



U.E.R. DES SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE  
INSTITUT DE GÉOLOGIE  
STRASBOURG

# THÈSE

présentée à  
L'UNIVERSITÉ LOUIS PASTEUR  
pour obtenir le grade de  
DOCTEUR ES SCIENCES NATURELLES

par

**Claude MARIUS**

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DES MANGROVES  
DU SENEGAL ET DE LA GAMBIE  
ECOLOGIE – PEDOLOGIE – GEOCHIMIE  
MISE EN VALEUR ET AMENAGEMENT**

Soutenue publiquement le 30 mars 1984 devant la Commission d'examen :

MM. J. LUCAS, Président  
G. AUBERT  
B. FRITZ  
P. MICHEL, Rapporteur  
L.J. PONS, Rapporteur

UNIVERSITÉ LOUIS PASTEUR  
 STRASBOURG I

 LISTE DES PROFESSEURS, MAITRES DE CONFÉRENCES  
 DIRECTEURS ET MAITRES DE RECHERCHE C.N.R.S. ET I.N.S.E.R.M.

Président	Professeur	H.DURANTON
Vice-Présidents	Professeur	C.GODBILLON
	Professeur	P.POINDRON
	M.de Rech.	A.CORET
Présidents honoraires	Professeurs	G.OURISSON - P.KARLI - F.MARCOUX
Secrétaire Général	Monsieur	G.KIEHL

## U.E.R. DES SCIENCES MÉDICALES

U.E.R. des Sciences Médicales	:	Directeur	Jean-Marie MANTZ
U.E.R. des Sciences Biomédicales	:	Directeur	Jean SCHWARTZ

Doyens honoraires : J.CALLOT J.CLAVERT - F.ISCH - M.DORNER.

Professeurs honoraires : A.BASSET J.CALLOT - J.CLAVERT - E.FORSTER - G.GREINER - Ch.GROS - A.JUNG - T.KAMMERER - P.MANDEL - H.METZGER - P.MULLER - A.ROHMER - F.ROHMER - E.SCHNEEGANS - J.SEROR - J.STAHL - J.VEORINE - P.VINTEMBERGER - J.WARTER - G.WINCKLER.

## Professeurs :

M.AOUFF N.APROSIO C.ARON L.ASCH A.BATZSCHLAGER P.BEYER P.BLOCH R.BLOCH R.ROCKEL C.BOLLACK A.BRINI A.BRONNER F.BUCHHEIT F.BUCK G.BURGHARD P.CHAMBON J.CHAMBRON M.CHAMPY M.CHAUMONT M.COLLARD C.CONRAUX P.DELLENBACH M.DORNER R.EATINGER M.FABRE L.FINCKER R.GANDAR P.GAUTHIER-LAFAYE J.P.GERHARD	Chirurgie générale Anatomie et Organogénèse Histologie Rhumatologie Anatomie Pathologique Clin.de Pédiatrie et Puériculture Radiologie Pharmacologie Hépatologie, Gastro-entérologie Urologie Ophtalmologie Clin. Ophtalmologique Neurochirurgie Clin.Chirurgicale des Enfants Clin.et Proximité de la Tuberculose Biochimie Physique biologique Stomatologie Médecine Légale et Médecine Sociale Clin. Neurologique Oto-Rhino-Laryngologie Gynéc. et Obstétrique Clin. Médicale B Psychiatrie infantile Histologie Clin. Médicale B Cardiologie Clin. Gynéc. et Obstétricale Anesthésiologie Ophtalmologie	J.GRENIER E.GROSSHANS P.HABEREY J.HERAN L.HOLLENDER J.L.LIMBS M.IMLER F.ISCH L.ISRAEL H.JAHN J.JUIF P.KARLI S.KELLER F.KEMPF I.KEMPF T.T.KIEN R.KIENY A.KIRN J.Q.KORITKE M.KREMER O.KURTZ G.LANG J.LAVILLAUREIX Y.LE GAL J.M.LEVY J.M.MANTZ F.MARCOUX J.MARESCAUX Ch.MARX	Chirurgie générale Clin.Dermatol.et Syphilitique Physiologie Méd.et Chir.Expérim.et Comparée Chirurgie Oigestive et Générale Pharmacologie Médecine interne Rééducation fonctionnelle Psychiatrie d'Adultes Néphrologie Pédiatrie et Puériculture Neurophysiologie Clin. Gynéc. et Obstétricale Radiologie Orthopédie et Traumatologie Parasitologie Pathol. et Clin. Sémhol. Chir. Virologie Anatomie Normale Parasitol. et Pathologie tropicale Neurologie Ortho. et Traumatologie Hygiène Anatomie pathologique Pédiatrie, Génétique médicale Réanimation médicale Médecine du travail Histologie Physiologie	S.MAYER J.MEHL G.METHLIN B.METZ R.MINCK G.MORAND F.OBERLING E.PHILIPPE (det.) R.RENAUD P.REVILLE P.REYS E.ROEGEL J.V.RUCH Y.RUMPLER A.SACREZ G.SAVA G.SCHAFF E.SCHVINGT J.SCHWARTZ A.SIBILLY L.SINGER F.STEPHAN O.STORCK G.VINCENDON R.VOEGTLIN A.WACKENHEIM P.WARTER J.P.WEILL O.WILLARO J.P.WITZ	Hématologie Médecine du travail Physique biologique Physiologie appliquée Bactériol. Viroi. Immunol. gén. Chirurgie thoracique Maladies du sang Anatomie pathologique Gynécologie et Obstétrique Endocrinol. Métabol. et Nutrit. Chir. Gén. - Hôp. L.Pasteur - Colmar Pneumologie Physiologie Biologie médicale Embryol. et Morphol. expérim. Cardiologie Chirurgie générale Physiologie Clin.Chir.Orthop.et Traumatol.d'Adultes Pharmacol. et Médecine Expérimentale Clinique chirurgicale A Clinique Psychiatrique d'Adultes Pathol.Gén.et Expérimentale Clinique Médicale A Biochimie Thérapeutique Radiologie Radiologie Gastro-Entéral et Hydrat.thérap. Pédiatrie, Génétique Médicale Chirurgie thoracique
---	---	---	--	---	--

Professeurs conventionnés : F.DEFEUDIS (Biologie) A.PETROVIC (Physiologie).

## Maîtres de Conférences Agrégés :

S.BABIN F.SAREISS P.BOURJAT C.BRECHENMACHER J.M.EROGARD J.CINQUALBRE A.CONSTANTINESCO J.P.OUPEYRON B.EISENMANN J.FLAMANT J.GEISERT P.GERLINGER E.HÉIO D.JAECK A.JAEGER	Orthopédie et Traumatologie Médecine interne Radiologie Cardiologie Médecine interne Urologie Physique biologique Anesthésiologie Chirurgie cardio-vasculaire Ophtalmologie Pédiatrie, Génétique médicale Embryologie Dermato-vénérologie Chirurgie générale Réanimation médicale	M.JESEL P.KEHR R.KEILING J.KEMPF G.KLOTZ F.KUNTZMANN J.M.LANG O.MAITROT J.L.MANDEL J.MARESCAUX J.MARK J.MESSER C.MEYER H.MONTEIL G.Obert J.C.OTTENI	Rééducation fonctionnelle Orthopédie et Traumatologie Cancérologie Biochimie Oto-Rhino-Laryngologie Médecine interne Maladies du sang Neurochirurgie Biochimie Chirurgie générale Biochimie Pédiatrie, Génétique médicale Chirurgie générale Bactériologie Virologie Anesthésiologie	M.PATRIS G.PAULI J.RITTER M.ROOS P.SAUVAGE J.P.SCHIEBER G.SCHLAEDER J.L.SCHLIENGER H.SICK C.STOLL J.O.TEMPE J.TONGIO J.P.WALTER J.M.WARTER A.WILK	Psychiatrie d'Adultes Pneumologie Gynécologie et Obstétrique Histologie Chirurgie infantile Physiologie Gynécologie et Obstétrique Médecine interne Anatomie et Organogénèse Pédiatrie, Génétique médicale Réanimation médicale Radiologie Radiologie Neurologie Stomatologie
--	---	--	---	---	---

Maître de Conférences Associé : R.BANOLER (Physiologie).

Maîtres de Conférences Conventionnés : A.MALAN (Physiologie respiratoire) J.J.VOGT (Thermophysiology).

Directeurs de recherche : M.JACOB\* (Biochimie) A.PETROVIC\* (Physiologie).

## Maîtres de recherche :

A.M.AUBERTIN* O.AUNIS* A.EBEL* L.FREYSZ* M.GAUTHIERE* G.GOMBOS* * C.N.R.S	Virologie Neurochimie Neurochimie Neurochimie Thermologie biomédicale Neurochimie I.N.S.E.R.M.	K.HAFFEN-STENGER* G.LECLERC* G.REBEL* R.RECHENMANN* M.SENSENBRENNER* C.STOCK-DEMANGE*	Endocrinologie Chimie organique Neurochimie Biophys. des Rayonnements Neurochimie Physiologie	J.STEVENIN* J.VELLY* N.VIRMAUX-COLIN* J.J.VOGT* A.WAKSMAN*	Biologie moléculaire et cellulaire Pharmacologie Neurochimie Thermophysiology Neurochimie
---	--	--	--	--	---

**U.E.R. DES SCIENCES EXACTES**

**Mathématiques**  
**Sciences Physiques et Chimiques**  
**Sciences de la Matière**  
**Sciences de la Vie et de la Terre**  
**Sciences du Comportement et de l'Environnement**  
**Ecole d'Application des Hauts Polymères**  
**Ecole Nationale Supérieure de Chimie**  
**Observatoire**  
**Physique du Globe**  
**Ecole Nationale Supérieure de Physique**

**Directeur Gérard SCHIFFMANN**  
**Directeur Henri BENOIT**  
**Directeur Raymond WEISS**  
**Directeur Geneviève LEBEURIER**  
**Directeur Philippe ROPARTZ**  
**Directeur Morand LAMBLA**  
**Directeur Marc DAIRE**  
**Directeur Alphonse FLORSCH**  
**Directeur Roland SCHLICH**  
**Directeur Gübert SUTTER**

**Doyens honoraires :** P.LACROUTE - J.H.VIVIEN - G.MILLOT.

**Professeurs honoraires :** J.BRENET - Mme M BRINI - J.BYE - H.CARTAN - C.CHABAUTY - A.CHRETIEN - A.DELUZARCHE - J.OENY - Mlle A.GAGNIEU - Mlle S.GILLET - S.GORODETZKY - R.HOCA - P.JOLY - P.LACROUTE - R.LECOLAZET - G.LEMEE - P.L'HERITIER - A.LICHNEROWICZ - A.MAILLARD - G.MILLOT - L.NEEL - J.PARROO - A.ROCHE - R.ROMER - J.P.ROTHE - L.SACKMANN - CH.SADRON - H.SAUCIER - P.SCHALLER - F.STUTINSKY - H.VILLAT - J.H.VIVIEN - Et. WOLFF - B.WURTZ.

**Maître de conférence honoraires :** A.WEIL.

**Professeurs :**

J.P. ALOFF	Chimie nucléaire	X FERNIQUE	Mathématiques	A MICHARD	Géologie
R. ARMBRUSTER	Physique	M FINK	Acoustique moléculaire	M.MIGNOTTE	Informatique
P. ARTZNER	Mathématiques	J G FISCHER	Chimie	P. MIRABEL	Chimie
V. AVANISSIAN	Analyse supérieure	D FOATA	Mathématiques	G.MONSONEGO	Physique théorique
G. BARBANCON	Mathématiques	E.FOLLENIUS	Zoologie	S.MORIN	Mathématiques I
F. BECKER	Physique mathématique	J.J. FRIED	Mécanique des Fluides	P. NANOPoulos	Probabilités et Statistiques
N. BEFORT	Biochimie	O. FROELICH	Chimie générale et Chimie physique	J.OSBORN	Chimie
G. BELLIAIRO	Botanique	A. FUCHS	Mécanique rationnelle	E.OSTERTAG	Electr. et Electrotechnique
C. BENEZRA	Dermato-Chimie	J.C.GALL	Géologie	G.OURISSON	Chimie
H. BENOIT	Physicochimie macromoléculaire	A GALLMANN	Physique	J.M.PAULUS	Chimie générale
P. BENVENISTE	Physiologie végétale	F GAUTIER	Physique	J.P. RAMIS	Mathématiques générales
O. BERNARD	Méth. math. de la physique	R.GERARD	Mathématiques	G REES	Topologie
J.C. BERNIER	Chimie générale	G GLAESER	Mathématiques	F. RICHARD	Physiologie animale
J. BONNIN	Géophysique interne	C. GOBILLON	Mathématiques	J.J.RIEHL	Chimie
Y. BOULANGER	Biochimie	A. GOLTZENE	Optique, physique atomique et moléculaire, physique du sol et cristallographie	P. RIMMELIN	Chimie (IUT)
J.F. BOUOT	Mathématiques	M.GOUNOT	Botanique	C. ROBERT	Physique
J. BROSSAS	Chimie macromoléculaire	M.GROSJANN	Physique	P. ROPARTZ	Psychno-Physiologie
R. BROUILLARD	Chimie org. et Chimie analytique	M.GROSS	Chimie physique	J.ROUX	Botanique
C. BURGGRAF	Minéralogie	Y GUEGUEN	Géophysique interne	J.P.SAUVAGE	Chimie théor. et Chimie physique (IUT)
H. BURNAGE	Mécanique des Fluides	L.HIRTH	Microbiologie	G.SCHIFFMANN	Mathématiques
M. CARRA	Géophysique interne	C.JASCHECK	Astronomie	A.SCHMITT	Physique
R. CERRA	Physique générale	J.JOHNARD	Viologie	P.SCHMITT	Psycho-physiol. et physiol. du comportement
F. CHARTIER	Chimie	J.P. JOUANLOU	Mathématiques	J.P.SCHWING	Chimie
P. CHEVALLIER	Physique	P. JUDANT	Physique nucléaire et corpuscul. et théor. phys.	M.J.SCHWING	Chimie physique
A. CLAUSSE	Chimie	T. JUTEAU	Minéralogie	J.C.SENS	Phys. nucl. et corpuscul. et théorie physiol.
A. COCHE	Physique nucléaire	K. KEDINGER	Biochimie	M.SIESKIND	Physique
M. DAIRE	Chim. phys. indus. et Sc. des Matériaux	A KIENNEMANN	Chimie appl. et Génie chimique	M.SILVERSTEIN	Mathématiques
H. CHAMIAN	Phys. Atom. et Phys. du Solide	R. KIRSCH	Chimie appl. et Génie chimique	G.SOLLADIE	Chimie organique
E. DANIEL	Physique expérimentale	F. LACROUTE	Zoologie	J.SOMMER	Chimie appliquée
M. DAUNE	Biochimie	J.C.LAFON	Biologie végétale	G.SUTTER	Physique électronique
J. OEHAND	Chimie générale	A.M.LAMBERT	Informatique appliquée	C. TANELIAN	Chimie (IUT)
J. DEMUYNCK	Chimie organique	M.LAMBLA	Chimie générale	Y TARDY	Géologie
J.F. DOUQURO	Inform. fondam. et appl. (IUT)	G.LEBEURIER	Microbiologie	J.TERRISSE	Chimie
G. DOURNOU de	Géologie	J.M. LEHN	Chimie	J.J. THIEBOLD	Biologie animale
SEGONZAC (det.)	Géologie	J.L. LEIBENGUTH	Chimie appl. et Chimie des matériaux	D.VIAUD	Mathématiques
H. DURANTON	Botanique	J.L. LEITE LOPES	Phys. nucléaire et corpusculaire	R.VOLTZ	Physique théorique
J.P. EBEL	Biochimie	P. LEMOINE	Chimie	J.H.WEIL	Biochimie
J.P. EBERHART	Minéralogie	M. LEROY	Chimie	G.WEILL	Physique
B. ERESMANN (det.)	Biochimie	J.C. LIONS	Zoologie et Ecologie	R.WEISS	Chimie
V. ERN	Physique	F. LOR	Immunologie	J.L.WENDEL	Physique
J. PARRAUT (det.)	Mathématiques	F. LUCAS	Géologie	B.WILL	Psycho-Physiologie
F. FASIOLO	Biochimie	D.MAGNAC	Physique	C.WINTER	Chimie
P. FEDERLIN	Chimie	J.MARTINET	Mathématiques	G.WIPPLER	Physicochimie des Hauts Polymères
P. FELTZ	Physiologie animale	P. MIALHE	Physiologie animale	J.WUCHER	Physique

**Professeur émérite :** G.MILLOT (Géologie Paléontologie)

**Professeur adjoint :** J.SITTler (Géologie).

**Professeurs associés :**

M. ABUD	Physique	V. KENKRE	Physique	T. MUKAIYAMA	Chimie
M. E. CONSTANTIN	Chimie	F. KNIGHT	Mathématiques	J. PALOUS	Chimie
G.L. GEOFFROY	Chimie	P. MÉYRUEIS	Métrologie	O. SOARES	Physique
A. JOFFE	Mathématique				

**Professeurs conventionnés :** P. BOUVEROT (Physiol. respiratoire) - P. DEJOURS (Physiol. respiratoire) - F. FARKAS (Physique) - Y. NAKATANI (Chimie) - P. SMIGIELSKI (Physique).

**Astronomes adjoints :** A. FLORSCH - A. FRESNEAU (det.).

**Astronome adjoint associé :** M. JASCHECK (Astronomie)

**Physiciens adjoints (Physique du Globe) :** P. HOANG TRONG (Géophysique int.) - R. MONTIGNY (Géophysique int.).

**Directeurs de recherche C.N.R.S. :**

P. ALBRECHT	Chimie	A. KOVACS	Physicochimie macromoléculaire	A. SKOULIOS	Physicochimie macromoléculaire
J.F. BILLMANN	Chimie	J. MARCHEL	Physicochimie macromoléculaire	M. VAN REGENMORTEL	Géologie
P. BOUVEROT	Physiologie respiratoire	P. A. MEYER	Mathématiques	R. VAROQUI	Physicochimie macromoléculaire
P. DEJOURS	Physiologie respiratoire	A. J. MEYER	Physique	A. VEILLARO	Chimie moléculaire
M. FRANCK-NEUMANN	Chimie organique	A. PORTE	Biologie cellulaire	R. ZANA	Physicochimie macromoléculaire
J. HOFFMANN	Biologie animale	P. REMPP	Physicochimie macromoléculaire	A. ZUKER	Physique théorique
A. KNIPPER	Phys. nucl. et corpusculaire	R. SCHLICH	Géophysique marine		

**Maîtres de recherche C.N.R.S. :**

J. Ch. ABBE	Physicochim. des interactions et des interfaces	J.C. GALIN	Physicochimie macromoléculaire	P. FOIX	Chimie
E. ASLANIOES	Physique nucléaire et corpusculaire	J.B. GRUN	Physique	P. GOUYET	Biochimie
H. BARRIEAU	Physiologie respiratoire	F. HAAS	Physique nucléaire et corpusculaire	R. JEMY	Biochimie
F. BECK	Physique nucléaire et corpusculaire	J. HERZ	Chimie	J. RICHERT	Physique nucléaire théorique
G. BECK	Biochimie	G. JENNER	Chimie	J. RINGEISEN	Physique
J.P. BECK	Physiologie	G. KAUFMANN	Chimie	O. ROHFRITSCH	Phytomorphogénèse
M. BONHOMME	Géologie	G. KEITH	Biochimie	J.P. ROTH (S. Dir. Inst. de Recherch)	Physicochimie macromoléculaire
H. BRAUN	Physique nucléaire et corpusculaire	J.P. KINTZINGER	Chimie	R. SCHANTZ	Physiologie végétale
M. BRAUNSTEIN	Chimie	B. KOCH	Physiologie	F. SCHEIBLING	Physiologie nucléaire et corpusculaire
M.C. CADEVILLE	Physique des Solides	E. KOCHANSKI	Struct. et dynamique moléculaire - chimie de coordination	F. SCHUBER	Chimie organique
H. CALLOT	Chimie	B. LANG	Cristallographie	G. SCHULZ	Physique nucléaire et corpusculaire
S. CANDAU	Physique	J. LANG	Physicochimie macromoléculaire	C. SCHWAB	Physique
M. CHAMPAGNE	Biochimie	P. LAURENT	Physiologie comparée des régulations	R. SELTZ	Physique nucléaire et corpusculaire
J. CHEVALLIER	Physique nucléaire et corpusculaire	C. LERAY	Physiologie comparée des régulations	P. SIFFERT	Physique nucléaire et corpusculaire
J.P. COFFIN	Physique	F. LEYENDECKER	Chimie	C. SITTler	Géologie
A. CORET	Physique	B. LOTZ	Physicochimie macromoléculaire	M. STOECKEL	Biochimie
M. CROISSIAUX	Physique nucléaire et corpusculaire	B. LUU	Chimie organique	G. STRAZIELLE	Physicochimie macromoléculaire
O. DISDIER	Physique nucléaire et corpusculaire	G. MAIRE	Chimie	V. SUFFERT	Physique nucléaire et corpusculaire
J. DOUBINGER	Géologie	J. MARLAN	Physiologie respiratoire	J.C. THIERRY	Chimie
F. DURST	Physiologie végétale	E. MARCHAL	Physicochimie moléculaire et macromoléculaire	K. TRADOR	Physicochimie atomique et ionique
S. EL KOMOSS	Physique	R. MORAUD	Physique nucléaire et corpusculaire	P. WAGNER	Physique nucléaire et corpusculaire
B. FRANCOIS	Physicochimie macromoléculaire	O. MORAS	Chimie	G. WALTER	Physique nucléaire et corpusculaire
J.M. FRIEDT	Physicochimie moléculaire	T. MULLER	Physique nucléaire et corpusculaire	F. WEBER	Géologie
B. FRITIO	Physicochim. des interactions et des interfaces	G. MUNSCHY	Physique	J.P. WENIGER	Zoologie
Y. GALLOT	Physicochimie macromoléculaire	M. NAUCIEL BLOCH	Physique des Solides	J. WITZ	Biologie cellulaire
J.P. GERBER	Physique nucléaire et corpusculaire	A. NICOLAIEFF	Viologie végétale	R. WOLFF	Chimie
R. GIÈGE	Biochimie	H. PAQUET	Géologie	J.P. ZIEGLER	Physique
H. GIRARD	Physiologie respiratoire	M. PATY	Physique nucléaire et corpusculaire		Mécanique des Fluides
		C. PICOT	Physicochimie macromoléculaire		

## U.E.R. D'ODONTOLOGIE

Directeur Robert FRANK

**Professeurs :**

M.DOCQ R.FRANK	Dentisterie opératoire Biologie et Matière fondamentale	P.KLEWANSKY J.LITZLER	Parodontologie Prothèse
-------------------	--	--------------------------	----------------------------

**Professeurs de premier grade :**

E.ALLEMANN M.BASTIAN C.BOLENDER A.COMTE	Dentisterie opératoire Prothèse Orthopédie dento-faciale Dentisterie opératoire	R.HAAG J.L.LACOSTE M.LANGER M.LEIZE	Pathol. et Thérapeutique dentaires Orthopédie dento-faciale Prothèse Prothèse	P.NICOLAS J.J.ROTH A.SCHLIENGER J.SOMMERMATER	Pathol. et Thérapeutique dentaires Parodontologie Prothèse Pédoodontie
--	--	--	--	--	---

**Professeurs de deuxième grade :**

W.BACON P.CAHEN J.P.CHARLIER	Orthopédie dento-faciale Biologie et Matière fondamentale Orthopédie dento-faciale	B.KAESS H.TENENBAUM	Pathol. et Thérapeutique dentaires Parodontologie
------------------------------------	--	------------------------	--

Maître de recherche I.N.S.E.R.M. : A.BELCOURT (Odontologie).

## U.E.R. DES SCIENCES PHARMACEUTIQUES

Directeur Alexis GAIRARD

Docteurs honoraires : P.DUQUENOIS - M.HASSELMANN - G.DIRHEIMER - P.METAIS.

Professeurs honoraires : P.COROIER - J.P.EBEL - G.GAZET du CHATELIER - M.HASSELMANN - P.JAEGER.

**Professeurs :**

R.ANTON R.CARBIENER G.DIRHEIMER G.FERARD A.GAIRARD D.GERARD C.HASSELMANN (dir.) L.LJUNG J.C.KOFFEL	Pharmacognosie Botanique Toxicologie Biochimie Physiologie Physiologie et Biophysique Chimie analytique Pharmacie chimique Pharmacie chimique	M.LAMI Y.LANDRY C.LAPP P.LAUGEL G.LAUSTRIAT A.LUGNIER J.MALGRAS C.MATHIS P.METAIS	Mathématiques Pharmacologie Chimie générale et minérale Chimie analytique Physique Toxicologie Immunologie Pharmacie galénique Biochimie	B.PESSON P.PJINDRON J.SCHREIBER A.STAHL A.STAMM J.C.STOCLET D.VIDON C.G.WERMUTH	Parasitologie Virologie Chimie organique Biochimie pharmaceutique Pharmacie galénique Pharmacodynamie Bactériologie Chimie organique
--	---	---	--	--	---

Chargé de cours : M.KRISTENSEN (Hygiène, Nutrition et Diététique).

Professeur associé : J.TYRZYK (Biophysique).

Professeur conventionné : B.ROTH-SCHECHTER (Pharmacodynamie).

Maître de recherche : I.N.S.E.R.M. : J.BIETH (Enzymologie)

## U.E.R. DES SCIENCES HUMAINES

U.E.R. de Géographie : Directeur Pierre LIMOUZIN  
U.E.R. des Sciences du Comportement et de l'Environnement : Directeur Philippe ROPARTZ

Professeurs honoraires : E.JUILLARD R.RAYNAL.

**Professeurs :**

J.M.AVENARD A.LIEURY P.LIMOUZIN	Géographie Psychologie expérimentale Géographie	P.MICHEL A.MOLES H.NONN H.REYMONO	Géographie Psychologie sociale Géographie Géographie	R.SCHWAB A.TABOURET-KELLER M.TARDY J.TRICART	Géographie Psychologie Pédagogie Géographie
---------------------------------------	---	--	---	---	--

Directeur de recherche : C.N.R.S. - S.RIMBERT (Géographie).

## U.E.R. DES SCIENCES ÉCONOMIQUES

Directeur Patrick COHENDET

Docteurs honoraires : P.CHAMLEY J.P.FITOUSSI R.DOS SANTOS FERREIRA - J.L.GAFFARD.

Professeur honoraire : P.CHAMLEY.

**Professeurs :**

P.ARTZNER F.BILGER A.CHABERT	Mathématiques Sciences Économiques Sciences Économiques	R.DOS SANTOS FERREIRA G.KOENIG	Sciences Économiques Sciences Économiques	J.J.OBRECHT P.PONCET	Sciences de Gestion Sciences de Gestion
------------------------------------	---	-----------------------------------	--	-------------------------	--

Professeur émérite : P.CHAMLEY (Sciences Économiques).

Professeur conventionné : R.UHRICH (Ec.rég.et euro-).

Chargés de conférences : R.ERBES - A.LOSSER.

## AVANT-PROPOS

C'est dès ma jeunesse que j'eus les premiers contacts physiques avec la mangrove, lorsqu'avec des camarades, nous descendions les "arroyos" de la rivière de Saïgon, entre deux haies d'arbres à échasses, sur des radeaux que nous avions confectionnés nous-mêmes. Ce fut aussi, à cette époque et en pleine guerre d'Indochine, la descente Saïgon-Cap St Jacques, dans un caboteur et au milieu de la mangrove. Mais les premiers contacts "scientifiques" ont eu lieu en 1963 quand je fus affecté au Centre ORSTOM de Cayenne pour étudier avec M. SOURDAT l'évolution des sols dans un polder de 360 ha qui venait d'être aménagé dans les mangroves aux environs de Cayenne. Et depuis 20 ans, je n'ai pratiquement plus quitté ce milieu amphibie. C'est aussi de cette époque que date ma rencontre avec le professeur PONS, à l'occasion du Congrès de Paramaribo de 1963 et surtout de la tournée que nous avons faite sur la plaine côtière de Guyane en 1964. Depuis, nous avons vu ensemble des profils de sols sulfaté-acides au Sénégal, en Thaïlande, en Malaisie. Il m'a plusieurs fois accueilli à l'Université de Wageningen où j'ai eu l'occasion de rencontrer les "leaders" des sols sulfaté-acides que sont VAN BREEMEN, BRINKMAN, DOST.

Je le remercie d'avoir accepté d'être mon "parrain" scientifique depuis plus de 10 ans et de participer aujourd'hui à mon jury.

C'est en 1970, à l'occasion de la restructuration de la section de Pédologie en thèmes que J. VIEILLEFON, animateur du thème C a proposé mon affectation à Dakar pour prendre sa succession dans les mangroves de Casamance qu'il venait d'étudier pendant six ans. Sa chronoséquence de Balingore est devenue un véritable laboratoire naturel pour l'étude de l'évolution des mangroves. Qu'il en soit remercié.

A peine avais je débuté mon travail sur les mangroves du Sénégal que j'eus la grande chance de rencontrer J. LUCAS en Janvier 1972. Il voulait connaître la mangrove. Chose rare, dès son premier contact - physique - avec la vase, ce fut pour lui le "coup de foudre" avec ce milieu et de 1975 à 1980 il a dirigé, dans le cadre d'une A.T.P. une série de campagnes de carottages dans les mangroves qui constituent la première opération de ce type dans ce milieu. Au cours de toutes ces campagnes, J. LUCAS a été à la fois un bon chef et un très bon "manoeuvre", car il est avant tout, un remarquable "homme de terrain" qui a su, d'une part, s'adapter à toutes les vases, d'autre part, communiquer aux différentes équipes qui ont participé à ces campagnes son goût du travail bien fait, mais dans la bonne humeur et l'optimisme. Il n'a donc pas été difficile pour lui de me convaincre de le suivre à Strasbourg, malgré les rigueurs de l'hiver alsacien, pour rédiger cette thèse et collaborer avec lui à l'animation d'un programme "MANGROVES" qui s'est étendu maintenant aux quatre coins du monde. Pour tout cela, je lui adresse mes plus vifs remerciements.

A Strasbourg, j'ai fait la connaissance de P. MICHEL qui anime toute une équipe de géomorphologues "littoraux" avec laquelle j'ai établi une collaboration fructueuse et je le remercie d'avoir accepté de faire partie de mon jury.

Monsieur G. AUBERT, m'a initié à la pédologie avec ses cours et, en tant que grand spécialiste français des sols salés il s'est toujours intéressé à mon travail. Aussi, bien qu'il ait depuis longtemps, abandonné ses fonctions à la tête de la section de PEDOLOGIE est-il le seul, de l'ORSTOM, qui se soit intéressé, même de loin, à mon travail. C'est pourquoi je suis particulièrement heureux de le voir aujourd'hui représenter l'ORSTOM dans mon jury et je l'en remercie.

Pendant les 8 années passées au Sénégal, je n'ai eu qu'à me féliciter des services que j'ai obtenus tant sur le terrain qu'au laboratoire et je tiens à remercier :

- ceux qui m'ont accompagné sur le terrain : BODIAN, BADJI, KANDIOURA, BACCARY, SAMB, ainsi que
- Marc CHEVAL qui de 1976 à 1980 a collaboré à toutes mes campagnes de carottages ;
- ceux du laboratoire du Centre ORSTOM de DAKAR, qui sous la direction efficace de mon ami C. PAYCHENG ont analysé pour moi des centaines d'échantillons : LOPEZ, FONSECA, P. N'DIAYE, N. N'DIAYE, LOPY, BOCOUNTA,
- au service de cartographie, CISSE qui a réalisé un grand nombre de figures de cette thèse et surtout l'un de mes meilleurs amis, J.C. POTTIER, tragiquement disparu en 1983 ;
- au service hydrologique : J. LERIQUE, ami de longue date, qui a effectué pour moi de nombreux prélèvements d'eaux en Casamance ;
- enfin trois de mes meilleurs amis et collègues pédologues
  - . J.C. LEPRUN, dont j'occupe le bureau à l'Institut de Géologie,
  - . S. PEREIRA-BARRETO, ami depuis 30 ans puisque nous avons débuté ensemble à l'Université de Toulouse
  - . et C. FELLER à qui je crois avoir communiqué la passion de la mangrove, puisqu'il est inscrit pour une thèse d'Etat à Strasbourg, ainsi que J.C. PION qui m'a accueilli à Strasbourg en 1977 et qui ne m'a jamais refusé son aide.

Dès le début de mon travail, j'ai noué des contacts avec la station I.S.R.A. de Djibelor où j'ai toujours été chaleureusement accueilli par les cinq pédologues qui se sont succédés et qui sont devenus autant d'amis. G. BEYE, aujourd'hui à la F.A.O., M. TOURE, directeur de la recherche agronomique au Sénégal et M. KHOUMA, aujourd'hui à l'O.M.V.G. C'est toujours avec le même plaisir que je les retrouve à l'occasion de mes missions au Sénégal.

A L'institut de Géologie de Strasbourg, je tiens à remercier d'abord L. PREVOT qui a préparé notre arrivée et notre installation à Strasbourg ainsi que H. PAQUET avec qui nous entretenons d'excellentes relations.

Dans cet Institut, j'ai surtout apprécié la qualité et l'efficacité des Sections Techniques et de leurs responsables et mes remerciements s'adressent tout particulièrement aux personnels des trois services auxquels j'ai eu affaire et de qui j'ai obtenu tout ce que je voulais dans les meilleurs délais avec de bons résultats. Il s'agit notamment :

- du service de géochimie des eaux, dirigé par B. FRITZ qui a inauguré avec nous la première campagne de carottages en 1975 et qui est aujourd'hui dans mon jury. J'ai noué avec ceux qui travaillent dans son laboratoire, Y. HARTMEIER, G. KREMPP et D. MILLION des relations cordiales ;

- de la section des R.X. dirigée par F. WEBER et P. LARQUE à qui je dois l'interprétation de nombreux diagrammes, ainsi que des techniciens R. FEURER, R. WENDLING et P. KARCHER ;
- de la section de chimie dirigée par Y. BESNUS avec R. ROUAULT, J. SAMUEL, P. STAUB et I. BALOUKA ;
- C. MOSSER avec qui j'ai noué des relations d'amitié m'a aidé pour l'interprétation de la géochimie des éléments traces ;
- au service Informatique, A. CLEMENT m'a rendu des services inappréciables en traitant toutes mes données et je lui exprime toute ma gratitude.

J'adresse aussi mes vifs remerciements aux personnels des services généraux dont l'aide m'a toujours été accordée avec la plus grande gentillesse. Il s'agit de MM. WENDLING, SCHUSTER, GRUNER qui a réalisé tous les travaux photographiques et surtout F. OPPERMANN, qui malgré ses multiples activités est arrivé au bout du dessin de certain nombre de figures qui sont dans cette thèse.

Je n'oublie pas enfin, les bibliothécaires M<sup>mes</sup> ORY et KIEFFER avec qui j'ai noué des relations de sympathie et que je remercie pour tous les services qu'elles m'ont rendus.

A l'O.R.S.T.O.M. de BONDY, je remercie particulièrement Mme DELAUNE, à qui je dois une bonne partie du chapitre 4 de cette thèse en espérant que notre collaboration se poursuivra dans les mêmes conditions pour les travaux à venir sur les autres mangroves.

Je remercie aussi Monsieur PELLOUX qui a toujours accepté de bonne grâce, d'effectuer pour moi quelques analyses dans son laboratoire.

C'est grâce à D. GOULEAU, du laboratoire de géologie marine de NANTES que le carottier a fonctionné dans de bonnes conditions au Sénégal. Depuis nous nous sommes retrouvés, sur ma proposition, dans une opération pluridisciplinaire C.N.E.X.O. sur les mangroves de Bornéo.

Je le remercie pour les magnifiques clichés qu'il a réalisés sur les échantillons de vases superficielles et je pense que notre collaboration est appelée à se poursuivre dans d'autres opérations.

Je remercie S. ALTSCHULER pour avoir relu et corrigé une partie de mon manuscrit le temps qu'il a été professeur associé ici. Il m'a appris beaucoup de choses sur les relations entre la matière organique et la pyrite.

Enfin, c'est D. BILTZ qui a assuré la frappe de cette thèse dans de bonnes conditions et les termes de la classification américaine n'ont plus de secret pour elle. Je la remercie infiniment.

Pour terminer, je dédie cette thèse à mon épouse Rita, qui a accepté de me suivre et qui s'est adaptée sans aucun problème, non seulement à toutes mes affectations successives : TCHAD, GUYANE, GABON, SENEGAL et ... ALSACE, mais aussi à nos nombreuses séparations. Partout, elle a assuré l'intendance de la famille dans d'excellentes conditions et accueilli toujours avec bonne grâce et sourire les nombreux amis et "visiteurs temporaires".



## INTRODUCTION

Le terme mangrove, à l'origine, servait à désigner les formations végétales de certaines plaines littorales, en régions tropicales : les palétuviers<sup>\*\*</sup>. Il caractérise aujourd'hui tout un écosystème des côtes à deltas de nombreuses régions intertropicales du monde.

Dans cet écosystème où les marées et les courants côtiers ont une influence prépondérante, plantes et animaux doivent s'adapter continuellement aux variations ininterrompues du milieu environnant. On comprend donc que, de longue date, l'étude de ce milieu ait attiré les botanistes et plus particulièrement les biologistes et les physiologistes de la végétation.

Selon BOWMAN (1917), cité par WALSH (1974), les premiers écrits sur la mangrove remontent à 325 av. J.C. avec une chronique de NEARCHUS, commandant de la flotte d'Alexandre le Grand.

Il existe une abondante littérature sur les mangroves et l'on doit à SNEDAKER (1974), WALSH (1974) et surtout ROLLET (1981) les compilations bibliographiques les plus récentes ; le premier (SNEDAKER), avec plus de 2 000 références a été établi pour le Symposium de HAWAII sur la Biologie des Mangroves, le deuxième (WALSH) a paru dans un ouvrage collectif sur l'Ecologie des Halophytes et enfin le troisième a été réalisé pour l'UNESCO. On y remarque que la plus grande partie des travaux est consacrée à la végétation et à l'écologie des mangroves des 4 continents. Milieu marécageux, inhospitalier, peuplé d'animaux sauvages - c'est notamment le refuge du tigre du Bengale - et insalubre à cause des moustiques et des mouches tsé-tsé (en Afrique), la mangrove est restée pendant longtemps à l'écart de toute activité humaine et, en particulier de l'activité agricole.

- C'est, en grande partie, sous la pression démographique que certaines mangroves, en Asie, ont été aménagées pour la riziculture : Malaisie, Thaïlande, Vietnam...

- En Afrique où les mangroves couvrent de vastes superficies au Nigeria, Cameroun, Gabon, Sierra Leone, Guinée, Sénégal, seule une petite frange littorale est utilisée pour la riziculture en Sierra Leone, Guinée et Sénégal.

- Mais c'est sur les côtes guyanaises que la mangrove a été aménagée pour la première fois, grâce aux hollandais dont on connaît le goût traditionnel pour la poldérisation. C'est ainsi qu'en Guyana, les premiers colons ont réalisé le tour de force de jeter une digue de 150 km environ, à l'extérieur de la mangrove, isolant d'un seul coup le continent de la

---

<sup>\*\*</sup> palétuvier vient de paletuviera qui est l'ancien nom de Rhizophora

mer. Dans les 3 Guyanes, les mangroves aménagées en polders au temps de l'esclavage ont permis les spéculations agricoles les plus vairées : cotonnier, caféier, cacaoyer, agrumes, canne à sucre. A l'abolition de l'exclavage, la plupart des exploitations ont été abandonnées. Mais au début du XXe siècle, l'apport 'immigrants asiatiques - Indonésiens et Indiens au Suriname, Indiens en Guyana \*\*, a permis à l'agriculture de connaître un nouveau départ sur les mangroves. Nous y reviendrons au chapitre de l'utilisation des sols de mangroves.

Malgré les études pédologiques, les aménagements des mangroves pour l'agriculture restent encore très limités, car il ont subi, dès les débuts, des échecs - souvent spectaculaires - généralement dus à une mauvaise connaissance des sols, de leur environnement et de leur évolution future.

En effet, les *sols sulfaté-acides* - puisque c'est d'eux qu'il s'agit - qui sont généralement le résultat d'un aménagement mal conduit des sols de mangroves ont été décrits et étudiés pour la première fois dans les régions tempérées et plus particulièrement en Hollande, par VAN BEMMELEN, en 1886 qui dès cette époque avait signalé que l'acidification des sols de polders (pH <4) était due à l'oxydation des sulfures de fer en sulfates, avec libération d'acide sulfurique. Ces sols étaient désignés "Katteklei" (cat-clays). Il fut suivi en cela par VANDERSPEK (1934), ZUUR (1936) et quelques auteurs scandinaves.

Dans les régions tropicales, des centaines de milliers d'hectares de mangroves aménagés en rizières, dans le delta du Mékong, avant la guerre, sont presque immédiatement stérilisés. On parle de terres et d'eaux "alunées" (AURIOL, 1934). En Thaïlande où la riziculture s'est développée dans la plaine de Bangkok depuis le 19e siècle, ce n'est qu'en 1947 que PENDLETON décrit pour la première fois les sols "sulfaté-acides".

En Afrique, DOYNE publie en 1937 un article sur l'acidité des marais à mangroves. Mais, il faudra attendre la fin de la seconde guerre mondiale pour que de plus en plus de chercheurs pédologues - et en particulier les hollandais - s'intéressent à l'origine et à la genèse des sols sulfaté-acides. Les travaux les plus importants sont dus à L.J. PONS (Suriname, 1963 ; Guyana, 1965 ; Thaïlande, 1969 ; Hollande, 1965), N. VAN BREEMEN (Thaïlande, 1976), COULTER (Malaisie, 1968), MOORMANN (Vietnam, 1981), VAN DER KEVIE (Thaïlande, 1969), HARMSSEN, HART, CARPENTER, JEFFERY, TOMLINSON (Sierra-Leone, 1953, 1963). Pour les pays d'expression française, on citera HERVIEU, (1966), VIEILLEFON (1963), pour (Madagascar), LEVEQUE, (1963), MARIUS, TURENNE (1967) en (Guyane Française), MARIUS, VIEILLEFON (Sénégal, 1972-1981 - 1965-1977).

Au Sénégal, où les mangroves sont cultivées en riz par les populations locales depuis fort longtemps les études pédologiques de ces sols sont très récents et débutent en 1965 avec J. VIEILLEFON qui, le premier, parle dans cette région, de sols sulfaté-acides, cartographie les sols de mangroves de Basse Casamance et sur une séquence, étudie plus particulièrement le rôle du soufre et de ses composés dans la pédogenèse de ces sols. Parallèlement, une société hollandaise : l'ILACO procède à des aménagements dans certaines des vallées affluentes, établit deux polders expérimentaux

---

\*\* Suriname : ex Guyane Hollandais - Guyana : ex Guyane Britannique

qu'étudie G. BEYE. Surviennent les premiers échecs.

A notre arrivée au Sénégal en 1971, nous avons commencé à étudier les mangroves de l'Estuaire du Saloum, situées dans une région plus aride que celles de la Casamance. Mais il se trouve que le début de nos travaux dans ce pays coïncide avec le début du cycle de sécheresse qui sévit dans la zone sahélienne, en général, et au Sénégal en particulier. Cette sécheresse - qui n'en finit pas - atteint notamment la mangrove de Casamance et dès 1973 nous observons que ces effets se font sentir sur la séquence étudiée par VIEILLEFON. Nous poursuivons donc l'étude de cette séquence. Parallèlement, 2 séquences sont choisies en Casamance, l'une, encore en équilibre, à Oussouye, au Sud du fleuve Casamance, dans la vallée du Kamobeul, l'autre, à Tobor, sur des vases récentes. La Casamance est presque un bras de mer, surtout depuis ces dernières années de sécheresse. Le Saloum est une ria et la Gambie, située entre les deux est un véritable fleuve. Il nous a donc paru intéressant de comparer les mangroves de Gambie et du Saloum avec celles de la Casamance. Une séquence a été choisie en Gambie, à un endroit où la mangrove est la mieux représentée.

Dans le Saloum, 2 séquences ont été étudiées, l'une est située dans les "îles" du Saloum (Bassid), l'autre, (N'Dimsiroh) est très en amont sur la rive droite du fleuve Saloum. La cartographie de l'Estuaire du Saloum, l'étude des effets de la sécheresse sur la séquence de Balingore, et l'étude des 6 séquences constituent un des volets de nos travaux.

A la suite d'une reconnaissance en Casamance et dans le Saloum, J. LUCAS, attiré par les problèmes de la mangrove, obtient des crédits nécessaires à l'acquisition d'un carottier à piston stationnaire et en 1975, dans le cadre d'une A.T.P. "Mangroves et Vasières" dont il assure la direction, commence une série de campagnes de forages profonds dans les mangroves. Grâce à ce matériel léger et efficient, 27 forages profonds sont exécutés, dont 18 en Casamance, 3 en Gambie, 2 dans le Saloum et 4 dans le Delta du Sénégal. Environ 300 échantillons ont été prélevés et les résultats fournis la matière à une thèse de Y. KALCK (1978) sur la géochimie et la minéralogie du sédiment de la mangrove.

La connaissance de la géologie de la mangrove constitue le deuxième volet de nos travaux.

Enfin, le troisième et dernier volet est représenté par l'étude de l'utilisation et de l'aménagement des sols de mangroves. En effet, de nombreux projets d'aménagements des mangroves de Casamance ont vu le jour ces dernières années et nous avons été associés de près à l'élaboration de ces projets qui concernaient notamment 4 vallées affluentes : Kamobeul, Guidel, Soungrougrou, Baïla. Sur le terrain, nous avons cartographié la vallée de Guidel, collaboré de près à la cartographie de la vallée de Baïla et de loin, à celles du Kamobeul et de Soungrougrou.

En résumé, les quinze années de travaux sur la mangrove sénégalaise ont abouti à un inventaire complet de ces sols - de l'Estuaire de la Casamance au Delta du Sénégal - à une meilleure connaissance de la géologie des sédiments et de leur pédogenèse et, par là même, permettent actuellement de mieux orienter les aménagements futurs de cette mangrove.



## Chapitre I

## ECOLOGIE DES MANGROVES DU MONDE

## 1. DEFINITION

Au sens large du mot, la mangrove est définie comme étant l'ensemble des formations végétales, arborescentes ou buissonnantes, qui colonisent les atterrissements intertidaux marins ou fluviaux des côtes tropicales. En fait, le plus souvent, quand on parle de mangrove, on pense surtout à des arbres d'espèces tout à fait caractéristiques : les palétuviers. Aussi certains auteurs ont donné un sens plus restrictif au terme mangrove pour définir exclusivement la formation à palétuviers en réservant d'autres termes tels que "marais maritimes tropicaux" (BALTZER-LAFOND, 1971) ou "mangal" (MACNAE, 1968) pour la végétation de la zone intertidale.

Les facteurs qui conditionnent l'existence et le développement des mangroves sont aussi nombreux et variés que les auteurs qui les ont étudiés : en Amérique DAVIS (1940), dans les régions indo-pacifiques MACNAE (1968), en Colombie WEST (1954), au Vietnam VU VAN CUONG (1964), à Ceylan ABEYWICKRAMA (1959), à Madagascar WEISS (1966) et le plus important d'entre tous : CHAPMAN (1970). De tous ces travaux et de nos propres observations (Guyanes, Gabon, Sénégal, Inde) il apparaît que 3 conditions sont favorables à l'installation de la mangrove :

*a) le climat*

Le facteur limitant principal est la température qui ne doit pas être trop basse et l'on trouve des mangroves aussi bien sous climats équatoriaux (Guyanes, Gabon) que dans des régions arides (Mer Rouge, Golfe Persique, ouest de l'Inde, Mexique, Brésil, Sénégal) et même dans des zones semi-tempérées (Côte Orientale d'Afrique du Sud, Nouvelle Zélande).

