durée d'inondation, la teneur en eau et la consistance des horizons superficiels et surtout, semble-t-il, la nature de l'argile.

En effet, quand la smectite est le minéral argileux prédominant, le sol se dessèche plus facilement et sa perméabilité est fortement réduite, ce qui explique sans doute la présence d'une nappe salée permanente (Pichavaram, Gabon). On remarquera enfin que l'évolution des sols dans une séquence mangrove-tanne ne conduit pas nécessairement à la formation de sols sulfaté-acides.

## 9. La classification des sols mangroves

TABEAU I

Répartition des sols des mangroves et tannes du Sénégal dans les différentes classifications

Végétation	Mangrove à <i>Rh. racemosa</i>	Mangrove à <i>Rhizophora</i> mangle + <i>Avicennia</i>	Mangrove décadente + Tanne inondé	Tanne vif	Tanne herbacé
Soil Taxonomy	Sulfihemist	Humic ou Typic Sulfaquent	Sulfuric Sulfaquent (Saloum) Halic Sulfaquent (Casamance)	Sulfaquentic Sulfaquent Halaquentic Sulfaquent Halic Sulfaquent	Sulfic Halaquent
C.P.C.S. (1967)	- S. peu évolués - non climatiques - d'apports organiques ou à sulfures  - S. hydromorphes organiques - tourbeux - Eutrophes	- S. peu évolués - non climatiques - d'apports hydromorphes ou à sulfures  - S. hydromorphes moyennement organique - humiques à gley salés		- S. halomorphes - à structure non dégradée - Salins - A efflorescences salines - (tannes non acides)  - S. halomorphes - à structures non dégradées - Salins - Acidifiés	- S. hydromorphes minéraux - A gley - Salés
ORSTOM (1979)	Halithiosols organiques	Halithiosols sombriques ou orthiques	Halithiosols haliques ou acido-sulfatés	Halisulfosols thioniques ou haliques	
F.A.O.	Thionic Fluvisols	Thionic Fluvisols	Thionic Fluvisols	Gleyic Solontchak	

## 10. Mise en valeur et aménagement des sols de mangroves

Les mangroves qui couvrent plus de 15 millions d'hectares en Afrique tropicale, en Asie et en Amérique latine sont l'un des écosystèmes les plus menacés de la planète. La mise en valeur des terres, l'exploitation forestière inconsidérée, le développement parfois abusif de l'aquiculture et naturellement la pollution mettent en danger de précieuses ressources naturelles : bois d'œuvre, charbon de bois, produits des palmiers, sans parler d'espèces de poissons nombreuses et très appréciés. La végétation terrestre et la faune marine coexistent en un équilibre fragile encore mal connu. Ce que l'on sait par contre, c'est que cet équilibre ne résiste pas à des interventions brutales aussi les projets d'aménagements des mangroves doivent-ils toujours tenter de concilier les intérêts de la production (agricole et piscicole) et l'intégrité de l'écosystème. Ces projets nécessitent donc des études sur le milieu physique ainsi que des études socio-économiques sur la base desquelles serait planifiée l'utilisation de ces milieux. Pour cela, il est nécessaire d'intensifier la recherche interdisciplinaire qui seule, permet d'établir des projets viables de développement intégrant la foresterie, les pêches et les activités agricoles.

En ce qui concerne plus particulièrement le Sénégal, on retiendra que les projets de barrages sur les marigots de la Basse Casamance ont été conçus dans le but de produire 2 récoltes de riz par an, « afin de dégager des surplus pour l'exportation ». Or, compte-tenu des aléas climatiques (sécheresse prolongée) et de l'environnement naturel (apports d'eau douce très réduits), il est avant tout *urgent* d'assurer aux popu-

lations locales une récolte de riz par an en leur fournissant un appoint d'eau douce en fin d'hivernage, et ce sera, nous le répétons, la seule fonction des barrages.

Par ailleurs, il serait plus judicieux de construire plusieurs petits barrages sur les bras secondaires des grands marigots que quelques grands barrages, en aval de ceux-ci, et il est totalement exclu que ces barrages soient destinés à arrêter de manière définitive l'entrée de l'eau salée dans les marigots, car alors les conséquences sur l'environnement écologique seraient catastrophiques. En effet, d'une part, on verrait alors disparaître une grande partie de la faune (crevettes, huîtres, poissons, coquillages...) qui est non seulement nécessaire à l'alimentation des populations locales, mais constitue aussi une source importante de revenus par son exportation, et d'autre part, on verrait aussi apparaître, par suite de la pollution des eaux douces en arrière des barrages — de nombreuses maladies (typhoïde, bilharziose, onchocercose) pour le moment inconnues dans cette région. Une telle catastrophe écologique a été déjà signalée dans d'autres parties du monde (Kerala, Inde, 1978).

En conclusion, l'utilisation et l'aménagement des mangroves du Sénégal doivent être conçus de manière à assurer un développement équilibré et harmonieux des diverses activités liées à ce milieu écologique riche de potentialités.

- *pêche*, par le développement de l'aquiculture (crevettes, parcs à huîtres) dans les tannes ;
- *riziculture*, par la construction de petits barrages-écluses pour assurer l'appoint d'eau douce en fin d'hivernage ;
- *tourisme* villageois s'intégrant au milieu et s'inspirant du modèle de la Basse Casamance.