*b) l'étendue du domaine intertidal*

Les côtes plates d'accrétion rapide ou les zones à fort marnage sont favorables à l'installation de la mangrove. Deltas, estuaires, lagunes sont des sites privilégiés, grâce à leur étendue, mais aussi parce que ce sont des zones protégées de la dynamique destructrice de la mer (vents, houles).

La nature du substrat n'est pas un facteur limitant. Certes la mangrove se développe mieux sur un matériel argileux ou argilo-limoneux, mais on en trouve aussi sur des sables, calcaires, récifs coralliens, granites, etc...

*c) la salinité*

Les palétuviers sont des halophytes facultatifs et de nombreuses études ont montré que leur croissance était normale dans des conditions de des-salure totale (STERN, VOIGHT, 1959). Dans la nature, c'est plus le balance-

ment périodique de la marée que la salinité de l'eau qui conditionne le développement de la mangrove et plus particulièrement de Rhizophora. Mais, d'une manière générale, c'est dans les régions équatoriales et tropicales humides où les eaux sont dessalées pendant une grande partie de l'année que la mangrove est la plus belle. Sous climats très contrastés, quand la salinité de l'eau dépasse celle de l'eau de mer (35 ‰), la mangrove est souvent rabougrie et son étendue, réduite aux dépens de zones nues, sursalées. Des 2 espèces principales de la mangrove Avicennia est nettement mieux adapté à la sursalure que Rhizophora

## 2. REPARTITION GEOGRAPHIQUE

MaC. GILL (1960) signale que 60 à 75 % du littoral des régions tropicales est occupé par la mangrove, mais l'examen des cartes de répartition des mangroves sur le globe (fig. 1) montre que d'une part, la mangrove est irrégulièrement répartie sur le littoral des divers continents, d'autre part, qu'elle déborde nettement au Nord et au Sud des deux tropiques. En effet :

### a) Sur le continent sud américain

La mangrove est abondante sur toute la côte orientale, en particulier au Brésil et dans les Guyanes et au Nord elle atteint 30° de latitude en Floride et dans le Golfe du Mexique, tandis qu'au Sud, on en trouve encore à 28°20', au Brésil. Par contre sur la côte occidentale qui borde le Pacifique, la mangrove est très peu représentée et ne dépasse par 4° de latitude Sud, à cause du courant froid de Humboldt.

### b) Sur le continent africain et à Madagascar

La mangrove borde la côte occidentale du Nord de l'Angola jusqu'à Saint Louis, au Sénégal, à 16°20' de latitude N, où elle est plutôt à l'état de relique et toute la côte Ouest de l'Afrique du Sud en est dépourvue, à cause du courant froid de Benguela. Sur la côte orientale, presque toute la mangrove est concentrée au Sud de l'Equateur et elle déborde un peu au Sud du Tropique du Capricorne.

A Madagascar, la mangrove est strictement localisée sur toute la côte occidentale.

### c) Sur le continent asiatique

La mangrove est présente sur toutes les côtes, de l'Inde, du Bangla Desh, de la Birmanie, de la Thaïlande, de l'archipel malais, de l'Indonésie, du Vietnam, des Philippines et au Japon elle a été signalée à 35° N de latitude N à Kyushu Island.

### d) Australie, Nouvelle Zélande, Iles du Pacifique

La mangrove borde toute la côte australienne au Nord du Tropique du Capricorne, avec quelques taches dans la région d'Adélaïde, à 33° S et bien que située nettement au Sud du Tropique du Capricorne, on trouve en Nouvelle Zélande des mangroves jusqu'à 40° de latitude S.

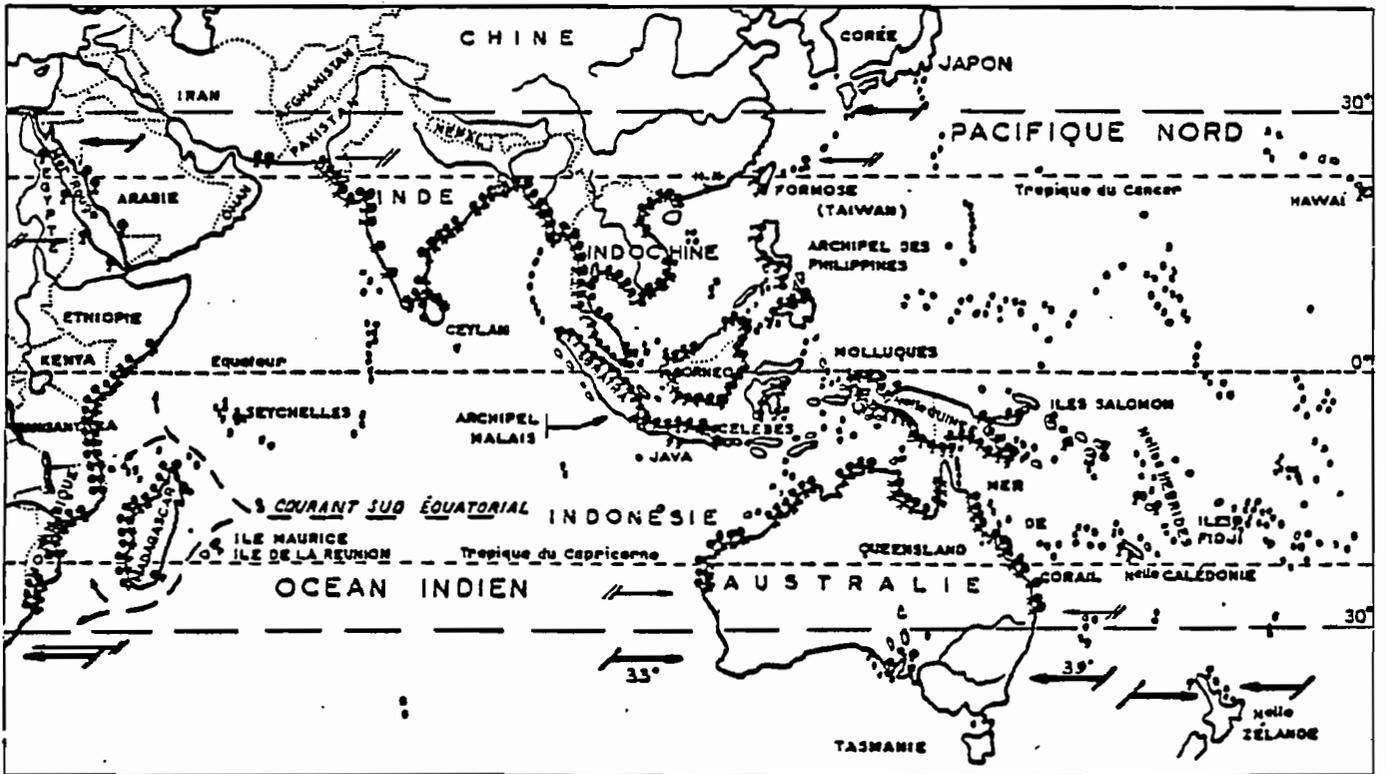
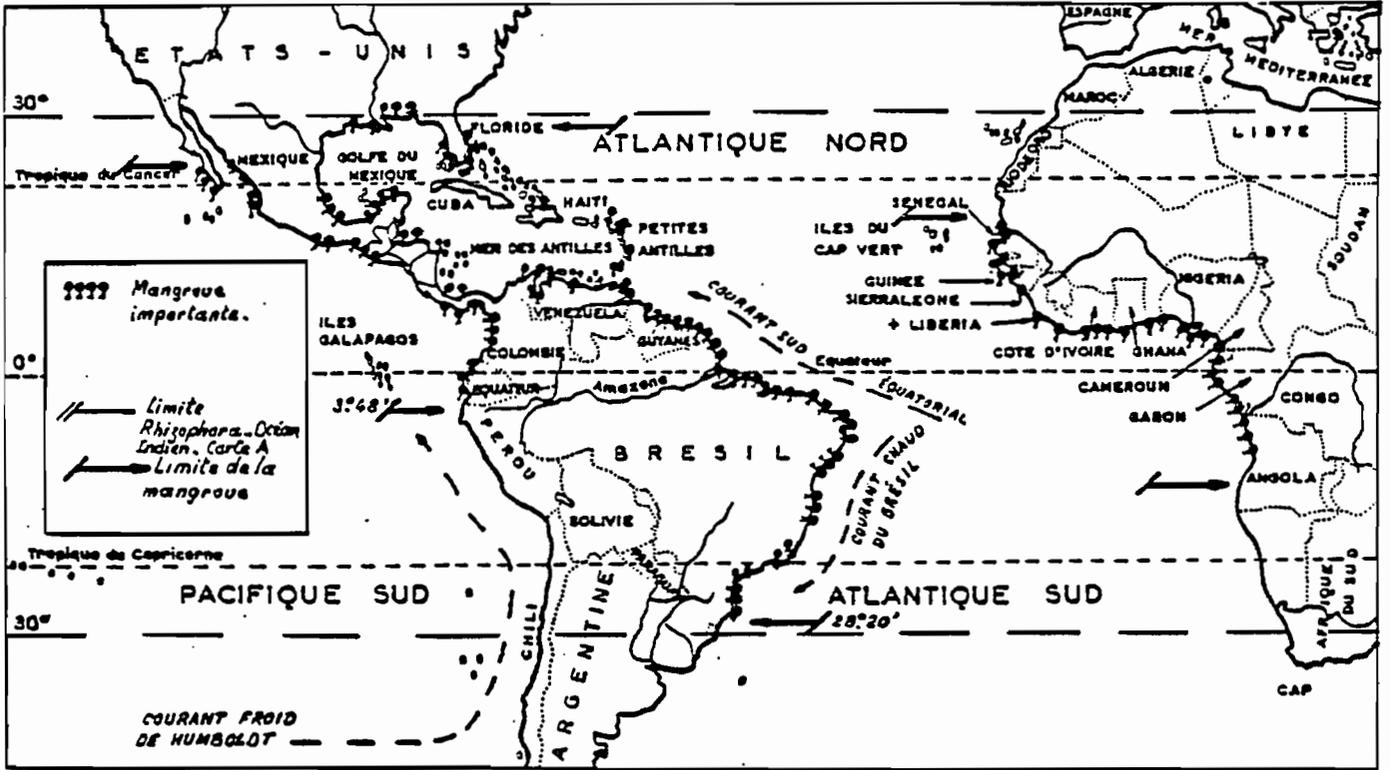


Fig. 1 - Répartition des mangroves du monde (d'après KIENER, 1973)

## 3. VEGETATION

Du point de vue des formations végétales, il existe une nette différence dans la répartition mondiale des espèces entre les mangroves de la région indo-pacifique et celles des Amériques et de la côte Ouest Africaine.

La région indo-pacifique beaucoup plus riche du point de vue floristique comprend les mangroves de l'Afrique de l'Est, de Madagascar, de l'Asie, de l'Australie et de Nouvelle Zélande.

La région Ouest-africaine - Amériques est formée des mangroves des côtes atlantiques et de la côte pacifique de l'Amérique Tropicale.

Sur les 55 espèces recensées par CHAPMAN (1970) dans les mangroves (tabl. I) et réparties dans 16 genres et 11 familles végétales, on remarque que la région indo-pacifique en compte 44, la mangrove américaine atlantique 9 et les mangroves ouest-africaines et Américaines pacifiques 7.

Tableau I

Distribution des plantes de mangroves  
(d'après CHAPMAN, 1970)

Familles et genres	Nombre total d'espèces	Région Indo- Pacifique	Amérique Pacifique	Amérique Atlantique	Ouest Afrique
<b>Rhizophoraceae</b>					
<u>Rhizophora</u>	7	5	2	3	3
<u>Bruguiera</u>	6	6	0	0	0
<u>Ceriops</u>	2	2	0	0	0
<u>Kandelia</u>	1	1	0	0	0
<b>Avicenniaceae</b>					
<u>Avicennia</u>	11	6	3	2	1
<b>Myrsinaceae</b>					
<u>Aegiceras</u>	2	2	0	0	0
<b>Maliaceae</b>					
<u>Xylocarpus</u>	?10	?8	?	2	1
<b>Combretaceae</b>					
<u>Laguncularia</u>	1	0	1	1	1
<u>Conocarpus</u>	1	0	1	1	1
<u>Lumnitzera</u>	2	2	0	0	0
<b>Bombacaceae</b>					
<u>Camptostemon</u>	2	2	0	0	0
<b>Plumbaginaceae</b>					
<u>Aegiaetilis</u>	2	2	0	0	0
<b>Palmae</b>					
<u>Nypa</u>	1	1	0	0	0
<b>Myrtaceae</b>					
<u>Osbornia</u>	1	1	0	0	0
<b>Sonneratiaceae</b>					
<u>Sonneratia</u>	5	5	0	0	0
<b>Rubiaceae</b>					
<u>Scyphiphora</u>	1	1	0	0	0
	<u>55</u>	<u>44</u>	<u>7</u>	<u>9</u>	<u>7</u>

La mangrove ouest africaine est essentiellement représentée par 6 espèces, dont 3 Rhizophoras : *Rh. racemosa*, *Rh. mangle*, *Rh. harrissonii* un seul Avicennia : *Av. africana* et 2 Combrétacés : *Laguncularia racemosa* et *Conocarpus erectus*. Il est à noter aussi qu'aucune espèce de la mangrove ouest-africaine-Amériques ne se retrouve dans la riche mangrove indo-pacifique dont voici quelques représentants : *Rhizophora mucronata*, *Rh. apiculata*, *Avicennia marina*, *Av. alba*, *Av. officinalis*, *Bruguiera cylindrica*, *Ceriops decandra*, *Ceriops tagal*, *Lumnitzera racemosa*, *Sonneratia alba*, *Nypa fruticans* ...

En ce qui concerne les Avicennias, c'est MOLDENKE qui en 1960 a identifié *Av. africana* sur la côte Ouest africaine pour le différencier de *Av. nitida* représenté uniquement en Amérique, associé à *Av. germinaus*.

La mangrove à Rhizophoras est communément désignée mangrove "rouge" en Afrique comme en Amérique, alors que la mangrove à Avicennia qui est la mangrove "noire" en Amérique correspond à la mangrove "blanche" en Afrique et c'est *Laguncularia* qui est la mangrove blanche en Amérique.

Du point de vue morphologique, *Rhizophora* se distingue d'*Avicennia* par ses racines échasses qui partent du tronc et des basses branches, un enracinement profond et dense de radicelles fibreuses, alors qu'*Avicennia* possède des racines aériennes : les pneumatophores qui forment un véritable tapis autour des arbres et leurs feuilles sont généralement recouvertes d'une pellicule de sel. *Avicennia* est, en effet, une cryo-halophyte tandis que *Rhizophora* est une euhalophyte.

A ces palétuviers et autres espèces qui forment la mangrove s. stricto, sont souvent associés des marais salés, saumâtres ou d'eau douce généralement liés à la dégradation des mangroves et aux changements dans le régime de sédimentation et surtout du régime hydrique.

Les peuplements végétaux des marais sont variables selon les régions et parmi les espèces les plus communes, nous citerons *Sesuvium portulacastrum*, *Philoxerus vermicularis*, *Scirpus littoralis*, *Paspalum vaginatum*, *Eleocharis*, *Typha* spp, *Cyperus* spp, *Phragmites*, *Achrosticum aureum* *Suaeda maritima*, *Batis maritima*, *Salicornia*, *Spartina*, *Sporobolus* spp.

#### 4. ZONATION ET SEQUENCE

Il y a eu de nombreuses tentatives dans le passé pour classer les mangroves suivant les caractères physiques de leur environnement, WATSON (1928) lie la zonation dans la mangrove à la hauteur et à la fréquence des marées, WALTER et STEINER (1937) distinguent les mangroves sur vases de celles sur sables, sur coraux ou sur tourbes. C'est DAVIS qui, en 1940, décrit pour la première fois une zonation complète dans la mangrove de Floride. Il y distingue 6 communautés principales :

- Zone à *Rhizophora mangle* pionnière
- Zone à *Rh. mangle* mûr sur tourbe
- Zone à Association d'*Avicennia* et d'halophytes : *Batis maritima*, *Salicornia* ... sur tourbes et sols salés en périodes sèches
- Zone à *R. mangle* + *Av. nitida*
- Zone à *Laguncularia Racemosa*
- Zone à *Conocarpus erectus*

CHAPMAN (1944) décrit une zonation semblable en Jamaïque.

TAYLOR (1959) décrit quatre types de séquences dans les mangroves de Nouvelle Guinée :

- la séquence des mangroves tidales
- la séquence des marais à mangrove
- la séquence des marais saumâtres
- la séquence estuarine

MACNAE (1966) décrit, de manière détaillée, une séquence dans les mangroves de l'Afrique de l'Est, qui semble être typique des mangroves de la région indo-pacifique. *Avicennia* est l'espèce pionnière et dominante, alors que *Rhizophora*, *Bruguiera*... se retrouvent à l'intérieur. Il distingue 9 associations végétales qui se répartissent de la manière suivante

- association à *Avicennia marina*
- " *Sonneratia alba*
- " *Rhizophora mucronata*
- " ± *Bruguiera gymnorhiza*
- " *Ceriops tagal*
- " ± *Bruguiera* spp
- " *Bruguiera gymnorhiza*
- " *Xylocarpus*
- " *Achroscopicum aureum* (dans les zones marécageuses)

Il en conclut que la zonation de la mangrove est due à l'interaction de 3 facteurs : fréquence d'inondation par les marées, salinité du sol, et durée d'inondation du sol. Ces facteurs étant eux mêmes liés à la pluviométrie, aux apports d'eau douce, à l'évaporation et à la nature du sol.

CLARKE et HANNON (1967-1969, 1970 ...) ayant étudié plusieurs mangroves d'Australie réfutent le rôle majeur de la nature du sol dans la zonation des plantes et concluent que celle-ci est intimement liée à leur situation par rapport au niveau moyen de la marée, à la salinité des nappes et à de légères variations de la microtopographie.

En Guyane (BOYE, 1961 ; LEVEQUE, 1962 ; MARIUS, 1965) on avait longtemps pensé que *Avicennia* était l'espèce pionnière en front de mer, suivi d'une mangrove décadente, de zones marécageuses à *Cyperacées*, *Typha*, *Achroscopicum aureum*, et d'une palmeraie marécageuse. *Rhizophora* est réduit à former des galeries le long des estuaires.

Une étude récente, LESCURE (1977) souligne l'originalité de la mangrove guyanaise due au fait que c'est *Laguncularia racemosa* - le palétuvier gris - qui est l'espèce pionnière, en front de mer. Il est progressivement remplacé par *Avicennia nitida* "La population de palétuviers gris avancerait vers la mer au rythme des dépôts de vase molle, suivie dans ce mouvement par les palétuviers blancs dont la distance à la mer, resterait constante, fonction de la distance nécessaire à la réalisation des changements édaphiques"

Au Gabon (MARIUS, 1971 ; LEBIGRE, 1981) la mangrove est presque exclusivement formée de *Rh. mangle* et *Rh. Harrisonii*, dans l'estuaire du Gabon, alors que les peuplements d'*Avicennia* sont relativement abondants, au milieu des *Rhizophoras*, dans la baie de la Mondah (LEBIGRE et MARIUS, 1981).

. En Sierra Leone (JORDAN, 1964) la succession est *Rh. recemosa* + *Harrissonii* - *Rh. mangrove* - *Av. africana* - *Laguncularia* - Marais à halophytes.

CHAPMAN (1970), dans un très important travail sur la phytosociologie de la mangrove cite 10 séquences caractéristiques de toutes les régions du monde. Il arrive à la conclusion qu'il y a une grande similitude dans les associations selon le système de BRAUN-BLANQUET, avec 8 alliances, 15 ordres et 40 associations. Or, ce travail - exclusivement basé sur les données souvent très partielles et localisées - d'auteurs anglo-saxons, ne peut pas être généralisé. C'est ainsi que, d'après CHAPMAN, sur toute la côte sud américaine (Brésil, Colombie, Equateur), *Rhizophora* est l'espèce dominante et pionnière, alors que dans les Guyanes, on sait que c'est *Avicennia* qui est largement dominant. (Tabl. II)

Le modèle de séquence qu'il présente pour l'Afrique de l'Ouest est celui de la Sierra-Leone, qui est très différent de ceux du Sénégal ou de la Guinée Bissau. En effet, si dans les régions équatoriales très humides, la mangrove est en équilibre stable, il n'en est pas de même sous les climats tropicaux, notamment ceux à saisons contrastées où des variations dans les précipitations et surtout leur répartition annuelle peut considérablement modifier le paysage de la mangrove, en quelques années (MARIUS, 1978).

## 5. FAUNE

Alors que la flore de la mangrove a fait l'objet d'une multitude de travaux plus ou moins exhaustifs, la faune de ce milieu est moins bien connue. Réputée pauvre en espèces, elle a été étudiée en Afrique du Sud (DAY et MORGAN, 1956 ; MILLARD et HARRISSON, 1954) à Madagascar (KIENER, 1965) au Brésil (GERLACH, 1958), au Sénégal (ELOUARD, 1977) et pour toute la région indo-pacifique (MACNAE, 1968). Nous passerons brièvement en revue trois grands groupes qui composent cette faune.

### a) Les crustacés

Leur nombre est relativement élevé dans la mangrove indo-pacifique et parmi les espèces qu'on retrouve un peu partout, on citera *Balanus* et *Chtalamus* spp, des crevettes, *Penacus*, *Alphacus* et surtout des crabes : *Cardiosoma*, *Sesarma* et *Uca* le crabe violoniste.

### b) Les mollusques

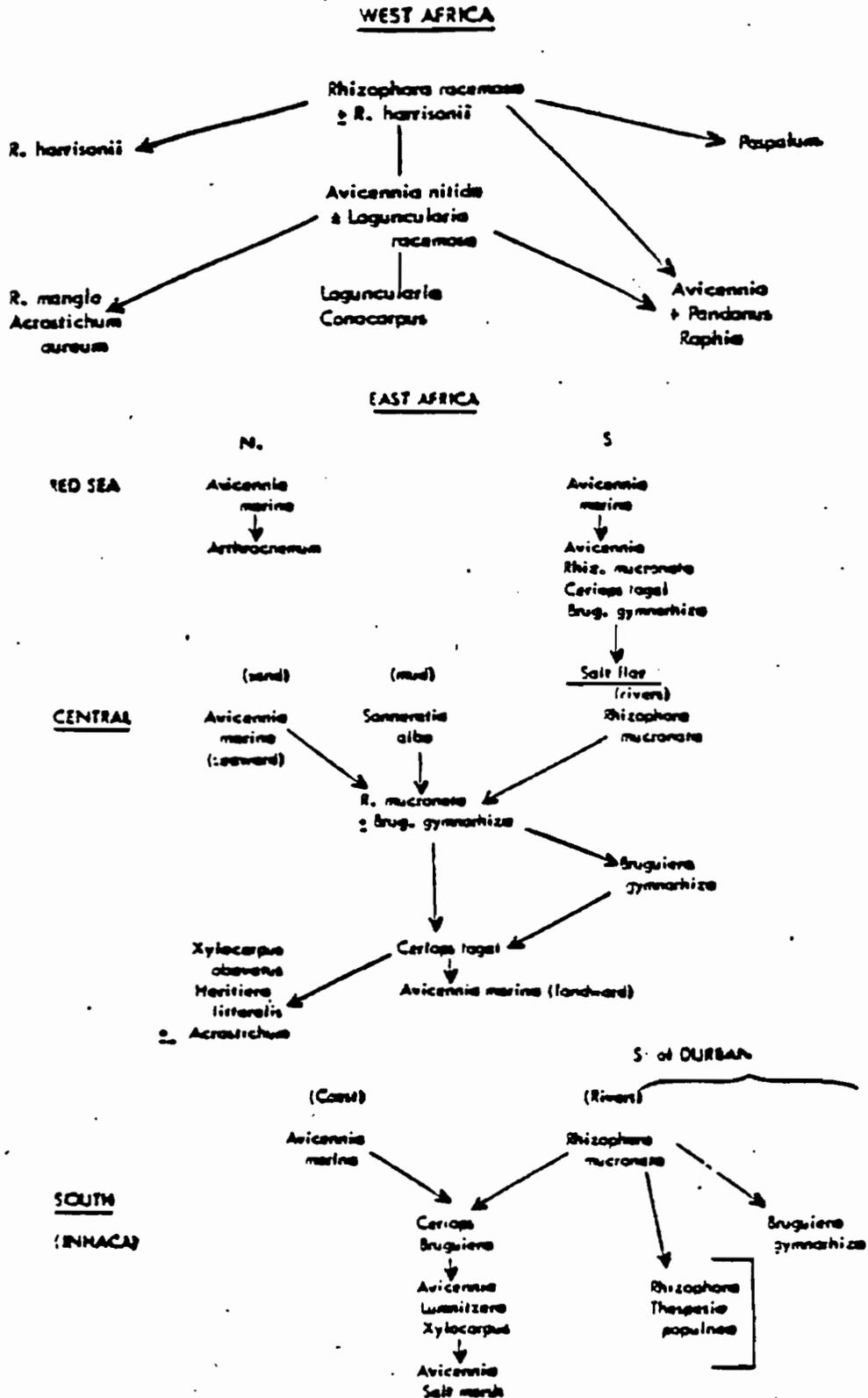
Ils sont surtout représentés par les huitres qui se fixent sur les racines et les contreforts des *Rhizophora*, auxquelles sont associés quelques gastéropodes (*Cerithidis*, *Néritines*, *Natica* ...) et des bivalves : petites moules, *Tellina*, *Tagelus* ..., *Aica* ...

### c) Les poissons

L'espèce caractéristique de ce biotope est le *périophtalme*. Amphibies constructeurs de terriers, grimpant sur les branches et les racines échasses des *Rhizophora*, les périophtalmes pullulent dans les mangroves, où, avec les huitres ils forment une véritable association avec les palétuviers.

Tableau II

Les séquences végétales sur les côtes africaines  
(CHAPMAN, 1970)



## 6. MANGROVE D'HIER ET D'AUJOURD'HUI

Nous avons vu que la mangrove indo-pacifique était floristiquement distincte et beaucoup plus riche en espèces que la mangrove atlantique et la disproportion est frappante pour qu'on ait essayé de l'expliquer. Actuellement, on constate aisément qu'il n'y a aucune communication possible entre la flore de l'Océan Indien et celle de l'Atlantique puisque les deux passages possibles, la Méditerranée et le Cap de Bonne Espérance sont hors de la zone tropicale. Mais en a-t-il été de même dans le passé ? La plupart des auteurs s'accordent à reconnaître que la mangrove serait originaire de l'archipel indo-malais, et même aujourd'hui, c'est dans cette région qu'elle est la plus riche en espèces et la plus belle en étendue et en taille. DING HOU (1960) et VAN STEENIS (1962) en concluent qu'elle serait partie de là, vers l'Ouest, en direction de l'Afrique et vers l'Est en direction des côtes américaines du Pacifique. Les germes auraient atteint la mer des Caraïbes entre le Crétacé Supérieur et le Miocène Inférieur en traversant l'Isthme de Panama. De là, les jeunes plants auraient été transportés sur les côtes ouest africaines par les courants marins. Par ailleurs pour expliquer la différence des flores sur les côtes africaines VAN STEENIS postule qu'au Crétacé Supérieur, le climat de l'Afrique du Sud n'était pas tropical et que donc les espèces n'ont pu franchir le Cap de Bonne Espérance. AUBREVILLE (1964), dans un article intitulé "Problèmes de la Mangrove d'hier et d'aujourd'hui" réfute, au moins en partie, l'hypothèse de VAN STEENIS. Constatant, en effet, que VAN STEENIS a montré la nécessité de l'existence du Jurassique au Crétacé Moyen d'un "pont transpacifique" joignant l'Océanie et l'Australie à l'Amérique du Sud, d'abord continu, puis ensuite discontinu et insulaire dans l'Est du Pacifique jusqu'au Crétacé Supérieur, AUBREVILLE trouve étonnant, qu'avec une telle possibilité de communication de proche en proche à travers le Pacifique jusqu'au Tertiaire inférieur, la mangrove indo malaise ne se soit pas étendue avec une plus grande densité d'espèces jusqu'aux îles du Pacifique et sur la côte pacifique de l'Amérique. Or, d'une part, la mangrove pacifique américaine est, par toutes espèces, d'origine atlantique, d'autre part, la mangrove indo-pacifique ne dépasse pas à l'Est, les îles Carolines et la Nouvelle Calédonie. AUBREVILLE en conclut "Il nous semble donc que les migrations de la mangrove indo malaise se sont faites vers l'Ouest et non vers l'Est par les rives tropicales de la Téthys jusqu'à l'Océan Atlantique Tertiaire".



## Chapitre II

ECOLOGIE DES MANGROVES  
DU SENEGAL ET DE LA GAMBIE

## 1. CADRE GEOGRAPHIQUE



Fig. 2 - Localisation des mangroves du Sénégal

Situées entre les latitudes  $12^{\circ} 20'$  et  $16^{\circ} 20' N$  et les longitudes  $16^{\circ} 20'$  et  $16^{\circ} 30'$  ouest, les mangroves du Sénégal représentent les mangroves les plus septentrionales de type atlantique, sur la côte Ouest Africaine. (Fig. 2)

Ce sont toutes des mangroves d'estuaires ou deltaïques situées au débouché des fleuves suivant qui sont, du Sud vers le Nord : la Casamance, la Gambie, le Saloum (et son affluent unique le Sine) et le Sénégal.

a) *Casamance*

La zone alluviale fluviomarine couvre environ 250 000 hectares entre l'Océan et les plateaux de Bignona, Ziguinchor et Oussouye qui se pourvuissent en Gambie au Nord et en Guinée Bissau au Sud. Elle pénètre largement à l'intérieur des plateaux, soit par la Casamance, dont le lit majeur atteint près de 10 km de large, à l'amont de Ziguinchor, soit par plusieurs de ses affluents : Soungrougrou, Bignona, Diouloulou et Baïla, sur la rive droite, Guidel, Nyassia et Kamobeul sur la rive gauche. Tous ces cours d'eaux sont soumis à l'influence de la marée sur la majeure partie de leur cours.

b) *Gambie*

Bien que la marée se fasse sentir très loin dans la partie inférieure de son cours, l'extension de la mangrove est assez réduite et, en grande partie localisée en bordure de quelques petits affluents (Bintang Bolon) ou défluent (Bao Bolon).

c) *Saloum*

Ni delta, ni même véritablement estuaire, le Saloum n'est aujourd'hui en réalité qu'une "ria" dont le chenal est exclusivement parcouru par les eaux marines. Ce bras de mer est formé d'une part de deux grands ensembles d'îles : les îles Betanti, au Sud, et les îles du Gandoul, au Nord, séparées par un estuaire très ensablé : les Diombos, d'autre part, d'un ensemble d'anciennes mangroves transformées en "tannes" sur la rive droite du fleuve Saloum.

d) *Delta du Sénégal*

Sur les 170 km en aval de Dagana et sur une superficie d'environ 4 000 km<sup>2</sup>, la mangrove ne subsiste plus qu'à l'état de reliques, aux environs de St Louis, tout le reste étant formé de terrains salés correspondant généralement à d'anciennes mangroves qu'aujourd'hui très évoluées.

## 2. LE CLIMAT

De Oussouye, en Casamance, à Richard Toll, sur le fleuve Sénégal, en passant par Sokone et Foundiougne, dans le Saloum, le climat varie considérablement avec la latitude et l'on passe d'un climat tropical humide, de type guinéen à un climat semi-aride.

a) *Pluviométrie (fig. 3)*

Dans le tableau III, sont portées les valeurs des pluviométries moyennes annuelles de différentes stations, en allant du Sud vers le Nord. On constate que dans tous les cas, il s'agit d'un climat à 2 saisons bien contrastées ; une saison des pluies qui dure 5 mois en Casamance (Juin-Novembre) et 3 mois dans le Saloum (Juillet-Septembre), suivie d'une saison sèche, plus longue, au cours de laquelle il ne tombe presque aucune goutte d'eau.

En fait, depuis environ 1968, on assiste à une diminution généralisée de la pluviométrie au Sénégal, comme dans toute la zone sahélienne,

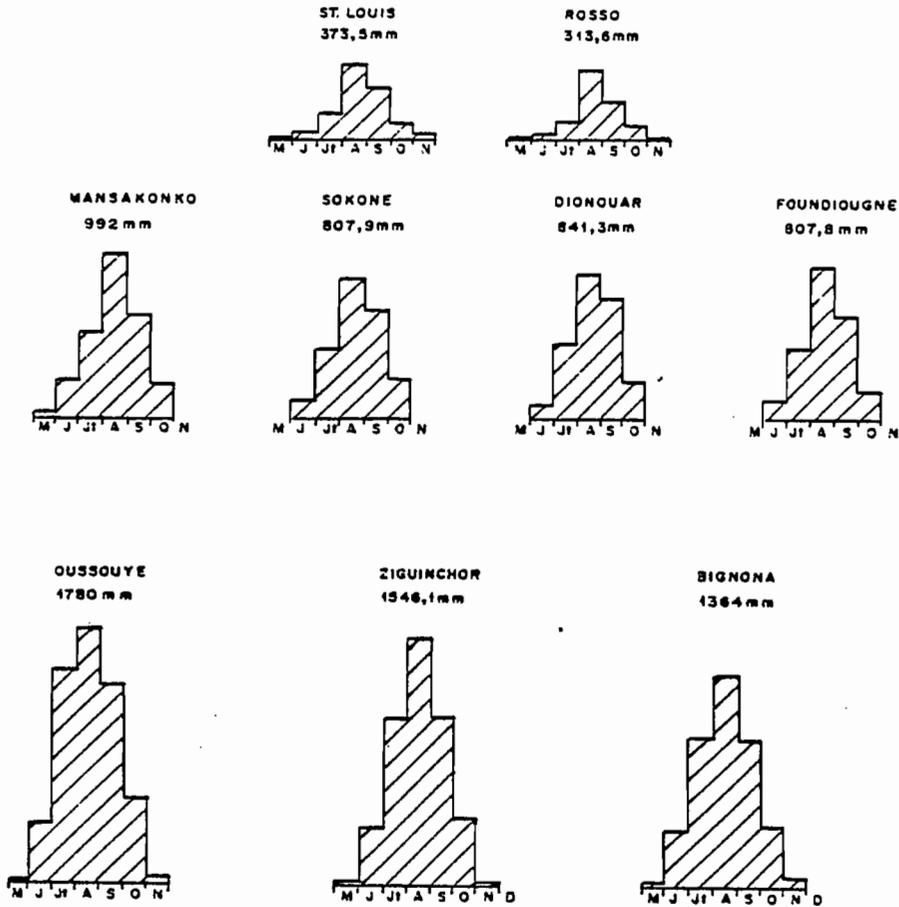


Fig. 3 - Pluviométrie au Sénégal  
(Zones Estuariennes)

Tableau III

Pluviométrie au Sénégal et en Gambie  
(Zones Estuariennes)  
(en mm)

Région	Station	M	J	Jt	A	S	O	N	Total
BASSE CASAMANCE	OUSSOUYE (31-60)	10	128	458	552	430	185	18	1780
	ZIGUINCHOR (31-60)	10.8	125.1	362.4	532.4	361	146	8.1	1546.1
	BIGNONA (53-65)	10.6	118.6	320	453	315.2	132.9	22.7	1364
GAMBIE	NANSA KONKO (51-67)	7	27	236	327	299	93	4	992
	NIORO-DU-RIP (31-60)	10	79.6	185.6	354.9	221.2	72.5	1.5	925.3
SALOUM	SOKONE 10 ans		42.7	146.2	301	231.6	86.4		807.9
	FOUNDIOUGNE (31-61)		42.4	153.8	328.7	218.3	64.6		807.8
	DIONWAR 10 ans		32.7	158.5	314.4	252.5	83.2		841.3
DELTA DU SENEGAL	ST LOUIS (31-60)	1.2	12.4	54.5	159.4	110.7	31	4	373.5
	ROSSO	2.4	9	40	147.5	79.7	31.7	2.6	313.6

avec des années de grande sécheresse (1968-1972-1973-1974-1977-1979) et on constate, simultanément dans la Basse Casamance une contraction de la saison des pluies qui est limitée à 3 ou 4 mois - Juin, ou surtout, Octobre étant un mois sec.

Un examen détaillé de la pluviométrie de ces dernières années (tabl. IV et fig. 4) fait ressortir, d'une part, son extrême irrégularité, d'autre part, son déficit presque généralisé au cours de cette période relativement longue (12 ans). On constate aussi que ce déficit pluviométrique est plus marqué en Casamance que dans le Saloum et c'est là que la mangrove a été la plus atteinte du point de vue écologique. Sécheresse cyclique ou tendance générale à la baisse de la pluviométrie en zone sahélienne ? Question fondamentale pour l'avenir de cette région et en particulier pour tous les projets de développement en Basse Casamance.

La méthode des moyennes mobiles qui permet, en statistique, de lisser les variations interannuelles erratiques et de faire apparaître, s'il en existe, les tendances à long terme d'une donnée historique a été utilisée pour la Casamance, à l'occasion de l'étude de la vallée de Baïla. Sur 3 stations caractéristiques : Ziguinchor, Bignona, Diouloulou, et sur les moyennes de 10 ans, (tabl. V) il apparaît quesi jusqu'en 1970, une tendance cyclique pouvait être admise, dans une mesure limitée, par l'insuffisance de la durée d'observation disponible, cette tendance s'est nettement transformée, dans les 3 stations de Basse Casamance, en une baisse généralisée et continue dont on est incapable de prévoir actuellement l'évolution, imposant ainsi une contrainte sérieuse à tous les projets de développement agricole.

Tableau IV

## Pluviométrie (1968-1977)

année	CASAMANCE			SALOUM				SENEGAL
	Oussouye	Ziguinchor	Bignona	Nioro du Rip	Sokone	Dionwar	Foundiougne	St. Louis
1968	913.5	879.8	826.2	449.4	427.6	522.7	446.9	289.3
1969	1607.3	1460.6	1464.5	984.4	967.4	941.7	691.7	598.4
1970	1248.5	1398.3		595.3	684.5	722.5	568.6	179.9
1971	1183.9	1098.6	904.6	738.7	874.8	906.3	449.1	177
1972	691.1	951.8	655.3	493.9	395.3	464.4	413.5	152.1
1973	1371.7	1289.4	1052.9	602.1	616.9	630.6	546.2	183.8
1974	1470.2	1240.4	1083.9	628.7	583.7	750.2	634.4	196.2
1975	1515	1417.2	1352.6	1028	885.7	854.3	603.8	399.1
1976	1682.5	1296	1207.7	760.3		613.2		196.1
1977	1030	790.3	847.5	509.1			428.1	102.3
Moyenne	1271.3	1182.2	1043.9	678.9	605.9	639.2	587.1	247.4
Normale	1780	1546	1364	925	867	841	807	373

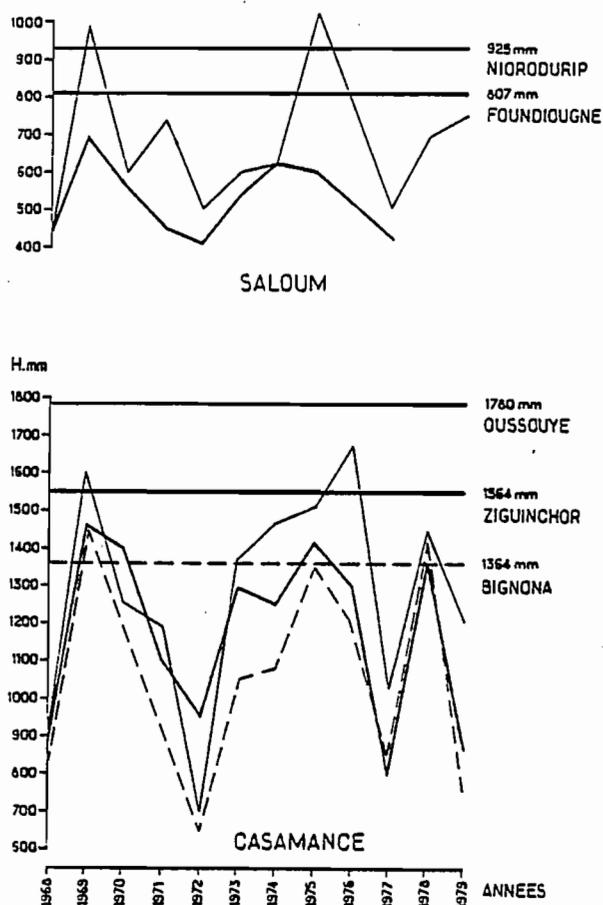


Fig. 4 - Pluviométrie 1969-1979

Tableau V

Basse Casamance  
Moyenne pluviométrique décennale

Stations	Période	Moyenne décennale en mm
BIGNONA	1978 - 1969	1122.9
	1968 - 1959	1287.8
	1958 - 1953	1630
DIOULOULOU	1978 - 1969	1164
	1968 - 1959	1222.7
	1958 - 1949	1594
	1948 - 1939	1263.8
ZIGUINCHOR	1978 - 1969	1276.1
	1968 - 1959	1443.8
	1958 - 1949	1645.1
	1948 - 1939	1426.4
	1938 - 1929	1465.8
	1928 - 1921	1692.4

b) *Température (tabl. VI)*

La température varie en moyenne de 24° à St Louis à 28° à Kaolack et 26° à Ziguinchor, les mois les plus chauds étant Avril et Mai à Ziguinchor et Kaolack et Septembre et Octobre à St Louis, où comme à Dakar, ce sont les mois d'"hivernage" qui sont les plus chauds.

Tableau VI

Température en degrés C

Mois	J	F	M	A	M	J	Jc	A	S	O	N	D	Année
<b>ST LOUIS</b>													
Maximum	28.6	28.5	27.5	27.7	25.6	29.1	31.1	31.6	32.2	31.8	30.1	29.3	29.2
Minimum	15.5	16.4	17	17.8	19	22.9	24.7	25	25.4	24.7	20.8	17.3	20.5
Moyenne	22	22.4	22.2	21.7	22.3	26	27.9	28.3	28.8	28.2	25.4	23.3	24.9
<b>KAOLACK</b>													
Maximum	31.1	36	38.5	39.5	39.4	36.3	33.5	31.8	32.5	34.4	35.6	33.8	35.5
Minimum	15.6	17.3	18.8	19.7	21.1	23.8	24.3	24	23.7	23.4	19.9	17.2	20.7
Moyenne	24.9	26.7	28.7	29.7	30.2	30	28.9	27.9	28.1	28.9	27.7	25.5	28.1
<b>ZIGUINCHOR</b>													
Maximum	31.9	34.6	36.7	36	36	33.8	31.2	30	31.2	32.7	32.4	31.2	33.1
Minimum	15.7	16.6	18.1	19.7	21.1	23	23	22.8	22.7	23	21	17.6	10.3
Moyenne	23.8	25.6	27.4	27.9	28.5	28.4	27.1	26.4	26.9	27.8	26.7	24.4	26.7

c) *Evaporation - Evapotranspiration potentielle*

Ce sont des éléments très importants du climat, au Sénégal, car ils sont à l'origine de l'aridité et par là même, de la salinisation des zones de mangroves.

Dans le Saloum, les données sont rares et surtout incomplètes. L'évaporation, mesurée au PICHE, donne les résultats suivants, pour deux stations : Dionwar, situé sur le littoral et Foundiougne, vers l'intérieur (tabl. VII).

On constate que l'évaporation est largement supérieure à la pluviométrie et que les variations en cours d'année sont directement liées à la température et inverses de la pluviométrie, les mois d'hivernage (Juillet - Aout - Septembre) étant les moins évaporants.

Tableau VII

Estuaire du Saloum - Evaporation

Station	J	F	M	A	M	J	Jc	A	S	O	N	D	Année	Pluviométrie annuelle
DIONWAR 1971	190.5	177	168.9	94.6	57.6	38.9	30.5	26.3	81.4	114.2	122.9	143	1245.8	854
FOUNDIOUGNE 1975	192.2	201.8	190.6	23.2	177	116.7	66.3	66.9	16.8	38.8	151.5	155.7	1606.3	703

En Casamance, une analyse détaillée de l'évaporation et de l'évapotranspiration potentielle a été faite à l'occasion de l'étude de la vallée de Baïla, d'après les résultats obtenus à la station ISRA de Djibelor (à 6 km de Ziguinchor) sur bac de "classe A" pour la période 1974 - 1978. (tabl. VIII).

On constate que là aussi, l'évaporation est supérieure à la pluviométrie et que le déficit hydrique, c'est-à-dire : Evaporation > Pluviométrie, concerne au moins 9 mois sur 12 (Octobre à Juin).

Tableau VIII

Evaporation sur bac en mm

	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Total
Moyenne journalière	4.5	5.5	6.5	7.3	7.4	5.8	3.9	3.7	3.7	4.1	3.8	3.4	
Moyenne mensuelle	140	160	203	219	229	174	122	114	112	129	115	105	1822

L'évapotranspiration potentielle est la quantité d'eau évaporée par le sol et la végétation lorsque le sol est à sa capacité de rétention. Elle est calculée, à partir de l'évaporation, de la température, de l'insolation ... par différentes formules : BLANEY et CRIDDLE, THORNTWAITE simplifiée, PENMAN...

Sur la période 1974-1978, on obtient les valeurs suivantes de l'E.T.P. en mm/mois, calculées à partir des différentes formules. (tabl. IX)

Tableau IX

E.T.P. calculée en mm

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Total
0,8 x E bac	112	128	162	175	183	139	97	91	89	103	92	84	1455
BLANEY-GRIDDLE + THORNTWAITE	153	153	186	193	208	101	88	83	86	93	87	154	1585
PENMAN	136	146	186	191	193	147	119	109	114	130	129	124	1727
Valeur choisie	153	153	186	193	208	147	119	109	114	130	129	154	1795

On constate d'une part que l'E.T.P. est très élevée et nettement supérieure à la pluviométrie moyenne de ces dernières années, d'autre part, que la période déficitaire en eau est de 9 mois (Octobre à Juin) accentuant ainsi l'aridité climatique de cette région.

En conclusion, on retiendra que, plus que la hauteur des pluies, c'est sa répartition annuelle qui est importante et qu'au Sénégal où toutes les précipitations sont concentrées dans 4 ou 5 mois, il suffit qu'un ou deux mois soient secs pour que la sécheresse se transforme en aridité avec toutes les conséquences sur la flore, les eaux et les sols.

### 3. FLORE

#### A. PHYTOGEOGRAPHIE

Deux formations végétales caractérisent les mangroves du Sénégal : les palétuviers et les marais à halophytes.

a) *les palétuviers* sont représentés par 6 espèces

Rhizophora racemosa  
 Rhizophora mangle  
 Rhizophora harrissonii  
 Avicennia africana  
 Laguncularia racemosa  
 Conocarpus erectus

Des 6 espèces, c'est, de loin Rhizophora mangle qui forme les peuplements les plus étendus et par endroits, en Casamance il est monospécifique. Rhizophora racemosa qui se distingue de Rh. mangle par sa taille - nettement plus grande - est strictement localisé en bordure de certaines rives convexes accrétionnées. Il fait souvent défaut, notamment dans les zones sableuses. Rhizophora harrissonii difficilement reconnaissable de Rh. racemosa se trouve souvent à la limite Rhizophora - Avicennia.

Avicennia africana, reconnaissable à ses pneumatophores et à la présence de cristaux de sel sur ses feuilles, se distingue facilement, dans le paysage, de Rhizophora mangle - auquel il est souvent mélangé - par ses feuilles d'un vert plus clair. Cette différence a pu être mise en évidence même sur les photos aériennes infra-rouge, fausse couleur, où Rhizophora apparaît d'un rouge plus vif que Avicennia. Laguncularia racemosa est généralement présent sur les berges vaseuses récentes. Conocarpus erectus n'a été observé qu'en Casamance où il semble affectionner les zones sableuses (vallée du Kamobeul et Baïla).

b) *Les marais à halophytes*

Dénommés localement "tannes herbacés" ou "tannes herbus", par opposition aux tannes "vifs" qui sont des étendues sursalées dépourvues de végétation, ils sont composés principalement des espèces suivantes : Sesuvium portulacastrum, Philoxerus vermicularis, Paspalum vaginatum, Heleocharis mutata, Heleocharis carribea, Scirpus maritimus, Sporobolus robustus. L'adaptation à la salure est différente selon les espèces. Philoxerus, et surtout Sesuvium, supportent des salinités 3 à 4 fois supérieures à celles de l'eau de mer ; les Heleocharis qu'on distingue facilement par leur tige - triangulaire pour mutata et circulaire pour Carribea - sont des espèces d'eaux saumâtres et souvent légèrement acides. Ce sont des halophytes acidophiles - Paspalum et Sporobolus ne supportent pas de salinités élevées.

A ces halophytes, il faut ajouter des cyperacées qu'on observe

généralement à la limite des eaux salées et des eaux douces, dans la plupart des affluents. Ce sont *Cyperus* sp., *Typha* sp. et *Phragmites vulgaris*. Le long de certains petits marigots (Bignona) il est fréquent de voir ces Cyperacées associées à *Avicennia*. Par contre, dans le Soungrougrou, affluent principal de la Casamance, la remontée de l'eau salée très loin en amont les a fait complètement disparaître. Ces cypéracées font totalement défaut dans les îles du Saloum.

Enfin, il faut signaler la présence dans les zones à mangroves des îles du Saloum et aussi du delta du Sénégal de *Tamaris senegalensis*. D'après sa situation dans les tannes et d'après les observations que nous avons pu faire dans la région de St Louis à la suite des années sèches 1972-1973..., il semble que cet arbuste - qui couvre d'assez grandes surfaces dans le delta du Sénégal - occupe aujourd'hui la place qu'avait *Avicennia* à des époques plus humides.

#### B. LES SEQUENCES (Pl. I)

Des berges du marigot jusqu'au rebord des plateaux du Continental Terminal ou des terrasses sableuses, il existe une zonation caractéristique de la végétation liée à la topographie, à la fréquence des submersions, soit par les marées, soit par les pluies et donc à la salinité. En fait, d'une part, il existe plusieurs types de séquences, comme nous verrons, à l'occasion de l'étude des sols, d'autre part, en Casamance, la sécheresse de ces dernières années a considérablement modifié le paysage des mangroves.

a) *En Casamance*, la séquence type était, en 1969, (VIEILLEFON)

- une bande étroite de *Rhizophora racemosa* (2 à 5 m), faisant souvent défaut sur les rives concaves et plus épaisse sur les rives convexes ;
- une bande très large de *Rhizophora mangle* (30-50 m), plus petit que *Rh. racemosa*, de taille ;
- une bande plus ou moins large dans laquelle on trouve associés : *Rh. mangle* et *Avicennia africana* (20-30 m) ;
- une bande, généralement étroite (5-10 m) d'*Avicennia africana* sur un tapis herbacé de *Sesuvium portulacastrum*, faisant limite avec :
  - . le tanne vif
  - . le tanne herbacé à *Héléocharis*

Ce type de séquence est, à présent, très rare en Casamance où on ne le trouve encore que sur la rive gauche du fleuve et dans la vallée du Kamobeul. Presque partout ailleurs, c'est la bande des *Rhizophoras*, qui a été la plus atteinte, ainsi que l'association *Rhizophora-Avicennia*.

Dans la vallée du Baïla, plus au Nord, la mangrove à *Rhizophoras* a presque entièrement disparu, faisant place à 2 zones plus ou moins distinctes ; l'une dans laquelle on trouve encore des troncs de palétuviers morts, avec çà et là des touffes de *Sesuvium Portulacastrum*, l'autre, complètement dépourvue de végétation. Ces deux zones sont quotidiennement inondées par les marées. Nous avons dénommé ces deux zones : l'une, mangrove décadente - par assimilation à ce que nous avons déjà observé en Guyane Française - l'autre, tanne inondé. De la même manière, les halophytes qui formaient le tanne herbacé n'ont pas résisté à la sursalure et à la place, on trouve fréquemment une couche plus ou moins épaisse, poudreuse formant une véritable "moquette" (pseudosable). Sur les récentes

photos aériennes I.R.C. (1978-79) de l'IGN, on distingue très nettement le tanne "vif" du tanne à "moquette".

L'examen des photos aériennes récentes en I.R.C. des vallées de Kamobeul, Guidel, Soungrougrou et Baïla et plusieurs survols de la Casamance nous permettent de dire qu'environ 70 à 80 % des palétuviers ont disparu depuis 1969. L'utilisation de la télédétection avec comparaison des images de Février 1972 avec l'une de 1979 devrait permettre une bonne évaluation de la disparition des palétuviers.

b) *En Gambie*, la mangrove là où elle est présente, est bien plus développée en hauteur qu'en Casamance ou dans les îles du Saloum, et les palétuviers : *Rhizophora* comme *Avicennia* sont de grands arbres. Cette différence est essentiellement à attribuer à la salure nettement plus faible des eaux de la Gambie qui baignent ces mangroves.

c) *Les îles du Saloum* représentent une zone de transition entre la zone soudano-guinéenne au Sud et la zone sahélienne, au Nord. Aussi remarque-t-on une plus importante extension des tannes dans les îles du Gandoul au Nord, que dans les îles Betanti, au Sud. Par ailleurs, toute la rive droite du fleuve Saloum est formée de tannes, les mangroves ne constituant qu'un mince rideau le long des affluents de cette rive.

La zonation est sensiblement comparable à celle que l'on observe aujourd'hui en Casamance.

Du marigot à la terrasse sableuse on rencontre :

- une très mince frange de *Rhizophora racemosa* qui fait souvent défaut - la mangrove du Saloum étant plus sableuse que celle de la Casamance ;
- une bande assez large (mais moins qu'en Casamance) de *Rhizophora mangle*, à laquelle succède une bande très étroite d'*Avicennia africana* en mélange avec *Rhizophora mangle*.

Vient ensuite une grande zone nue : le tanne vif, dans laquelle on distingue une zone régulièrement visitée à marée haute : le tanne inondé et une zone blanche couverte de sel : le tanne vif au milieu duquel subsistent parfois quelques îlots d'*Avicennia rabougris* sur un tapis de *Sesuvium*.

Le tanne vif se raccorde à la terrasse par un rideau discontinu d'*Avicennia*, dans les îles Betanti et le Sud des îles du Gandoul et de *Tamaris* dans le Nord des îles du Gandoul. En ce qui concerne plus particulièrement la strate herbacée halophyte, on remarque dans les îles du Saloum l'absence de certaines espèces de Casamance, notamment : *Paspalum vaginatum*, *Scirpus littoralis* et même les *Eleocharis*. Par contre *Sporobolus* est plus abondant.

#### 4. LA FAUNE

De même que la végétation, la faune présente dans la mangrove de remarquables adaptations à un milieu où les conditions sont très particulières, il en résulte un nombre relativement peu élevé d'espèces dont les populations présentent de gros effectifs donc une biomasse importante.

En fait, il existe une grande différence entre la mangrove de la Casamance et celle du Saloum, celle-ci étant plus riche en espèces et en populations que celle de la Casamance. Nous distinguons la faune marine de la faune terrestre.

#### A. FAUNE MARINE

##### a) Estuaire du Saloum

La faune marine de cette région a été étudiée par ELOUARD (1977) qui distingue 4 ensembles de biocénoses de mollusques en relation avec le milieu énergétique et les variations de salinité de l'eau.

- L'ensemble à *Tympanotonus fuscatus*, lié à la mangrove et caractérisé par une basse énergie. Les espèces sont peu nombreuses et on trouve *Tympanotonus fuscatus radula*, *Tympanotonus fuscatus fuscatus*, *Crassostrea gasar* (huitre), *Littorina angulifera*, *Tagelus angulatus* et *Tellina nymphalis*.

Ces espèces sont essentiellement liées aux palétuviers et le milieu est sableux ou sablo-vaseux.

- L'ensemble à *Anadara senilis* et *Natica marochiensis* est caractéristique de la lagune. Les mollusques y sont euryhalins, eurythermes et vivent dans l'étage médiolittoral et infralittoral supérieur. Les espèces sont : *Anadara senilis*, *Dosinia isocardia*, *Loripes aberrans*, *Tellina nymphalis*, *Natica marochiensis*, *Hemifusus morio* et *Bulla striata adansonii*. S'y associent des Mures et des Cymbium.

- L'ensemble littoral à *Macra glabrata*, *Natica collaria* et *Terebra senegalensis*.

Les espèces sont très nombreuses, car le milieu est franchement marin, donc moins confiné.

- L'ensemble mixte à *Anadara senilis* et *Natica fulminea* se situe dans un biotope intermédiaire entre la lagune et la zone intermédiaire. La faune y est plus pauvre que la faune littorale.

Au cours de nos prospections dans les îles du Gandoul, nous avons trouvé dans plusieurs profils de tannes inondés, des accumulations de coquilles souvent bien conservées, la détermination a été faite par MONTEILLET qui a reconnu, outre la plupart des espèces déjà citées : *Mesalia mesal*, *Dentalium katchekense*, *Cardita lacunosa*, *Lopha stentina*, *Thais hemostoma*.

A ces mollusques, il faut ajouter *Uca tangeri*, le crabe violoniste qui forme des populations importantes au niveau médio-littoral et les périophtalmes, poissons aux yeux proéminents et mobiles qu'on retrouve dans toutes les mangroves du monde associés aux palétuviers et qui est représenté ici par *Periophtalmus kolrenteri*.

b) En Casamance, la faune marine semble être plus pauvre tant en espèces qu'en nombre que dans le Saloum. J. VIEILLEFON avait signalé l'absence de coquilles dans tous les profils observés. Nous ne pouvons que confirmer ces observations et les très rares débris de coquilles trouvés proviennent des carottages en profondeur. Les seules espèces marines qu'il nous a été donné d'observer sont : *Tympanotonus fuscatus*, *Crassostrea*, les

Périophtalmes et plus rarement *Uca Tangeri*.

#### B. FAUNE TERRESTRE

Comme pour la faune marine, la faune terrestre et plus particulièrement la faune avienne est beaucoup plus riche en espèces et en nombre dans le delta du Saloum que dans la Casamance. On y trouve des pélicans, des cormorans, des hérons (cendrés, pourprés), des aigrettes, des garzettes, des aigles pêcheurs, des martins pêcheurs...

#### C. MICROFAUNE

La microfaune de la mangrove a été décrite par Y. KALCK (1978) sur des échantillons de carottes prélevés en Casamance et dans le delta du Sénégal ainsi que sur des échantillons de surface, prélevés à Oussouye, Balingore (Casamance) et Bassid (Saloum). Foraminifères, ostracodes et diatomées ont été déterminés respectivement par A. ROUVILLOIS, F. DEPECHE et M. RICARD.

Ces études montrent que la faune de foraminifères à la surface des mangroves actuelles est très pauvre en espèces et en individus qui sont pratiquement tous du sous ordre des *Textulariina*. Les Ostracodes n'ont été trouvés qu'à Oussouye et présentent une biocénose monospécifique de *Cyprideis*.

Quant aux diatomées, on constate, d'une part, que les variations de flore sont faibles entre les différents sites de prélèvements (Casamance, Gambie, Sénégal), d'autre part qu'elles caractérisent un biotope saumâtre subissant une influence marine plus importante que l'influence continentale.

D. GOULEAU (1977) a étudié le peuplement benthique des mangroves, en comparaison avec les vasières atlantiques. Les observations ont été faites au M.E.B. sur des échantillons de sols congelés in situ par de l'azote liquide puis lyophilisés. Les échantillons ont été prélevés en Casamance et dans le Saloum sur différentes formations : vase nue, chenaux ou canaux de rizière, fosses pédologiques ...

Les observations montrent que la colonisation par les diatomées est quasiment constante, par *Nitzschia* principalement, ainsi que par d'autres espèces telles que *Amphora*, *Pleomsigma*.

### 5. GEOLOGIE

#### A. HISTOIRE DU QUATERNAIRE RECENT (fig. 5)

C'est à la transgression nouakchottienne dont le maximum se situe vers 5500 BP que l'on attribue la plus grande partie du comblement alluvial des vallées du Sénégal et de la Gambie. En effet, d'après P. MICHEL (1973), la mer a occupé toute la basse vallée du fleuve Sénégal jusqu'aux environs de Bogué à 230 km de la côte.

Elle a remonté la vallée du Saloum jusqu'à Birkelane, en amont de Kaolack et celle du Sine, son affluent principal bien au delà de Fatick.

En Gambie, la mer nouakchottienne a occupé toute la vallée inférieure de la Gambie, mais n'y a formé qu'un golfe étroit et très sinueux dont la

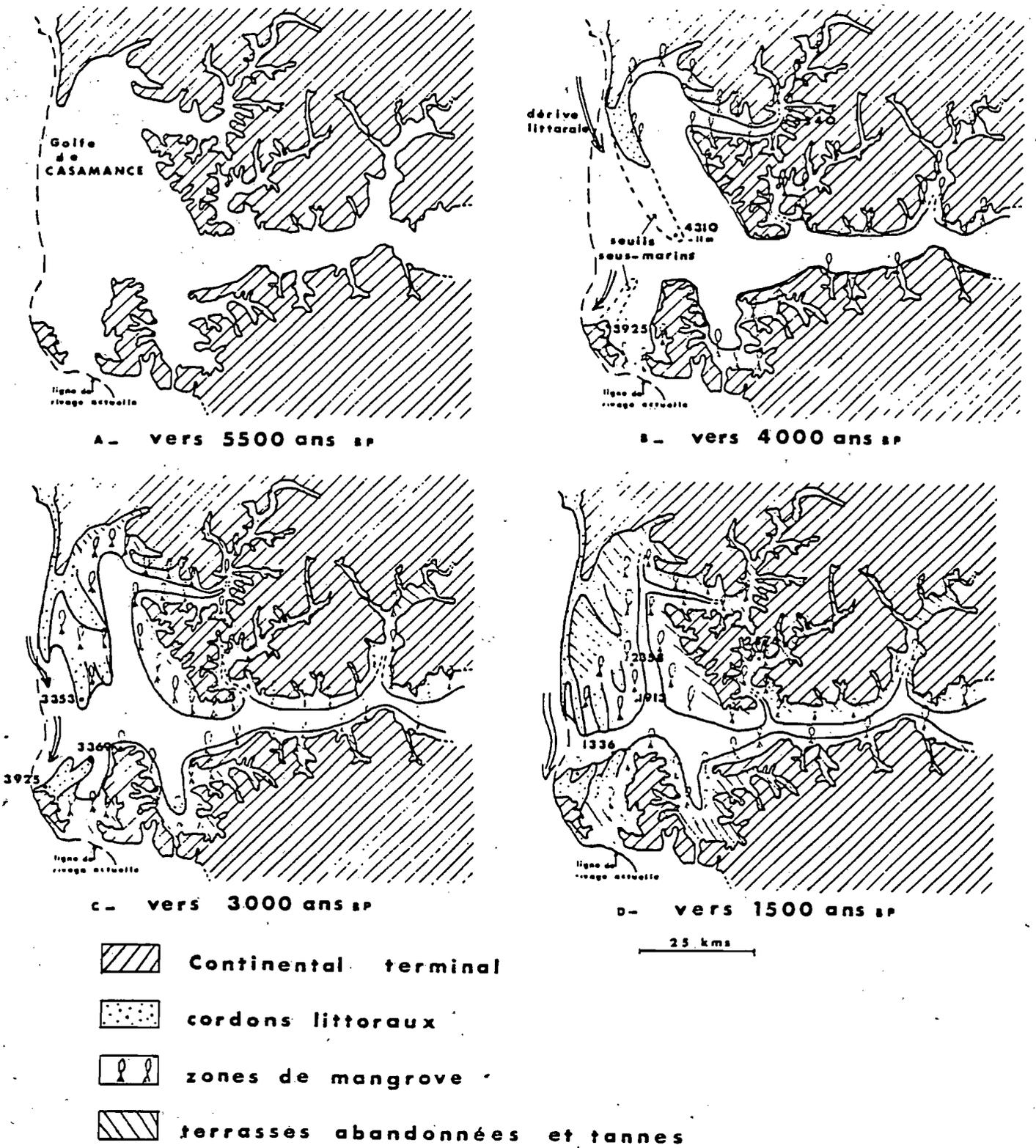


Fig. 5 - Evolution du golfe de Casamance au Quaternaire récent (Y. KALCK, 1978)

largeur dépassait à peine celle de la ria actuelle dans la partie aval de l'Estuaire.

Enfin, en Casamance, la mer a formé un vaste golfe au Nouakchottien et ses eaux s'étalaient sur une largeur de 75 km entre Diouloulou et la frontière de la Guinée Bissau ; et elle a pénétré dans les vallées en doigts de gants du fleuve et des affluents (Soungrougrou, Baïla, Kamobeul...)

Cette transgression a généralement laissé des dépôts sableux qui forment des terrasses en bordure du plateau Continental et qui subsistent parfois en îlots au milieu des alluvions plus récentes. La sédimentation est alors essentiellement marine.

Mais, en Basse Casamance et dans le Saloum, des datations effectuées sur des échantillons de tourbes ou de coquilles prélevés en profondeur par les carottages, à Diouloulou, Baïla (Casamance) et Bandiala (Saloum) montrent que le début de l'ingression marine est plus ancien : 6540 BP à Baïla et 6100 BP à Bandiala (Y. KALCK). Ce qui rapproche nettement l'âge de l'invasion marine en Casamance de celle du delta du Sénégal estimée à 8800 BP près de Rosso (P. MICHEL).

Après le Nouakchottien, entre 4800 et 4200 BP s'établit un courant NS de dérive littorale qui ferme progressivement les golfes par une série de cordons littoraux. Le phénomène est progressif et commence par la Mauritanie puis se manifeste au Sénégal (4000 BP) et apparaît en Casamance vers 3900-3500 BP (fig. 5b).

Ces cordons littoraux ont fermé partiellement les golfes marins et de grandes lagunes se sont installées en arrière des cordons. C'est le cas des dépressions du Khant, N'Diael, N'Diasseou, dans le delta du Sénégal. Vers 3000 BP le golfe de Casamance se transforme en une grande lagune où la mangrove se développe (fig. 5c)

Enfin, vers 1500 BP la Casamance prend sa forme actuelle (fig. 5d). La fermeture du golfe par les cordons littoraux provoque la diminution des apports marins et ralentit l'évolution morphologique. Les terrasses basses argileuses (VIEILLEFON, 1977) datent probablement de cette époque.

Le comblement du golfe de Casamance se présente donc d'après Y. KALCK comme l'association de 2 systèmes progradants. Le premier correspond au développement des cordons littoraux qui ferment le golfe, les plus importants progressant dans le sens de la dérive littorale NS, les plus petits, en sens inverse et l'ensemble des 2 groupes se déplaçant progressivement vers l'Ouest. Le deuxième système déterminé par le premier correspond à l'avancée des vasières de mangroves qui comblent peu à peu la lagune pour aboutir au résultat actuel (fig. 6). Ce type de progradation a été décrit par ALLEN et al. (1979) dans le delta de la Mahakam en Indonésie (Fig. 7).

Parallèlement à la fermeture des golfes, les populations anciennes ont consommé de nombreux coquillages (Anadara et Huitres principalement) et les ont déposés en amas. Ces amas artificiels dénommés "Kjökkenmoddinger" se retrouvent sur toute la côte depuis Nouakchott jusqu'en Casamance. Ils sont facilement reconnaissables car ils forment des buttes isolées peuplées exclusivement d'*Adansonia digitata* (Baobab) et on les trouve soit sur des terrasses, soit sur des cordons sableux, soit plus rarement sur des bancs sableux émergés. Ils sont particulièrement nombreux dans

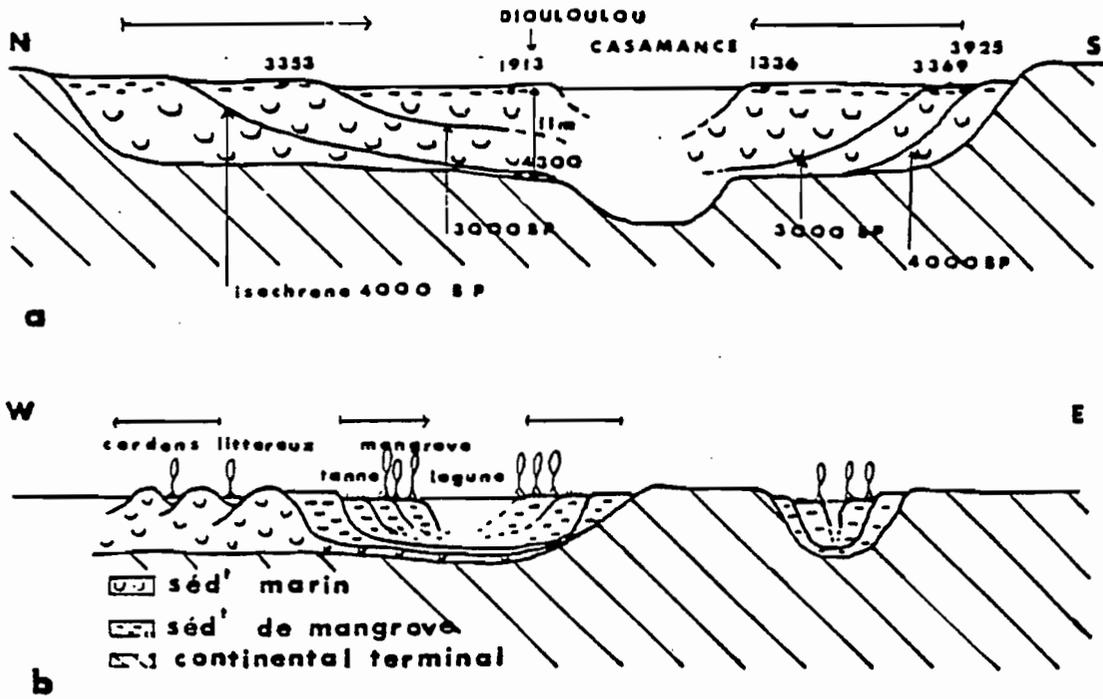


Fig. 6 - Les systèmes de progradations en CASAMANCE (KALCK, 1978)  
 b. système des vasières de mangrove  
 a. système des cordons littoraux

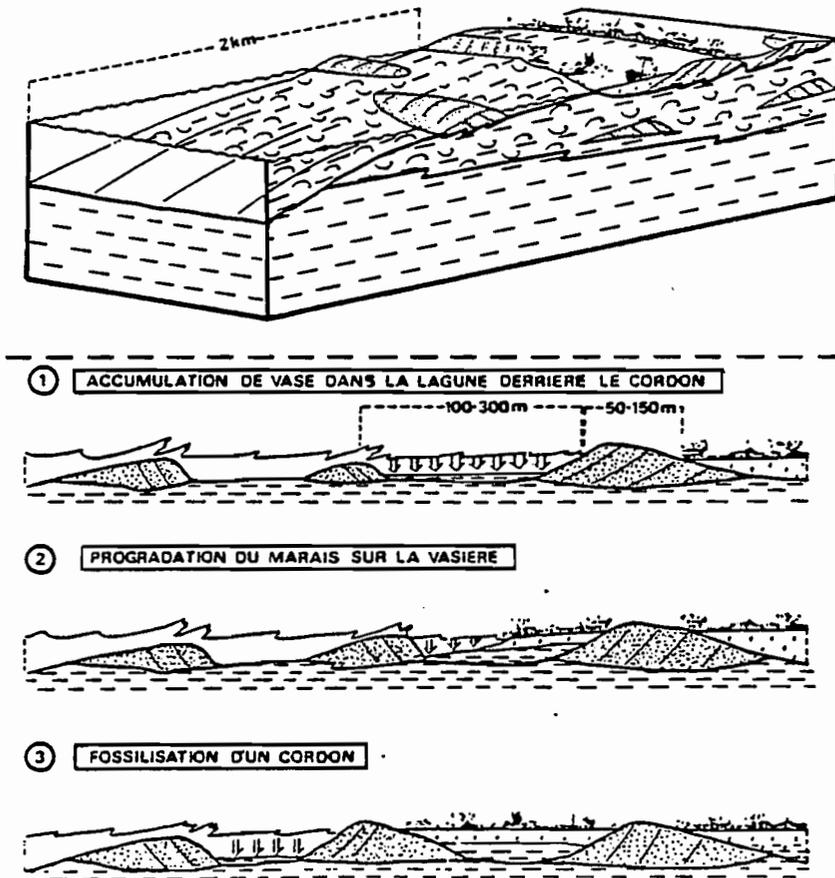


Fig. 7 - DELTA de la MAHAKAM Côte Sud  
 Evolution d'une côte à cordons (ALLEN, 1979)

dans les îles du Saloum où le plus grand d'entre eux : Diorom Boumak qui culmine à 12 m a été étudié du point de vue protohistorique (DESCAMPS, THILMANS, 1974) et du point de vue pédologique (LEPRUN, MARIUS, 1976). Les âges de ces amas artificiels sont très variés. Les plus anciens, dans le delta du Sénégal datent de 5200 ans BP, comme dans le Khant (RAVISE, comm. écrite). Celui de Diorom Boumak, au Saloum est compris entre  $1160 \pm 80$  BP et  $1580 \pm 80$  BP. En Casamance, ils sont plus récents 900 BP (LINARES DE SAPIR, 1971).

A l'inverse de la Casamance où la plupart des débris coquilliers - souvent très altérés - n'ont pu être observés qu'en profondeur, dans l'Estuaire du Saloum, par contre, les dépôts coquilliers - souvent bien conservés - d'arches ou d'huitres, sont fréquents dans les niveaux superficiels. C'est ainsi que, dans deux séquences (Bassid et N'Dimsiroh) des datations ont été effectuées sur des coquilles d'huitres ainsi que sur une tourbe par J.C. FONTES. Les résultats sont les suivants :

- A Bassid :

- . Profil CMB 8 - à 0,75 m - Coquilles d'huitres -  $4150 \pm 100$  BP
- . Entre CMB 11 et CMB 12 - à 0,95 m - Coquilles d'huitres -  $3500 \pm 300$  BP
- . CMB 19 à 1m 60 - tourbe -  $3630 \pm 300$  BP.

- A N'dimsiroh :

- . CMB 8 - à 1,20 m - huitres - 5110 BP

Il y a une assez bonne corrélation entre toutes ces datations pour indiquer que, dès la période post holocène, la mangrove était installée dans cette région, comme l'atteste la présence des huitres généralement associées aux palétuviers.

## B. MORPHOLOGIE

### a) Rappel de quelques définitions

Il nous semble nécessaire de rappeler ici quelques définitions simples concernant les estuaires et les deltas pour lever certaines ambiguïtés sur les régions étudiées.

Selon la définition ancienne, le delta est la partie inférieure d'un cours d'eau (rivière ou fleuve) qui se divise en plusieurs bras secondaires pour former autant d'embouchures distributaires se jetant soit en mer, soit dans un lac. Pour le sédimentologue, le terme delta évoque l'ensemble des sédiments associés à une embouchure fluviale. Plusieurs classifications de deltas ont été proposées : BERNARD (1965), COLEMAN et GAGLIANO (1970), VOLKER (1966). Dans un ouvrage synthétique publié en 1975 sous le titre "Deltas", la Houston Geological Society présente la mise au point la plus complète des deltas anciens et modernes. On y trouve notamment une classification génétique des deltas modernes (GALLOWAY) en 3 types selon la prédominance des processus de houle, de marée, ou des apports fluviaux. D'après cette classification les bouches de la Casamance, de la Gambie et du Saloum, seraient des deltas à marée. Cependant, on admet généralement que le trait morphologique le plus important des deltas est l'accumulation des sédiments qui provoque l'avance de la terre sur la mer et que les phénomènes d'apport fluviaux prédominent sur les phénomènes d'apport marin (OTTMANN, 1965). Seule, l'embouchure du Sénégal répond à cette définition. Les estuaires, par contre, sont caractérisés par une pénétration des influences marines loin à l'intérieur des terres. D'après PRITCHARD (1967)

"An estuary is a semi enclosed coastal body of water which has a free connection with the open sea and within which seawater is diluted with freshwater derived from landwater". La Gambie répond bien à cette définition, mais pas tout à fait la Casamance et surtout le Saloum, dans lesquels l'influence de l'eau douce est nulle en saison sèche, conduisant à une hypersalinité de l'eau des rivières. PRITCHARD a proposé pour ces estuaires le terme de "inverse estuary". Saloum et Casamance sont donc des "estuaires inverses", comme certains estuaires de l'Australie, Broadsound (P. COOK, 1977). Par la suite, nous utiliserons toujours le terme d'estuaire pour caractériser le Saloum, la Gambie et la Casamance.

#### b) Morphologie générale

La zone alluviale de la Casamance forme un vaste entonnoir dans lequel on distingue 2 secteurs d'aspects différents, situés de part et d'autre du bief maritime :

- au Nord, le remplissage alluvial complet s'est fait dans une zone probablement subsidente limitée par une faille NO-SE qui borde le plateau de Bignona ;
- au Sud, un autre système de failles et de basculements a isolé plusieurs îlots de terrains continentaux frangés de vastes dépôts alluvionnaires : l'un forme le plateau d'Oussouye, l'autre, celui de Boucotte.

Dans le Saloum, on observe aussi une nette dissymétrie entre les 2 rives du fleuve. Elle est due au fait que, arrêté par la longue jetée de la Pointe de Sangomar, le flot n'entre pas directement dans les marigots de la rive droite du fleuve, alors que dans les bouches des Diombos et du Bandiala il pénètre de plein fouet, d'où la présence sur la rive méridionale d'un milieu véritablement insulaire soumis aux remaniements d'un réseau très actif de chenaux directement ouverts sur l'Océan.

En Gambie, la vallée, dans la partie inférieure, est plate depuis Georgetown, à 200 km de la mer. Le fleuve coule dans les anciennes vasières du Nouakchottien et se divise à plusieurs reprises en deux bras séparés par de grandes îles. Le lit mineur de la Gambie s'élargit rapidement en aval du passage de la route transgambienne (où est située notre séquence) et se termine par une grande ria, large de 13 km près de Banjul (fig. 8). Les vasières, sillonnées par les chenaux de marée se cantonnent dans les échancrures du plateau, mais s'étendent plus largement dans les vallées du Bintang Bolon et du Bao Bolon, anciens affluents qui fonctionnent maintenant comme des défluent. Le plateau de grès argileux du Continental Terminal limite partout le lit majeur de la Gambie et domine par endroits directement son lit mineur (P. MICHEL, 1973). Il se termine par une succession de petites falaises sur la côte au SO de l'embouchure. Une flèche littorale a partiellement fermé l'estuaire de la Gambie et la capitale *Banjul* est construite à son extrémité.

#### c) Morphologie des vasières

Dans les régions tempérées, on distingue généralement 2 zones, dans les vasières : la slikke et le schorre qui sont des noms d'origine flamande. J. VERGER (1968) les a définies de la manière suivante : le *schorre* est obligatoirement dans les zones inondables par les eaux marines ou fluvio-marines, soit pendant les vives-eaux, soit pendant les tempêtes. Il pos-

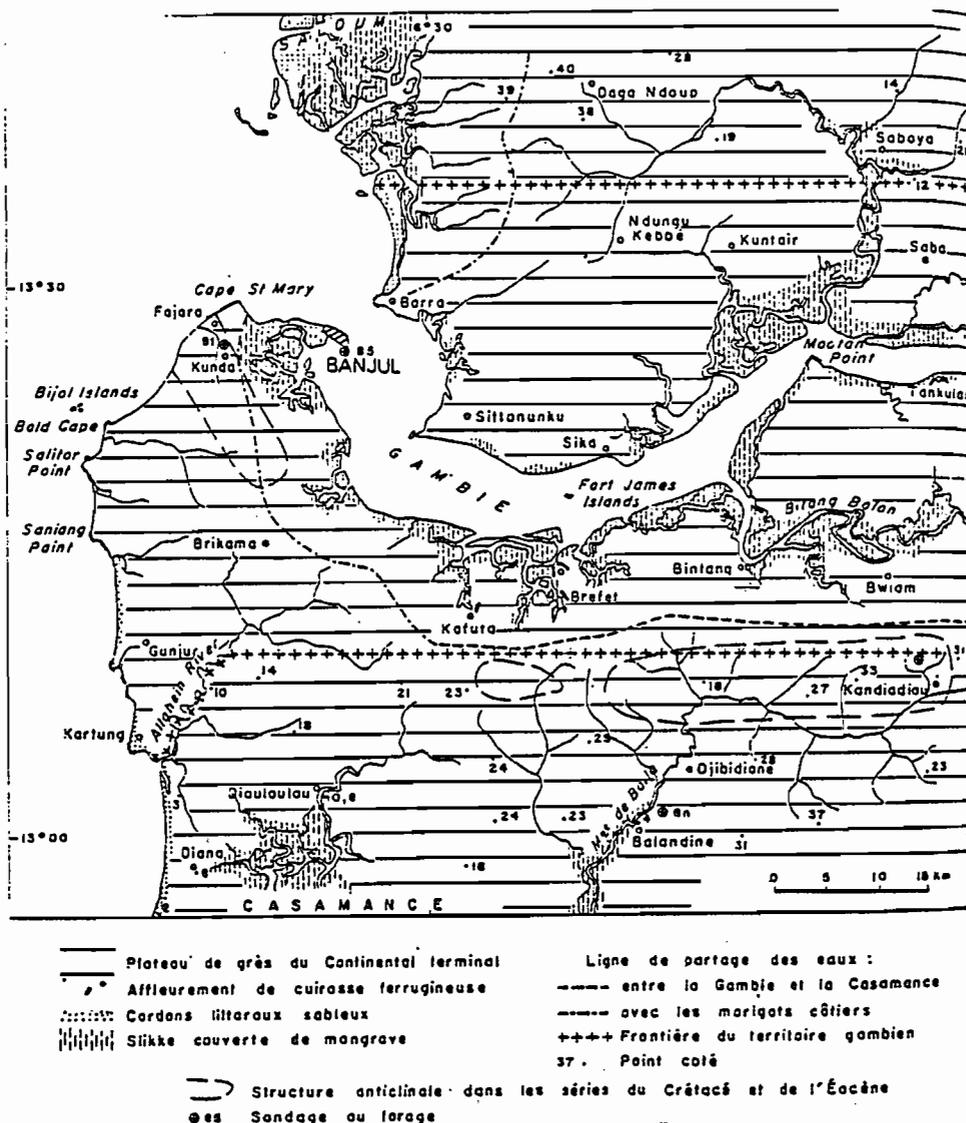


Fig. 8 - Croquis géomorphologique et géologique de la région estuarienne de la Gambie (P. MICHEL)

sède une couverture végétale dense halophile. La *slikke* s'étend dans la zone intertidale sans en atteindre la limite supérieure, et les sédiments n'ont pas d'évolution pédologique. (Pl. II)

Dans les régions tropicales, ces définitions s'appliquent mal et on a généralement distingué dans la *slikke* une basse *slikke* correspondant à la vase nue découverte à marée basse, d'une haute *slikke* qui est la partie couverte de palétuviers. En fait la haute *slikke* comprend la mangrove à palétuviers et le tanne inondé. Le schorre correspondrait au tanne vif et, dans certains cas, au tanne herbacé, en Casamance et dans le Saloum, à la partie du tanne vif inondé aux marées exceptionnelles. On le voit, cette classification en *slikke* et schorre s'adapte difficilement à la mangrove sénégalaise. P. COOK dans son étude de la baie de Broad Sound, en Australie, a proposé une classification des zones tidales qui paraît plus appropriée à nos mangroves. Il utilise 5 zones tidales qui sont : la zone *subtidale* qui ne se découvre jamais, la zone *infratidale*, rarement découverte à marée basse, peut être 3 à 4 fois par mois lunaire, pendant les marées de vives-eaux, la zone *intertidale*, comprise entre la marée haute et la marée

basse quotidienne, donc découvrant à chaque marée basse semi-diurne. La zone *supratidale* est celle qui est inondée aux marées exceptionnelles, de vives-eaux ; enfin, la zone *extratidale* est celle qui est atteinte par les marées de tempêtes ou de cyclones, ce qui donnerait le tableau de correspondance ci dessous (tabl. X).

Tableau X

Tableau de correspondance des zones tidales

Zone tempérée	Australie (Broad Sound)	Casamance	Gambie	Saloum
Schorre	Herbacé	Extratidale	Terrasses basses Tannes herbacés	Terrasses sableuses Tannes herbacés Tannes vifs
	Nu	Supratidale	Tannes vifs Tannes herbacés (en dépressions)	Tannes vifs inondés
Slikke	Haute Slikke	Intertidale	Mangroves à palétuviers + tannes inondés	Mangroves à Palétuviers + Tannes inondés
	Basse Slikke	Infratidale	Vase nue  Vase nue	Vase nue  Vase nue

Il faut noter aussi, dans la zone extratidale, la présence de formes d'accumulation éolienne : les lunettes. Ces microreliefs, non atteints par les marées ont été signalés par VIEILLEFON, dans le marigot de Bignona. Ils sont très nombreux dans la vallée du Baïla, et dans le Saloum où ils forment de véritables dunes sur la rive droite.

### C. SEDIMENTOLOGIE

Grâce à l'utilisation d'un carottier à piston stationnaire, 28 forages profonds ont été effectués, dans les mangroves du Sénégal, avec une nette prédominance pour la Casamance qui en compte 19. Environ 300 échantillons ont été prélevés. Les observations morphologiques et les mesures du pH et de Eh ont été faites sur le terrain. Les analyses physiques et chimiques ont été effectuées, en partie à Dakar, en partie à Strasbourg. Toutes les déterminations minéralogiques ont été faites à Strasbourg, sur le sédiment et sur la fraction argileuse.

Les formations de mangroves, vases argileuses ou vases sableuses, sont dans l'ensemble peu épaisses et ne dépassent pas une vingtaine de mètres au dessus du Continental Terminal.

- A l'exception des forages situés en amont de Ziguinchor, Tobor, Guidel, N'Dieba et Bona, ainsi que celui de Jenoi en Gambie, où les séries sont homogènes et argileuses, partout ailleurs on note que la lithologie est très hétérogène. Les séries sont, généralement argileuses en surface et sableuse en profondeur, ou plus rarement, comme à Baïla, présentent

une alternance de lits argileux et de lits sableux.

- Du point de vue minéralogique, le sédiment est en majeure partie composée de quartz, d'argile, de halite, de pyrite auxquels sont parfois associés selon les forages, du gypse, du feldspath et de la jarosite, provenant de l'oxydation de la pyrite.

a) *Composition chimique du sédiment* (Y. KALCK, 1978)

La composition moyenne du sédiment de mangrove calculée sur 121 échantillons est présentée dans le tableau XI

Tableau XI

Composition chimique moyenne du sédiment

Élément	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Perte à 1000°C	C	Sr	Ba	V	Ni	Co	Cr	B	Zn	Ga	Cu	Pb	Sn
MANGROVE Moyenne	60,43	13,42	1,03	0,29	4,97	0,04	0,88	2,00	0,70	13,87	1,96	113	125	97	44	23	147	91	41	20	27	32	27
MANGROVE Écart-type	14,80	5,80	0,59	0,17	2,34	0,03	0,29	1,34	0,38	6,44	1,37	38	57	28	13	7	49	21	16	7	7	10	25

Les mangroves apparaissent comme étant riches en B et en Sn, pauvres en Ca principalement, en K, et en l'ensemble de traces (sauf B et Sr) et banales pour les éléments moyens et mineurs. Dans le tableau XII sont présentées les compositions chimiques moyennes, d'une part, des mangroves de 3 régions (Casamance, Gambie et Sénégal) d'autre part des sédiments marins peu ou pas influencés par la mangrove, de la Casamance et du Saloum. On constate que :

- Les variations régionales de la *composition chimique du sédiment* de la mangrove sont faibles et sont principalement influencés par l'abondance plus ou moins grande du quartz, mais une étude détaillée montre qu'en Gambie, Mn et Ti sont plus élevés qu'en Casamance.
- Le potassium varie dans le même sens que le quartz car les zones à quartz abondant correspondent à une influence marine plus marquée et sont plus riches en smectite que les zones les plus internes, comme nous le verrons plus loin.

En conclusion, le sédiment de mangrove apparaît comme très homogène du point de vue chimique.

KALCK a, par ailleurs étudié la distribution des éléments chimiques dans le sédiment en utilisant la méthode des groupes à intercorrélations positives de BESNUS et MOSSER (1976). De cette étude, il conclut que la mangrove apparaît géochimiquement comme composée de deux phases principales.

- Une "phase majeure" essentiellement argileuse laissant apparaître trois associations : argilo-pyriteuse, argilo-humique et argilo-détritique ;

Tableau XII

Composition chimique des mangroves des différentes régions étudiées  
Comparaison avec les sédiments marins voisins

		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	C	PF	Sr	Ba	V	Ni	Co	Cr	B	Zn	Ga	Cu	Pb	Sn
Casamance	M	57,7	14,7	1,12	0,27	4,67	0,036	0,93	2,53	0,66	2,52	16,2	110	95	85	51	21	146	96	39	22	26	31	34
67 éch.	$\sigma$	15,1	5,9	0,55	0,22	1,76	0,019	0,31	1,58	0,30	1,44	6,7	34	32	20	10	5	48	22	14	7	7	8	28
Gambie	M	58,7	15,0	0,93	0,29	5,78	0,101	1,02	1,16	0,74	2,27	12,6	116	173	120	50	31	149	85	60	24	26	36	38
23 éch.	$\sigma$	15,7	5,6	0,57	0,19	2,84	0,079	0,22	0,68	0,38	1,45	3,7	41	41	24	13	6	38	15	17	5	4	8	43
Fleuve Sénégal	M	64,4	11,1	1,30	0,78	5,83	0,059	0,63	2,38	1,23	1,54	10,6	113	245	104	50	22	154	81	32	15	37	24	26
15 éch.	$\sigma$	17,0	5,4	0,69	0,66	2,99	0,036	0,22	1,57	0,45	1,61	7,2	51	79	28	14	8	59	17	10	5	10	9	26
Casamance marine	M	80,2	6,8	0,75	0,80	3,03	0,019	0,50	1,15	0,51	0,79	6,00	161	60	68	36	17	110	97	23	15	22	30	20
20 éch.	$\sigma$	10,6	4,4	0,55	0,83	1,52	0,013	0,28	0,84	0,26	0,39	3,08	104	19	20	12	2	57	21	8	6	5	6	9
Sine- Saloum	M	74,5	7,5	0,87	2,34	3,32	0,015	0,57	1,99	0,64	0,55	7,89	271	115	74	35	16	114	88	19	16	24	26	14
11 éch.	$\sigma$	12,4	4,1	0,77	3,87	1,46	0,015	0,20	1,73	0,36	0,57	4,54	348	47	20	11	4	43	23	9	5	8	15	9

- Une phase ne groupant que des éléments traces. Ces éléments traces sont, pour la plupart, distribués entre toutes les phases à l'exception de quelques uns. C'est ainsi que Zn est presque exclusivement associé à la phase argilo-pyriteuse, et Sr, Pb et Sn appartiennent à la phase supposée d'origine animale.

### b) Salinité

Ajoutons à cela que tous les échantillons sont riches en sels solubles et que du point de vue régional, c'est la Casamance qui présente partout les salinités les plus élevées (MARIUS, 1978). Dans la majorité des cas, et à l'exception de quelques niveaux très profonds, la salinité est en général supérieure à celle de l'eau de mer (tabl. XIII).

On constate que la salinité est de 7 à 8 fois supérieure à celle de l'eau de mer (46 mmhos/cm) en Casamance et dans le Saloum. Cela a des conséquences évidentes sur l'aménagement futur de ces sols. La salinisation est du type chlorurée sodico-magnésienne.

## 6. HYDROLOGIE

### A. HYDROGRAPHIE

Toute l'hydrologie estuarienne est liée à la *marée* qui entraîne l'existence d'une zone intertidale comprise entre les laisses de haute

Tableau XIII

Salinité des extraits à saturation des échantillons  
provenant des carottages profonds

Echan- cillon	CASAMANCE (BALINGORE)		GAMBIE (JATABA)		SALOUM (BANDIALA)		NDIAËL (SENEGAL)	
	Profondeur cm	C.E. mmhos/cm	Profondeur cm	C.E. mmhos/cm	Profondeur cm	C.E. mmhos/cm	Profondeur cm	C.E. mmhos/cm
1	70-100	385	100- 120	132.4	195-225	383.3	110-130	254
2	120-140	303.3	210- 220	196.9	305-325	411.5	210-230	193.2
3	140-160	356	360- 380	199.7	395-415	383.3	310-320	135.1
4	200-220	330.6	510- 530	77.4	480-500	330.1	400-425	208.7
5	280-300	303	610- 630	75	595-625	201.1	510-530	170.2
6	300-320	266.7	730- 750	48.6	680-700	200.5	600-625	83.8
7	350-370	242.4	810- 830	40.6			710-730	30.3
8	370-390	260.2	880- 900	45.2				
9	425-435	243.5	1010-1030	39.2				
10	480-500	242.4	1110-1130	30.3				
11	500-600	200.7						

mer et de basse mer, dans laquelle se développe la mangrove.

Rappelons que le phénomène des marées est dû au principe de la gravitation universelle et que la cause des marées réside dans l'attraction exercée sur les molécules d'eau des océans par la lune et le soleil. Les périodicités des marées proviennent des mouvements apparents de la lune et du soleil par rapport à la Terre.

Les composantes de l'onde de marée en un point d'une côte océanique ont donc des périodes bien définies par l'astronomie qui sont les mêmes pour tous les points du globe terrestre, mais les amplitudes de chacune des composantes dépendent de la latitude du point considéré et des configurations des fonds marins au voisinage de ce point. On distingue une onde annuelle et une onde semi-annuelle, dues au mouvement du soleil en déclinaison.

- des ondes mensuelles et semi-mensuelles dues aux mouvements de la lune ;
- des ondes diurnes et semi-diurnes dues à la rotation de la lune sur elle-même.

Les ondes de plus fortes amplitudes le long d'une côte sont en général les ondes semi-diurnes et diurnes qui se composent pour former les marées hautes et basses.

On appelle partie maritime ou bief maritime d'un fleuve la partie qui s'étend de l'embouchure jusqu'au point où les plus fortes marées cessent de se faire sentir.

#### a) La Casamance

Elle a été étudiée de manière détaillée par la section hydrologie de l'O.R.S.T.O.M. (BRUNET-MORET, 1969).

Le bief maritime de la Casamance s'étend sur 217 km sur le bras principal et sur 185 km sur son affluent principal, le Soungrougrou. En

fait, comme nous le verrons par la suite, l'influence de la marée est remontée beaucoup plus loin ces dernières années à cause de la sécheresse.

Il apparaît une forte *marée annuelle* qui a la même allure à toutes les stations étudiées et qui est très dissymétrique : minimum en Janvier-Février, maximum en Septembre-Octobre. Ceci est très important, car au minimum de Janvier-Février est liée une baisse de la nappe dans les mangroves et un assèchement des tannes. De même, il existe une forte *marée semi-mensuelle* qui se produit de la même façon à toutes les stations.

Quant à la marée semi-diurne, elle s'impose à l'observation superficielle, car sa courte période masque les marées de périodes plus longues. Elle est affectée d'une inégalité diurne qui est importante en Casamance. Les jours de vives eaux où les amplitudes de marées sont nettement supérieures à l'amplitude moyenne correspondent à la nouvelle lune et à la pleine lune, alors que les jours de mortes eaux où les marées sont nettement inférieures à l'amplitude moyenne correspondent au premier et au dernier quartier.

#### b) Le Saloum

La marée remonte biquotidiennement jusqu'à Birkelane, à 130 km environ de l'embouchure et aucun cours d'eau ne vient à la rencontre de l'eau salée. Par ailleurs, la marée envahit toutes les ramifications du réseau hydrographique fossile qui fonctionne ainsi comme un réseau d'irrigation en eau salée, pour ne pas dire sursalée. Les particularités des marées dans le chenal du Saloum sont connues d'après le guide pratique de la mission hydrographique effectuée en Avril-Juin 1960 : l'amplitude des marées, à la pointe de Sangomar varie de 1 m 80 en vives eaux à 1 m en mortes eaux, l'amplitude moyenne étant de 1 m 40. Cette amplitude diminue irrégulièrement au fur et à mesure qu'on remonte le Saloum ou les marigots, en même temps que le niveau moyen aurait tendance à s'abaisser par suite des pertes de charges dans les chenaux sinueux larges et peu profonds. L'amplitude moyenne qui est encore de 1 m 40 à Foundiougne tombe à 0,40 m à Kaolack et à 0,20 m dans les marigots secondaires.

#### c) La Gambie

Le bief du fleuve soumis à l'action de la marée s'étend sur une distance de 526 km; de Banjul à Goulombo, et pendant la saison sèche, de Décembre à Juin, toute cette partie se comporte comme une anse marine. L'amplitude des marées à Banjul est comprise entre 0,1 et 2,2 m et l'inégalité diurne peut s'élever jusqu'à 0,5 m mais reste généralement comprise entre 0,1 et 0,2 m. L'estuaire est exceptionnel du fait que sa longueur est suffisante pour contenir presque deux longueurs d'ondes de marée. D'une manière générale, l'on distingue trois tronçons dans le bief soumis à l'action de la marée, chacun ayant ses propres caractéristiques : de Banjul à Kaur, au km 200, les palétuviers bordent la plus grande partie du fleuve, puis de Kaur à Bansang au km 315, les palétuviers cèdent la place aux palmiers et le fleuve a tendance à suivre des chenaux anastomosés formant des groupes de grandes îles ; enfin de Bansang au pont de Goulombo, au Km 526, la largeur du fleuve se réduit à 100-150 m durant la saison sèche et aucune tendance à l'anostomose ne se manifeste dans son chenal.

## B. HYDROCHIMIE

Dans tous les estuaires, la salinité des eaux des marées est influencée par les alternances saisonnières du climat et cela, d'autant plus que l'on remonte vers l'amont des biefs maritimes des fleuves et de leurs affluents. C'est en Casamance que l'hydrochimie a été étudiée de manière détaillée par BRUNET-MORET de 1968 à 1970 et ensuite par nous, de Janvier 1978 à Juin 1979. En 1976, D. GOULEAU a étudié le profil hydrologique du marigot de Bignona, à 9 stations et à diverses profondeurs. Il a pu noter, comme B. MORET, l'absence d'un gradient vertical de salinité, ce qui caractérise un estuaire très mélangé. Dans le Saloum, des prélèvements ont été effectués en plusieurs points -de l'embouchure jusqu'à Sokone- et en Gambie, l'eau du fleuve a été étudiée au niveau de la transgambienne.

### a) Casamance

#### - Salinité

Nous rappellerons brièvement quelques paramètres permettant de caractériser une eau en termes de salinité. La salinité globale d'une eau est généralement exprimée par la conductivité électrique en millimhos/cm,\*\* à 25° C. Celle-ci est proportionnelle à la quantité d'ions majeurs en solution suivant l'équation

$$k.C.E \# \Sigma \text{ Anions} + \Sigma \text{ Cations}$$

$$\Sigma \text{ Anions} = \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{=} + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{=} \text{ en milliéquivalents/l} \\ \text{(meq/l)}$$

$$\Sigma \text{ Cations} \quad \text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} + \text{Na}^+ + \text{K}^+ \text{ en me/l}$$

k. est un coefficient qui dépend de la nature des sels.

L'eau de mer moyenne a une conductivité de 46 mmhos/cm correspondant à 35 g/l environ de sels dissous.

L'étude de BRUNET-MORET montre que jusqu'en 1970 la salinité, à son maximum, en fin de saison sèche n'atteignait pas Bignona sur le marigot du même nom, et Diaroumé sur le Soungrougrou. A Balingore, la salinité la plus élevée, exprimée par la conductivité électrique à 25° C était de l'ordre de 50 mmhos/cm/cm<sup>2</sup>, donc voisine de celle de l'eau de mer.

De Janvier 1978 à Juin 1979 des prélèvements d'eaux ont été effectués, mensuellement, en 12 points de la Casamance et de ses affluents (fig. 9). La conductivité a été mesurée sur 18 séries de prélèvements et les analyses chimiques complètes ont été effectuées sur les 12 séries de prélèvements de l'année 1978. Les résultats concernant la salinité sont consignés sur le tableau XIV et sur la figure 10, nous avons tracé les variations de la salinité pour 7 points, 2 pour la Casamance (Pte St Georges et Sefa) et un point sur chacun des affluents. Plusieurs observations se dégagent, à l'examen du tableau et du graphique.

- La salinité en cours d'année varie considérablement dans les biefs amont des affluents et cette variation est brutale entre la fin de la saison sèche et la saison des pluies.

- les maximas se situent en Mai-Juin et les minimas en Septembre-Octobre.

\*\* ou en millisiemens/cm (mS/cm). Nous avons adopté le terme millimhos/cm (mmhos/cm) pour toute l'étude.

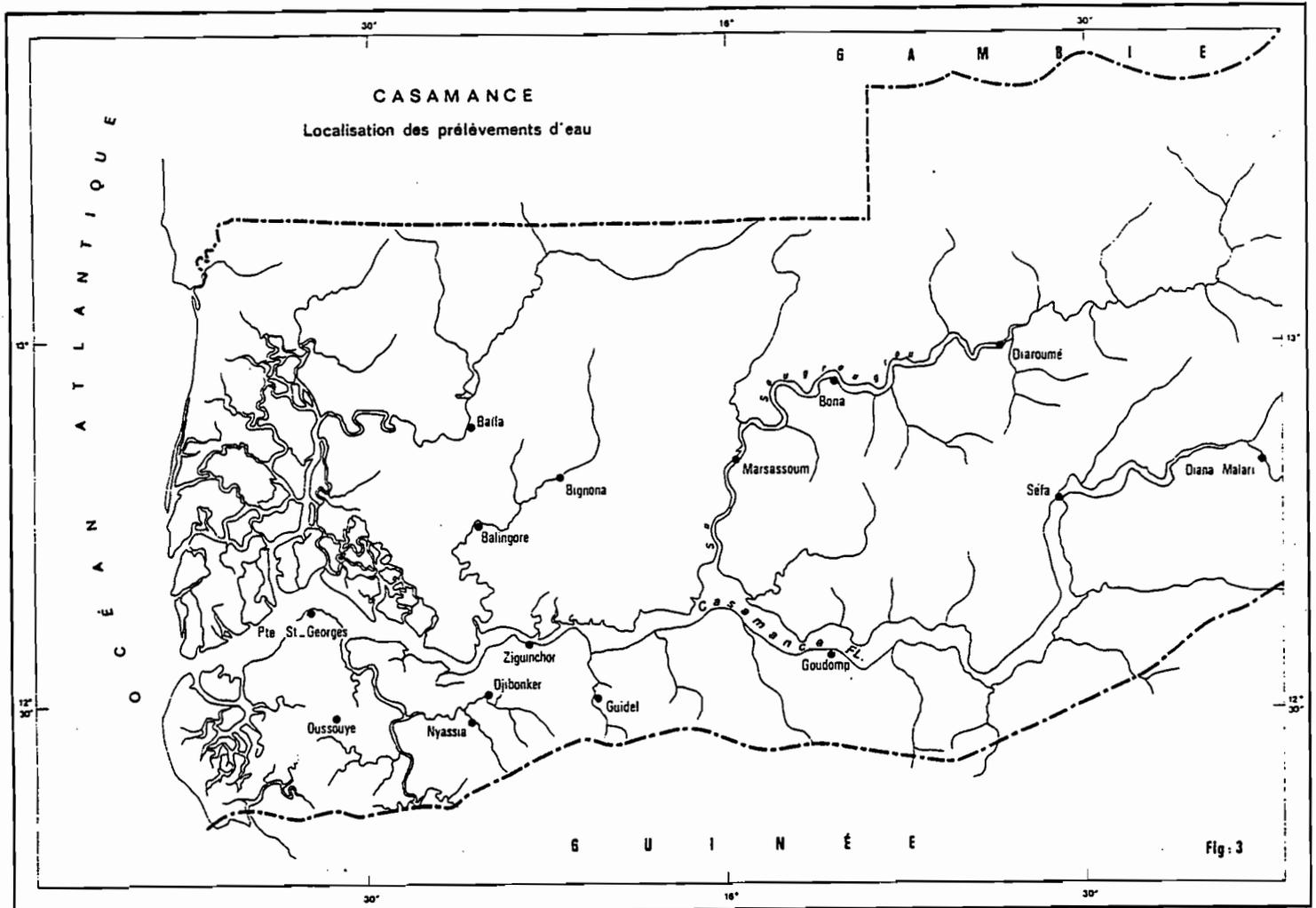


Fig. 9 - Casamance : Localisation des prélèvements d'eaux.

- Les salinités sont plus élevées dans les affluents de la rive gauche (Nyassia, Guidel, Djibonker) que dans ceux de la rive droite.

- L'amplitude de la variation annuelle est nettement plus faible dans le fleuve (Pte St Georges - Sefa) que dans ses affluents et l'on note que la salinité minimale à St Georges est voisine de celle de l'eau de mer et très nettement supérieure aux salinités minimales des affluents, sauf de

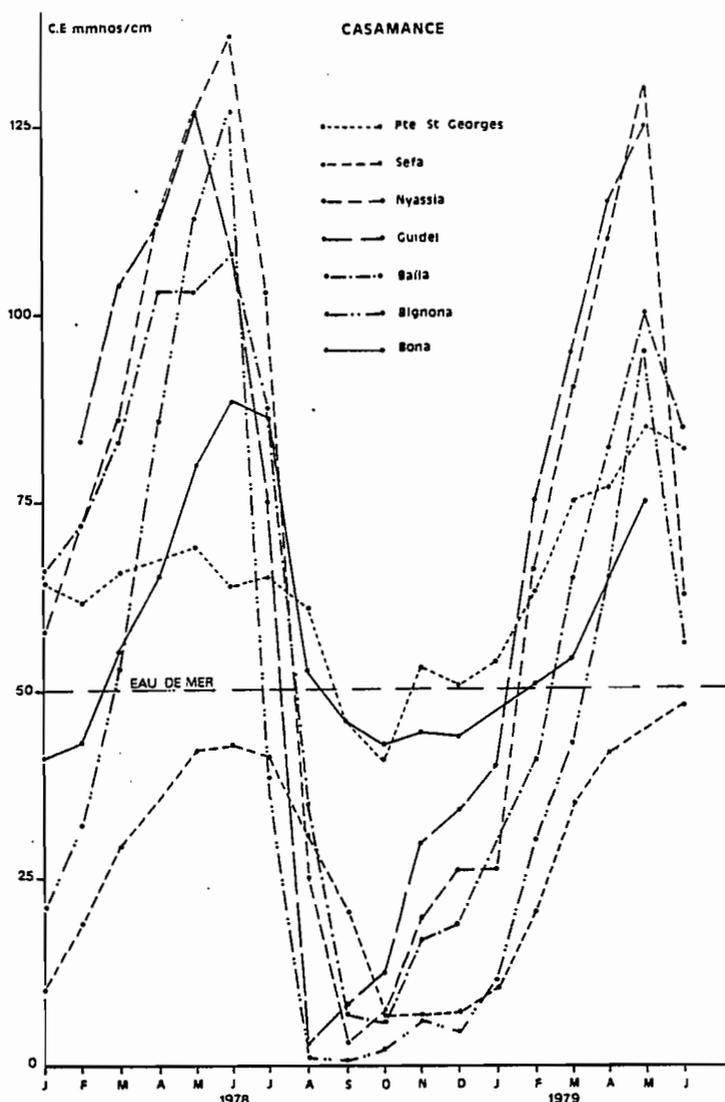


Fig. 10 - Casamance : Variations mensuelles de la salinité des eaux.

celui du Soungrougrou. En effet, dans cet affluent principal de la rive droite, le maximum de Juin est plus faible qu'ailleurs et, comme à St Georges, la salinité minimale en Septembre-Octobre est celle de l'eau de mer. Le *Soungrougrou* ne se dessale pas en hivernage.

Il est intéressant de comparer nos résultats à ceux de BRUNET-MORET (tabl. XV). On constate que dix années après, et la sécheresse aidant, le fleuve et son affluent principal, le Soungrougrou sont salés sur la totalité de leurs cours, en fin de saison sèche.

En Mai-Juin, la salinité sur tout le cours du Soungrougrou est double de celle de l'eau de mer et comme l'avait déjà signalé BRUNET-MORET "la salure semble être, à distance égale de la mer, systématiquement plus forte dans Soungrougrou que dans le fleuve proprement dit".

Tableau XIV

Salinité de la Casamance en mmhos/cm à 25°

Année	1978											1979						
	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
Diaroumé	43.5	40	53.7		75.6	85.7	79.6	21.7	23.6	18.6	27	27.1	40.3	53	72	87		90
Bona	46.6	43	55.5	65.3	85.7	88.6	87.3	52.8	46	43.8	44.6	43.8		51	54		74	
Marsassoum	59.7	60.8	58.8	79.6	85.7	94.3	93.6	38.4	32.2	28.8	36.1	34			67	74	95	90
Bignona	24.2	32	53.1	86.1	113.2	127.1	38.3	1.6	1	2.4	6	4.6	12	30	43	65	5	56
Balingor	50.5	57.4	74.5	86.1	103	108.7	93.6	21.7	4.6	5.7	17	18.6	28.9	47	67	76	90	70
Baïla	72.2	72.5	83.5	103.6	103	108.7	87.3	34.3	6.9	6.5	17.3	19.5		41	65	82	100	85
Pte St Georges	69.5	62.2	66.2		69.5	64.2	65.3	61.3	46	40.5	53.1	51.5	54.2	63	75	77	85	82
Djibonker	69.5	72.5	97.7	118.8	127.1	137.2	93.6	2	1.9	4.6	19.5	26	40.3	61	90	110	130	63
Nyassia	65.3	72.5	86.1	112.3	127.1	137.2	103.6	24.8	3	7.5	19.5	26.5	39	66	90	110	130	63
Guidel		83.5	105	112.3	127.1	108.7	75	3.5	12	8.4	29.3	34	39	75	96	115	125	54
Sefa	11	19	29.4		42.5	43	41.6	21.2	20.8	7.3	6.8	7.7	10.3	21	35	42		48
Diana Malari	0.8	1.5	3.8			18.2	18.7	1.1	0.3	0.4	0.4	0.5	0.7					

Tableau XV

Conductivité en millimhos/cm

Station	CASAMANCE			SOUNGROUGROU		
	Ziguinchor	Sefa	Diana Malari	Marsassoum	Bona	Diacoumé
1969	53	8.7	0.9	50.2	30.9	10.5
1978	69.5	43	18.7	94.3	88.6	85.7
1979	85	48		95		90

## - Composition chimique

Pour 118 échantillons, il existe entre la conductivité électrique et la somme des anions, une relation (fig. 11).

$$\Sigma A = 10,6 \text{ CE}$$

avec un coefficient de corrélation  $r = 0,98$ .

Le pH est, pendant la plus grande partie de l'année compris entre 7,5 et 8, sauf en Septembre où dans tous les affluents il est acide et inférieur à 5.

Les anions sont essentiellement représentés par les chlorures et les sulfates. Les bicarbonates sont, à l'état de traces et les carbonates sont absents.

Parmi les cations, on a  $\text{Na} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{K}$ . L'utilisation des rapports anioniques  $\frac{\text{SO}_4}{\text{Cl}}$  et cationiques  $\frac{\text{Ca}}{\text{Mg}}$  et  $\frac{\text{Na+K}}{\text{Ca+Mg}}$  pour caractériser les eaux (IVANOVA, ROSANOF, 1953) montre que le rapport  $\frac{\text{SO}_4}{\text{Cl}}$  est pendant toute l'année, proche de 0,1.

Le rapport  $\frac{\text{Ca}}{\text{Mg}}$  varie en cours d'année, passe de 0,16 en Janvier-février à 0,2 en Juin et à 0,25 en Novembre et Décembre.

Le rapport  $\frac{\text{Na+K}}{\text{Ca+Mg}}$  passe de 3,7 en Janvier à 3 en Mai et à 4,5 en Décembre.

*L'eau de la Casamance et de ses affluents est donc chlorurée-sodique à chlorurée sodicomagnésienne.*

L'étude des variations mensuelles de la composition chimique moyenne de l'eau du fleuve et de ses affluents a été faite en utilisant le rapport  $\text{ion}/\text{Cl}^-$  exprimé en me/l. Ce rapport a l'avantage de présenter les variations des éléments par rapport à l'eau de mer (GOULEAU, 1975) en supprimant le phénomène de concentration dû à l'évaporation. La moyenne a été faite sur dix points de prélèvements : Diaroumé, Bona, Marsassoum, Bignona, Balingore, Baïla, Pte St Georges, Nyassia, Guidel et Sefa. Rappelons que dans l'eau de mer normale (EN), les rapports sont les suivants :

$$\frac{\text{SO}_4}{\text{Cl}} = 0,1. \quad \frac{\text{Mg}}{\text{Cl}} = 0,194. \quad \frac{\text{Ca}}{\text{Cl}} = 0,036. \quad \frac{\text{K}}{\text{Cl}} = 0,018.$$

La figure 11, sur laquelle sont portés les différents rapports, montre que  $\frac{\text{SO}_4}{\text{Cl}}$  varie entre 0,09 et 0,11 et que pendant 7 mois de l'année il est identique à celui de l'eau de mer.

Les variations ne sont pas très significatives. Le rapport  $\frac{\text{K}}{\text{Cl}}$  est pendant 9 mois de l'année, constant et de 0,02. En saison des pluies, il est nettement plus élevé que dans les eaux océaniques.

Mg et Ca ont des variations saisonnières inverses l'un par rapport à l'autre:  $\frac{\text{Ca}}{\text{Cl}}$  est supérieur à celui des eaux océaniques à la fin de la saison sèche et pendant toute la saison des pluies, alors que pour Mg, le rapport  $\text{Mg}/\text{Cl}$  est à peine supérieur à l'eau de mer normale de Février à Juin et inférieur à 0,2 d'août à Décembre. Ces résultats rejoignent, en partie, ceux de D. GOULEAU qui a étudié le profil hydrologique du marigot de Bignona, depuis l'amont jusqu'à l'embouchure, le 6 Février 1976.

Il semble donc que l'eau de la Casamance est une eau particulière - ni océanique diluée, ni continentale "polluée" d'eau marine - qui a subi des influences complexes dans lesquelles on peut reconnaître un héritage marin (chlorures dominants) et un héritage continental, essentiellement lié à la mangrove (augmentation du Ca, Mg et K).

#### b) Le Saloum

De la pointe de Sangomar ou de l'embouchure du Bandiala, jusqu'à Sokone, en passant par Djirnda, Tialane, Toubacouta ou les Diombos

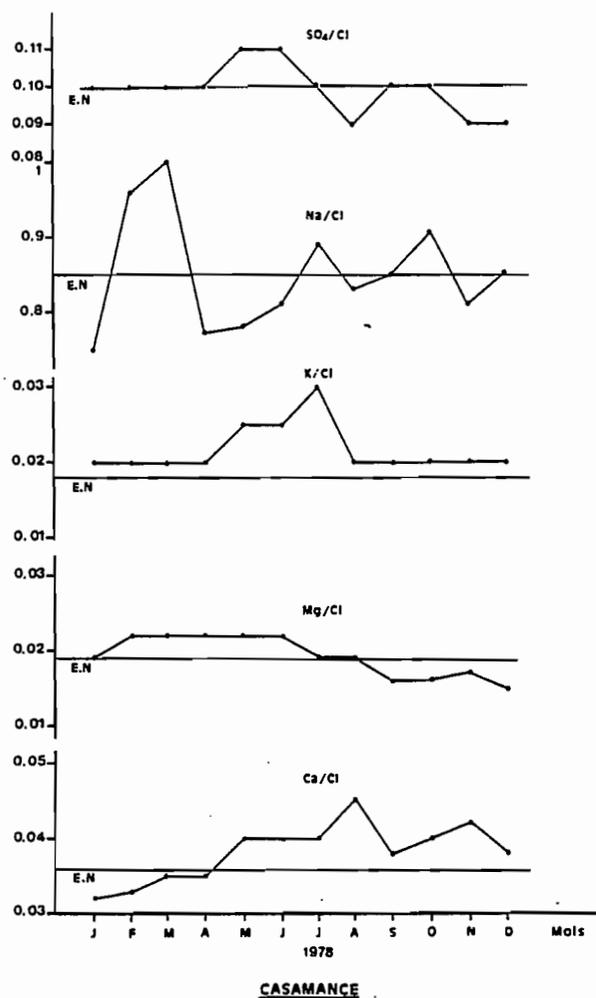


Fig. 11 - Variation de la composition chimique des eaux du fleuve et de ses affluents.

Tableau XVI

Salinité des eaux du Saloum

Localité	pH	Conductivité en micro mmos/cm	Anions - meq/l			Cations - maq/l			
			Cl	SO <sub>4</sub>	CO <sub>3</sub> H	Ca	Mg	K	Na
Sangomar	7.4	68.800.	604.8	58.3	2.4	21.2	112	14.5	514
Gokehor	7.3	73.600	664.3	67.7	2.5	22.4	123	16.4	600
Diogane	7.2	71.100	659.5	65.1	2.6	23.6	122	15.5	544
Tialane	7.4	73.600	656.6	62.6	2.4	21.8	127	16.4	588
Diombos	7.5	71.100	649.9	66	2.4	24.1	138	15.3	544
Djirnda	7.4	67.200	615	66.9	2.7	23.5	123	11.5	520
Bandiala	7.2	68.800	610.6	62.6	2.5	18.9	120	15	544
Toubacouta	7.4	71.100	664.3	62.6	2.5	19.4	122	14.2	514
Sokone	7.5	87.900	852.5	79.7	2.8	28.4	178	19.4	708

(fig. 12), la salinité est partout très élevée et de 2 à 3 fois supérieure à celle de l'eau de mer (tabl. XVI). Comme en Casamance, c'est une eau chlorurée-sodico-magnésienne.

#### Iles du Saloum



Localisation des prélèvements d'eau

Fig. 12

#### c) La Gambie

A la différence de la Casamance et du Saloum, la Gambie est un fleuve à débit relativement puissant pour permettre aux eaux douces de refouler l'eau salée pendant plus de la moitié de l'année et de Juillet à Février, l'Estuaire est presque entièrement dessalé et même en fin de saison sèche, la salinité de l'eau du fleuve ne dépasse pas celle de l'eau de mer. Les résultats du tableau XVII sont fragmentaires et concernent les prélèvements effectués au bac de la transgambienne. (Fig. 13).

Tableau XVII

Salinité de la Gambie au bac de la Transgambienne

Année	1974		1975		1978		1979					
Mois	Aout	Oct.	Juin	Nov.	Nov.	Dec.	Jan.	Fev.	Mars	Mai	Juin	Oct.
C.E mmhos/cm	0.6	0.2	22	0.4	0.4	1.1	1.7	18	19	38	40	4.3
pH	7.4	7.4	7.5	7.2	7.7	7.6	7.5	7.2	7.3	7.6	7.8	7.8
Cl <sup>-</sup> meq/l	3.7	1.1	192.3	2.5	2.2	9.4						
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> "	0.4	2.6	9.4	0.4	0.86	0.9						
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> "	0.6	6.7	1.3	0.6	0.4	0.6						
Ca <sup>++</sup> "	0.6	2.4	8.4	1	0.24	0.6						
Mg <sup>++</sup> "	0.6	cr.	38.6	0.2	0.46	1.5						
K <sup>+</sup>	0.2	0.1	3.4	0.1	0.12	0.25						
Na <sup>+</sup>	2.8	1.1	168	2.3	2.5	8						

On constate que de Juillet à Janvier l'Estuaire est dessalé, ce qui permet notamment la riziculture dans cette mangrove, sans problème ; aussi est-il courant d'y voir, à cette époque de l'année des Rhizophora au milieu des champs de riz.

L'étude hydrochimique confirme notamment que la Casamance et le Saloum sont des "estuaires inverses" dans lesquels les eaux sont salées pendant la majeure partie de l'année (8-9 mois) et hypersalées en fin de saison sèche.

*En résumé*, 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 tidiaux 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 qu'on peut dire qu'au Sénégal, il n'y a pas de mangrove sans tanne.

En effet, il y a des tannes dans d'autres zones à mangroves dans le monde et notamment, à Madagascar, dans la région de Tuléar, en Nouvelle Calédonie (BALTZER, 1983) et même en zone équatoriale, au Gabon (LEBIGRE, MARIUS, 1981), ou en Inde, à Pichavaram (KERREST, 1980 ; MARIUS, en prép.).

Là, comme au Sénégal, leur développement est, en grande partie, liée à la sécheresse de ces dernières années, mais nulle part leur extension est aussi importante et surtout aussi générale qu'au Sénégal.

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.

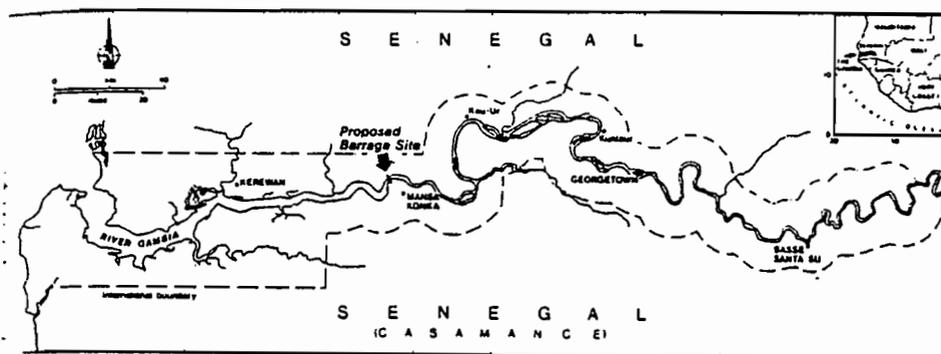


Fig. 13

## Chapitre III

## LA MORPHOLOGIE DES SOLS DE MANGROVES

## I - MACROMORPHOLOGIE

## 1. METHODES D'ETUDES (pl. III)

Sauf rares exceptions (Bassid et N'dimsiroh), où il a été possible de faire quelques fosses dans des zones non inondées à marée haute, toutes les séquences observées sont, soit inondées en partie à marée haute, soit influencées par cette marée dont la nappe se trouve à faible profondeur. La seule méthode d'observation possible est alors "la pelle à vase", que nous avons utilisée pour la première fois dans les mangroves de Guyane. Elle est formée d'un manche et d'une sorte de demi-cylindre de 120 cm de long et de 8 cm de diamètre, à bords tranchants. L'enfoncement instantané de l'outil dans la vase permet de retirer par rotation un cylindre de vase que l'on ouvre à la main sur toute la longueur après avoir amorcé l'ouverture par une entaille au couteau le long d'une génératrice : il faut arracher sans lisser (C. MARIUS et al., 1968). Une fois la carotte ouverte, on procède immédiatement à des mesures de pH et de Eh, à différentes profondeurs, à l'aide d'un pH mètre équipé d'électrodes combinées, à embouts renforcés. La description morphologique des profils est surtout basée sur les caractères suivants : couleur de la matrice, couleurs des taches, consistance (fluide à développée), selon des normes de PONS (1965)\* pénétration racinaire (racines, fibres, radicelles). Le nombre de profils observés est variable selon les séquences, de l'ordre de un tous les 2 m en moyenne à Bassid, à Balingore et à Oussouye, et de un tous les 4 ou 5 m dans les autres séquences. Le nombre de profils prélevés a été de 6 à Tobor, 8 à Oussouye, 10 à Balingore, N'Dimsiroh et Gambie et de 19 à Bassid. Au total, 216 échantillons de sols ont été prélevés, ainsi que 54 échantillons d'eaux de nappes phréatiques. Nous étudierons les 6 séquences en partant du Sud vers le Nord, c'est-à-dire de Oussouye à N'Dimsiroh.

## 2. SEQUENCE DE OUSSOUYE

## a) Localisation (pl. IV)

Elle est située au Sud de la Casamance, à 12°27' de latitude N et 16°30' de longitude Est et elle est à peu près perpendiculaire à la route-digue Niambalang-Oussouye. Du bord du marigot, à la route, la sé-

---

\* 5 classes de consistance ont été définies par PONS, d'après la valeur de n (n value) liée elle-même à la teneur en eau, en argile et en matière organique et sur laquelle nous aurons l'occasion de revenir (ch. IV).

quence de végétation est la suivante : (Pl. III)

- Une bande de 35 m de large à peuplements purs de *Rhizophora racemosa*, de grande taille, suivie d'une zone de 15 m environ composée presque exclusivement de *Rhizophora mangle*.
- Vient ensuite une zone de 60 m dans laquelle se trouvaient mélangés *Rhizophora mangle* et *Avicennia africana*, pour la plupart morts à présent à la suite de la sécheresse et dont on ne voit plus que les troncs desséchés. Cette zone est inondée à marée haute et la surface est recouverte d'une croûte algale noirâtre plus ou moins poudreuse.
- Un petit escarpement sépare brutalement toute cette zone à dominance de *Rhizophoras*, d'une zone très étroite (15 m) formée de quelques *Avicennia africana* isolés au milieu de touffes d'herbes (*Sesuvium*) et de quelques *Conocarpus Erectus*.
- On redescend ensuite sur une grande zone nue de 150 m environ, dont une partie est mouillée en surface, c'est le tanne vif inondé, et l'autre est totalement sèche, avec un réseau polygonal en surface : c'est le tanne vif s. stricto.

8 profils ont été prélevés dans cette séquence dont on trouvera les descriptions en annexes.

*b) Principaux caractères morphologiques de la séquence (Fig. 14)*

Cette séquence se caractérise par la présence d'un horizon très fibreux brun rouge à rouge posé sur un matériau sableux, dans le domaine de la mangrove à *Rhizophoras* et d'un horizon tourbeux situé à environ 1 m de profondeur dans le domaine du tanne vif.

Par ailleurs, on remarque que les deux domaines sont nettement tranchés, malgré leur apparente continuité.

Toute la zone à *Rhizophora* a un potentiel d'oxydo réduction fortement négatif indiquant un milieu très réducteur et le pH y est voisin de la neutralité et compris entre 6 et 7. Par contre tous les profils du tanne vif ont un potentiel d'oxydo réduction Eh, positif et un pH très bas, de l'ordre de 3,5.

Entre les deux, la bande étroite légèrement surélevée à *Avicennia* forme une zone de transition ; le potentiel d'oxydo réduction y est fortement positif, comme dans le tanne, mais le pH est de l'ordre de 6 comme dans la mangrove.

Les taches de jarosite sont présentes dans tous les profils du tanne, toujours associées aux gaines racinaires de *Rhizophora*, dans un horizon de couleur caractéristique, dite "purée de marron" - 10 YR 4/2 et de consistance semi-fluide.

### 3. SEQUENCE DE TOBOR

*a) Localisation (Pl. II)*

Cette séquence est localisée, à 4 km environ au Nord de la ville de Ziguinchor, dans une plaine alluviale couverte d'une mangrove dense à *Rhizophora mangle* et *Avicennia* jusqu'en 1971. Quelques aménagements rizi-

coles mal conduits et la sécheresse de ces dernières années ont fait disparaître brutalement la plus grande partie de cette mangrove. On est ici, en bordure du fleuve Casamance, à un endroit où il s'étrangle dans un coude et d'où part le marigot de Tobor, sur la rive droite du fleuve. Dans toute cette région, c'est Rhizophora mangle qui était largement représenté, avec immédiatement en arrière une mangrove mixte Rhizophora mangle - Avicennia africana. La carte pédologique de J. VIEILLEFON (1975) mentionne ici des "sols peu évolués, hydromorphes, sur vases argileuses, peu organiques, peu pyriteuses". La séquence comprend 4 zones :

- une bande étroite de Rhizophora mangle, en peuplement pur ;
- une très large bande de mangrove décadente, dans laquelle dominent des troncs d'Avicennia, desséchés, ceux de Rhizophora ayant été généralement enlevés par les populations locales ;
- suit une très étroite bande de tanne vif inondé, ceinturant ;
- un tanne herbacé, légèrement surélevé par rapport à la plaine alluviale.

6 profils ont été prélevés dans cette séquence (Annexe)

*b) Principaux caractères morphologiques de la séquence (Fig. 14)*

Les caractères distinctifs de cette séquence sont :

- l'absence de taches de jarosite dans les profils des tannes ;
- l'absence de racines de Rhizophora et même de fibres, dans les profils des tannes ;
- l'apparition d'un horizon réduit, de couleur  $N_4/0$ , à partir du profil 3, et d'un horizon de surface de couleur gris bleu dans le tanne vif ;
- un pH neutre dans le domaine de la mangrove et légèrement acide, dans le tanne.

Ces caractères sont liés, d'une part, à l'évolution récente et rapide de la mangrove dans cette région, d'autre part, à la prédominance d'une mangrove à Avicennia dans une partie de la séquence.

#### 4. SEQUENCE DE BALINGORE

*a) Localisation et Historique (pl. VI)*

Située dans un coude du marigot de Bignona, au Sud du village de Balingore ( $12^{\circ}45'$  lat. N,  $16^{\circ}214$  long. O), cette séquence a été étudiée de manière détaillée de 1966 à 1971 par J. VIEILLEFON qui en a fait l'objet de sa thèse. A la suite des années sèches 1972 et 1973, nous avons pu observer d'importants changements dans la séquence de végétation. L'examen de quelques profils nous a montré que les caractères morphologiques changeaient aussi. Nous avons donc entrepris de suivre l'évolution de cette séquence, d'autant que les années sèches se suivaient et que celle de 1977 fut une année catastrophique. En tout, 7 séries de prélèvements ont été effectuées dans cette séquence : Mai - Août - Octobre 1974 - Juin - Octobre 1975 - Mai - Novembre 1978.

En Novembre 1978, la séquence a été de nouveau étudiée de manière détaillée. 31 profils ont été observés et 10 prélevés.

*b) Caractères Morphologiques de la séquence (Fig. 14)*

Les principaux caractères morphologiques de ces profils sont : la

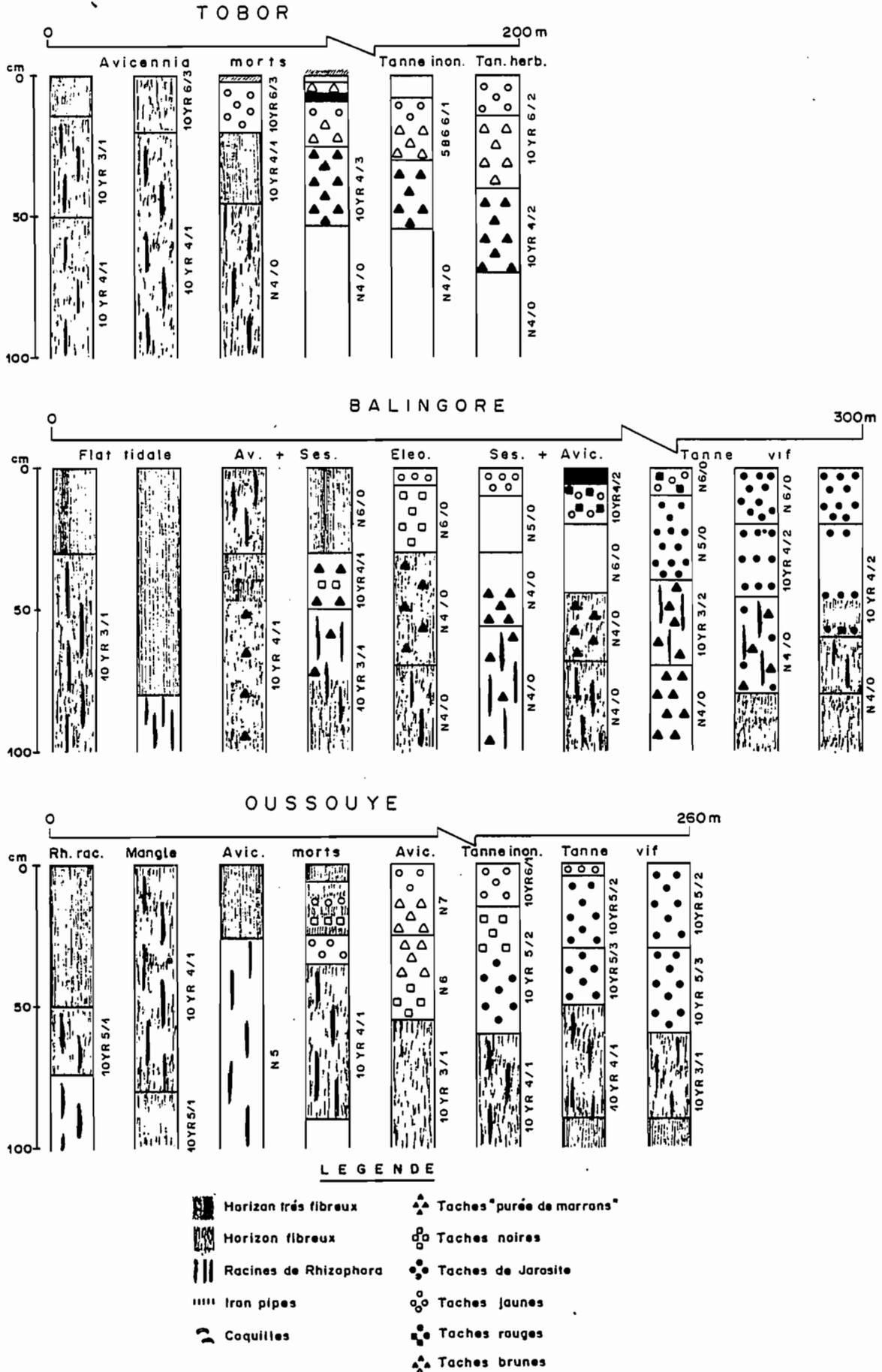


Fig. 14 - Morphologie des séquences de OUSSOUE - TOBOR - BALINGORE

présence de taches brunes, "purée de marron", dès le profil 3, c'est-à-dire dans l'ancienne zone à *Rhizophora mangle*. L'observation montre que ces taches sont liées à la décomposition des amas fibreux et parallèlement à l'apparition de taches, on remarque que le pH de ces horizons est acide. Par ailleurs, dans la séquence, on note que ce sont les horizons de moyenne profondeur - entre 20 et 60 cm - qui s'acidifient le plus.

D'une manière générale, dans toute la séquence, l'acidité est plus élevée en profondeur qu'en surface. Le sédiment a une couleur gris, gris foncé N4,N5. A partir du profil 4, l'horizon de surface s'éclaircit et petit à petit apparaît une structure finement grumeleuse. Nous sommes dans la zone à *Avicennia*. C'est dans le tanne qu'apparaît un horizon "purée de marron" 10 YR 4/2, à consistance "de beurre", dans la zone qui fut le tanne herbacé et qui est recouverte aujourd'hui d'une "moquette". Dans le tanne vif, l'horizon à taches de jarosite est consistant. Dans le flat tidale, là où les *Rhizophora* ont disparu, l'épaisseur de la tourbe est très variable, sur une faible distance. Nous verrons, au chapitre 9, les transformations subies par cette séquence sous l'influence de la sécheresse.

Tableau XVIII

Variations du pH dans la séquence

Profondeur cm	P R O F I L S									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	7	6.2	6.2	5.8	6.2	5.6	5.5	3.6	3.5	4.4
20								3.5		
30	7.1	6.2	5.6		5.5	5	5.2		3.2	3.5
40				5.3				3.4		
50	7	6.2	5.6		5.5	4.2			3.3	3.5
60				5.6			4.5	3.4		
70	6.6	6.2			5.5	4.6			3.6	3.7
80			6	5.8				3.4		
90					5.5		4.7	3.5	3.7	
100	6.4	6.2	5.9	5.8		5				4.6

## 5. SEQUENCE DE GAMBIE

### a) Localisation (Fig. 15)

Située à l'endroit où la route transgambienne franchit le fleuve et où un projet de barrage est en cours d'étude (DENT et al., 1981) la séquence est en grande partie aménagée pour la riziculture. On y observe cependant des palétuviers de grande taille : *Rh. racemosa* est dominant sur la rive droite du fleuve, tandis que sur la rive gauche on observe la succession complète depuis *Rh. racemosa* jusqu'au tanne vif, en passant par le tanne herbacé à *Sesuvium*.

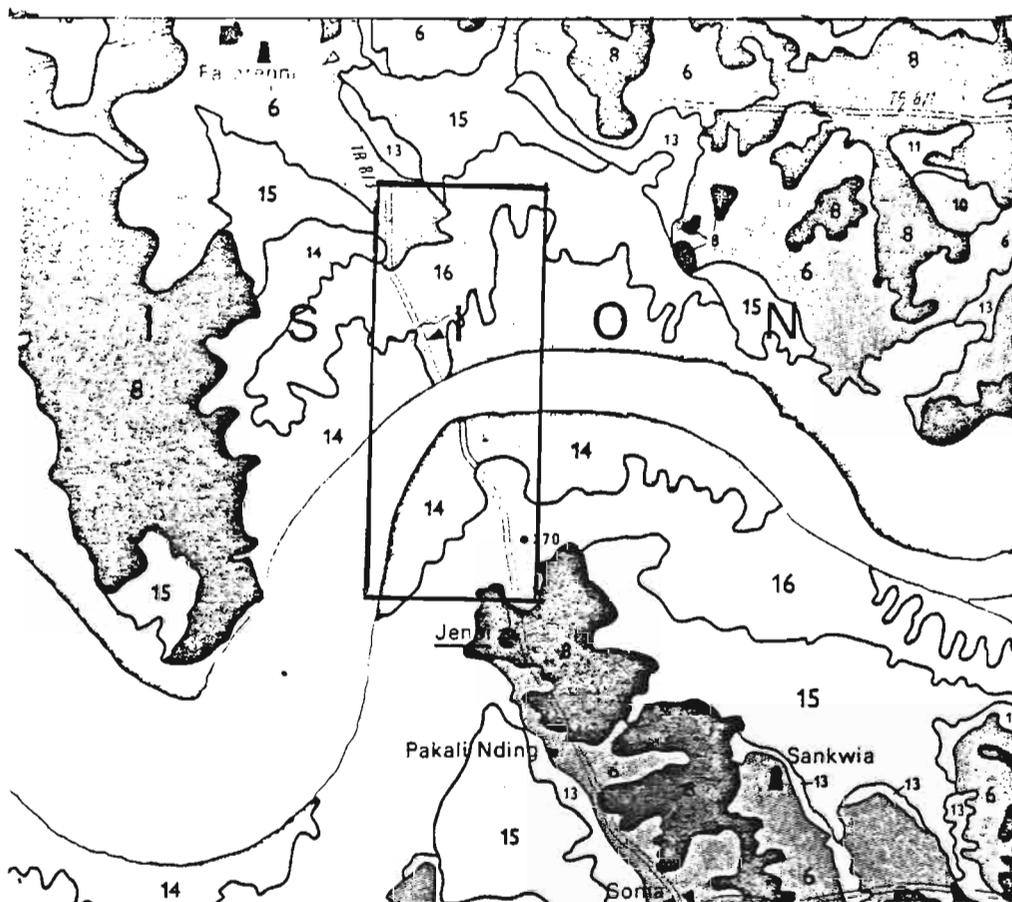


Fig. 15 - Localisation de la séquence de GAMBIE  
(14 : Mangrove - 16 : Tanne vif)

*b) Principaux caractères morphologiques (Fig. 16)*

Dans toute la séquence, le matériau est homogène et argileux, de couleur grise 10 YR 5/1, gris foncé 10 YR 4/1 et parfois gris-vert 5 GY (CMG 1 et 2). Les taches "purée de marron" ne sont présentes que dans un seul profil (CMG 2). La consistance est dans l'ensemble bien développée et aucun des profils n'a la consistance "de beurre". La plupart des profils de la séquence ont un pH neutre ou faiblement acide et seul, le profil du tanne vif CMG 8 a une acidité forte et on note que ce sont les horizons de surface qui ont un pH très acide.

## 6. SEQUENCE DE BASSID

*a) Localisation (Pl. IV)*

Située dans l'Estuaire du Saloum, à 13°55' de latitude Nord et à 16°27' de longitude Ouest, cette séquence, longue de 480 m, a été étudiée de manière très détaillée depuis plusieurs années.

Du bord du marigot au pied de la terrasse herbeuse, on distingue : (Pl. III)

- une frange étroite - de 30 m - de *Rhizophora racemosa* associés à quelques *Rhizophora harrissonii* ;

- une bande plus large, de 70 m, composée exclusivement de *Rhizophora mangle* ;
- un rideau, de 25 m, où sont associés *Rhizophora mangle*, et *Avicennia africana* ;
- une très large zone nue de 140 m environ, quotidiennement inondée par la marée haute, au moment de l'étude, mais qui, à certaines époques, Janvier et Février, notamment, n'est pratiquement pas atteinte par les marées, c'est le tanne inondé ;
- lui fait suite, une petite zone nue, recouverte d'une mince croute algale verdâtre, inondée qu'aux marées exceptionnelles d'équinoxes, c'est le tanne vif inondé qui est séparé du tanne vif exondé par un mince rideau d'*Avicennia* plus ou moins rabougris sur un tapis de *Sesuvium*.

Long de 150 m, le tanne vif exondé vient buter sur un escarpement de 10 à 20 cm sur lequel s'étend une terrasse herbacée à *Andropogon*, *Acacia*, etc...

19 profils ont été prélevés sur cette séquence (Annexe).

#### b) Principaux Caractères Morphologiques de la Séquence (Fig. 16)

Cette séquence se distingue nettement des autres séquences décrites jusqu'à présent par l'extrême hétérogénéité du matériau.

On note cependant la présence en profondeur, d'un niveau sec, extrêmement dur et compact. Ce niveau, impénétrable même au carottier, se retrouve, dans toute la séquence à une profondeur variable, comme on peut le voir sur la figure.

Il en est de même pour les débris de coquilles qu'on retrouve dans de nombreux profils de la mangrove et du tanne inondé, à des profondeurs variables. Il s'agit exclusivement de coquilles d'huitres, dans cette séquence, alors qu'ailleurs, dans l'Estuaire du Saloum, nous avons pu trouver en profondeur des coquilles d'*Arcas*, souvent bien conservés.

Autre caractéristique de la séquence, la présence d'un horizon argileux, très fibreux, plus ou moins épais et qu'on retrouve de manière discontinue jusqu'à la limite de la terrasse herbacée.

La limite de la mangrove avec le tanne est bien marquée par l'apparition en surface d'un horizon sableux, plus ou moins épais, qu'on retrouvera, de manière continue jusqu'au bout de la séquence. Cet horizon présente le plus souvent des taches jaunes, brunes et parfois rouges. Dans le tanne exceptionnellement inondé et le tanne exondé, on observe souvent en surface un mince horizon très noir, dû à la décomposition des feuilles de *Rhizophora*, transportées par les marées hautes.

Parmi les autres caractères morphologiques, on citera aussi, la couleur purée de marron, 7,5 YR 4/2 et la consistance de beurre, des horizons subsuperficiels, dans le tanne, dès qu'apparaît la jarosite (CMB 9).

Enfin, on signalera l'apparition de gypse sous forme d'aiguilles, en surface dans le tanne exondé, et la présence en profondeur, dans certains profils de la terrasse herbacée de gros cristaux de gypse (MARIUS, 1975).

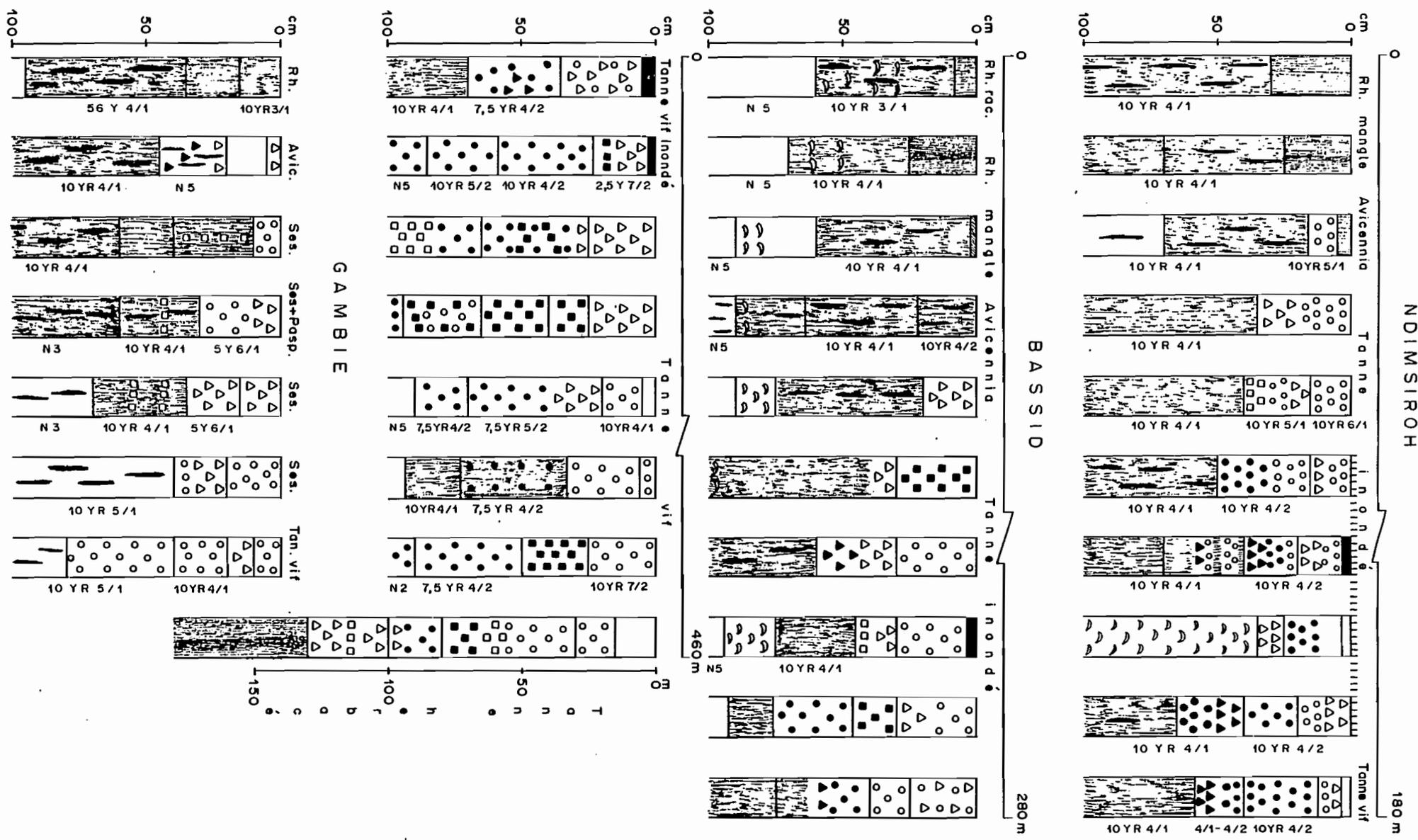


Fig. 16 - Morphologie des séquences  
 GAMBIE - BASSID - N'DIMSIROH

## 7. SEQUENCE DE N'DIMSIROH

### a) Localisation (Fig. 17)

Située à 14°5' de latitude Nord et à 16°34' de longitude Ouest, sur le marigot de Faoye, un des affluents de la rive droite du fleuve Saloum, cette séquence constitue pratiquement la limite septentrionale de l'association mangrove-tanne actuelle. Plus au Nord, on trouvera, soit des mangroves reliques (Somone, St Louis ...), soit des tannes très évolués, (Fatick, Delta du Sénégal ...).

Longue de 160 m environ, cette séquence se caractérise par la présence d'une bande très large de tanne inondé dont une partie est couverte de racines ferruginisées, indurées d'*Avicennia* et de *Rhizophora*, les "iron-pipes" traduisant la présence et - la disparition - récente d'une mangrove.

Du bord du marigot à la terrasse à Baobab, Acacia et *Andropogon*, 11 profils ont été prélevés.

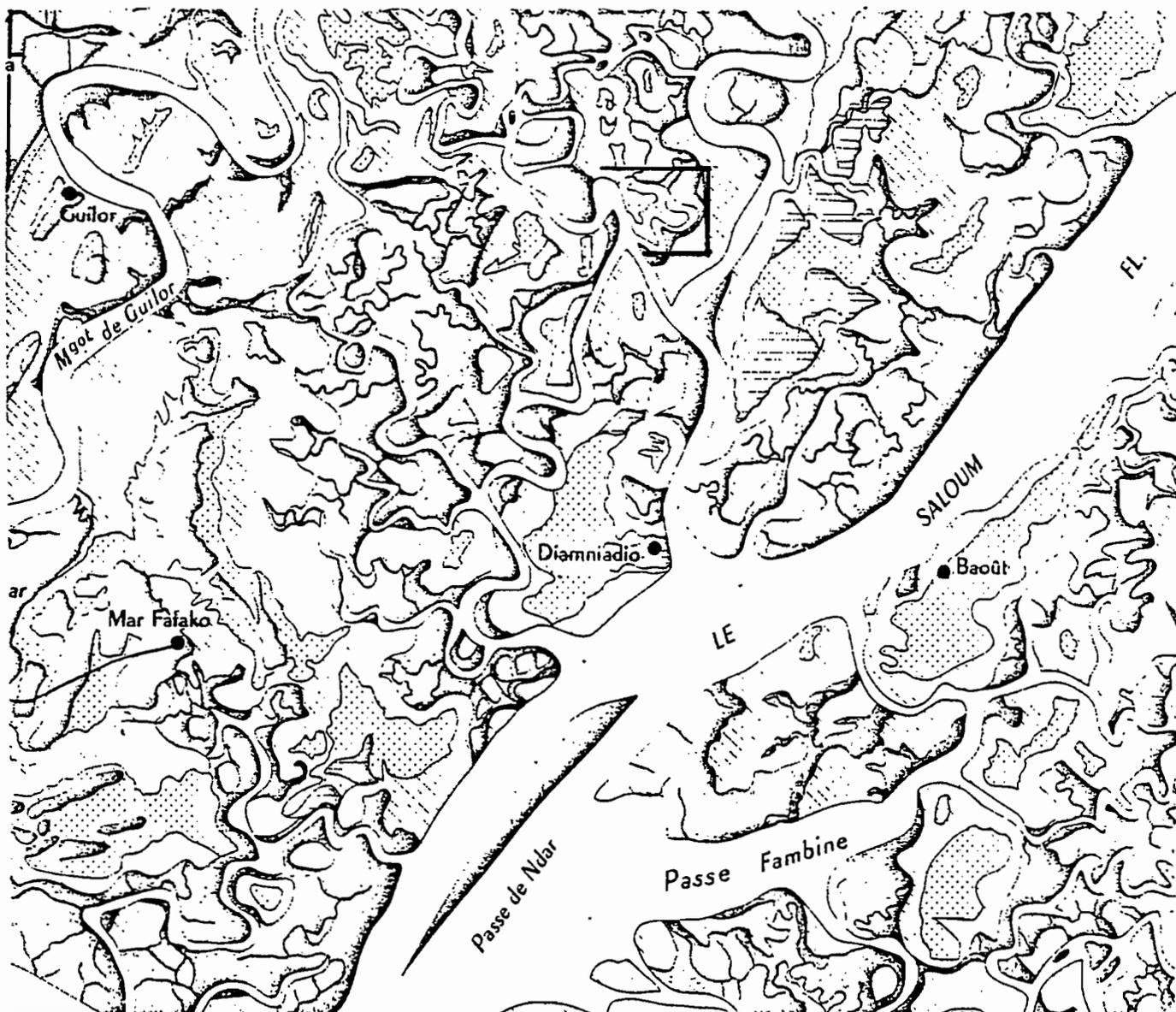


Fig. 17 - Séquence de N'Dimsiroh

b) Principaux Caractères Morphologiques de la Séquence (Fig. 16)

Cette séquence se distingue par un microrelief important de surface provoqué par les trous de crabes et par la présence de racines ferruginisées, les "iron-pipes", dans une assez grande partie du tanne inondé. Leur taille et leur position verticale laissent supposer qu'il s'agit de pneumatophores d'Avicennia qui se seraient épigénisés sur place en oxydes de fer. C'est, en particulier, dans cette région que les "iron-pipes" ont été observés et signalés pour la première fois par C. CHARREAU. On en retrouvera ensuite en Casamance (Baïla), dans le Bao Bolon et surtout dans tout le delta du Sénégal. Comme à Bassid, on remarque l'apparition d'un niveau sableux en surface dès qu'on aborde le tanne inondé.

Quant au matériau lui-même, il s'agit principalement d'une argile plus ou moins sableuse, gris foncé 10 YR 4/1, très riche en fibres.

## 8. CONCLUSION

Le tableau XIX présente un résumé des principaux caractères morphologiques des 6 séquences étudiées.

Tableau XIX

Résumé des Caractères Morphologiques des séquences

Séquence	OUSSOUYE	TOBOR	BALINGORE	GAMBIE	BASSID	N'DIMSIROH
Couleur de la matrice	10 YR 3/1-4/1	N4	N4, N5	N3-10 YR 4/1	10 YR 4/1 (N5)	10 YR 4/1
Couleur de l'horizon "purée de marron"	10 YR 5/2	10 YR 4/2	10 YR 4/2	-	7,5 YR 4/2	10 YR 4/2
Taches brunes purée de marron jarosite rouges	++ ++ +++ +	+++ +++ - -	+ +++ +++ -	++ + + -	+++ + +++ ++	+++ + ++ -
Coquilles	-	-	-	-	+++	+++
Iron pipes	-	-	-	-	-	+++
Texture	Hétérogène	Argileuse	Argileuse	Argileuse	Hétérogène	Argilo sableuse
(- absent ; + rares ; ++ présent ; +++ abondant)						

C'est la richesse en matière organique, attestée par la présence de fibres, racines et radicules qui confère au sédiment la couleur gris foncé 10 YR 4/1 ou N4. Dans la plupart des carottages effectués dans les affluents de la Casamance, on retrouve les fibres et la couleur gris foncé du sédiment, à de grandes profondeurs (15 m à Baïla, N'Dieba, Bona ...). A Bassid, le matériau de couleur N5 qui constitue le substratum sec et dur n'évolue pas dans la séquence, sauf en Gambie, on trouve généralement, à partir du tanne inondé, un horizon de couleur "purée de marron" qui, dans le code MUNSELL correspond à 10 YR 4/2, mais à Bassid il est plus foncé 7,5 YR 4/2.

Les taches sont de 4 sortes : brunes et rouges, correspondant à des oxydes de fer (goethite et hémateite), "purée de marron", généralement liées à la décomposition des amas fibreux, et jaunes, 2,5 Y 8/6 correspondant à la jarosite. On observe que les taches rouges ne sont présentes que dans les séquences à texture hétérogène (Oussouye et Bassid) et que les taches "purée de marron" sont abondantes dans les séquences de la Casamance, là où la mangrove est en voie de disparition. La jarosite est rare ou absente à Tobor et en Gambie, c'est-à-dire en bordure du bras principal des deux fleuves, là où les sédiments sont relativement jeunes. La couleur de la matrice et les couleurs des taches ont une très grande importance dans la caractérisation des sols de mangroves tropicales.

Dans les Guyanes, par exemple, les argiles marines ont une couleur gris foncé ou gris bleu 5 Y 5/1 ou 4/1, d'où le nom "d'argiles bleues" qu'on leur a parfois donné. Leur maturation donne des taches qui sont différentes selon le mode de dépôt, le site géomorphologique ou la végétation. C'est ainsi que VANAMSON (1966) a classé les sols d'argiles marines de Suriname d'après la couleur des taches. Il a distingué :

Les argiles à taches brunes	Brown Mottled clays
" " jaunes	Yellow Mottled clays
" " jaune-brun	Brownish yellow Mottled clays
" " brun-jaunes	Yellowish-brown Mottled clays
" " rouges	Red Mottled clays

De même, PONS (1969), en étudiant les sols sulfatés acides de Thaïlande a montré que la présence ou non de certains minéraux verts, tels que la chlorite, la glauconie ou la chamosite conférerait à l'argile réduite, à pyrites, une couleur qui pouvait permettre de prévoir le développement futur de ces sols par oxydations (tabl. XX).

Tableau XX

Influence des minéraux verts sur l'évolution  
des sols à pyrites de Thaïlande  
(PONS, 1969)

Type d'Argile réduite à pyrite	Couleur	Couleur	Développement par oxydation
Argile tourbeuse ou humifère sans minéraux verts	gris foncé à brun gris foncé	10YR3/1 - 10YR4/1 10YR3/2 - 10Y4/2 N4/0	sols sulfatés acides
Argile, sans minéraux verts	gris foncé à gris	10YR4/1 - 5Y4/1 10YR5/1 - 5Y5/1	sols sulfatés acides
Argile avec peu de minéraux verts	gris foncé à gris vert foncé	5Y4/1 - 5GY4/1	sols intermédiaires
Argile à nombreux minéraux verts	gris vert foncé	5GY4/1 - 5G4/1	sols marins non acides

En ce qui concerne les coquilles ou leurs débris, on notera qu'on n'en a trouvé nulle part dans les séquences de Casamance, bien qu'en profondeur, dans certains carottages, elles soient présentes (Baïla, Diouloulou, Tobor ...). Par contre, dans l'Estuaire du Saloum, la présence de coquilles ou de leurs débris est quasi générale, surtout dans les îles du Gandoul. Ce sont le plus souvent des débris de coquilles d'huitres (*Crassostrea* ou *Gryphaea*, et plus rarement *Arca Senilis*).

Les "iron pipes", tubes racinaires ferruginisés et indurés, soit d'*Avicennia*, soit de *Rhizophora* n'ont été observés que dans la séquence la plus septentrionale, à N'Dimsiroh. Ils sont relativement abondants dans cette partie du Saloum, comme dans le delta du Sénégal, là où l'aridité du climat est très marquée.

En Casamance, les "iron pipes" ont été trouvés dans la vallée de Baïla où ils sont étudiés par AUBRUN (en prép.).

Le gypse, en aiguilles ou sous forme de cristaux de grande taille se trouve au sein de nombreux profils de l'Estuaire du Saloum, ou à la surface, notamment dans les îles du Gandoul. On en trouve aussi dans les anciennes mangroves du delta du Sénégal (marigot de Khant).

En Casamance, la présence de gypse n'a été signalée par aucun de mes prédécesseurs, notamment par J. VIEILLEFON et c'est encore à la sécheresse de la dernière décade qu'il faut attribuer la présence presque générale, à l'heure actuelle, de gypse, en Basse Casamance. Il se présente sous forme d'amas d'aiguilles localisés généralement à la partie inférieure de la "moquette" qui recouvre les anciens tannes herbacés. Nous en avons vu à Oussouye, à Balingore, à Guidel, dans la vallée de la Soungrougrou, à Baïla, dans les Kalounayes ...

L'étude micromorphologique confirmera d'ailleurs la présence généralisée de gypse, dans cette région.

## II - MICROMORPHOLOGIE

A l'occasion d'une tournée commune dans les mangroves du Sénégal, en Mai 1974, avec le professeur PONS, quelques échantillons ont été prélevés à Balingore, à Bassid, en Gambie et dans le delta du Sénégal. Des lames minces ont été exécutées sur ces échantillons au laboratoire de Wageningen selon une méthode qui consiste à remplacer l'eau des échantillons par de l'acétone avant leur imprégnation et leur interprétation a été faite par H.A. KRUL (1976).

### 1. SEQUENCE DE BALINGORE

#### A. SOUS ANCIENNE MANGROVE A RHIZOPHORA MANGLE

2 échantillons ont été prélevés, en surface (0 - 12 cm) et en profondeur (70 - 75 cm).

##### a) La matrice

Les grains du squelette sont peu nombreux - le matériau étant une

argile tourbeuse - et formés de quartz de taille comprise entre 20 et 150  $\mu$ .

Le plasma est formé de minéraux argileux et de matière organique.

Les vides sont constitués par les canaux, mais leur abondance est difficile à établir, à cause de la richesse du profil en matière organique.

#### b) Aspects particuliers

- La *pyrite* est abondante dans tous le profil sous forme de
  - . cristaux intercalaires (framboises) répartis dans la matrice, de taille comprise entre 5 et 100  $\mu$ .
  - . cristaux intercalaires (grappes framboïdales), de taille 100-600  $\mu$ , probablement associés à la matière organique et remplissant parfois les cellules des racines. (Pl. V)
- Le *gypse* est présent sous forme de cristaux intercalaires en étoiles d'aiguilles d'environ 200  $\mu$ .
- La *halite* est présente sous forme de cristaux cubiques, isotopiques et localement en grappes, de taille comprise entre 100-300  $\mu$ .
- La *matière organique* est abondante dans tout le profil.
- Les *diatomées* sont présentes, en petites quantités, de taille avoisinant 50  $\mu$ .
- Les *pelotes fécales* sont présentes en surface (0 - 12 cm).

#### B. SOUS TANNE VIF : CMV 8

3 échantillons ont été prélevés, à 35 - 40 cm, à 50 - 55 cm et à 115 - 120 cm.

#### a) La Matrice

Les grains du squelette sont formés de quartz de taille comprise entre 10 et 100  $\mu$  dans l'échantillon 35 - 40 cm, et de taille plus petite 10 - 80  $\mu$  en profondeur. Le plasma est formé de minéraux argileux et le matériau est une argile fine. Les vides sont essentiellement des canaux remplis souvent de débris racinaires et le diamètre varie de 50  $\mu$  à 2 mm.

#### b) Aspects particuliers

La *pyrite* est abondante, à partir de 50 cm mais son occurrence est différente dans l'échantillon 50 -55 cm et à 115 - 120 cm.

En profondeur, (115 - 120 cm) la pyrite se présente sous forme :

- de cristaux individuels ou petites framboises (> 15  $\mu$ ) dans la matrice ;
- de framboises plus grandes (30 - 80  $\mu$ ) sous formes de chaînes et de grappes dans la masse, probablement associées à la matière organique ;

- de cristaux angulaires (5  $\mu$ ), parfois comme partie d'une framboise ;
- de framboises, remplissant en partie ou entièrement des diatomées ;
- de minuscules framboises (10  $\mu$ ) comme noyau de cellules de plantes (Pl. IV)

A 50 - 55 cm, la pyrite est sous forme :

- de grappes de framboises de taille supérieure à 300  $\mu$ , associées à la matière organique ;
- de cristaux angulaires (5  $\mu$ ) dans les framboises ;
- de noyaux de cellules de plantes, comme petites framboises (10  $\mu$ )
- dans les cellules de plantes de 200  $\mu$ , comme "nuages" de minuscules framboises. (Pl. V)

La *jarosite* n'est présente que dans l'échantillon 35 - 40 cm, sous forme :

- de nodules jarositiques, supérieures à 2 mm, irrégulièrement façonnées ;
- de néo et quasijarositans de diamètre supérieur à 200  $\mu$  ;
- de matériau microcristallin dans les canaux racinaires.

Les *composés ferriques* sont présents en petites quantités dans l'échantillon 35 - 40 cm.

Les *diatomées*, de différents types et de taille supérieure à 50  $\mu$  sont présentes dans tout le profil.

Le *gypse* se trouve aussi dans tout le profil sous forme de cristaux intercalaires, d'étoiles d'aiguilles et de cristaux cubiques de taille comprise entre 50 et 200  $\mu$ .

La *halite* se présente sous forme de cristaux intercalaires de taille supérieure à 200  $\mu$ .

#### C. SOUS ANCIEN TANNE HERBACE - correspondant au profil CMV 10

2 échantillons ont été prélevés : la "moquette" de surface et le niveau immédiatement en dessous : 0 - 3 cm

##### a) La Matrice

Dans les 2 échantillons elle est formée de grains de quartz de taille comprise entre 20 et 80  $\mu$ , de minéraux argileux et de fer.

##### b) Aspects particuliers

Dans la "moquette", la *pyrite* est abondante sous forme :

- de framboises de cristaux angulaires (10  $\mu$ ), comme noyaux dans les cellules des plantes ;

- de "nuages" de minuscules cristaux angulaires dans les cellules de plantes ;
- de framboises ou de grappes de framboises (50 - 200  $\mu$ ) associées à de la matière organique.

La *matière organique* est abondante, sous forme de débris racinaires mais aussi sous forme de cellules de plantes.

Les *diatomées*, de différents types sont abondantes, avec des tailles supérieures à 50  $\mu$ .

Dans l'échantillon 0 - 3 cm, ce sont les *composés ferriques* qui prédominent, ainsi que le *gypse* et la *halite*.

D. EN RESUME, les observations micromorphologiques montrent que la pyrite est abondante dans toute la séquence, sous forme framboïdale et souvent liée à la matière organique qui, elle aussi, est abondante.

La jarosite n'est présente qu'en surface dans le tanne vif, ainsi que les oxydes ferriques.

La présence du gypse, de la halite et des diatomées est générale dans la séquence, comme le confirme d'ailleurs, l'observation au MEB des échantillons de cette séquence (pl. VII).

On remarquera enfin que la présence de pyrite et de diatomées dans la moquette semble indiquer que cet échantillon est, en grande partie, formée de sédiment arraché à la slikke et déposé dans la zone déprimée par les marées exceptionnelles.

## 2. GAMBIE

2 échantillons ont été prélevés à 20 - 30 cm et 50 - 60 cm sous mangrove à *Avicennia* et *Rhizophora*, correspondant au profil CMG 2 sur la rive gauche de la Gambie.

### a) La Matrice

Les grains du squelette sont constitués de quartz et de mica. La taille moyenne des grains est de 20 - 50  $\mu$ . Le matériau parental est une argile fine.

Le *plasma* est formé de minéraux argileux et d'un mélange minéraux argileux-matière organique.

Les *vides* diminuent en nombre et en taille avec la profondeur. On trouve des canaux dans les 2 échantillons de taille variant de 100  $\mu$  à 5 mm.

### b) Aspects particuliers

La *pyrite* est abondante dans tout le profil, sous forme :

- de grappes framboïdales associées à la matière organique, de taille comprise entre 100  $\mu$  et 1 mm ;

- de framboises régulièrement réparties dans la matrice.

La quantité de pyrite croît avec la profondeur. La pyrite oxydée "in situ" s'observe dans l'échantillon 20 - 30 cm comme des glaebules bruns soudés et entourés d'un anneau diffus de fer amorphe.

Des *nodules ferriques*, de tailles comprises entre 100  $\mu$  et quelques mm, sont présentes dans l'échantillon 20 - 30 cm.

Des *nodules jarositiques*, entourant les nodules ferriques sont présentes à 20 - 30 cm.

La *silice secondaire* s'observe dans cet échantillon sous forme de nodules de quelques centaines de microns se trouvant souvent à l'intérieur des nodules jarositiques.

*Halite* et *gypse* sont présents dans tout le profil sous forme cubique (halite) ou d'aiguilles et étoiles d'aiguilles (gypse).

La *matière organique* se présente sous forme de restes de racines, légèrement décomposés dans les 2 échantillons.

Les *pelotes fécales*, souvent riches en pyrite et d'environ 200  $\mu$  de diamètre sont présents en profondeur (50 - 60 cm).

### c) *Interprétation*

Ce profil est caractérisé par une intense activité biologique, qui se manifeste par la présence de nombreux canaux racinaires et de pelotes fécales.

L'oxydation de la pyrite "in situ" se traduit par la présence de glaebules bruns de même taille que les framboises de pyrite. On notera la présence de silice secondaire, due sans doute à la dégradation des argiles, en milieu acide.

On remarquera aussi l'absence de diatomées.

## 3. SEQUENCE DE BASSID

Comme à Balingore, plusieurs prélèvements ont été effectués dans cette séquence.

A. SOUS RHIZOPHORA MANGLE, un échantillon de profondeur (105 - 115 cm) dans l'horizon gris clair N5.

### a) *La Matrice*

Elle est formée de grains de quartz de taille moyenne comprise entre 20 et 100  $\mu$ . On note aussi la présence de grains de taille supérieure à 200  $\mu$ . Le plasma est essentiellement constitué de minéraux argileux et localement d'un mélange argile-matière organique. Les vides sont représentés par des canaux de 100 - 400 microns de diamètre.

### b) *Aspects particuliers*

La *pyrite* est abondante, associée à la matière organique, soit sous forme framboïdale régulièrement répartie dans la matrice, soit en grappes

dans lesquelles des framboïdes sont reconnaissables localement, soit en cristaux cubiques.

La *matière organique* est présente sous forme de racines vivantes et mortes.

Des aiguilles d'un sel, de composition non connue sont présentes.

*c) Interprétation*

La particularité de cet échantillon est la présence de pyrite sous forme cubique. D'après N. VAN BREMMEN, la pyrite cubique ne pourrait se former qu'en l'absence complète d'oxygène dans le milieu alors qu'une certaine quantité d'oxygène est nécessaire pour que la pyrite framboïdale puisse se former.

B. SOUS TANNE INONDE

3 échantillons ont été prélevés : 30 - 40 cm, 35 - 45 cm, 55 - 65 cm.

*a) La Matrice*

Le squelette est formé essentiellement de grains de quartz de taille comprise entre 30 et 150  $\mu$ , avec parfois des grains de taille supérieure à 150  $\mu$ . Le plasma est principalement représenté par les minéraux argileux et localement par un mélange argile - matière organique. Les vides sont constitués par des canaux dont la taille varie de 100  $\mu$  à 1 cm.

*b) Aspects particuliers*

La *pyrite* est abondamment représentée dans tout le profil et particulièrement dans l'échantillon de profondeur 55 - 65 cm, soit sous forme framboïdale, de taille comprise entre 5 et 30  $\mu$ , soit en grappes de 50  $\mu$  à quelques mm, associées à la matière organique.

Les *quasi* et *neoferrans* sont présents dans l'échantillon 35 - 45 cm autour des canaux et leur épaisseur varie de 100  $\mu$  à 2 mm.

L'*oxydation de la pyrite "in situ"* se manifeste par la présence de glaebules de fer de même forme et de même taille que les framboises de pyrite. Localement, ils contiennent encore un noyau de pyrite. On observe aussi des grappes de pyrite partiellement oxydée entourées d'un anneau diffus de fer amorphe.

La *halite* se trouve à 35 - 45 cm et 55 - 65 cm, sous forme de cubes de 50  $\mu$ , remplissant les vides.

La *matière organique* est représentée dans tout le profil sous forme de restes de plantes à différents états de décomposition

*c) Interprétation*

Le profil est très riche en matière organique, principalement en débris de plantes qui datent de la période de sédimentation, parce que la stratification est horizontale.

La pyrite est abondante et ses produits d'oxydation sont des composés ferriques et pas encore la jarosite et l'on note que l'oxydation se forme

surtout autour des canaux.

On observe aussi des produits d'oxydation de la pyrite "in situ", comme en Gambie, principalement des glaebules de fer.

#### C. SOUS TANNE VIF

2 échantillons ont été prélevés à 40 - 55 cm et 60 - 80 cm.

##### a) La Matrice

Le squelette est formé de grains de quartz de taille comprise entre 20 et 200  $\mu$ . Ils sont arrondis à subangulaires. Le plasma est formé d'argile et les vides sont représentés par des canaux régulièrement distribués, de taille comprise entre 100  $\mu$  à quelques mm.

##### b) Aspects particuliers

La *pyrite* est *absente* dans le profil.

Les nodules de *jarosite* sont présents dans tout le profil et leur taille varie de 100  $\mu$  à quelques cm. Leurs limites sont parfois tranchées, parfois diffuses. Dans l'échantillon 40 - 55 cm, ces nodules sont parfois mélangés à des nodules ferriques.

Les nodules *ferriques* ne s'observent que dans l'échantillon 40 - 55 cm. Ils ont quelques cm et sont colorés en rouge vif. Par endroits, on trouve des vides dans ces nodules et des cutanes de cristaux de fer de 10 - 50  $\mu$  de diamètre remplissent ces vides.

La *halite* est présente sous forme de cubes dans le profil.

Le *gypse* se trouve dans l'échantillon 40 - 55 cm sous forme d'étoiles de 200 - 500  $\mu$ .

Des restes de plantes se trouvent dans tout le profil, de même que des *diatomées*, plus abondantes en profondeur qu'en surface.

##### c) Interprétation

On retiendra l'absence de pyrite dans ce profil et la présence de ses produits d'oxydation : ferri-hydroxydes et jarosite. Ces produits ont une distribution zonale. A la partie inférieure du profil, ce sont les neoferrans qui dominent. Dans la partie moyenne, les neo et quasijarositans le long des grands canaux racinaires forment les principaux constituants. Dans la partie supérieure, on a surtout des neoferrans et des nodules ferriques.

#### D. SOUS TANNE HERBACE

6 échantillons ont été prélevés : à 12 - 15 cm, 40 - 45 cm, 70 - 73 cm, 75 - 78 cm, 83 - 86 cm, 112 - 115 cm.

##### a) La Matrice

Le squelette est formé de grains de quartz de 20 - 150  $\mu$ . Au dessous de 78 cm, la taille des grains est supérieure à 600  $\mu$ . Les 4 échantillons de surface (12 à 78 cm) sont très sableux et n'ont pas de plasma.

Le plasma n'est présent qu'à partir de 75 cm et constitué essentiellement de minéraux argileux.

#### b) Aspects particuliers

La *pyrite* est absente de tous les échantillons.

*Quasi* et *néoferrans* sont présents sporadiquement à 12 - 15 cm et entre 75 - 86 cm et en petites quantités en profondeur. Leur diamètre varie de 20 à 200  $\mu$ .

Les *nodules ferriques* sont abondants dans l'échantillon 75 - 78 cm et en petites quantités entre 12 et 73 cm. Leur taille croît avec la profondeur, de 100  $\mu$  à 1 cm. Des cristaux de goethite sont présents dans les nodules à 70 - 73 cm et 83 - 86 cm.

Les *neojarositans* se présentent sporadiquement dans l'échantillon 83 - 86 cm, en combinaison avec les quasiferrans. Leur diamètre est de 100  $\mu$ .

Les *nodules de jarosite*, de taille comprise entre 200 et 500  $\mu$  sont présents entre 75 et 86 cm et sont souvent mélangés à du fer amorphe.

Le *gypse* est présent sous forme de cristaux intercalaires entre 75 et 115 cm, associé à de la *halite*.

De même les *diatomées* se trouvent dans les échantillons de profondeur (75 - 115 cm).

#### c) Interprétation

La *pyrite* est oxydée très profondément et les produits d'oxydation sont : la jarosite, la goethite, les hydroxydes ferriques et le gypse.

Toute la partie supérieure du profil est très sableuse.

## 4. CONCLUSION

La figure 18 résume les principales observations micromorphologiques pour les deux séquences : Balingore et Bassid.

On remarque que la *pyrite* est présente dans toute la séquence de Balingore toujours sous forme framboïdale alors qu'à Bassid où elle est parfois sous forme cubique, elle disparaît dans le tanne vif.

A Balingore comme partout en Casamance, les produits d'oxydation de la *pyrite* sont exclusivement la jarosite et les oxydes ferriques alors qu'en Gambie et à Bassid, on observe la présence de certains produits d'oxydation "in situ" de la *pyrite* qui sont les glaebules de fer, la goethite ..

Par ailleurs, on remarque que, paradoxalement, le gypse est plus abondant en Casamance qu'en Gambie et dans le Saloum.

MICROMORPHOLOGIE DE 2 SEQUENCES

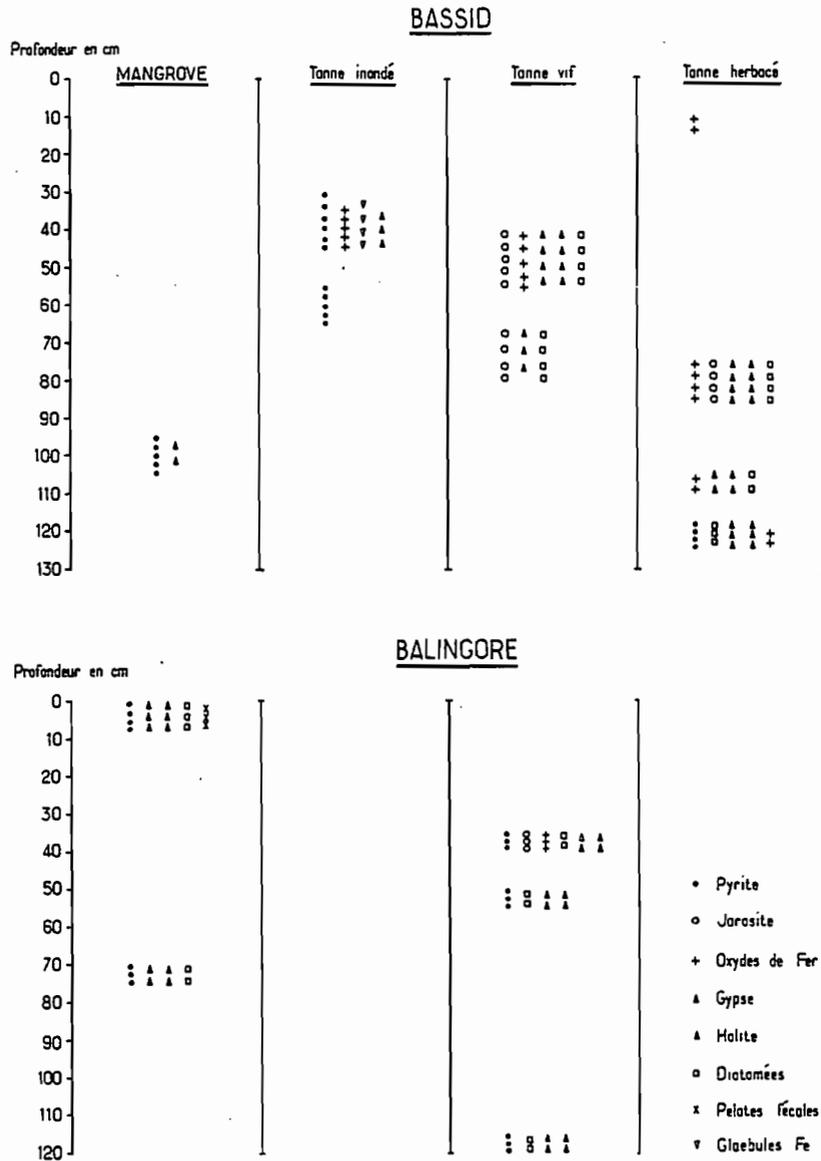


Fig. 18 - Schéma résumant les observations micromorphologiques à BALINGORE et à BASSID

## 5. CONCLUSION GENERALE

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 radicules de couleur foncée, sans tache et à consistance fluide qui constitue en quelque sorte le matériau original, on observe que celui-ci se différencie de la manière suivante :

- a) A la base, le matériau fibreux, réduit se retrouve dans toute 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.

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.



## Chapitre IV

## LES CARACTERES PHYSIQUES DES SOLS DE MANGROVES

### 1. LA TEXTURE

Quand on parle de mangroves, on imagine généralement la vase, c'est-à-dire, un matériau fluide, argileux, collant et gorgé d'eau. C'est effectivement le cas le plus fréquent et, qu'il s'agisse des mangroves des Guyanes, du Gabon, de Thaïlande ou de Malaisie, etc... nous avons généralement observé un matériau très fin, argileux ou argilo-limoneux. Au Sénégal, le sédiment de la mangrove n'est ni homogène, ni généralement argileux. Tout au plus, peut on dire qu'en Casamance, la vase est plus ou moins argileuse et que dans le Saloum elle est plus ou moins sableuse.

#### A. LES FORAGES PROFONDS

Sur la trentaine de forages profonds effectués dans toute les mangroves, cinq présentent une lithologie homogène et argileuse ; quatre d'entre eux sont localisés en Casamance, et en amont de Ziguinchor, dans les vallées de la Soungrougrou et de Guidel, le cinquième est situé en Gambie. Dans tous les autres forages, le sédiment est hétérogène et l'on note que plus on va vers la mer, plus le sable l'emporte sur l'argile (Bandiala, Ehidi, Diouloulou), mais en règle générale, le sédiment est, soit argileux en surface et sableux en profondeur, soit caractérisé par une alternance de lits sableux et de lits argileux (Baïla).

#### B. LES SEQUENCES

Nous rappellerons brièvement quelques définitions : la texture du sol est définie par les classes granulométriques isolées par l'analyse mécanique. On définit trois grandes classes granulométriques : les *sables* grossiers de 2 mm à 200  $\mu$  et fins de 200  $\mu$  à 50  $\mu$ ) - les *limons* (grossiers de 50 à 20  $\mu$  et fins de 20 à 2  $\mu$ ) - la *fraction argileuse*, inférieure à 2  $\mu$ . A partir des données de l'analyse granulométrique, on construit des triangles de texture qui définissent des unités ou classes de texture suffisamment distinctes pour que chaque classe (ou ensemble de classes) rende compte de propriétés analogues, physiques ou hydriques. Il existe plusieurs types de triangles de texture et nous avons adopté le triangle international utilisé par tous les pédologues.

On remarquera que sur les six séquences étudiées, trois ont une texture homogène et argileuse : Gambie, Balingore et Tobor, alors que pour les deux séquences du Saloum (Bassid et N'Dimsiroh) et celle de Oussouye, en Casamance, la texture est hétérogène (fig. 19).

##### a) Tobor

C'est la séquence dont la texture est la plus fine et composée presque exclusivement d'argile et de limon fin. L'ensemble de ces deux fractions inférieures à 20  $\mu$ , avoisine 90 % et la fraction sableuse est inférieure à 5 %. Toute la mangrove située en amont de Ziguinchor est très argileuse, comme nous avons pu le constater, en étudiant la vallée de

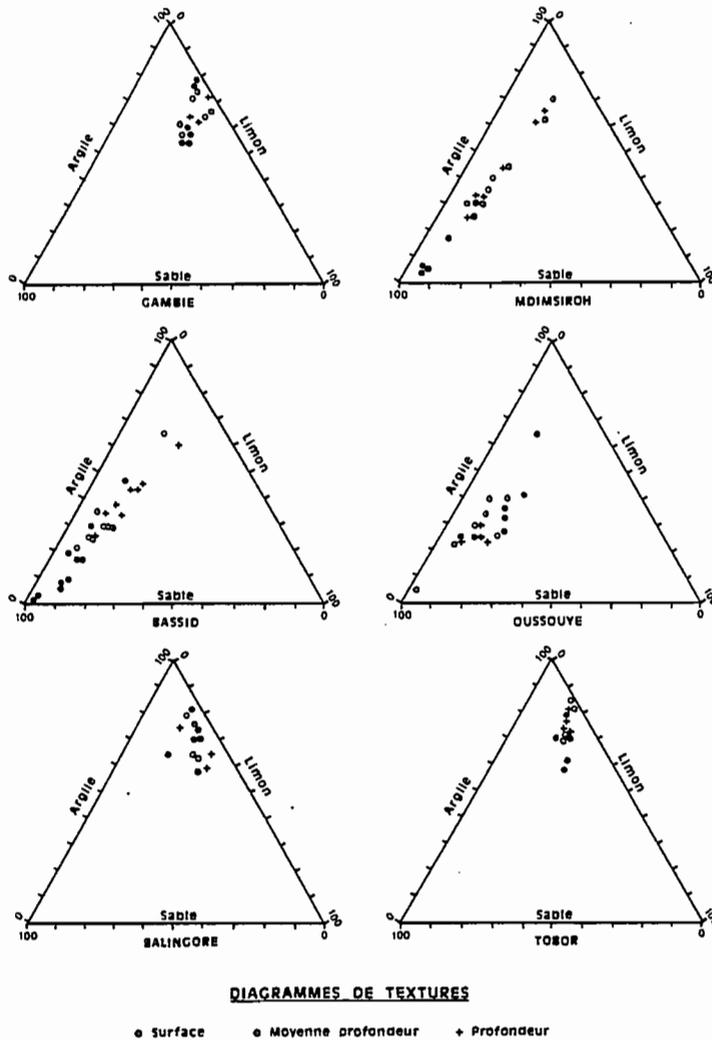


Fig. 19 - Diagrammes texturaux des sols - des séquences

Guidel, les Kalounayes et la vallée du Soungrougrou. Il semblerait que, compte-tenu du faible débit du fleuve Casamance, la plus grande partie des sédiments fins soit arrêtée par l'étranglement de Ziguinchor.

### b) Balingore

Comme à Tobor, la texture est fine, mais la proportion de limon fin légèrement plus élevée. La fraction fine argile-limon représente 90 à 95 % de la terre fine. On note peu de variations dans la séquence, sinon une légère augmentation de la fraction sableuse en surface dans le tanne herbacé.

### c) Gambie

La texture est argileuse mais plus riche en limon fin qu'en Casamance dont le tanne s'élève jusqu'à environ 30 %. Dans la séquence, on note que le sol de tanne est plus riche en argile que le sol de mangrove (70 - 80 % d'argile dans le tanne et 60 - 70 % dans la mangrove). Une cartographie récente de toute la zone alluviale fluviomarine à mangrove de la Gambie (THOMAS-VARLEY, 1981) montre la très grande homogénéité texturale de la mangrove gambienne qui, sur des milliers d'hectares, est argileuse.

d) *Oussouye*

Située à l'aval de Ziguinchor, dans une des vallées affluentes de la rive gauche, proches de l'embouchure de la vallée du Kamobeul, cette séquence est représentative d'une zone où prédominent les cordons littoraux sableux qui ont isolé récemment les mangroves de la mer. Sur la figure 20, on observe aisément la grande hétérogénéité texturale, tant dans la séquence, qu'au niveau du profil lui-même. Dans la mangrove, l'horizon de profondeur est purement sableux, mais dans l'ensemble le matériau est un limon, traduction du "loam" anglo-saxon, c'est-à-dire un matériau à texture "équilibrée" défini comme étant composé de 7 à 27 % d'argile, de 20 à 50 % de limon ("silt" des anglo-saxons), et moins de 52 % de sable. En fait, pour la plupart, ce sont des limons argilo-sableux ou argileux. Font exception, l'horizon de profondeur du profil 8 qui est du sable limoneux et à moyenne profondeur du profil 6 une argile sableuse. Un examen détaillé des résultats analytiques montre qu'il s'agit généralement de sols à dominance de sables fins plus ou moins argileux.

e) *Bassid*

De toutes les séquences, c'est celle qui présente la plus grande hétérogénéité texturale et une analyse des résultats pour 17 profils et 3 horizons donne la répartition suivante :

Tableau XXI

Nombre d'échantillons

Texture Horizon	Argileuse	Limon Argileux	Limon Argilo- Sableux	Limon Sableux	Sable Limoneux	Sable
Surface				6		11
Moyenne Profondeur	7	1	6	3		
Profondeur	2	5	6	1	2	

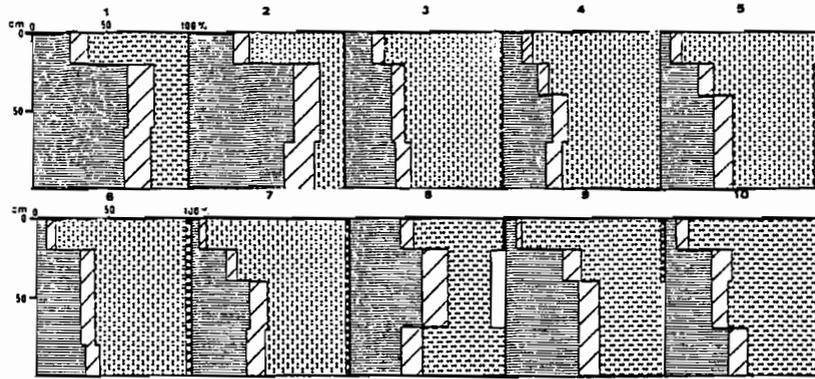
On constate que l'horizon de surface a une texture très différente des horizons profonds et l'étude sédimentologique effectuée avec M. DELAUNE nous permettra d'émettre quelques hypothèses sur le mode de sédimentation.

En profondeur, la fraction argileuse est assez bien représentée et l'on a de l'argile, du limon argileux ou du limon argilo-sableux.

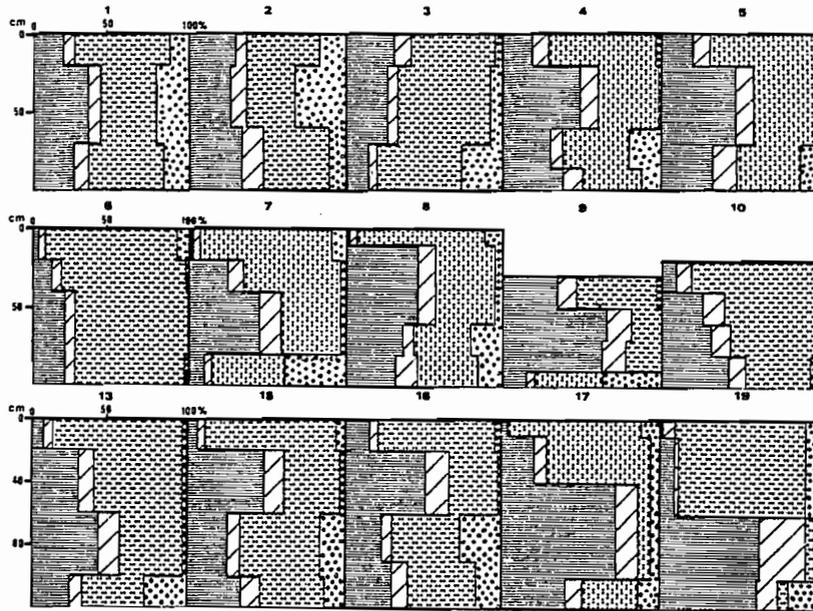
f) *N'Dimsiroh*

Cette séquence présente une relative homogénéité texturale. La mangrove est argileuse et toute la partie tannée est constituée par du limon. Limon sableux en surface et limon argileux en profondeur. L'examen détaillé de la répartition des 5 fractions granulométriques montre une très nette prédominance des fractions limon grossier + sable fin, c'est-à-dire

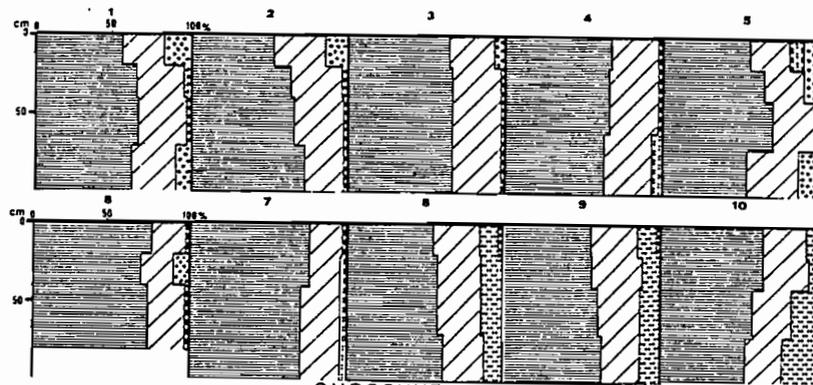
N' DIMSIROH



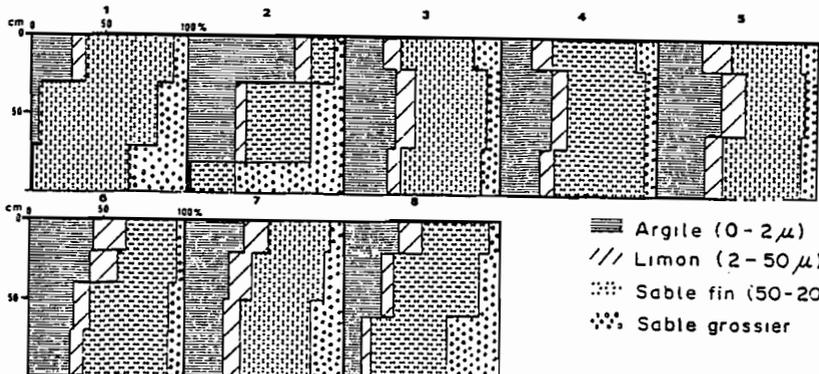
BASSID



GAMBIE



OUSSOUYE



- Argile (0-2 $\mu$ )
- /// Limon (2-50 $\mu$ )
- ⋯⋯ Sable fin (50-200 $\mu$ )
- ⋄⋄ Sable grossier

Fig. 20 - Profils granulométriques de quelques séquences.

de la fraction comprise entre 50 et 200  $\mu$  qui représente, en surface notamment, de 80 à 90 % de la terre fine.

#### g) Conclusion

Les sédiments et les sols des mangroves et tannes sont caractérisés :

- en Gambie, par une texture très homogène et très argileuse ;
- en Casamance, par une texture argileuse relativement homogène dans la partie située en amont de Ziguinchor et dans certaines vallées affluentes de la rive droite du fleuve (Bignona, alors que dans les zones proches de l'embouchure et dans les vallées affluentes de la rive gauche (Kamobeul, Nyassia), elle est hétérogène et de plus en plus sableuse à mesure que l'on se rapproche de la mer ;
- dans l'estuaire du Saloum, par une texture hétérogène à dominance sableuse.

## 2. ETUDE GRANULOMETRIQUE DES SEDIMENTS DE L'ESTUAIRE DU SALOUM

Cette étude a été réalisée avec M. DELAUNE, sur 4 séquences choisies en fonction de leur position par rapport à la pleine mer. 2 séquences : Bandiala et Fathala sont situées, sur l'un des bras de mer : le Bandiala, à proximité de l'embouchure, la séquence de Bassid et la séquence de N'Dimsiroh étant situées dans les zones internes.

Pour chaque séquence, on a étudié l'évolution granulométrique sur un horizon de surface et un horizon de profondeur.

### A. LA TEXTURE DES SEDIMENTS

En reportant sur un diagramme triangulaire simplifié (fig. 21) les teneurs respectives en argile, limon et sables, on remarque que les 2 séquences proches de la mer ont une composition granulométrique voisine et sont essentiellement sableuses.

Les 2 autres séquences sont nettement plus hétérogènes et constituées de sédiments plus fins. On note que la majorité des échantillons de la séquence de Bassid se situe dans la partie centrale du diagramme, indiquant bien que les sédiments de cette séquence comprennent un mélange, en proportions presque égales de particules fines, moyennes et grossières. La séquence de N'Dimsiroh, (CMN) est de texture fine, en grande partie limoneuse. Il semble donc bien s'établir une évolution granulométrique entre les 4 points étudiés :

- les deux séquences proches de la mer sont sableuses ;
- dans les zones internes de l'Estuaire, la sédimentation est plutôt limono-argileuse et, apparemment de plus en plus fine, à mesure que l'on s'éloigne de la mer.

Par ailleurs, au sein de chaque séquence, les sédiments de surface sont plus grossiers que les sédiments profonds.

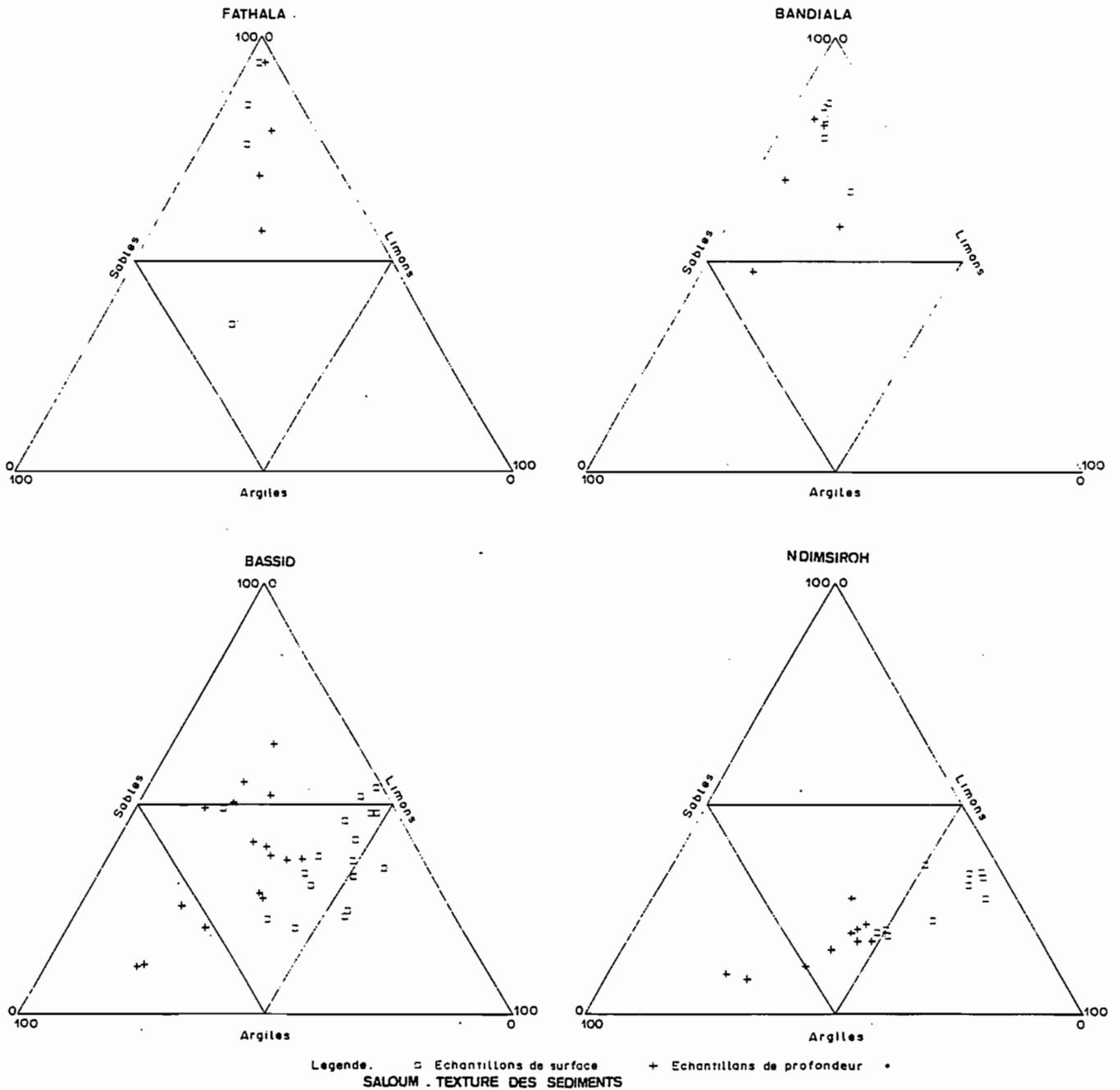


Fig. 21 - Texture des sédiments du SALOUM

### B. ETUDE GRANULOMETRIQUE DETAILLEE

Elle a consisté à étudier, d'une part, l'évolution des paramètres fractilaires en surface et en profondeur, d'autre part la dynamique de la sédimentation à partir des indices d'évolution de RIVIERE (1977).

#### a) Evolution des paramètres fractilaires

Les fractiles sont les valeurs des diamètres des particules correspondant à des pourcentages pondéraux particuliers dont le plus impor-

tant est la médiane (ordonnée 50 %). 4 fractiles ont été prises en compte, Q 25, Q 50, Q 75, Q 90 et on a comparé leur répartition en surface et en profondeur (fig. 22).

L'étude de l'évolution des paramètres fractilaires le long des 4 séquences confirme les observations faites à partir des diagrammes triangulaires, à savoir une augmentation de la finesse des dépôts vers les zones internes de l'Estuaire

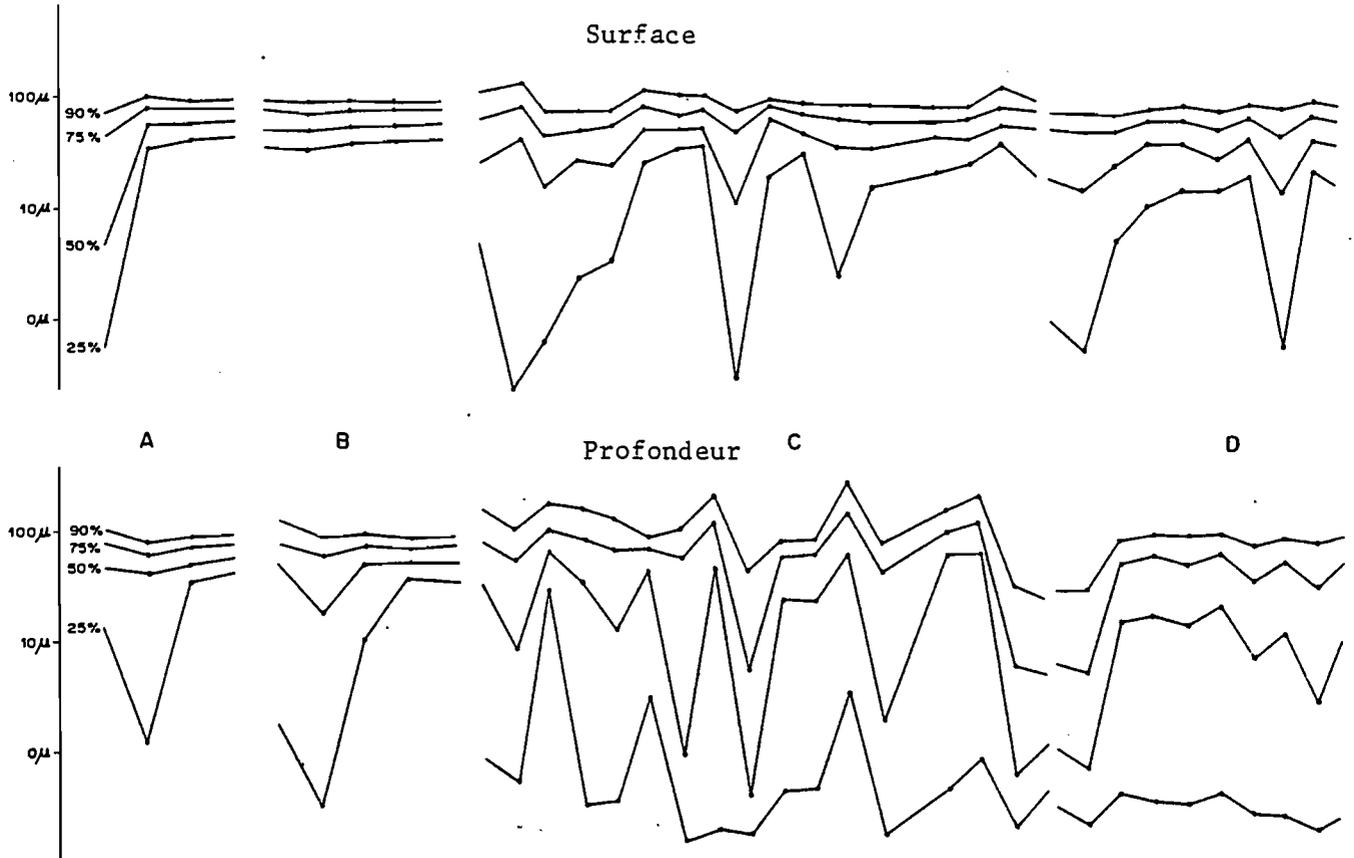


Fig. 22 - Evolution des paramètres fractilaires  
(A. BANDIALA - B. FATHALA - C. BASSID - D. N'DIMSIROH)

*b) Etude dynamique de la sédimentation à partir des indices d'évolution*

Les courbes granulométriques cumulatives semi-logarithmiques peuvent être représentées par une fonction de la forme  $Y = aX^N + b$  dans laquelle l'exposant  $N$ , appelé "indice d'évolution" (RIVIERE, 1977) est représentatif des conditions dynamiques du milieu de sédimentation.

Un paramètre fractilaire  $\bar{X}$  (moyenne logarithmique), qui comme la médiane est un paramètre de grossièreté peut être couplé à  $N$ . La corrélation  $\bar{X}/N$  est caractéristique du milieu de dépôt.

Pour chaque point de prélèvement l'indice d'évolution  $N$  a été cal-

culé par itération sur la totalité de la courbe. Pour rendre les résultats plus homogènes, les courbes cumulatives ont été préalablement recalculées en prenant pour point de départ ( $Y = 0$ ) sur l'axe des abscisses  $x = 0,063$  microns (courbes en dimensions équivalentes - RIVIERE, 1977, op. cit.).

La valeur de la moyenne logarithmique  $\bar{X}$  a également été calculée pour chaque échantillon pour déterminer la corrélation  $X/N$ .

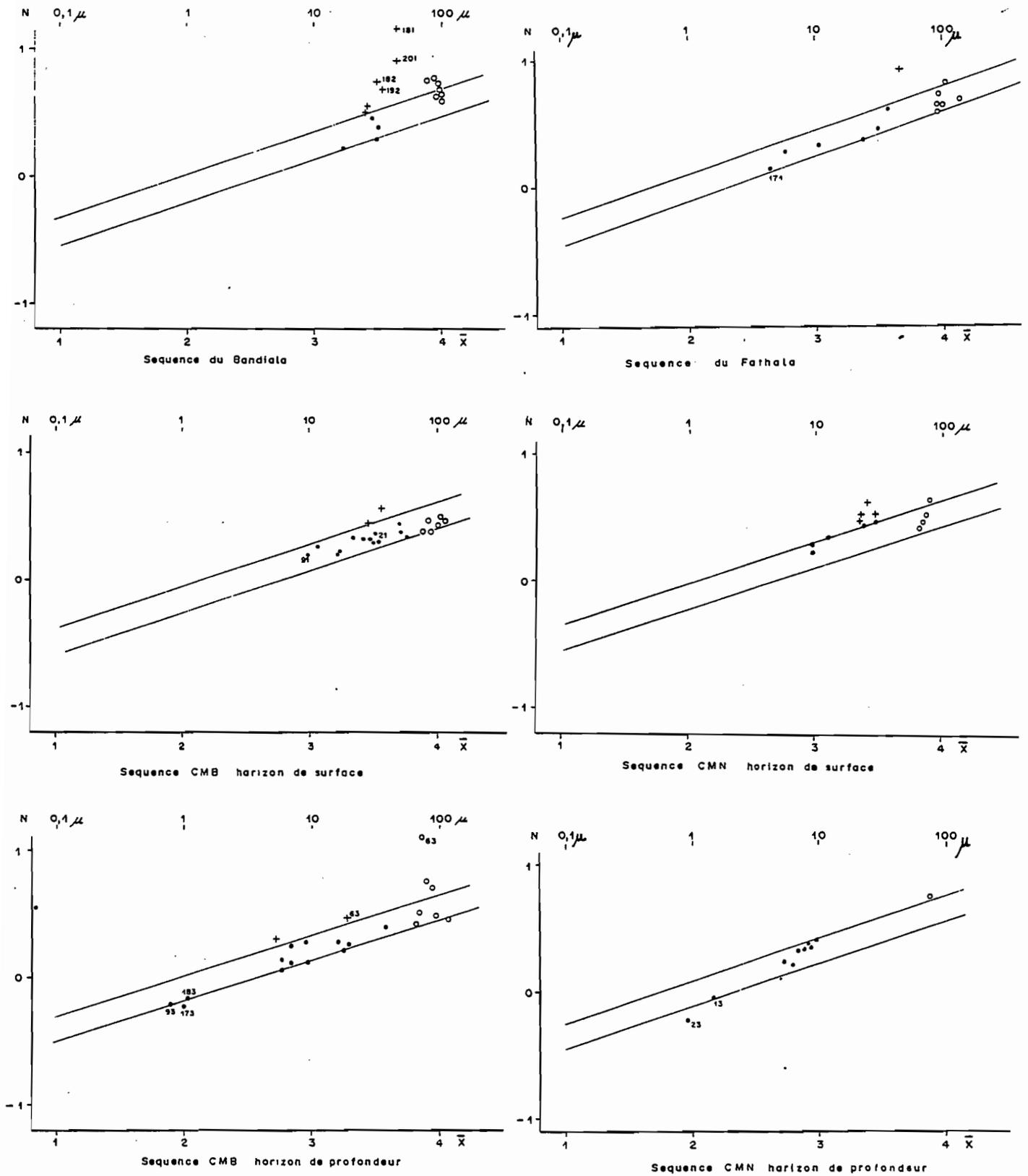
La même opération (calcul de  $N$  et de  $\bar{X}$ ) a été effectuée sur la fraction sableuse de quelques niveaux, ainsi que le calcul approché de  $N$  sur la fraction fine.

Par ailleurs, RIVIERE (1977, op. cit.) a constaté qu'il existait une bonne corrélation entre l'indice d'évolution  $N$  et la moyenne logarithmique  $X$ . La figure montre la position occupée, sur la droite de régression, par les sédiments en fonction du milieu transporteur. Nous avons reporté sur un graphique semblable les corrélations  $N/\bar{X}$  des sédiments du Sine Saloum afin d'en déterminer l'évolution granulométrique. (Fig. 23)

On constate que c'est l'horizon de profondeur qui rend le mieux compte de l'état de la sédimentation ancienne. Les apports étaient alors essentiellement argilo-limoneux et à évolution granulométrique normale (les échantillons sont placés à l'intérieur de l'intervalle de confiance de la droite de régression). Les valeurs des indices d'évolution montrent que le milieu de dépôt était dans l'ensemble un milieu de haute énergie. Les quelques points, à indice d'évolution négatif correspondent aux niveaux à enrichissement en particules fines et leurs places - variables d'une séquence à l'autre - montrent que le milieu est très fluctuant. Ces sédiments fins se déposaient dans des zones calmes délimitées par des dépôts sédimentaires plus grossiers qui devaient former des bourrelets parallèles au rivage. L'analyse séparée de la fraction fine et de la fraction sableuse rend compte d'un phénomène de "piégeage" des éléments fins par les éléments grossiers. BALTZER (1983) explique ce phénomène par la formation d'un micro environnement caractérisé par le milieu de dépôt. Il se produirait à l'arrivée dans ce milieu deltaïque un phénomène de détente avec diminution du courant, favorable à la décantation de limons fins et argiles.

Ce n'est que dans les zones externes (Bandiala et Fathala) que l'influence marine se fait sentir, avec l'élimination de la fraction limoneuse et la formation d'un stock sableux homogène. Les horizons de surface montrent une évolution différente. En effet, les apports fluviatiles ayant cessé, les sédiments actuels sont remaniés uniquement par les courants de marée. Leur action se traduit par une remise en mouvement des sédiments par les vagues amenant la perte progressive de la fraction fine qui se trouve remise en suspension et éliminée. Les valeurs des indices d'évolution illustrent bien ce phénomène, elles sont supérieures à celles des sédiments de profondeur. De plus, nous ne trouvons plus en surface, de zones calmes favorables aux dépôts par décantation et la fraction fine, qui avait un faciès par décantation a, en surface, des faciès de transport.

Ainsi, la séquence de Bandiala a un caractère littoral très net, alors que dans les autres séquences, l'action marine est plus ménagée.



---Fig. 23 - Evolution granulométrique  
des sédiments du SALOUM

### 3. MATURATION DES SOLS ET PROPRIETES PHYSIQUES

En 1965, PONS et ZONNEVELD proposent d'utiliser le terme de "pédogenèse initiale" pour caractériser les processus pédogénétiques initiaux qui se produisent dans les dépôts marins et fluvio-marins. En hollandais, ce processus est connu sous la dénomination de "ripping" et sa traduction anglaise est "ripening" qui correspond au tout premier stade de la maturation, au sens pédologique.

Bien que le processus de maturation puisse être divisé en trois catégories : physique, chimique et biologique, on accorde généralement une place importante à la maturation physique parce que, d'une part, ses effets sont irréversibles, notamment la déshydratation du sédiment son tassement, sa consistance et sa structure, d'autre part, elle peut être mesurée par une valeur  $n$  - liée à la teneur en eau, en argile et en matière organique - qui détermine une classe de consistance. Cette valeur est un des éléments de la classification des sols sulfaté-acides, en général et des sols de mangroves, en particulier.

#### A. TENEUR EN EAU - DENSITE APPARENTE

La teneur en eau est exprimée par rapport au sol séché à l'étuve à  $105^{\circ}$  ; elle a été déterminée sur des échantillons prélevés dans des boîtes cylindriques, de volume connu, ce qui nous a permis de calculer, en même temps, la densité apparente.

La figure 24 illustre la variation de la teneur en eau au long des différentes séquences, pour les échantillons de surface et de profondeur. On constate qu'il n'y a pas de règle générale dans cette variation sinon qu'en surface, la teneur en eau est plus élevée dans la mangrove que dans le tanne, surtout en Gambie et en Casamance où les horizons tourbeux se comportent comme de véritables éponges. Les valeurs de la teneur en eau s'élèvent à 300 % et 400 % respectivement en Gambie et à Oussouye. Dans les séquences CMN, CMG et CMV, la teneur en eau est plus élevée en profondeur qu'en surface, alors que c'est l'inverse dans les 3 autres séquences.

En Gambie, le pourcentage d'eau est supérieur à 100 dans toute la séquence en profondeur.

A Bassid, nous avons signalé à propos de l'étude morphologique que les horizons profonds étaient généralement secs ; cela se traduit en effet par des teneurs en eau faibles, nettement inférieures à 50 % dans toute la séquence.

A Balingore, on note une diminution progressive et régulière du pourcentage d'eau en surface de la mangrove au tanne, alors qu'en profondeur, il varie peu et se maintient à plus de 100 dans la plus grande partie de la mangrove.

A Oussouye, la variation de la teneur en eau est brutale, en surface et on passe de 300 à 400 %, dans les profils 1 et 3 à 50 % dans le profil 4 et jusqu'au profil 8, il n'y a presque pas de variation en surface comme en profondeur.

A Tobor, la décroissance de la teneur en eau de la mangrove au tanne est très nette et l'on passe de 300 % à moins de 50 % d'eau.

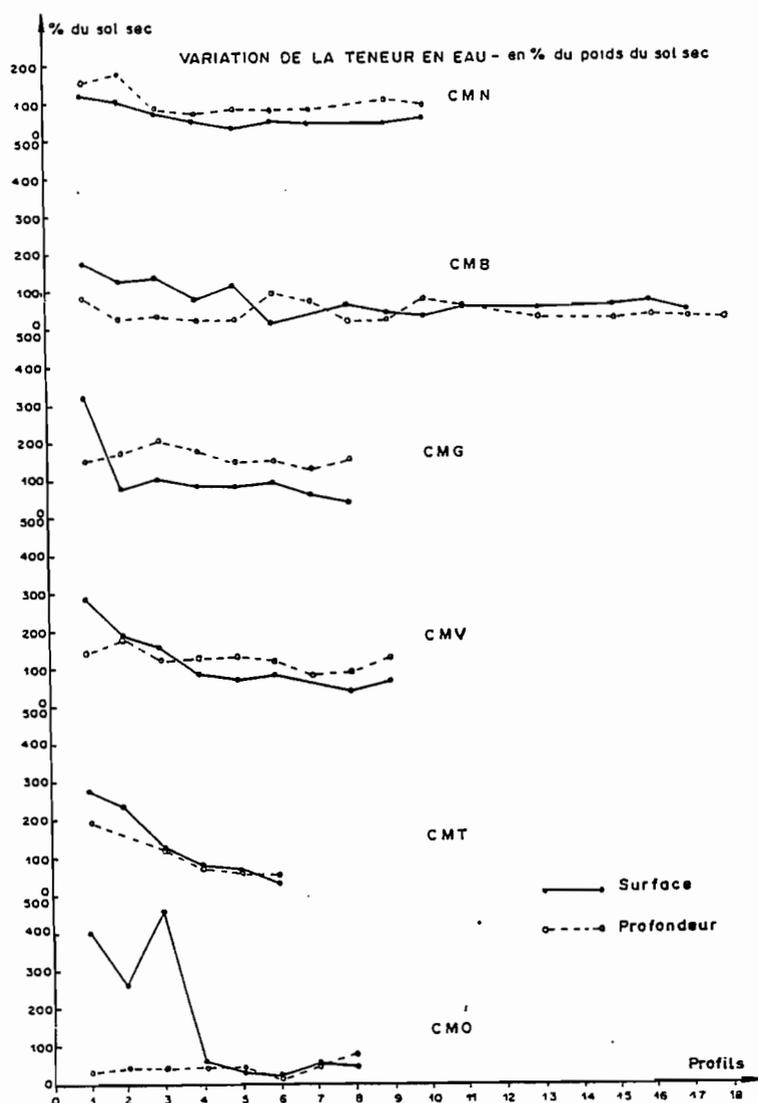


Fig. 24 - Evolution de la teneur en eau dans les séquences

La figure 25 montre que pour 156 échantillons, il existe une relation entre la teneur en eau et la densité apparente, généralement assimilée au poids spécifique apparent de l'échantillon.

#### B. CONSISTANCE

La maturation physique des vases marines a été particulièrement bien étudiée par les néerlandais dans leurs polders, notamment par PONS, ZONNEVELD, ZUUR (1965). Elle comprend tous les processus liés à la déshydratation de la partie colloïdale du sol, notamment la baisse de la teneur en eau par évaporation directe ou surtout par évapotranspiration par les racines des plantes. Cette maturation physique peut être mesurée par un indice  $n$ , lié à la teneur en eau, en argile et à la matière organique par la relation :

$$n = \frac{A - 0,2 Z}{L + 3 H}$$

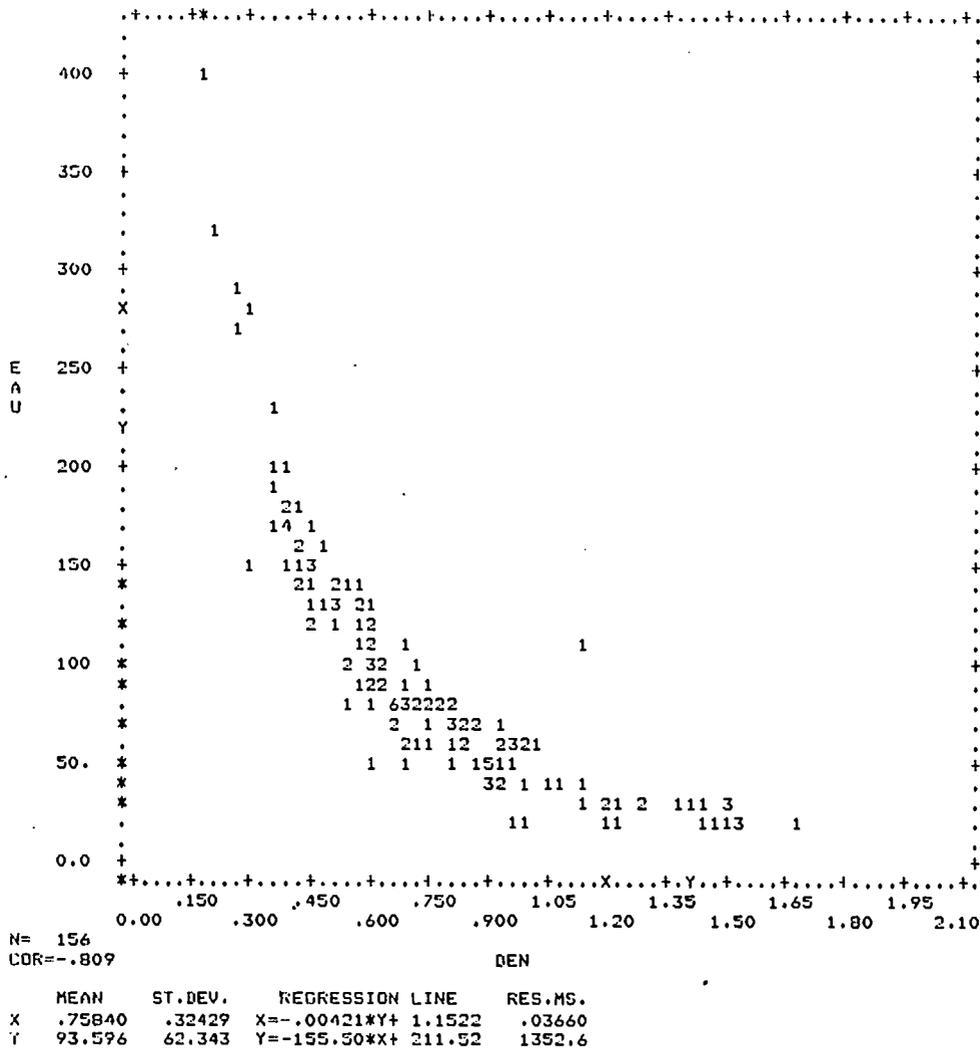


Fig. 25 - Relation teneur en eau - densité apparente

- A = teneur en eau du sol sec en %
- L = teneur en argile en % du sol séché à l'air
- H = teneur en matière organique totale
- Z = 100-L-H (fraction non colloïdale à faible rétention d'eau)

Plus la valeur de n est élevée, moins le sol est développé. C'est ainsi que la vase molle, non sédimentée a un indice n supérieur à 2, alors qu'un sol drainé a une valeur de n inférieure à 0,7.

L'appréciation de la consistance permet de déterminer sur le terrain le degré de développement physique d'un sol et les auteurs ont défini 5 classes de développement correspondant à 5 types de consistance et valables aussi bien sous climat tempéré (Hollande) que sous climat tropical (tabl. XXII). Le degré de maturation peut donc être apprécié sur le terrain et sa valeur est un des éléments essentiels de la classification de ces sols, notamment dans la classification américaine (Soil Taxonomy).

Sur le tableau XXIII, nous avons porté les indices de maturation "n" pour les 6 séquences. On constate que les horizons tourbeux ont tous un

Tableau XXII

## Indice n et classes de consistance

Indice n	Classe de consistance	Classe de développement	Description de la consistance
> 2	1	non développé	Fluide, mou, ne peut être contenu dans la main.
1,4 - 2	2	peu développé	Sans consistance - Très plastique - Passe entre les doigts.
1 - 1,4	3	semi développé	Très malléable - Plastique - Colle à la main, mais s'échappe entre les doigts.
0,7 - 1	4	presque développé	Malléable, un peu plastique Colle à la main. Nécessite de forcer pour passer entre les doigts.
< 0,7	5	développé	Très consistant, résiste à la pression de la main

Tableau XXIII

## Valeurs de n dans les séquences

Séquence	BASSID																				
Vég.	Mangrove				Tanne inondé							Tanne vif					Tanne herbacé				
Profil	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	15	16	17	18	19				
Ech.																					
1	1.9	1.6	1.8	1.7																	
2	1.3	2	3	1.7	1.3				1	0.8	0.3	1.2	1	0.9	1.1	0.5	0.7				
3	1.9	0.3	0.6	1.2	0.3	1.9	0.7	0.2	0.9	1.3	1.2	1.3	0.4	0.4	0.7	0.6	0.8				
4				0.2	2.2 3.3 0.4 0.2 1.1 0.7							0.4 0.2					1.2				
Séquence	N'DIMSIROH										GAMBIE										
Vég.	Mangrove			Tanne inondé							T.V.	Rh.	Av.	T.V.							
Profil	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8			
Ech.																					
1	1.7	1.6	0.4	1.1									2.8	0.9	1.2	0.8	0.9	1.1	0.6	0.4	
2	1.5	1.7	1.3	1	1.7		0.9		0.8	1.1	1.5	1.4	1.2	1.4	1.2	1.1	0.9	0.8			
3	1.5	1.5	1.4	1.2 0.9 1							1.1	1.4	1.8	1.3 1.6 1.2 1.5							
4				1.3	1.2 1.2							1.5	1.2	1.9 1.9 1.9 1.5 1.6							
Séquence	OUSSOUYE								TOBOR					BALINGORE							
Vég.	Mangrove		Mang. décad.	Av.	Tanne vif				M.	T.V. T.V.T.H.											
Profil	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	2	5	8	10				
Ech.																					
1	3.9	1.5	4.3	1.5	0.6	0.1					2	1.7	1.2	1	0.8	1.6 0.9 0.5 0.5					
2	3.2	1.9	0.7	0.9	0.5	0.7									1.6 2 1.6 1.6						
3	2.9		0.8	0.6	1.1 1.2				1.7	1.4 0.9 0.6				1.45 1.8 1.5 1.6							
4									0.1 0.7 1.5												

indice supérieur à 2, soit en surface (Gambie, Oussouye, Tobor) soit, en profondeur, dans le tanne inondé à Bassid. Dans l'ensemble, les profils sous mangroves ont une consistance peu développée. La séquence de Bassid se distingue des autres par le développement marqué de ses horizons profonds lié à leur faible teneur en eau et en matière organique. Dans les séquences argileuses, Gambie et Balingore, en particulier, la consistance est généralement peu développée, à semi développée, sauf en surface dans le tanne où n est légèrement inférieur à 0,7.

En résumé, les sols des 6 séquences sont, dans l'ensemble, peu "maturés" physiquement, malgré une saison sèche très marquée et une forte évapotranspiration, parce qu'en fait, ils sont inondés de manière quasi permanente par les marées. Aussi, la maturation "chimique" de ces sols, caractérisée par la présence de taches de jarosite est-elle par certains côtés, plus avancée que la maturation physique.

#### 4. CONCLUSION

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 n 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.

## Chapitre V

## LE pH ET L'ACIDITE POTENTIELLE DES SOLS DE MANGROVES

### 1. GENERALITES - METHODOLOGIE

Le pH est la donnée essentielle pour caractériser les sols de mangroves tropicales au point que toutes les classifications pédologiques l'ont pris en compte à un haut niveau. On en reparlera au chapitre de la classification, mais on peut déjà rappeler que ces sols sont communément désignés "sols sulfaté-acides", parce que, généralement, leur pH déterminé au laboratoire sur des échantillons séchés à l'air, comme c'est l'usage pour tous les sols, est très acide. C'est en Sierra Leone qu'apparaissent les premières observations sur l'acidité des sols des mangroves, avec DOYNE (1933). Suivent, de 1957 à 1963, les travaux des pédologues de la station de Rokupr sur l'acidité des sols de mangroves poldérisés pour la riziculture (TOMLINSON, 1957 ; HESSE, JORDAN, JEFFERY, (1961-1963). En Gambie, GIGLIOGLI et THORNTON (1965), au Sénégal, BEYE (1973), VIEILLEFON (1974) observent que les sols de mangroves s'acidifient considérablement au séchage, alors que dans leur état naturel, le pH est de 6-7. En Sierra Leone, HESSE (1961) constate que les sols sous *Rhizophora* s'acidifient plus que les sols sous *Avicennia*, lorsque cette dernière est l'espèce pionnière, comme c'est le cas notamment sur les côtes des Guyanes ou la côte orientale de l'Inde. Ceci n'est plus valable pour les mangroves du Sénégal où *Avicennia* est une espèce secondaire remplaçant *Rhizophora*. Toutes ces observations ont conduit les participants au 1er Symposium sur les Sols Sulfaté-Acides de Wageningen (1972) à recommander aux pédologues travaillant sur les sols sulfaté-acides de mesurer systématiquement le pH sur le terrain. Ce que nous avons donc toujours fait en utilisant un pH mètre - Eh mètre portable CORNING équipé d'électrodes combinées Polymetron ou Ingold, à embout renforcé. Les mesures ont été faites immédiatement après la sortie de la carotte prélevée à la pelle à vase (pl. III). On a donc là le pH et le Eh "in situ".

A leur arrivée au laboratoire, les échantillons ont été séchés à l'air et on a procédé à une mesure du pH avec un rapport sol/eau = 1/1, ainsi qu'il a été recommandé au Symposium de Wageningen.

La différence entre le pH mesuré "in situ" et le pH du sol séché représente l'acidité "potentielle" du sol et dans la séquence de Balingore, VIEILLEFON (1977) a montré que tous les échantillons subissent une acidification au séchage ; mais que cet effet est d'autant moins accentué que l'on passe des mangroves aux tannes. Cette notion d'acidité "potentielle" a été prise en considération pour caractériser les sols de mangroves - généralement sous *Rhizophora* - dont le pH voisin de la neutralité "in situ" devient très acide après séchage. Ce sont ceux que l'on désigne communément "sols potentiellement sulfaté-acides".

## 2. EVOLUTION DU pH DES SOLS DANS LES SEQUENCES

La figure 26 illustre l'évolution du pH de la mangrove au tanne pour les échantillons de surface et de profondeur, dans les 6 séquences.

### a) Le pH "in situ"

Il est voisin de la neutralité, dans tout le profil, sous mangrove à Rhizophora et légèrement inférieur à 7, dans les zones internes (Balingore, N'Dimsiroh et Bassid), alors que dans les zones externes, en bordure des cours d'eaux, il est plus élevé et compris entre 7 et 8 (Gambie, Oussouye, Tobor). Cette différence est à attribuer à la durée d'inondation qui est plus importante dans les zones externes que dans les zones internes, à cause du retard de la marée. Moins longtemps inondés, les sols de N'Dimsiroh et de Balingore subissent un début de maturation chimique et donc une légère baisse de pH.

De la mangrove au tanne vif, le pH diminue régulièrement sauf à N'Dimsiroh, où la présence de débris de coquillages contribue à relever nettement le pH au dessus de 7, en profondeur, et à Tobor où la variation est faible de la mangrove au tanne.

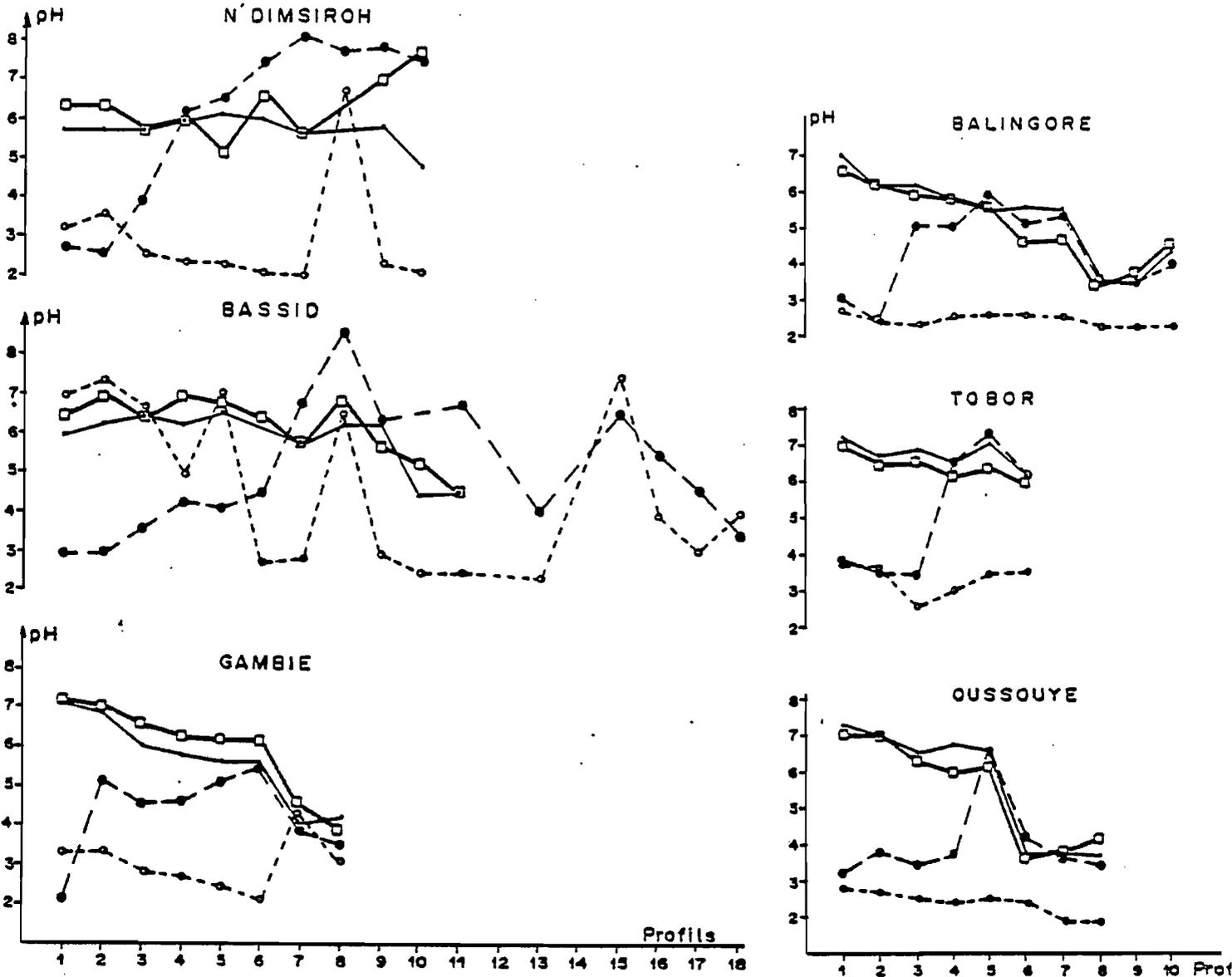
Par ailleurs, dans le Saloum et en Gambie, le pH est plus élevé en profondeur qu'en surface, alors que dans les séquences de Casamance, c'est l'inverse, mais dans tous les cas, la différence est faible entre le pH des 2 horizons et ne dépasse pas une unité. Sauf à N'Dimsiroh et à Tobor, le pH "in situ" est généralement plus acide dans le tanne vif que dans la mangrove, mais cette acidité est variable selon les séquences et l'on observe que les profils les plus acides sont ceux de Balingore et de Oussoye avec un pH de l'ordre de 3,5, alors qu'en Gambie il est de 4 et à Bassid de 4,5 - 5.

Dans l'ensemble, on peut dire que les sols de tannes de l'Estuaire du Saloum sont moins acides que ceux de l'Estuaire de la Casamance, malgré la présence très fréquente de taches de jarosite dans la plupart des profils. Cela est dû, en grande partie, à la très forte salinité des sols de l'Estuaire du Saloum qui comme nous le verrons plus loin, permet de tamponner leur acidité normale.

### b) Le pH du sol séché

Son évolution dans les séquences et sa variation dans les profils est très différente du pH "in situ", et l'on observe que les sols de l'Estuaire du Saloum se distinguent nettement de ceux de Gambie et de Casamance. En effet, tous les échantillons de profondeur en Gambie et en Casamance ont un pH sec très acide, compris entre 2 et 3, alors qu'à N'Dimsiroh et surtout à Bassid, l'évolution du pH dans les séquences se fait en "dents de scie" en liaison généralement avec la présence de coquillages qui contribue à relever le pH. On passe ainsi très rapidement d'un pH très acide de l'ordre de 2 ou 3 dans le profil 7 à un pH 7 au profil 8, dans les 2 séquences. A ces exceptions près, on peut dire que le pH sec de tous les horizons de profondeur est très acide et compris entre 2 et 3 et que l'acidité potentielle de ces horizons, dans la mangrove et le tanne inondé est très élevée puisque leur pH "in situ" est généralement compris entre 6 et 7.

En surface, le pH sous mangrove à Rhizophora est très acide et donc identique à celui de l'horizon de profondeur, il augmente ensuite progres-



- pH "in situ" - surface
- -●- - pH sec - surface
- pH "in situ" - profondeur
- -□- - pH sec - profondeur

- Fig. 26 - Evolution du pH dans les séquences.

sivement dans la mangrove à *Avicennia* et le tanne inondé pour s'abaisser dans le tanne vif où pH "in situ" et pH sec sont sensiblement identiques.

On pense généralement que dans les sols de mangroves, le pH sec est inférieur au pH "in situ" et c'est notamment le cas des sols des séquences de Gambie et de Casamance, mais il n'en est plus du tout de même dans le Saloum, où à N'Dimsiroh et à Bassid, comme dans de nombreux autres profils observés au cours de nos prospections, le pH sec des horizons superficiels est le plus souvent nettement supérieur au pH mesuré "in situ". Cela est dû au fait que les sulfates - insolubles ou solubles - responsables de l'acidité de ces sols, sont en partie lessivés des horizons superficiels et que, par contre, au séchage cristallisent des sels, comme la halite et le gypse, résultant de l'hypersalinité des nappes et des sols.

#### *c) Acidité naturelle ou provoquée - Causes de l'Acidification*

Nous avons vu que de la mangrove au tanne vif, le pH "in situ" allait en décroissant, d'une manière générale, du moins pour les horizons superficiels. Il y a donc là une évolution naturelle vers l'acidité qu'on pourrait appeler dans ce cas, la "tannification" des mangroves. Cette "tannification" naturelle peut aussi être le résultat d'un changement climatique prolongé et c'est ainsi que la séquence de Balingore que nous avons étudiée est nettement différente de celle qu'avait suivie VIEILLEFON de 1966 à 1971, tant du point de vue végétation que du point de vue chimique et notamment du pH. En effet, nous avons pu montrer (MARIUS, 1979) en suivant de manière régulière cette séquence de 1974 à 1978, pendant les années de sécheresse que le pH "in situ" qui variait de 6,5 - 7 dans la mangrove à 6,7 - 4,9, dans le tanne vif avait sensiblement baissé au cours des années et qu'en Mai 1978, il était inférieur à 6 dans la mangrove et de l'ordre de 3 - 3,5 dans le tanne vif et qu'en particulier l'acidité avait surtout atteint les horizons intermédiaires (à partir de 30 - 40 cm), caractérisés par la présence de taches "purée de marron" et une consistance de beurre.

Dans certaines régions du monde où ces sols avaient été transformés en polders pour l'agriculture (Guyana, Suriname, Sierra Leone, Thaïlande, Malaisie, Sénégal) on a souvent observé une baisse du pH, notamment quand la végétation portée par ces sols était des *Rhizophora* (Sierra Leone). Il s'agit là d'une acidité provoquée et en Casamance, cette acidification, souvent brutale et marquée - le pH pouvant être inférieur à 3 - a été observée et étudiée par G. BEYE (1972), dans le polder de Medina et par nous-même à Tobor (1976). A Tobor un polder aménagé sur une mangrove à *Rhizophora mangle* avec un système de drainage profond a vu le pH de son sol "in situ" passer de 6,5 à 2, en moins de 2 ans et a dû être définitivement abandonné.

Dans les Guyanes, où nous avons observé ces sols, les problèmes d'acidification ne se posent pas dans la mangrove même qui est à dominance d'*Avicennia*, mais dans les marais internes à forte accumulation de matières organiques tourbeuses (MARIUS et al., 1968). Toutes les recherches menées pour trouver les causes de cette acidification ont mis en évidence que c'était l'oxydation des sulfures et polysulfures de fer et notamment de la pyrite, accumulés dans ces sols qui était à l'origine de leur acidité (DENT, 1947 ; TOMLINSON, 1957 ; HART, 1959, 1961, 1962, 1963 ; JEFFERY, 1960-61 ; HESSE, 1961 ; JORDAN, 1964) pour la Sierra Leone, (DOST, 1963 ; GUIBAN, 1788 ; LEVEQUE, 1968 ; MARIUS, 1969 ; PONS,

1963, 1970 ; PONS et al., 1965) pour les Guyanes, (VAN BREEMEN, 1972, 1976) pour la Thaïlande.

Nous reviendrons, au pH et à l'acidité, en traitant des problèmes du soufre. Par ailleurs, la végétation semble jouer un rôle important dans l'évolution du pH au séchage, comme nous l'avons signalé au début de ce chapitre. En effet, HESSE (1961) avait déjà observé, en Sierra Leone, que les sols sous *Avicennia* s'acidifiaient moins que les sols sous *Rhizophora* et nos observations en Guyane (1968) comme sur la côte orientale de l'Inde (1982) montrent que sous *Avicennia*, le séchage des échantillons ne provoque pas une baisse du pH et les évaluations de KAWALEC (1973) montrent que sur environ 500 millions d'hectares de sols de mangroves, dans le monde, 12,5 millions d'hectares seraient "potentiellement sulfaté-acides" dont près de 3 millions sur les côtes africaines où *Rhizophora* est largement dominant.

### 3. EVOLUTION DU Eh DES SOLS DE SEQUENCES

Dans les sols sulfaté-acides, la mobilité des éléments comme le fer, le soufre, l'aluminium est liée, non seulement au pH mais aussi au potentiel redox, défini par le Eh.

C'est à ZOBELL (1946) qu'on doit les premiers travaux concernant l'équilibre des minéraux en fonction du Eh et du pH. PONNAMPERUMA (1964, 1967 ...) a étudié de manière détaillée l'équilibre du potentiel redox dans les sols submergés périodiquement. VIEILLEFON (1974) a étudié les variations du Eh dans la séquence de Balingore en fonction de la hauteur de la nappe et a montré que les relations Eh-pH sont en grande partie, liées d'une part aux alternances d'engorgement et d'aération que commandent les marées, d'autre part à l'alternance climatique. Dans la séquence mangrove-tanne, le fer est lié au soufre sous forme de deux minéraux caractéristiques : la pyrite  $\text{FeS}_2$  et la jarosite, un sulfate double de fer et de potassium. Les relations de stabilité de ces minéraux, ainsi que de la goéthite et des formes dissoutes du fer et du soufre, en fonction du Eh et du pH sont illustrées par le diagramme de la figure 27, dû à VAN BREEMEN.

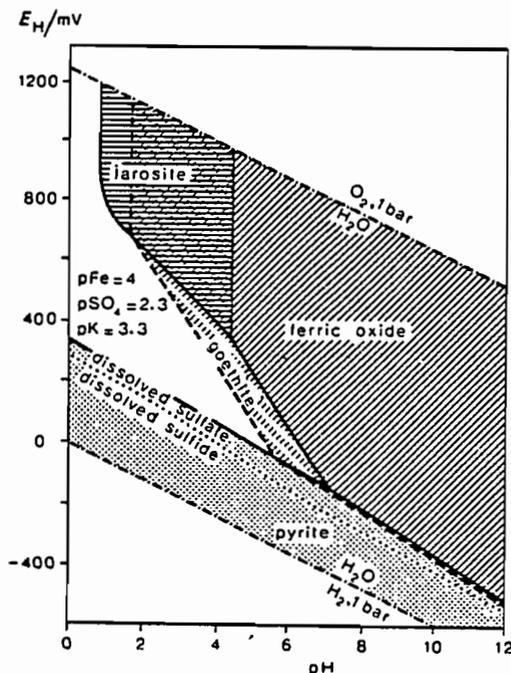


Fig. 27 - Diagrammes Eh-pH de stabilité de l'oxyde ferrique, de la jarosite et de la pyrite à 25 ° C.  
(VAN BREEMEN, 1976).

On note que la pyrite est stable dans une large gamme de pH, en conditions réduites, tandis que la jarosite est limitée aux conditions fortement oxydées et acides et que les oxydes ferriques couvrent une large gamme de Eh à des pH supérieurs à 4.

a) *Mesures et Interprétations du potentiel redox*

Le potentiel d'oxydo-réduction se mesure à l'aide d'un système composé d'une électrode de référence - généralement une électrode de calomel - et une électrode inerte dont la plus courante est l'électrode de platine. Si la mesure du Eh est apparemment simple, son interprétation est complexe, car le problème est d'obtenir des mesures reproductibles. C'est ainsi qu'à de faibles concentrations d'espèces électro-actives, la reproductibilité des mesures est généralement mauvaise. Par ailleurs, l'électrode de platine peut perdre son inertie par la formation de complexes Pt-O à la surface, en conditions aérobies ou par la formation de sulfure de platine en conditions fortement anaérobiques. Les mesures, dans ces conditions, peuvent cependant être hautement reproductibles.

Pour être fiable, le contact entre l'électrode de platine et les milieux riches en sulfures notamment doit être très court et rapide.

A l'exception du couple redox  $Fe^{4+}/Fe^{2+}$  et peut-être le couple  $Mn^{4+}/Mn^{2+}$ , la plupart des systèmes redox importants dans les sols ( $NO_3^-/NO_2^-$ ,  $SO_4^{2-}/H_2S$  et les systèmes organiques) ne sont pas électro-actifs (STUMM-MORGAN, 1970). En présence de fer dissous et en conditions oxydées acides, le Eh peut être quantitativement lié au couple  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  (VAN BREEMEN, 1976). Dans un milieu modérément réducteur, proche de la neutralité, c'est encore le couple  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  qui détermine le Eh (PONNAMPERUMA et al., 1967).

Dans les sédiments riches en sulfures (pH 7 - 8), les principaux éléments dissous C-H-N-S-O sont  $HCO_3^-$ ,  $NH_4^+$ ,  $HS^-$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$ ,  $N_2$  et  $SO_4^{2-}$ . D'après BERNER (1963), les mesures du Eh dans ces sédiments donnent des valeurs différentes de celles que l'on pourrait attendre en combinant les couples de ces différents éléments et en fait, le Eh mesuré dans les sédiments riches en sulfures est essentiellement celui du couple  $HS^- \rightleftharpoons S^0 + H^+ + 2e^-$  (BERNER, 1963). Les espèces électro-actives sont  $HS^-$  et la série des ions polysulfurés  $S_2^{2-}$ ,  $S_3^{2-}$  etc... formés par la réaction de  $S^0$  avec  $HS^-$ . La variation du Eh des zones étudiées au Sénégal est représentée dans la figure 28.

Il apparaît que la mangrove - à Rhizophora, en particulier - se distingue nettement du tanne - le Eh est en effet négatif et compris entre -100 et - 200 mV dans la mangrove et il est positif avec des valeurs souvent très élevées, de l'ordre de 400 mV dans le tanne vif. Sous Avicennia, le Eh est variable selon sa situation dans la séquence. Quand ce palétuvier est situé au même niveau et suit immédiatement Rhizophora, le Eh est négatif, sauf parfois en surface (Bassid, Tobor, Gambie, N'Dimsiroh). Par contre, à Balingore et à Oussouye où Avicennia est situé très loin en arrière de Rhizophora et légèrement en surélévation, le Eh est très nettement positif. Il s'agit généralement de profils évolués, consistants. Dans le tanne inondé, le Eh est le plus souvent positif, sauf dans les horizons profonds, mais à Oussouye où cette zone correspond plus à une mangrove récemment disparue, le Eh est encore négatif, mais compris entre -50 mV et 0 mV.

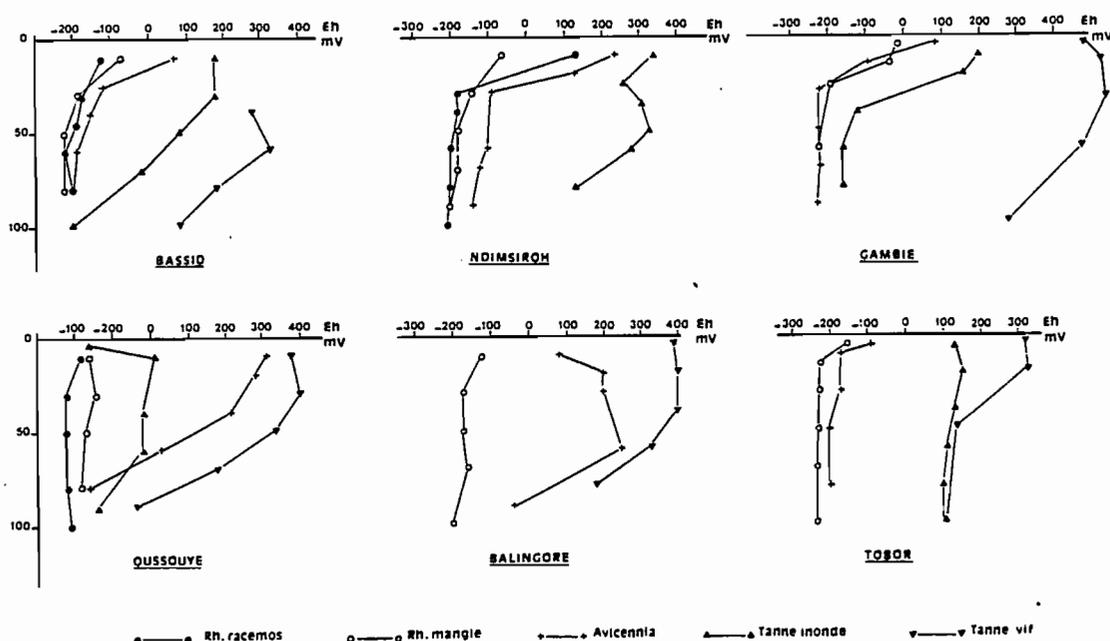


Fig. 28 - Evolution du Eh dans les séquences

b) Relation Eh - pH

La comparaison du diagramme Eh-pH (fig. 29) établi à partir de nos mesures avec le diagramme de stabilité des minéraux (fig. 26) montre 3 groupes de points ; le premier correspond au champ de stabilité de la pyrite (Eh < 50 mV et pH compris entre 5,5 et 7,5) et comprend tous les échantillons de mangroves et les horizons profonds des tannes ; le second groupe pH > 5 et Eh > 100 mV correspond à peu près au champ de stabilité des oxydes ferriques et comprend la plupart des échantillons des mangroves à Avicennia, des tannes inondés et de certains tannes vifs (Bassid, N'Dimsiroh, Tobor). Dans le diagramme de stabilité (fig. 26) des minéraux, on note que la jarosite est stable dans un domaine très restreint pH : 1,7 à 4 et Eh supérieur à 400 mV, or la plupart de nos échantillons très acides (pH 3,5 - 4) ont un Eh qui ne dépasse pas 400 mV, ce qui indique que, dans son milieu naturel, la jarosite est sous une forme métastable. En effet, l'étude des conditions de formation de la jarosite, basée sur les produits de solubilité des composés du fer : oxydes et jarosite montre qu'en milieu modérément acide (pH < 4,4) et oxydé (Eh > 400 mV) la jarosite est stable, en comparaison des oxydes ferriques mais son domaine de stabilité est limité aux conditions extrêmement acides (pH < 1,7) si on prend en considération le produit de solubilité de la goethite à grain grossier (VLEK et al., 1974). Du fait que le pH des sols sulfatés-acides est largement supérieur à 1,7, la jarosite est métastable et à terme, se transforme en goethite (VAN BREEMEN, 1976).

#### 4. CONCLUSION

En conclusion, on peut dire que, dans l'ensemble 1) le pH "in situ" varie peu au sein des profils. Légèrement acide et de l'ordre de 6 - 7 sous mangroves et tannes inondés il s'abaisse dans le tanne vif à des

valeurs de l'ordre de 3,5 - 4, sauf dans les séquences peu évoluées (Tobor) ou sursalées (Bassid, N'Dimsiroh).

Le pH du sol sec, par contre, peut varier considérablement au sein des profils, mais on retiendra que :

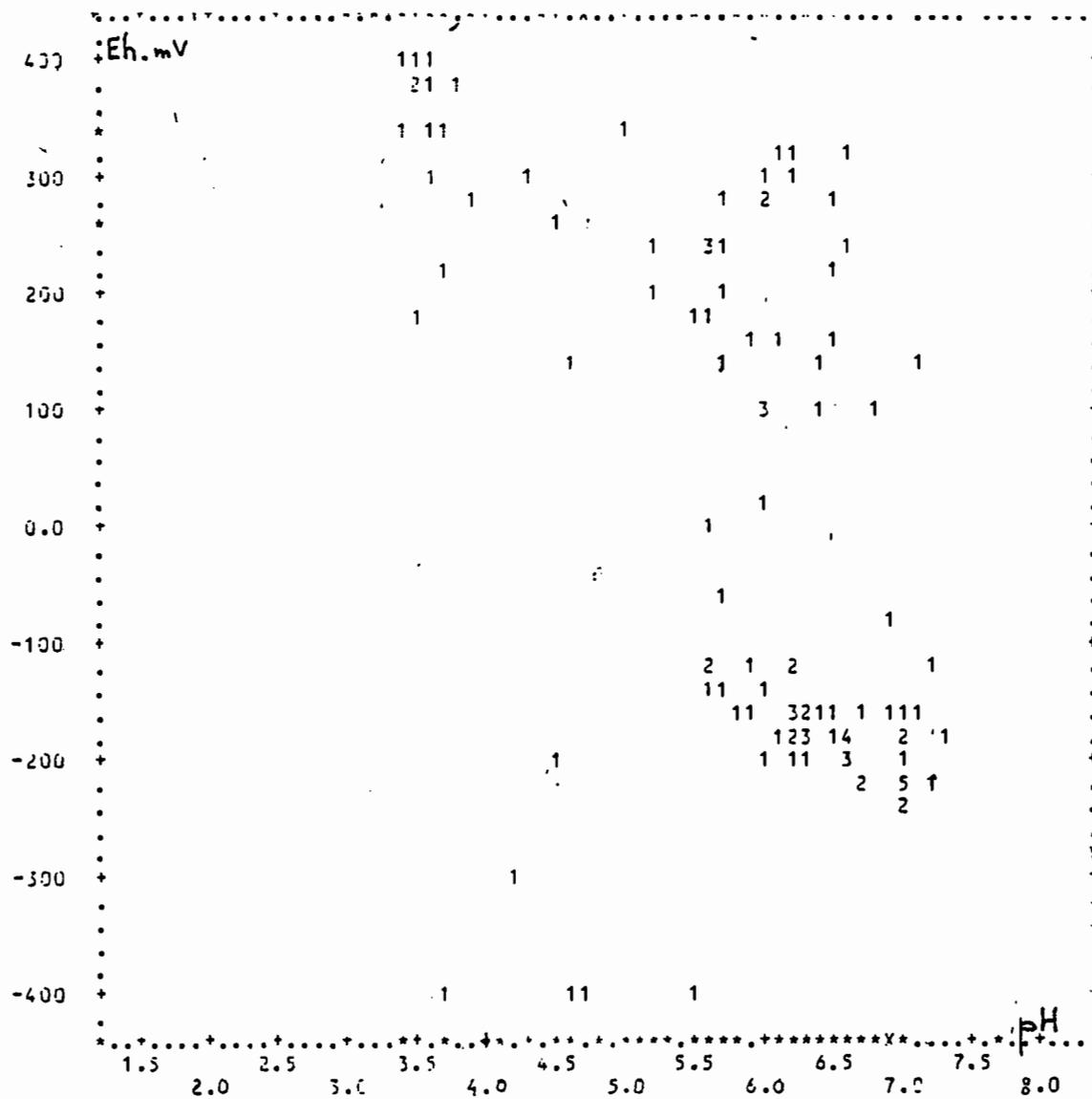


Fig. 29 - Diagramme Eh - pH des échantillons des séquences.

- d'une part, le pH sec de tous les horizons profonds, réduits, est très bas et de l'ordre de 2 à 3 ;
- d'autre part, que dans les séquences de l'Estuaire du Saloum, sableuses et sursalées, le pH sec des horizons superficiels est généralement supérieur à celui du pH "in situ".

Il en résulte que l'acidité potentielle est, en grande partie, localisée et plus élevée dans les horizons profonds des profils sous mangroves et tannes inondés que dans le profils sous tannes vifs.

Par ailleurs, cette acidité potentielle est toujours présente et liée, semble-t-il, à la végétation pionnière à Rhizophora. Le potentiel d'oxydo réduction, mesuré par le Eh montre que celui-ci varie de -400 mV dans les échantillons sous Rhizophora à +400 mV dans les échantillons de tanne vif et en étudiant la relation Eh-pH, on constate que la jarosite est métastable et que la plupart des échantillons se situent dans le domaine de stabilité, soit de la pyrite soit de  $Fe_2O_3$ .



## Chapitre VI

## LE SOUFRE DANS LES SOLS DE MANGROVES

## 1. INTRODUCTION - METHODOLOGIE

L'étude des caractères morphologiques des séquences et plus particulièrement des caractères micromorphologiques, nous a indiqué la présence quasi-générale dans nos échantillons de minéraux soufrés : pyrite, jarosite, gypse. Par ailleurs, l'étude du pH a montré que l'acidité de ces sols était liée à l'oxydation des composés réduits du soufre et notamment à certaines formes du soufre résultant du séchage des échantillons.

L'étude du soufre dans les sols de mangroves pose de nombreux problèmes de méthodologie, notamment si l'on veut doser les formes réduites, car le contact avec l'air provoque une oxydation parfois rapide. Par ailleurs, les méthodes de dosage du soufre sont très nombreuses et le Sulphur Institute (1968) a publié un bulletin spécial sur la détermination du soufre dans les sols. J. VIEILLEFON (1968) a fait une mise au point bibliographique sur le dosage des composés soufrés. En fait, lorsqu'on examine les résultats concernant par exemple, le soufre total, on constate que les méthodes utilisées sont très variables d'un auteur à un autre et nous verrons que pour une des séquences étudiées - BALINGORE - les méthodes que nous avons utilisées pour le soufre total, la pyrite et la jarosite sont différentes de celles utilisées par VIEILLEFON et par VAN BREEMEN et que de ce fait, les résultats obtenus sont aussi très différents.

J. VIEILLEFON qui a étudié de manière détaillée le comportement du soufre et de ses composés dans la séquence de BALINGORE a utilisé les méthodes suivantes :

- *Soufre total* : méthode de CHAUDRY-CORNFIELD (1966), basée sur l'extraction par un mélange acide nitrique - nitrate de potassium au four et dosage des sulfates formés, par gravimétrie ou turbidimétrie.
- *Sulfates* : dans la solution du sol, par turbidimétrie ou par complexométrie.
- *Sulfates solubles* : dans l'eau, extraction par l'eau dans le rapport 1/10 du sol/eau (extrait aqueux) et dosage par gravimétrie.
- *H<sub>2</sub>S et sulfures solubles* : dosés par iodométrie, après attaque par HClN, à l'abri de l'air (GONI et al., 1966).
- *Soufre élémentaire* : extraction par acétone et iodométrie (GONI et al.) ou turbidimétrie (HART, 1961).
- *Sulfures insolubles et polysulfures* : méthode GONI-PARENT, oxydation au four à 1000° par un mélange oxyde tungstique-oxyde ferrique, oxyde ferreux, cette méthode intègre le soufre organique et le soufre des sulfates insolubles dans l'eau.

- *Jarosite* : extraction à chaud par  $\text{CO}_3\text{Na}_2$  et turbidimétrie des sulfates (VAN BREEMEN, 1971).
- *Pyrite* : Dosage aux R.X.

Ces analyses ont été effectuées par VIEILLEFON sur des échantillons lyophilisés ou non, prélevés à différentes époques de l'année - généralement Juillet et Novembre - afin de suivre les variations saisonnières.

Nous avons adopté la méthode suivante : sur chaque carotte, 3 à 4 échantillons de 20 cm de long, en général, ont été prélevés dans les différents horizons. Chaque échantillon a été divisé en 2, longitudinalement, une moitié a été conservée en sacs plastiques, puis séchée au laboratoire pour être utilisée à la plupart des analyses : granulométrie, Carbone, sels solubles, soufre total, R.X. ..., la 2ème moitié a été prélevée dans des flacons en plastique, à double fermeture et immédiatement conservée dans un congélateur. Une petite partie de cet échantillon a servi au dosage de la pyrite et tout le reste a été passé dans une ultracentrifugeuse à 23000 g pour en extraire l'eau interstitielle.

Les nombreux résultats de VIEILLEFON ayant montré que les teneurs en  $\text{H}_2\text{S}$ , sulfures solubles et soufre élémentaire ne représentaient qu'un pourcentage infime du soufre total, ces dosages ont été abandonnés. Sur tous les échantillons, nous avons procédé aux dosages suivants : (MARIUS-PAYCHENG, 1976)

- *Soufre total*. Il a été dosé au Sulmograph WOSTHOFF par combustion de l'échantillon à  $1350^\circ\text{C}$  dans un courant d'oxygène. Le  $\text{SO}_2$  provenant de la combustion du soufre est absorbé dans une solution oxydante  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$  dans laquelle  $\text{CO}_2$  n'est pas retenu. La concentration du soufre est déterminée par variation de la conductivité avant et après passage du  $\text{SO}_2$  dans la solution contenant la solution oxydante.
- *La pyrite* a été dosée par la méthode PETERSEN (1969) modifiée par VAN BREEMEN. Le principe consiste en une extraction successive des composés non pyritiques avec  $\text{HCl}$  concentré, puis de la pyrite avec  $\text{NO}_3\text{H}$  concentré. Le fer est déterminé dans l'extrait de l'acide nitrique.
- *La jarosite* a été dosée par la méthode VAN BREEMEN, citée plus haut.
- *Les sulfates solubles* dans l'eau (extrait aqueux 1/10) et ceux de la solution du sol ont été dosés par gravimétrie.
- Ajoutons à cela que sur une cinquantaine d'échantillons provenant de BALINGORE et de BASSID, le soufre total a été dosé au Sulmograph LECO, à BONDY (ORSTOM) par combustion suivie d'une coulométrie.
- Enfin signalons que deux séries d'échantillons prélevés à BALINGORE et à BASSID en 1974 par VAN BREEMEN, ont été analysés à WAGENINGEN (VAN BREEMEN et al., 1978). Le soufre total a été déterminé sur un extrait à  $\text{HCl}$  après fusion partielle de l'échantillon avec un mélange  $\text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{KNO}_3$  à  $700^\circ\text{C}$ . La pyrite a été dosée sur l'extrait  $\text{HNO}_3$  après extraction des composés non pyritiques par un mélange  $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{HF}$ . Les sulfates solubles ont été extraits par une solution aqueuse d'E.D.T.A.  $3\text{Na}$  et dosés par turbidimétrie.

Cette longue énumération montre que sur des mêmes séries d'échantillons, les méthodes de dosages du soufre et de ses composés ont été complètement différentes selon les auteurs et que de ce fait, les résultats sont difficilement comparables.

A titre d'exemple, nous donnerons, pour la séquence de BALINGORE, les résultats obtenus pour le soufre total sur des échantillons séchés non lyophilisés prélevés, en des sites identiques, à la même époque de l'année (Novembre) (Tabl. XXIV).

On constate que les valeurs obtenues par combustion au sulmograph sont nettement supérieures à celles obtenues par VIEILLEFON avec la méthode CHAUDRY-CORNFIELD et que pour certains échantillons - de profondeur, notamment - ces valeurs peuvent varier du simple au double. Dans ces conditions, il ne sera pas aisé d'établir un bilan des formes du soufre.

Tableau XXIV

Séquence de Balingore. Répartition du Soufre total.  
(Valeurs obtenues selon 2 méthodes)

J. VIEILLEFON <sup>x</sup>			C. MARIUS		
Profils	Profondeur cm	S %.	Profils	Profondeur cm	S %.
1	0 - 20	37.48	2	0 - 20	53.8
	40 - 60	35.40		50 - 70	65.8
	60 - 80	37.66		90 - 110	53.1
2	0 - 20	17.13	3	0 - 20	13.7
	40 - 60	40.02		50 - 70	70.
	80 - 100	32.88		100 - 120	62.4
3	0 - 20	4.46	5	0 - 20	9.86
	40 - 60	36.08		40 - 60	47.6
	80 - 100	36.24		80 - 100	36.3
4	0 - 20	2.61	7	0 - 20	7.43
	20 - 40	3.86		20 - 40	8.05
	40 - 60	10.73		40 - 60	41.9
	80 - 100	27.98		80 - 100	50.4
5	0 - 20	5.8	8	0 - 20	34.5
	40 - 60	12.77		40 - 60	37.7
	80 - 100	37.88		80 - 100	55.8
6	0 - 20	15.43	10	0 - 20	19.5
	20 - 40	12.70		30 - 50	45.1
	60 - 80	31.93		60 - 80	55.
	80 - 100	32.50		90 - 110	61.

<sup>x</sup> Les résultats sont extraits du tableau VIII.  
Répartition des différentes formes du Soufre.  
Echantillons non lyophilisés. Prélèvements  
en Novembre.

## 2. REPARTITION DU SOUFRE DANS LES SEQUENCES

L'examen des graphiques de la répartition du soufre total dans les séquences montre que (fig. 30) les teneurs en soufre sont, d'une manière générale, élevées dans la mangrove et les horizons profonds des tannes - 40 à 80 % - les teneurs les plus fortes étant observées à Tobor et à Balingore.

La teneur moyenne calculée sur 191 échantillons est de 28,6 %, le maximum étant de 96 % (Tobor) et le minimum de 2 % (Bassid).

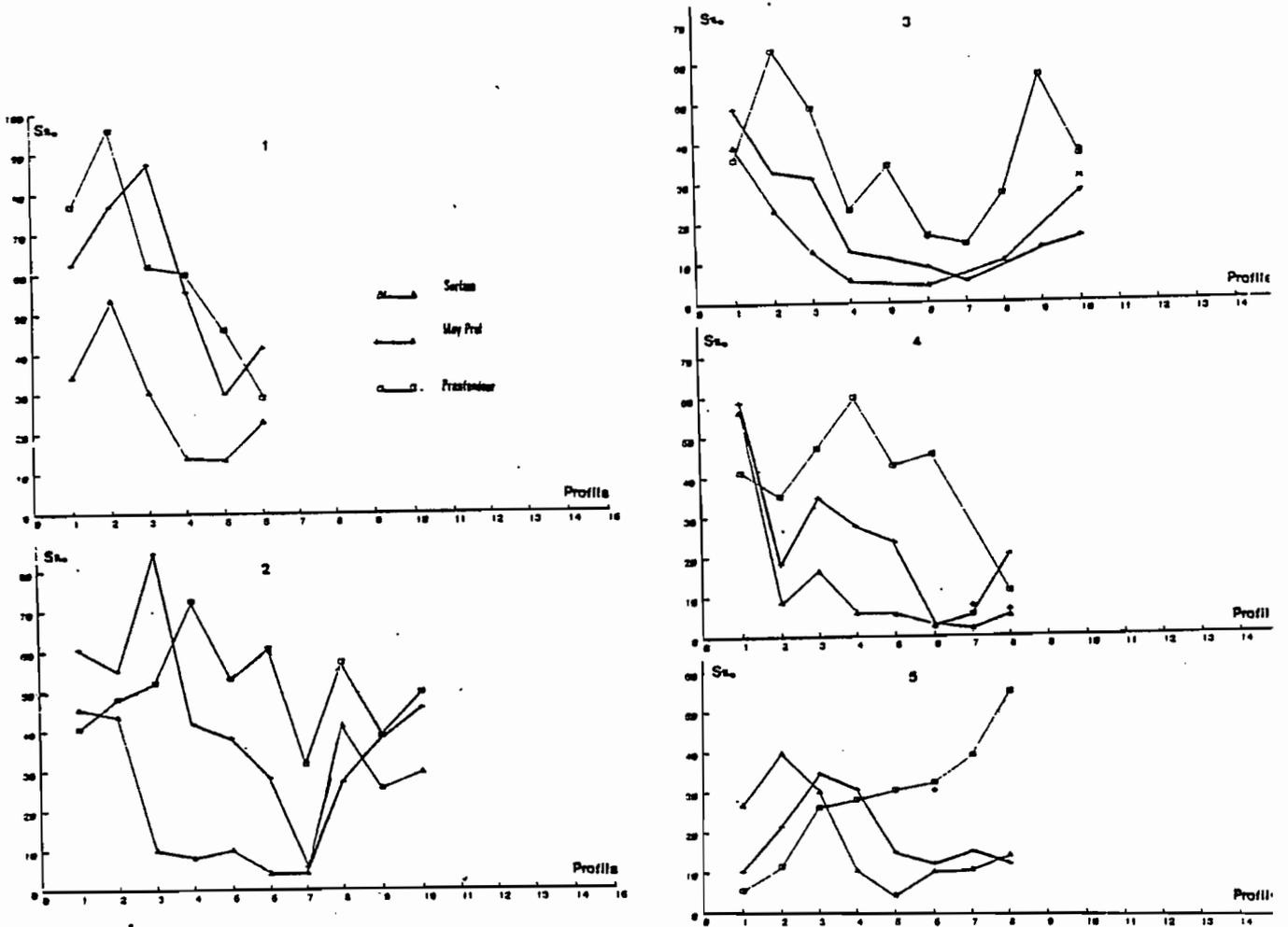


Fig. 30 - Evolution du Soufre total dans les séquences  
 1 Tobor - 2 Balingore - 3 N'Dimsiroh  
 4 Gambie - 5 Oussouye.

Dans toutes les séquences, on remarque que le soufre total, *en surface*, diminue brutalement quand on passe de la mangrove au tanne inondé (N'Dimsiroh, Bassid) ou à la mangrove décadente (Balingore, Tobor) et qu'il remonte ensuite dans le tanne vif, sauf en Gambie.

En fait, c'est sous *Avicennia* que le taux de soufre total est le plus faible et cela est particulièrement net à N'Dimsiroh et surtout à Balingore

où l'on note qu'en surface, le taux de soufre total passe de 5 % environ sous Rhizophora à moins de 0,5 % sous Avicennia, pour remonter brutalement en quelques mètres à 3-4 % dans le tanne vif. A N'Dimsiroh, le minimum, de l'ordre de 0,5 % aussi, s'observe dans toute la zone à "iron-pipes" indiquant bien que ceux-ci correspondent aux pneumatophores d'anciens Avicennia. Il en est de même à Oussouye où le minimum - toujours voisin de 0,5 % - se trouve sur la petite levée à Avicennia (profil 5).

En profondeur, la répartition du soufre total est variable d'une séquence à une autre :

- . à Bassid le taux de soufre total est, dans l'ensemble plus faible en profondeur qu'en surface - de l'ordre de 1 à 2 % - Il s'agit, rappelons-le de l'horizon compact, sec, en grande partie de texture sableuse.
- . A N'Dimsiroh, le taux de soufre total est nettement plus élevé qu'en surface dans la mangrove et le tanne vif où la valeur est sensiblement identique, de l'ordre de 6 %. Dans le tanne inondé, les teneurs en soufre sont de l'ordre de 3 %.
- . En Gambie, il y a peu de variation du profil 1 au profil 6, avec des taux de soufre compris entre 4 % et 6 %, ensuite, on observe une baisse brutale dans le tanne vif (0,5 - 1 %).
- . A Tobor, il y a une décroissance régulière de 10 % environ dans la mangrove à 6 % dans le tanne inondé et 3 % dans le tanne herbacé.
- . A Balingore, on note que, dans l'ensemble, le taux de soufre total en profondeur est compris entre 4 et 6 %, sauf sous Avicennia où il est légèrement plus faible.
- . Enfin, à Oussouye, le taux de soufre est plus faible en profondeur qu'en surface dans la mangrove (0,5 - 1 %) et s'élève régulièrement jusque dans le tanne vif, à des taux de 5 - 6 %.

Les forages profonds effectués à proximité de 4 des séquences étudiées Oussouye, Tobor, Balingroe et Gambie montrent que les teneurs en soufre sont élevées jusqu'en profondeur.

En résumé, les sols des mangroves et tannes du Sénégal se caractérisent par :

- des teneurs en soufre élevées, non liées semble-t-il, à la nature du substrat sableux ou argileux, mais plus à la végétation originelle, dans tous les cas, c'est sous Avicennia que le taux de soufre est le plus faible alors que les horizons profonds à racines et fibres de Rhizophora conservent des valeurs élevées ;
- une répartition du soufre sensiblement identique pour toutes les séquences, en surface, mais très variable et très hétérogène, d'une séquence à une autre pour les horizons profonds.

### 3. GENESE ET ACCUMULATION DE LA PYRITE

#### A. PROCESSUS DE GENESE

La présence de soufre sous forme réduite - notamment sulfures de fer

et pyrite - a été signalée dans les vases marines par FRANCISBOEUF (1946) et DEBYSER (1961) et leur genèse dans les sédiments marins a été étudiée de manière intensive par de nombreux océanographes dont BERNER (1964, 1970, 1972), GOLDHABER et KAPLAN (1974), RICKARD (1970, 1973). Par ailleurs, la synthèse expérimentale de la pyrite, en solution aqueuse et à basse température avait été réalisée dès 1911 par ALLEN et reprise par BERNER en 1970. Chaque année, environ 368 megatonnes de sulfates dissous sont transportées vers l'océan par les fleuves. Ils peuvent, soit précipiter sous forme de sulfate de calcium, soit se transformer en pyrite sous l'influence de la réduction bactérienne. Le processus global par lequel la pyrite se forme dans les sédiments marins peut être brièvement résumé comme suit, selon BERNER (1970). "Dans ces sédiments où la matière organique s'accumule plus rapidement qu'elle ne se détruit, les eaux interstitielles deviennent anaérobiques et la sulfato-réduction bactérienne démarre. Il se forme de l'hydrogène sulfuré dont une partie réagit immédiatement avec les minéraux détritiques du fer pour former des monosulfures de fer, noirs, principalement la mackinawite  $\text{FeS}$  et la greigite  $\text{Fe}_3\text{S}_4$ . Le reste d' $\text{H}_2\text{S}$  est oxydé en soufre élémentaire par les bactéries aérobiques ou anaérobiques. Une partie de ce soufre élémentaire réagit ensuite avec les monosulfures de fer pour donner de la pyrite, le reste de soufre élémentaire étant oxydé par les bactéries en sulfates.

Ce qui est illustré par le schéma de la fig. 31, dû à BERNER.

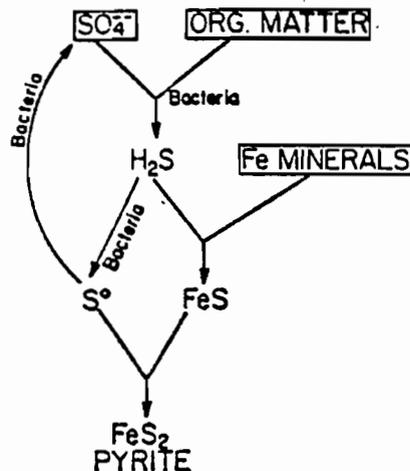


Fig. 31 - Schéma de formation de la pyrite. (BERNER, 1972).

D'après ce schéma, il apparaît que 3 conditions sont nécessaires à la formation de la pyrite.

- La disponibilité en matières organiques décomposables par les bactéries.
- La concentration et le taux de dépôt des composés ferriques qui peuvent réagir avec  $\text{H}_2\text{S}$  pour former les sulfures de fer.
- Le taux de réapprovisionnement en sulfates des sédiments.

La présence de matière organique microbiologiquement décomposable est absolument nécessaire pour que la pyrite puisse se former, d'une part parce que la stabilité de la pyrite est liée à l'absence d'oxygène dissous et que l'élimination de cet oxygène nécessite la présence d'une matière

organique qui se comporte comme un agent réducteur de l'oxygène, d'autre part, pour favoriser la sulfato-réduction bactérienne.

Une productivité organique élevée favorise le dépôt de grandes quantités de matière organique, d'où l'observation que les régions parcourues par les courants "d'upwelling" sont généralement formées de sédiments riches en pyrite. Dans ce cas, il s'agit généralement de pyrite "syngénétique" ou pyrite primaire (PONS, 1973).

Dans les zones intertidales des tropiques, les arbres des mangroves et plus particulièrement les Rhizophoras, avec leurs racines, radicules et fibres sont à l'origine d'importantes accumulations de matières organiques, sources d'une pyrite dite "secondaire" (PONS, 1973).

En présence d'importantes quantités de matières organiques et en milieu anaérobie, se développe la sulfato-réduction bactérienne grâce aux bactéries de deux genres. *Desulfovibrio* et *Desulfatomaculum*, anaérobies obligatoires et adaptées à une large gamme de pH, de température, de salinité ou de pression. Les sulfates sont réduits, par ces bactéries en  $H_2S$  par la voie dissimilatrice (voie respiratoire). Il faut cependant signaler qu'en 1976, PFENNIG isole des bactéries anaérobies strictes qui tirent leur énergie de croissance de la réduction de  $S^0$  en  $H_2S$  en présence d'acétate ou d'éthanol comme donneurs d'électrons. L'auteur désigne ces bactéries sulfato-réductrices sous le nom de *DESULFOROMONAS ACETOXIDANS*. Une étude de ces 2 types de bactéries - sulfato-réductrices et sulfo réductrices - a été faite sur 5 de nos séquences par TRAORE (1978). La méthode de numération bactérienne a été faite "in situ" selon une technique mise au point par le laboratoire de microbiologie des sols de l'ORSTOM à Dakar et basée sur l'apparition de l'hydrogène sulfuré provenant de la réduction du soufre élémentaire. Le tableau XXV donne les densités de bactéries sulfo et sulfato réductrices des sols de 5 séquences.

Ce tableau montre, qu'à l'exception de la Gambie, où la densité des bactéries sulfo-réductrices est nettement plus élevée que dans les autres séquences, partout ailleurs, les bactéries sulfato-réductrices prédominent largement sur les sulfo-réductrices (la majorité des rapports  $\log_{10} \frac{S R}{BSR}$  sont négatifs). En ce qui concerne plus particulièrement les bactéries sulfo-réductrices, on distingue deux groupes d'échantillons, d'une part ceux de Bassid, N'Dimsiroh et Balingore qui renferment au plus  $10^3$  bactéries par gramme, d'autre part ceux de Tobor et Gambie qui ont au moins  $10^3$  bactéries/g. Or, les mangroves du premier groupe sont situées à l'amont des marigots là où les sols sont évolués et ne bénéficient plus d'apports de matières organiques; elles sont par ailleurs très salées, tandis que les échantillons de Tobor et de Gambie sont situés en bordure des fleuves, correspondent à des mangroves plus récentes et sont encore alimentées en matières organiques. Il semble par ailleurs, d'après TRAORE que les bactéries sulfato-réductrices soient stimulées par les milieux salés, notamment par  $ClNa$ , alors qu'au contraire les bactéries sulfo-réductrices sont en partie inhibées par les sels.

Quant au fer, de nombreuses études (CARROLL, 1958 ; BERNER, 1970 ; RICKARD, 1973) ont montré que dans les sédiments le fer qui réagit avec  $H_2S$  pour former les sulfures de fer se présente essentiellement sous forme de revêtements d'oxydes ferriques colloïdaux - tels que l'hématite et la goéthite - sur les grains détritiques d'argiles et de limons. Il faut y ajouter aussi les chlorites contenant du fer finement cristallisé.

Dans nos mangroves le fer nécessaire à la pyritisation - le fer réactif - est relativement abondant et provient essentiellement des altéra-

Tableau XXV

Densités des bactéries sulfo et sulfato-réductrices de 5 séquences.

Echantillons	Log <sub>10</sub> densité S.R.	Log <sub>10</sub> densité BSR	Log <sub>10</sub> $\frac{S.R.}{BSR}$	
BASSID	CMB 1	6.910	9.204	-2.30
	CMB 5	< 3	7.672	< -4.7
	CMB 10	< 3	4.322	< -1.32
	CMB 13	6	4.903	1.1
	CMB 17	< 3	6.903	< -3.9
	CMB 19	< 3	3.301	< -0.3
N'DINSIROU	CMN 1	< 3	6.681	< -3.68
	CMN 3	< 3	5.602	< -2.60
	CMN 6	< 3	> 3	> 0
	CMN 10	< 3	n.d.	n.d.
	CMN 11	4.924	5.602	-0.7
GAMBIE	CMG 1	7.623	6.301	1.3
	CMG 2	7.114	6.255	0.36
	CMG 3	7.114	6.079	1.03
TOBOR	CMT 1	4.756	5.204	-0.45
	CMT 2	4.662	n.d.	n.d.
BALINCORE	CMV 1	< 3	n.d.	n.d.
	CMV 2	< 3	5.477	< -2.48
	CMV 3	< 3	6	< -3
	CMV 4	3	n.d.	n.d.
	CMV 5	6.431	6.255	0.2

S.R. = Bactéries Sulfo-réductrices

BSR = Bactéries Sulfato-réductrices

tions et des sols du Continental Terminal qui forment les bassins versants des estuaires des 3 fleuves. Or il est bien connu qu'en Afrique tropicale, le processus dominant sur les formations du Continental Terminal est la ferrallitisation caractérisée par une accumulation relative de fer et d'aluminium. L'érosion des sols ferrallitiques et ferrugineux libère des quantités notables de fer qui sont transportées par les fleuves dans les estuaires.

Le réapprovisionnement en sulfates, enfin, est régulièrement assuré par le jeu des marées.

Le fer réactif apporté par le sédiment réagit avec les ions sulfures pour donner un sulfure de fer. Selon RICKARD (1973) sept sulfures de fer sont connus. (Tabl. XXVI)

Tous ces sulfures de fer peuvent plus ou moins intervenir dans la formation de la pyrite sédimentaire, dont la réaction globale s'écrit :

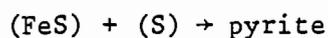
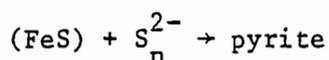


Tableau XXVI

Composition, structure et stabilité  
des sulfures de fer  
(RICKARD, 1973)

	Pyrite	Marcasite	Pyrrhotite	Mackinawite	Griegite	Smythite	FeS cubique
Composition	FeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Fe(1-x)S x > 0.125	c. FeS	Fe <sub>3</sub> S <sub>4</sub>	Fe <sub>3</sub> S <sub>4</sub>	c. FeS
Structure	Cubique	Orthorhombique	Hexagonal ou Monoclinique	Tetragonal	Cubique	Hexagonal	Cubique
Stabilité	< 743°C	metastable < 400°C	< 1083°C	metastable < 130°C	metastable < 200°C	stable ? < 75°C	metastable

dans laquelle (FeS) représente un ou plusieurs sulfures de fer métastables et (S) représente une variété de soufre. Parmi les sulfures métastables, la mackinawite et la griegite sont communément les premiers minéraux identifiés. La synthèse expérimentale de la pyrite a été tentée par de nombreux géochimistes dont BERNER (1970) ; ROBERTS et al. (1969) et surtout RICKARD (1969), dont les observations montrent que les polysulfures aqueux interviennent dans la formation de la pyrite. La réaction probable de la formation de la pyrite en solution aqueuse serait de la forme :



dans laquelle  $n = 2 - 5$ .

La formation de la pyrite à basse température, en solution aqueuse est résumée par RICKARD dans la figure 32.

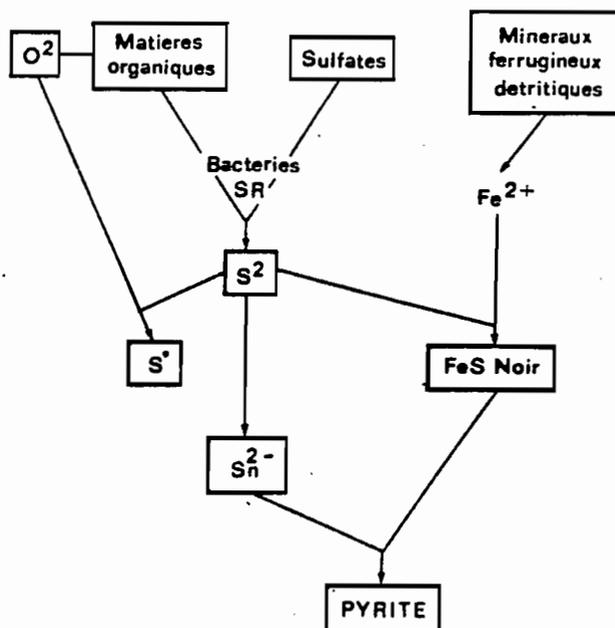


Fig. 32 - Schéma de formation de la pyrite  
(RICKARD, 1973)

Il apparaît qu'un précipité noir de FeS se forme, qui peut contenir d'autres phases que la mackinawite et la griegite, et qui réagit ensuite avec le soufre par des intermédiaires polysulfurés pour former la pyrite.

En fait, si les mécanismes de la formation de la pyrite par voie expérimentale sont assez bien connus, il n'en est pas de même en ce qui concerne le taux de formation de la pyrite "*in situ*". Il est généralement admis que la réaction, à l'état solide,  $\text{FeS} + \text{S} \rightarrow \text{FeS}_2$  est un processus lent qui nécessite des mois et des années pour fournir des quantités mesurables de pyrite, tandis que la précipitation directe du fer ferreux dissous et du polysulfure, peut sous certaines conditions donner de la pyrite en quelques jours (GOLDHABER-KAPLAN, 1974). Les 2 types de réactions : précipitation directe ( $\text{Fe}^{2+} + \text{S}_2^{2-} \rightarrow \text{FeS}_2$ ) et réaction solide-solide ( $\text{FeS} + \text{S} \rightarrow \text{FeS}_2$ ) sont cinétiquement favorisés par un pH bas, compris entre 6,5 et 4 (GOLDHABER-KAPLAN, 1974).

- L'analyse micromorphologique a mis en évidence la présence de pyrite - relativement abondante - sous forme framboïdale dans les mangroves et les horizons profonds des tannes des 6 séquences. D'après RICKARD (1975) c'est la voie passant par la formation intermédiaire de greigite ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$  cubique) et qui nécessite apparemment de l'oxygène atmosphérique qui donne la pyrite framboïdale, alors qu'en l'absence d'oxygène il se forme de la pyrite non framboïdale. Cette pyrite est souvent associée aux débris racinaires peu décomposés et plus rarement noyée dans la masse.

- Par diffraction X, seule la pyrite a été identifiée parmi les sulfures de fer, par la raie à 2,71 Å. Tous les échantillons ont été traités par diffraction X et l'examen des diagrammes montre que, dans l'ensemble, les pics à 2,71 Å sont faibles par rapport aux autres raies : halite, quartz, argile ...

- Le dosage chimique de la pyrite a été fait par la méthode de PETERSEN, qui, d'après VAN BREEMEN (1978) est la plus spécifique malgré la consommation excessive d'acides et de temps qu'elle nécessite. Pour 174 échantillons analysés, la valeur moyenne est de 9,738 % de soufre, avec un maximum de 34 % à Tobor. Dans les séquences, on observe une diminution de la pyrite dans les horizons superficiels, sous Avicennia et sous les tannes, mais cette diminution est surtout très marquée dans les séquences où la mangrove est stabilisée (Balingore, Bassid, N'Dimsiroh) alors que dans les mangroves récentes ou peu évoluées (Tobor, Gambie), les horizons superficiels des tannes contiennent encore des quantités appréciables de pyrite.

En fait, plus que la quantité de pyrite elle-même, c'est la proportion de pyrite par rapport au soufre total qui est intéressante à considérer. En effet, si dans les sédiments marins et, peut-être dans les sols sulfaté-acides très évolués, comme en Thaïlande, la majeure partie du soufre est sous forme de pyrite, il n'en est pas du tout de même, dans les sols de mangroves du Sénégal et l'on comprend mal que VIEILLEFON étudiant la séquence de Balingore ait pu considérer que "le résidu insoluble, après extraction des sulfures solubles et du soufre élémentaire était constitué principalement de pyrite". Dans le tableau XXVII nous avons indiqué les proportions de pyrite exprimées en pour cent du soufre total ; pour certains profils des 6 séquences. On constate que dans la mangrove et les horizons profonds des tannes, la pyrite ne représente environ que 30 à 50 % du soufre total. VIEILLEFON a dosé la pyrite par diffractométrie X et les résultats obtenus sur les échantillons non lyophilisés (prélèvements de Novembre) sont, dans l'ensemble plus faibles que les nôtres. Dans les

Tableau XXVII

Rapport  $S_{\text{pyrite}} / S_{\text{total}}$ 

Séquence Profil	Tobor	Gambie	Balingore	Oussouye	N'Dimsiroh	Bassid
Rhizophora racemosa			0.46	0.4	0.2	0.39
			0.46	0.5	0.17	0.28
			0.37	0.51	0.19	0.44
Rhizophora mangle	0.18	0.23	0.62	0.05	0.38	0.08
	0.30	0.40	0.42	0.37	0.29	0.25
	0.30	0.49	0.32	0.50	0.15	0.42
Mangrove Decadente	0.13	0.24	0.1	0.29	0.11	
	0.31	0.23	0.31	0.48	0.73	
	0.35	0.43	0.21	0.56	0.69	
		0.36		0.70		
Mangrove à Avicennia		0.1	0.16	traces		
		0.25	0.18	0.59		
		0.35	0.30	0.71		
		0.36	0.47			
Tanne Inondé	0.15	0.23		0.08	0.47	0.13
	0.32	0.44		0.05	0.96	0.20
	0.30	0.30		0.45	0.33	0.27
Tanne vif	0.08	0.06	0.04	0.05	0.05	0.03
	0.25	0.06	0.07	0.07	0.52	0.03
	0.30		0.5	0.54	0.61	0.025
Tanne herbacé			0.05			0.04
			0.01			0.09
			0.38			0.31
			0.46			0.30

sols sulfatés acides de Thaïlande, étudiés par VAN BREEMEN, les horizons pyritiques sont généralement très profonds (plus de 1 m 50) et la méthode utilisée pour doser la pyrite incluait le soufre élémentaire, une partie du soufre organique ainsi que des sulfures volatiles. Ce sont cependant les seuls termes de comparaisons que nous ayons car la pyrite n'a jamais été dosée ailleurs dans les sols de mangroves.

#### B. INFLUENCE DE LA MORPHOLOGIE SUR L'ACCUMULATION DE LA PYRITE

Les conditions de formation et d'accumulation de la pyrite varient considérablement selon les mangroves. DIEMONT et VAN WIJNGAARDEN (1974) ont mis en évidence des différences importantes dans la chimie et le développement pédogénétique entre des sédiments d'un système côtier d'accrétion et ceux d'une zone estuarienne très découpée par des chenaux de marée. C'est ainsi qu'en Malaisie, le substratum réduit des mangroves

de front de mer a un pH "in situ" de 8 - 8,5, reflétant les fortes concentrations en  $\text{HCO}_3^-$  de la solution du sol, un taux de soufre des pyrites inférieur à 0,5 % et une teneur faible en matière organique. C'est aussi le cas des mangroves des côtes guyanaises et de celle de la côte Orientale de l'Inde (MARIUS, 1982). Par contre, les mangroves estuariennes sont plus riches en pyrite ( $S > 1 - 2,5 \%$ ), et en matière organique peu décomposée ; leur pH "in situ" est de l'ordre de 6,2 - 6,8 et la solution du sol contient peu ou pas de  $\text{HCO}_3^-$ .

Le pH relativement faible et l'élimination périodique des sulfures dissous par les marées permettent d'expliquer le degré élevé de pyritisation dans les mangroves d'estuaires. En effet, on a vu que la formation de la pyrite était cinétiquement favorisée par un pH bas (GOLDHABER et KAPLAN, 1974), d'une part, et que l'oxydation partielle des sulfures en soufre élémentaire par un oxydant autre que le fer ferrique était un préalable nécessaire à la pyritisation complète d'une certaine quantité d'oxyde ferrique, d'autre part. Or, dans les zones estuariennes l'effet de marée (tidal flushing) permet une aération partielle des sols de mangroves et donc la formation de pyrite. Les teneurs relativement faibles en pyrite de la plupart des sédiments côtiers sont à attribuer au temps disponible pour leur formation et leur accumulation. Si la côte avance rapidement, comme en Guyane ou dans le Gange, la mangrove n'a qu'un temps relativement court pour s'installer et les conditions favorables à la formation de la pyrite sont, elles aussi, relativement courtes (MOORMANN et PONS, 1974), alors que dans les estuaires, très découpés, les conditions de sédimentation lentes et faibles sont favorables à la formation et à l'accumulation de la pyrite.

### C. INFLUENCE DE LA VEGETATION SUR L'ACCUMULATION DE LA PYRITE

La végétation dans les zones côtières et estuariennes joue un rôle important dans la formation de la pyrite, parce que d'une part, en fixant la vase elle contrôle l'érosion, d'autre part, elle est la source principale d'accumulation de la matière organique, siège de la sulfato-réduction bactérienne et donc d'accumulation des sulfures. C'est TOMLINSON (1957) qui le premier, semble-t-il, signale dans les mangroves de Sierra Leone, les relations entre les différentes espèces de palétuviers et la formation de sulfures. Il note en effet que les zones à *Rhizophora racemosa* développent une acidité plus forte au drainage que les zones à *Avicennia*. Il attribue cette différence au système racinaire des deux espèces. Le système racinaire de *Rhizophora* est, en effet, très profond, très large et présente surtout un chevelu très dense de fibres qu'on a retrouvé jusqu'à 20 m. dans nos carottages. Cette accumulation de fibres est à l'origine du matériau tourbeux souvent très épais, qu'on trouve sous les mangroves ouest-africaines. A Bassid et à Oussouye, les horizons tourbeux situés en profondeur dans les profils des tannes (CMB 8 - MO 7 - CMO 8) contiennent presque exclusivement des pollens de *Rhizophora* (pl. V). Il en est de même pour les deux carottes de Tobor et Balingore où jusqu'à 20 m et 10 m. respectivement, on ne trouve que des pollens de *Rhizophora* (TISSOT et al., 1983). Par contre, *Avicennia* présente un système racinaire très superficiel, à dominance de pneumatophores. Les tourbes formées sous *Rhizophora* sont généralement de couleur brun-rouge ou rouge. Sous *Rh. racemosa* (CMO 1 - CMO 2) CMB 1) les fibres sont très peu décomposées et forment un mat directement posé sur l'argile ou le sable sous-jacent, alors que sous *Rhizophora mangle*, les fibres sont plus décomposées et mélangées à la fraction minérale.

L'accumulation de pyrite semble être plus importante sous *Rhizophora mangle* que sous *Rhizophora racemosa*.

Compte-tenu du comportement différent des palétuviers dans la formation de la tourbe et par conséquent des sulfures, la connaissance des séquences végétales est d'un intérêt certain pour la compréhension des zones d'accumulation des sulfures et notamment de la pyrite. Comme elles résistent peu à l'érosion, les mangroves ne colonisent les zones littorales, que lorsqu'elles sont protégées de l'action des vagues par une barre littorale très large et peu profonde (Guyanes, Côte Ouest de la Malaisie).

Cette mangrove de front de mer est toujours occupée par *Avicennia* ou *Laguncularia* et c'est essentiellement dans les baies protégées - en arrière des cordons lagunaires - que la mangrove se développe le mieux avec pour espèce pionnière et dominante *Rhizophora*. Pour certains auteurs (BLOOMFIELD, 1973) *Avicennia* coloniserait les sables et les vases consistantes, tandis que *Rhizophora* se développerait sur les vases molles. En fait, au Sénégal, c'est essentiellement *Rhizophora* qui colonise les vases estuariennes et plus particulièrement *Rhizophora mangle*. *Avicennia* n'est qu'une espèce secondaire liée à l'évolution de la salinité des nappes et en tout état de cause on retiendra que le souvenir de la présence de *Rhizophora* dans toutes les séquences est témoigné par la présence d'un horizon organique à moins d'un mètre.

#### 4. SOUFRE LIÉ A LA MATIÈRE ORGANIQUE

Nous venons de voir que la pyrite ne représentait environ que 30 à 50 % du soufre total et l'on sait, par ailleurs (VIEILLEFON, 1977 ; MARIUS, 1973, 1976) que les formes réduites solubles et le soufre élémentaire ne constituent qu'une fraction minime du soufre total (moins de 5 %). On considère généralement que la différence est à attribuer au soufre organique ou plus exactement au soufre lié à la matière organique. Deux séries d'échantillons provenant des séquences de Bassid et de Balingore, ont été calcinées au four à 350° C pendant 24 h., température à laquelle il est admis que la matière organique est détruite (DEBOISSEZON, 1970). Le soufre a été dosé au Sulmograph sur les échantillons calcinés, or cette calcination à température modérée et sur une durée relativement longue entraîne toujours une certaine perte de poids due à la destruction des matières organiques, au départ d'eau d'absorption et de l'eau des argiles. Il en a été tenu compte dans les calculs et les résultats exprimés en % du sol sec étuvé à 105° (tabl. XXVIII) montrent que le Soufre Organique représente une fraction relativement importante du soufre total dans les profils de mangroves - surtout à Balingore - et même dans les tannes, ce qui laisse supposer qu'une partie de la fraction réduite rapportée à la pyrite serait plutôt de nature organique. En effet, à Balingore le soufre "Organique" représente plus de 50 % du soufre total dans les 5 premiers profils et il est intéressant de constater que dans les profils 3 et 5, par exemple, le Soufre Organique dépasse largement la pyrite. Or, les analyses ayant été faites sur les échantillons séchés à l'air, cette fraction de soufre "Organique" correspondrait à ce que VIEILLEFON (1973) avait appelé soufre "mobilisable", provenant en partie de la désagrégation de la pyrite. Les résultats montrent que contrairement à ce qui est généralement admis dans le cas des sols à sulfures, les sols de mangroves oxydés, ont une fraction importante de leur soufre liée à la matière organique. Alors que la corrélation entre le soufre total et le Carbone Organique est lâche pour les 191 échantillons analysés ( $r = 0,414$ ), on constate qu'elle est meilleure, mais cependant pas significative, entre le Carbone et le soufre "Organique".

Tableau XXVIII

Répartition du soufre "organique"  
à Balingore et à Bassid

BASSID				BALINGORE			
Végétation	Echantillon	S org.	S total	Végétation	Echantillon	S org.	S total
Rh. racemosa	11	18	39	ex	11	44.8	56.9
	12	14.6	38.1	Rh.	12	42.2	73
	13	4.3	16.8	racemosa	13	25.5	59.1
Rh. mangle	21	22.9	42.5	ex	31	9.9	13.7
	22	9.45	31.4	Rh.	32	47.6	70
	23	4.8	17.7	mangle	33	36.3	62.4
Tanne inondé	71	2.3	11.6	Avicennia	71	0.1	7.4
	72	26.7	42		72	6.6	8.05
	73	12.2	42.4		73	12.3	41.9
	74	7.6	17.1		74	29.8	50.4
Tanne vif	161	2.1	18.4	Tanne vif	81	22.3	34.5
	162	9.3	20.6		82	4.8	37.7
	163	3.2	10.4		83	36	55.8
	164	5.6	12				
Tanne herbacé	191	1.5	6.9	ex	101	5.4	19.5
	192	0.4	8.6	Tanne	102	19.2	45.1
	194	10	16.2	herbacé	103	15.9	55
	195	19.1	35		104	37	61.1

A Bassid, la corrélation s'écrit :  $S \% = 0,19 C \% + 5,26$  ( $r = 0,63$ )

et à Balingore :  $S \% = 0,25 C \% + 11,87$  ( $r = 0,57$ )

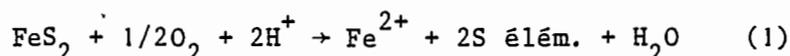
ALTSCHULER et al (1983) ont montré dans une étude récente des tourbes des Everglads (Floride, USA) que la pyrite se formait directement aux dépens des composés organiques soufrés sous l'influence de la respiration dissimilatoire par les bactéries sulfato-réductrices.

## 5. L'OXYDATION DE LA PYRITE

### A. MECANISMES D'OXYDATION DE LA PYRITE

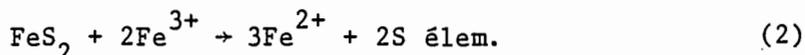
Les mécanismes de l'oxydation de la pyrite dans les sols sulfatés-acides ont été étudiés par BLOOMFIELD et COULTER (1973) et surtout par VAN BREEMEN (1976), dont voici résumées, les conclusions :

Nous avons vu que la pyrite n'était stable qu'à un Eh faible en milieu réducteur. C'est d'abord l'oxygène dissous, en milieu aqueux qui attaque la pyrite pour donner le fer ferreux et le soufre élémentaire selon la réaction :

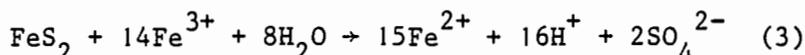


suit un processus plus lent qui est l'oxydation du soufre élémentaire en sulfate avec l'oxygène comme oxydant. Par ailleurs, le fer ferrique dis-

sous réagit rapidement avec la pyrite selon la réaction :



En conditions expérimentales, l'oxydation du soufre élémentaire par le fer ferrique est presque instantanée et la réaction totale s'écrit



Comme le fer ferrique n'est sensiblement soluble qu'à un pH très acide (< 4), les réactions (2) et (3) ne peuvent se produire que dans des milieux acides. En présence d'oxygène, le fer ferreux dissous produit par la réaction (3) peut être davantage oxydé en fer ferrique et l'oxydation de la pyrite peut se poursuivre, encore y a-t-il une restriction d'ordre cinétique, qui est, qu'à pH bas, l'oxydation du fer ferreux par l'oxygène est lente. Mais là interviennent les bactéries sulfo-oxydantes, autotrophes, capables d'accélérer les réactions d'oxydation de la pyrite. Les plus importantes de ces bactéries appartiennent au genre *Thiobacillus*. *Th. thiooxygenans* et plusieurs autres thiobacilles oxydent le soufre élémentaire et certains composés réduits du soufre, à un pH neutre, en utilisant l'oxygène (et parfois le nitrate) comme oxydant. Ces organismes peuvent jouer un rôle important en oxydant le soufre élémentaire produit par la réaction (1) en acide sulfurique et provoquer ainsi l'acidification initiale nécessaire à l'oxydation rapide ultérieure. *Th. thiooxydans*, isolé en 1921 par LIPMAN et al., dont la croissance optimale se situe à un pH 2,0 - 3,5 n'aurait pas d'action directe sur la pyrite et d'après BLOOMFIELD (1973) le soufre élémentaire formé dans la réaction (2) pourrait être le substrat favorable au développement de *Th. thiooxydans*.

Enfin, *Th. ferrooxydans* dont la croissance optimale se situe entre pH 2,5 et 5,8 oxyde le fer ferreux et différents composés réduits du soufre en produisant notamment du fer ferrique. Un certain nombre de facteurs interviennent dans l'oxydation de la pyrite dont :

- a) *La température* : l'oxydation microbienne est fortement inhibée à des températures inférieures à 10°. L'optimum de croissance des bactéries sulfo-oxydantes se situerait entre 20° et 40°.
- b) *La teneur en eau de l'échantillon* : d'après de nombreux auteurs les conditions optimales pour l'oxydation de la pyrite seraient situées juste au dessous de la capacité au champ. Dans les sols séchés à l'air, l'oxydation de la pyrite est inhibée.
- c) *Les éléments métalliques* : les thiobacilles sont très résistants aux fortes concentrations en ions métalliques (Cu, Fe, Zn), alors qu'ils sont relativement inhibés en présence de chlorures.
- d) *Le pH* : l'oxydation de la pyrite est optimale aux pH compris entre 1 et 4, la raison principale étant qu'à ces pH, le  $\text{Fe}^{3+}$  agit comme un oxydant.

Enfin, d'autres facteurs tels que la taille des particules, l'oxygène dissous, etc... interviennent à des degrés moindres dans l'oxydation de la pyrite. VAN BREEMEN (1973) a résumé les voies d'oxydation de la pyrite par la figure 33.

---

\* L'importance de cette bactérie dans la production de fortes acidités dans les sols et les eaux a été signalée par de nombreux auteurs (STARKEY, 1970 ; HART, 1959 ; HARMSSEN, 1954 ...)

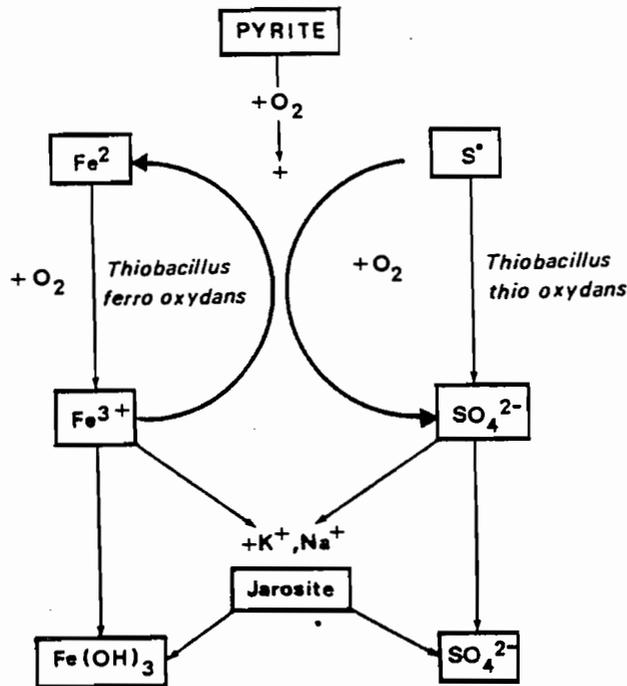


Fig. 33 - Voies d'oxydation de la pyrite  
(d'après VAN BREEMEN, 1973)

#### B. L'OXYDATION DE LA PYRITE "IN SITU"

Les profils des mangroves et les horizons profonds des tannes, riches en pyrite sont caractérisés par des couleurs gris foncé, gris très foncé 10 YR 4/1 - N 4/0 - 10 YR 3/1 - N 3/0. Ces couleurs foncées sont dues à l'association de la pyrite et de la matière organique provenant de la décomposition plus ou moins avancée des racines de *Rhizophora*. En lames minces, nous avons vu que la pyrite était abondante sous forme framboïdale souvent associée à la matière organique. Sur le terrain, l'oxydation de la pyrite se manifeste dans les profils par la formation d'un horizon de couleur brune 10 YR 4/2 à consistance "semi-fluide" dite "de beurre" dans lequel les gaines racinaires de *Rhizophora* sont auréolées d'un halo jaunâtre de jarosite. L'observation minutieuse de cet horizon indique que la couleur brune, dite "purée de marron" est provoquée par la décomposition des amas fibreux des *Rhizophora*. A Bassid, N'Dimsiroh et Balingore, cet horizon apparaît très rapidement dès le tanne inondé. A Oussouye, on ne l'observe qu'à partir du profil 6 dans le tanne vif. A Tobor et en Gambie, aucun des profils observés ne présente ces caractères morphologiques. PONS (1970), dans une étude sur les sols sulfaté-acides de la Plaine de Bangkok a établi une classification approximative des teneurs en pyrite des vases, à partir de laquelle il prévoit leur évolution en sols sulfaté-acides, ou non, en fonction notamment de la présence ou non de minéraux verts (chamosite, glauconite, chlorite ...) et de  $\text{CO}_3\text{Ca}$ .

Sur environ 50 profils choisis et répartis en 11 groupes, un seul ressemble à nos profils. Il a été classé : sol peu développé sulfaté-acide, salé. Dans les Guyanes, ces profils à consistance de "beurre" et couleur "purée de marron" sont fréquents sous les marais à *Eleocharis* de la série MARA. (MARIUS et al., 1968). En Malaisie, on en a observé sous *Nipa* dans la

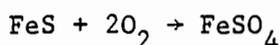
mangrove de Carey Island (MARIUS, 1981).

En lames minces, l'oxydation "in situ" de la pyrite se manifeste par la transformation des "framboises" de pyrite en sphérules de ferri-hydroxydes qui contiennent encore, par endroits, un noyau de pyrite (tanne inondé de Bassid). Selon MIEDEMA et al. (1974) ce type de transformation "in situ" de la pyrite en glaebules de ferri-hydroxydes se produirait généralement dans un milieu plus ou moins calcaire, à pH élevé. Il ne faut cependant pas perdre de vue que tous les profils étudiés ont une nappe phréatique, salée, proche de la surface, même dans le tanne et les observations périodiques effectuées à Bassid et à Balingore nous ont montré que les profils n'étaient exondés, avec une nappe relativement profonde (entre 0,5 et 1 m.) que pendant 2 mois de l'année (Janvier-Février). Avec les marées d'équinoxes toutes les séquences sont inondées. Il en résulte que la percolation vers la profondeur de petites quantités de fer ferrique formé en surface contribue à oxyder la pyrite selon la réaction (3). Cependant, il semble que le facteur déterminant dans l'oxydation de la pyrite soit l'oxygène atmosphérique, particulièrement dans ces régions soumises à la sécheresse climatique pendant plusieurs mois de l'année.

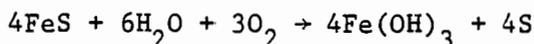
### C. LES CONDITIONS EXPERIMENTALES DE L'OXYDATION DES SULFURES

La poldérisation et le drainage des terres récupérées sur la mer ayant fortement acidifié leurs sols, ce sont les hollandais qui sont les pionniers dans l'étude expérimentale de l'oxydation des sulfures. Les premiers travaux sont dus en effet à VAN BEMMELEN (1863). Abandonnées ensuite pendant de nombreuses années, les recherches sur les transformations des sulfures dans les sols ont redémarré vers 1934 à l'occasion de l'aménagement du Zuidersee, VAN DER SPEK (1934) ; ZUUR (1936). VERHOOP publie en 1940 un traité fondamental sur les transformations chimiques et biologiques du soufre dans les sols.

Les travaux antérieurs laissaient présumer la formation de sulfate ferreux comme premier produit d'oxydation de FeS.



suit d'une oxydation ultérieure en sulfate ferrique. Cette hypothèse fut démontrée par VERHOOP qui expérimentalement a démontré qu'il n'y avait pas formation de sulfate ferreux et que la première réaction de FeS était strictement un fractionnement chimique de la molécule et une oxydation du fer en hydroxyde ferrique tandis que le soufre s'accumulait sous forme élémentaire



Aucune activité microbienne n'est nécessaire à cette transformation et les bactéries n'interviennent que dans une deuxième étape pour accélérer le processus d'oxydation du soufre élémentaire en sulfates et acide sulfurique.

Pendant longtemps les processus concernant l'oxydation de la pyrite  $\text{FeS}_2$  sont restés plus obscurs que ceux concernant FeS. VAN BEMMELEN et, par la suite, d'autres chercheurs avaient observé que l'oxydation de la pyrite ( $\text{FeS}_2$ ) était un processus beaucoup plus lent que celle de FeS mais que les produits de l'oxydation étaient apparemment identiques dans les deux cas.

C'est à QUISPEL, HARMSSEN et OTZEN (1952) qu'on doit les premiers résultats expérimentaux sur l'oxydation de la pyrite. Bien que ces expériences soient incomplètes, elles montrent clairement que l'oxydation de la pyrite suit fondamentalement la même voie que celle de FeS. Là aussi, en effet, une oxydation du fer en composés ferriques précède l'oxydation du soufre élémentaire formé dans un premier stade du processus, mais la molécule de pyrite est apparemment tellement résistante à l'attaque par l'oxygène atmosphérique que le premier fractionnement exige beaucoup plus de temps et semble aussi être accéléré par l'activité des Thiobacilles. Ces expériences ont aussi montré que dans les vases et les sols, la pyrite n'est pas la seule forme réduite du soufre mais qu'elle est toujours accompagnée d'autres formes réduites du soufre plus réactives telles que le soufre élémentaire, les polysulfures labiles amorphes ou le monosulfure FeS. L'oxydation de ces composés provoque l'abaissement du pH nécessaire à l'oxydation de la pyrite.

Dans les sols de mangroves tropicales, les premières études expérimentales sur l'oxydation des sulfures sont dues à HART et al. (1959, 1962). En effet, la poldérisation des mangroves de Sierra Leone pour la riziculture ayant fortement acidifié les sols sous Rhizophora, les chercheurs de la station de ROKUPR ont étudié sur le terrain et expérimentalement les processus d'oxydation des sulfures. HART (1959, 1962) ; HART, CARPENTER, JEFFERY (1961) ont montré que l'acidité provoquée par le drainage des mangroves à Rhizophora était le résultat de l'oxydation du soufre élémentaire par la bactérie Thiobacillus thiooxydans, oxydation qui commence dès que la teneur en eau du sol s'abaisse à 50 - 60 %. On a longtemps pensé que la pyrite était stable et que les sols de mangroves contenaient des quantités importantes de sulfure ferreux et de soufre élémentaire. Or les analyses de HART et al. (1965) sur les sols de Sierra Leone et de Nigeria de VIEILLEFON (1974) sur les sols de Casamance, de MARIUS (1976) ont montré qu'en Afrique de l'Ouest, les teneurs en soufre élémentaire et en FeS des sols de mangroves sont très faibles (moins de 5 % du S total). Il faut donc admettre que la pyrite présente dans les sols de mangroves est suffisamment instable et oxydable à l'air dans les conditions initiales de pH élevé pour produire du soufre élémentaire. HART et al. (1965) ont procédé à une étude expérimentale des taux d'oxydation des polysulfures du sol en comparaison avec de la pyrite du commerce, purifiée, par une méthode utilisant des ions ferriques comme agent oxydant et en déterminant le taux d'oxydation par la mesure des ions ferreux dégagés. Cette expérience a montré que l'oxydation était le fait de la pyrite elle-même et non de la concentration de l'agent oxydant et surtout qu'elle était liée à la surface que les particules de pyrite offraient à l'oxydation. Plus celles-ci sont petites plus rapide est l'oxydation, alors que les pyrites de grande taille ne s'oxydent que très lentement. VIEILLEFON (1974) a testé l'influence de l'humidité du sol et du pH de départ sur la vitesse d'oxydation de la pyrite. Ses expériences montrent que l'oxydation de la pyrite contenue dans un sol de mangrove se produit assez rapidement si le sol est assez humide et tant que le pH n'est pas trop acide alors que dans le cas contraire le processus est notablement freiné et ne peut se développer que si d'autres réactions neutralisant ou immobilisant une partie de l'acidité produite relèvent tant soit peu le pH.

Dans des expériences similaires de longue durée, RASMUSSEN (1961) étudiant les sols des marais danois a montré que la pyrite ne diminue significativement que si le pH de départ est légèrement acide.

Dans une expérience que nous avons conduite sur des échantillons de la séquence de Balingore, le pH a été mesuré sur des échantillons réhumectés

et asséchés à température ambiante, pendant 3 mois. Les résultats consignés dans le tableau XXIX montrent qu'au bout de 3 mois, le pH atteint des valeurs très acides, voisines de 2.

Tableau XXIX  
Séquence de BALINGORE  
Expérience d'assèchement et de réhumectation  
des échantillons - Evolution du pH

Echantillon	Profondeur cm	18-1-74	7-2-74	22-2-74	9-3-74	23-3-74	13-4-74	30-4-74
Mangrove à Rhizophora MV 1	20 - 34	6.51	4.7	3.9	3.6	3.2	2.5	2.4
	53 - 68	6.9	4.4	3.8	3.3	2.6	2.2	2.3
	84 - 110	6.8	4.8	4.3	3.8	3.3	2.3	2.3
Avicennia + Sesuvium MV 2	0 - 10	5.3	5	5.1	5.1	5.1	5	5.3
	15 - 30	6.1	6.3	6.3	6.3	6.4	6.2	6.5
	27 - 40	6.1	6.3	6.4	6.3	6.3	6.3	6.5
	40 - 50	5.4	4.7	4.3	3.9	3.6	3.3	3.2
	50 - 55	5.3	3.4	2.8	2.5	2.1	1.8	2
	90 - 100	5.7	3.8	3.1	2.7	2.3	2.9	2
Tanne vif  MV 3	0 - 5	4.1	3.8	4	4	3.9	3.8	3.9
	5 - 20	3.7	3.4	3.6	3.6	3.5	3.4	3.5
	20 - 40	3.5	3.2	3.3	3.3	3.2	3.2	3.2
	40 - 56	3.5	3	2.9	2.6	2.3	2	2.1
	71 - 75	3.7	2.9	2.5	2.2	1.9	1.6	1.9
	84 - 100	4.1	2.6	2.3	2.1	1.7	1.6	1.5
Tanne herbacé MV 4	0 - 75	5.4	4.9	4.8	4.8	4.8	4.7	4.7
	10 - 20	4.4	4.1	4.3	4.3	4.2	4.1	4.1
	22 - 29	4.2	4.2	4.3	4.3	4.2	4.2	4.2
	30 - 40	5.3	5.1	5.2	5.2	5.1	5.1	5.1
	50 - 60	5.8	3.8	3.3	2.9	2.7	2.3	2.2
	70 - 80	6.4	4	3.5	3	2.6	2.2	2.2
	90 - 100	7.2	4.5	3.5	2.9	2.5	2.2	2.2

Ce tableau montre que sous mangrove à Rhizophora et les horizons profonds réduits des autres profils, la baisse du pH est régulière et considérable puisqu'elle passe à des valeurs de l'ordre de 2 et même moins. En surface, on constate que sous Avicennia, comme dans les tannes la baisse du pH est faible, de l'ordre de 0,5 à 1 unité pH.

La même expérience a été menée par VAN BREEMEN sur des sols sulfatés-acides de Thaïlande dont les échantillons ont été asséchés et réhumectés soit avec de l'eau distillée, soit avec de l'eau de mer. Dans les deux cas, il note que le pH a diminué rapidement jusqu'à une valeur voisine de 2 avec une augmentation de la teneur en sulfates solubles aux dépens de la teneur initiale en soufre pyritique et du fer ferrique aux dépens du fer ferreux. VAN BREEMEN (1973) signale qu'au laboratoire, l'oxydation des sols de mangroves conduit à des pH plus bas que dans le cas d'oxydation des sols par drainage, la différence étant due au fait que, sur le terrain, les acides formés par oxydation sont lessivés par les eaux de pluie ou les eaux d'inondation. On notera cependant qu'en Casamance, on

a mesuré des pH voisins de 2 dans des parcelles aménagées pour la riziculture sur sédiments récents à Rhizophora.

#### D. ROLE DES MICROORGANISMES DANS L'OXYDATION DE LA PYRITE

Toutes les expériences citées précédemment ont montré que l'acidification des sols à pyrite était due à l'oxydation des pyrite, dont le processus était soit accéléré par des microorganismes comme Thiobacillus thiooxydans,, soit catalysé par Thiobacillus ferrooxydans à pH < 4 (BLOOMFIELD, 1972), mais on a jamais bien su si les microorganismes contribuaient à l'abaissement du pH ou si, au contraire, leur développement était favorisé par un pH acide. Une thèse récente de ARKESTEYN (1980) consacrée à l'étude des sols sulfaté-acides, donne une réponse à ces questions. Dans un premier temps, l'auteur a porté une attention spéciale sur la baisse initiale du pH de 7 à 4. Il apparait que cette acidification initiale est un processus non biologiquement catalysé. Th. thioparus, Th. thiooxydans et d'autres bactéries hétérotrophes thiooxydantes ont bien été isolées du sol potentiellement sulfaté-acide en voie d'acidification, mais l'expérience effectuée en comparaison avec un milieu stérile montre clairement que ce ne sont pas ces thiobacilles qui oxydent la pyrite. L'acidification initiale de sols potentiellement sulfaté-acides stérilisés est en tous points identique à celle de sols inoculés en thiobacilles. Les essais pour isoler d'autres microorganismes capables d'intervenir dans l'oxydation de la pyrite tels que Leptospirillum ferrooxydans ou du genre Metallogenium se sont avérés infructueux. *Le seul microorganisme responsable de l'oxydation de la pyrite est Thiobacillus ferrooxydans.*

On connaît deux mécanismes d'oxydation de la pyrite par Th. ferrooxydans, "le mécanisme par contact indirect" et le "mécanisme par contact direct". Dans le premier cas, la moitié du soufre de la pyrite est oxydée en sulfate par les ions ferriques qui sont eux mêmes réduits en fer ferreux. Th. ferrooxydans oxyde alors le fer ferreux en fer ferrique pour compléter le cycle.

Dans le second cas, la bactérie est en contact direct avec la pyrite et elle oxyde aussi bien la moitié du soufre de la pyrite que le fer. C'est ce second mécanisme qui a été étudié de manière expérimentale par l'auteur. Par ailleurs, il est apparu au cours de cette expérience que des cultures de Th. thiooxydans se développant dans un milieu ferreux comme source d'énergie contenaient toutes sans exception, un autre microorganisme, Thiobacillus acidophilus. L'explication la plus évidente serait que Th. thiooxydans serait capable d'utiliser  $Fe^{2+}$  comme source d'énergie. Les expériences montrent que ces deux microorganismes sont toujours associés et présents en quantités presque égales dans les cultures hétérogènes.

Les résultats de ces expériences indiquent, enfin, que Th. ferrooxydans excrète plus de matière organique assimilable en présence de Th. acidophilus qu'en cultures pures.

#### E. LES PRODUITS D'OXYDATION DE LA PYRITE

Jarosite, oxydes et hydroxydes ferriques et gypse sont les principaux produits d'oxydation de la pyrite. Cependant, à certaines époques faisant suite généralement aux grandes années de sécheresse (1972-1973-1977), on a pu observer en surface, dans les tannes et les rizières abandonnées (Tobor, Guidel ...) des croûtes de sulfates plus solubles tels que l'alun  $\{Na, Al(SO_4)_2 \cdot 12H_2O\}$  et la tamarugite  $\{NaAl(SO_4)_2 \cdot 6H_2O\}$ .

## a) Jarosite

Elle est caractérisée par sa couleur jaune pâle, 2,5 Y 8/6 ou 2,5 Y 8/4, associée le plus souvent à des gaines racinaires ou parfois en amas localisés dans un horizon de couleur "purée de marron" ou gris clair. Sur le terrain, les profils à horizons jarositiques ont été observés à Bassid, dans le tanne inondé et le tanne vif (CMB 9 à CMB 19), à N'Dimsiroh (CMN 5 à CMN 10), à Balingore, dans le tanne vif (CMV 8 à 10) à Oussouye (CMO 6 à CMO 8), en Gambie (CMG 7). A Tobor, la jarosite n'est pas présente dans la séquence, mais elle a été observée en plusieurs autres points de cette zone, notamment dans les rizières récemment aménagées.

En Casamance et en Gambie, on note que les horizons à jarosite sont strictement localisés au dessus des horizons réduits à pyrite dont ils sont parfois séparés par un horizon à taches brunes "purée de marron". Dans les 2 séquences du Saloum, par contre, on observe que la jarosite pénètre profondément en "doigts de gants" dans les horizons réduits pyritiques. Cela apparaît très nettement à Bassid dans les profils des tannes inondés (CMB 9, 10 et 11) et des tannes vifs (CMB 13 - CMB 16). En lames minces, la jarosite se présente, nous l'avons vu au chapitre III sous forme de nodules souvent mélangées à du fer amorphe et parfois auréolées d'oxydes ferriques. Dans la plupart des sols sulfaté-acides, jarosite et pyrite sont spatialement bien séparés tant dans les profils qu'en lames minces, (PONS, 1973). Cette séparation est en accord avec les diagrammes de stabilité qui prévoient que l'association pyrite-jarosite est instable. Or, à Bassid, dans des sédiments relativement jeunes, pyrite et jarosite sont intimement liés dans les horizons profonds des tannes.

En effet, dans ces milieux soumis à un climat aride, l'oxygène diffuse rapidement jusqu'en profondeur, le matériau étant par ailleurs sableux. A cette oxydation rapide par l'oxygène s'ajoute une oxydation par le fer ferrique dont les horizons supérieurs sont largement pourvus. Ce fer ferrique percole jusqu'en profondeur avec la nappe quasi permanente et agit comme oxydant de la pyrite. Par ailleurs, le séchage à l'air des échantillons provoque des transformations importantes, mais variables selon les séquences. C'est ainsi que dans la plupart des échantillons séchés de Tobor, les taches de jarosite, et les aiguilles de gypse sont abondantes. A Balingore, comme à Oussouye, tous les échantillons profonds dans la séquence sont recouverts d'amas jaunes de jarosite parfois associés à des aiguilles de gypse. Par contre, en Gambie, aucun des échantillons séchés provenant des horizons profonds de la mangrove et du tanne ne montre de taches de jarosite. A Bassid, dans le tanne vif, l'horizon profond contient souvent de gros cristaux de gypse très coloré.

La diffraction des R.X. a été faite sur tous les échantillons séchés à l'air et les diagrammes montrent que la jarosite est présente de manière quasi-générale et bien caractérisée par les raies à 3,08 et 3,11 Å et si dans les horizons superficiels des tannes, elle est bien individualisée et bien cristallisée, on observe que dans les horizons profonds, elle est, dans la plupart des séquences, sauf à Bassid, généralement associée à la pyrite. La jarosite est un minéral du groupe de l'alunite, rhomboédrique appartenant à une série de sulfates basiques, de formule générale  $AB(SO_4)_2(OH)_6$ , dans laquelle A est représenté par K, Na,  $H_3O$  (hydronium) ou  $NH_4$ , tandis que B peut être soit  $Fe^{3+}$  (jarosite) soit  $Al^{3+}$  (alunite); la jarosite vraie, la plus courante dans la nature, est la jarosite K. C'est elle qui est généralement représentée dans les sols sulfaté acides.

Cependant ANDRIESSE (1973) et ESWARAN et al. (1981) ont signalé la présence de natrojarosite (Na) dans les sols de mangroves de Malaisie. En fait, la distinction des 2 minéraux n'est pas aisée, car leurs raies, à la diffraction X sont très proches l'une de l'autre 3,08 Å - 3,11 Å pour la jarosite K et 3,06 Å - 3,12 Å pour natrojarosite. Si dans la plupart des échantillons de Casamance c'est la jarosite K qui est dominante, il semble qu'à N'Dimsiroh et surtout à Bassid, la natrojarosite soit bien représentée dans les échantillons des tannes.

Toutes les déterminations aux R.X., de même que les dosages par voie chimique de la jarosite (méthode VAN BREEMEN) ayant été faites sur des échantillons séchés à l'air, il est évident qu'une fraction de cette jarosite provient de l'oxydation de la pyrite. La teneur moyenne en soufre de la jarosite - exprimée en % du sol séché à l'air - est de 7,6 %, avec un maximum de 21 % et un minimum de 0,8 %, mais il faut retenir que la méthode d'extraction du sulfate de la jarosite par une solution de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  peut aussi inclure d'autres sulfates basiques, notamment  $\text{AlOHSO}_4$  (VAN BREEMEN, 1973). La jarosite a été obtenue synthétiquement au laboratoire au bout de 6 mois, à partir d'une solution de sulfate ferreux et de sulfate de potassium acidifiée avec de l'acide sulfurique jusqu'à un pH de 0,8 - 1,7 (BROWN, 1970). Il semble cependant que malgré les teneurs élevées des éléments constituant la jarosite, celle-ci se forme plus lentement au laboratoire qu'à partir des vases pyritiques, notamment parce que dans la nature les microorganismes contribuent à accélérer sa formation. Par ailleurs, la jarosite synthétisée au laboratoire est - par son aspect et sa granulométrie - tout à fait identique à celle observée dans les sols sulfaté-acides.

Les diagrammes d'équilibres Eh-pH assignent à la jarosite un domaine de stabilité relativement étroit  $\text{Eh} > 400$  mV et pH extrêmement acide 1,7 - 2. VAN BREEMEN (1976) et VLEK (1974) montrent, par l'étude des produits de solubilité des hydroxydes de fer et de la jarosite dans les sols sulfaté-acides de Thaïlande que la jarosite est presque toujours présente si le Eh est supérieur à 400 mV et le pH inférieur à 4. Ces conditions ne se retrouvent qu'en Gambie et à Oussouye où le Eh est voisin ou supérieur à 400 mV et le pH compris entre 3,4 et 4 pour les horizons jarositiques.

Par contre à Balingore, les horizons à jarosite des profils CMV 8, 9 et 10 ont un pH très acide - de l'ordre de 3 et un Eh inférieur à 400 mV tandis que dans les séquences du Saloum (Bassid et N'Dimsiroh) la jarosite est présente dans des horizons à pH supérieur à 4 parce qu'ici l'acidité liée à la formation de la jarosite est, en partie, tamponnée par l'hyper-salinité des nappes. C'est aussi le cas de la plupart des mangroves aménagées pour la riziculture en Casamance (Guidel) où l'oxydation des horizons superficiels a conduit à la formation de jarosite mais où la sursalure des nappes a permis de neutraliser l'acidité.

En résumé, des observations et des mesures sur le terrain il semble que la jarosite soit stable dans les mangroves du Sénégal, dans des milieux nettement moins acides que ceux prévus par les diagrammes d'équilibre. Enfin, la "tannification" naturelle des mangroves du Sénégal ne conduit pas nécessairement à la formation de sols sulfaté-acides, notamment dans les zones sursalées ou qui ne se dessalent presque jamais, c'est-à-dire dans l'Estuaire du Saloum, en bordure du bras principal de la Casamance et en aval des affluents de ce fleuve et il semble que seuls les tannes de la partie amont - dessalés en hivernage - soient acidifiés.

b) *Autres produits d'oxydation de la pyrite*

A côté de la jarosite qui est le produit d'oxydation le plus caractéristique de la pyrite, on peut, dans certaines conditions, en trouver d'autres qui seront étudiés plus en détail dans les chapitres suivants. Il s'agit notamment des oxydes de fer : goethite et hématite présents dans les sols sulfaté-acides très évolués, du gypse, minéral lié à l'aridité climatique et dont la présence dans la plupart des séquences est attestée par les observations macro et micro morphologiques. Or, si au cours de la prospection et de la cartographie des îles du Saloum (MARIUS, 1977) nous avons pu noter la présence de gypse, souvent sous forme de gros cristaux, au sein même des profils observés, la présence de ce minéral n'avait jamais été signalée en Casamance, notamment par VIEILLEFON, avant 1971.

La succession des années sèches depuis 1972 a, d'une part, profondément modifié la végétation en Casamance, d'autre part, provoqué l'apparition de gypse, de manière quasi générale, dans les tannes sous forme d'un lit d'aiguilles ou de petits cristaux en surface, recouvert d'une couche poudreuse de 2 à 3 cm d'épaisseur (la moquette). Dans les lames minces, on remarque que le gypse est souvent plus abondant dans les profils de Casamance que dans ceux du Saloum.

## 6. LES SULFATES SOLUBLES

Les sulfates solubles dans l'eau ont été dosés par gravimétrie sur un extrait aqueux au 1/10 de l'échantillon séché à l'air. Cette méthode qui présente certains défauts par rapport à l'extrait aqueux à saturation - plus proche de la réalité de sol en place - a cependant le gros avantage de se prêter à l'analyse rapide en série, d'une part, et de solubiliser la plus grande partie, sinon la totalité des sels solubles, d'autre part. En fait, cette fraction du soufre englobe elle-même 3 fractions : les composés oxydés solubles qui correspondent aux sulfates dosés dans la solution du sol (eaux interstitielles) et dans les nappes phréatiques, les composés réduits solubles ( $H_2S$  et sulfures solubles) et une fraction des sulfures réduits insolubles qui s'est oxydée à l'air, correspondant au soufre réduit "facilement" oxydable (VIEILLEFON).

Pour 205 échantillons, le taux de sulfates solubles, exprimé en milli-équivalents pour 100 g. de sol (meq/100 g) a une valeur moyenne de 26,4, avec un maximum à 87,4 meq/100 g. et un minimum de 3,4 meq/100 g. (Tabl. XXX)

Tableau XXX

Valeur moyenne des sulfates solubles en meq/100 g

Nombre d'échantillons	Maximum	Minimum	Moyenne	Variance	Ecart-type
205	87.4	3.4	26.4	355.4	18.85

Exprimée en S ‰, on constate que cette fraction représente de 10 à 20 % du soufre total, ce que nous avons déjà signalé en étudiant l'évolution saisonnière des sols dans différentes chronoséquences (MARIUS, 1974, 1976). Alors qu'entre les autres formes du soufre (Pyrite et Jarosite) et le soufre

total, on ne trouve aucune corrélation significative, on constate qu'entre les sulfates solubles et le soufre total il existe une bonne corrélation. En effet, entre les 2 variables, la relation s'écrit, pour 182 échantillons des 6 séquences :

$$S_{\text{total}} = 0,85 \text{ SO}_4 + 4,27$$

avec un coefficient de corrélation  $r = 0,763$  (fig. 34).

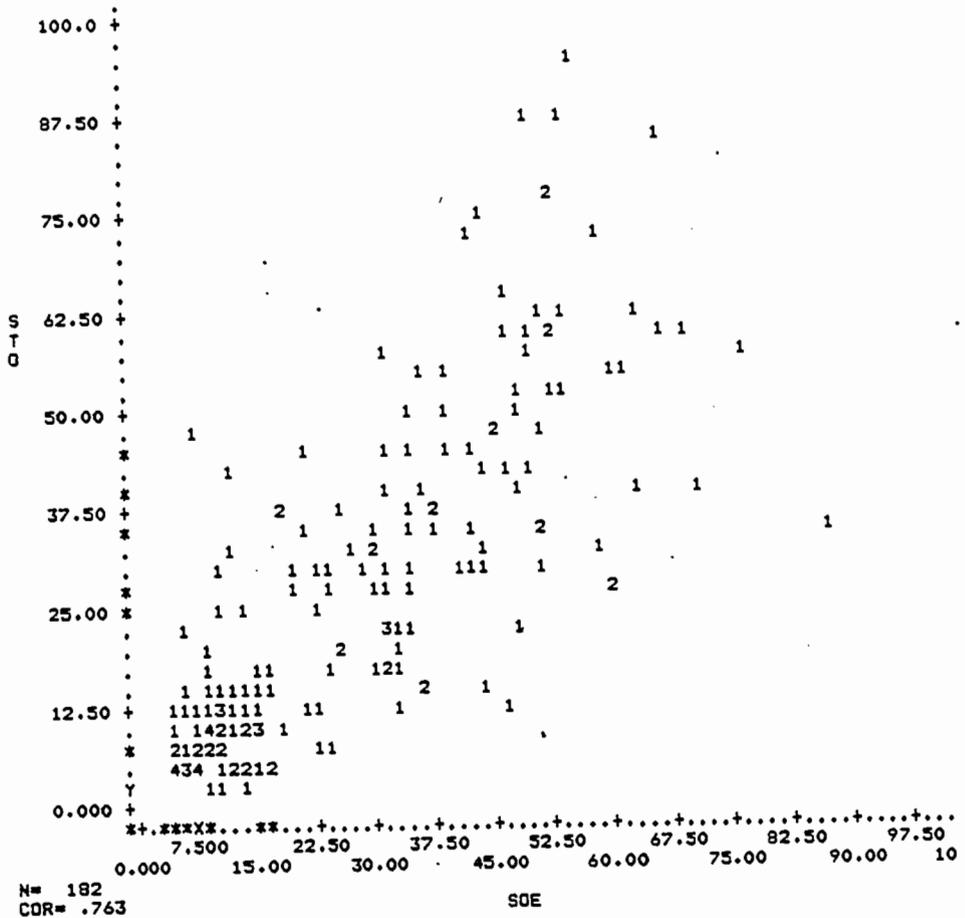


Fig. 34 - Relation Soufre total - Sulfates solubles

Cette relation est intéressante dans la mesure où elle permet, d'une part, grâce à une détermination rapide et fiable du sulfate soluble, d'avoir une idée de la valeur du soufre total, d'autre part, de relier aisément cette valeur à l'acidité potentielle de ces sols.

## 7. SOUFRE ET ACIDITE POTENTIELLE

Tout au long de l'étude du pH et des composés du soufre, nous avons dit et répété que l'acidité des sols des mangroves et des tannes était due à l'oxydation des composés réduits du soufre, notamment de la pyrite. On pourrait donc s'attendre à trouver, associées aux plus basses valeurs du pH les valeurs les plus élevées du soufre total. Or, on constate que, prises dans leur totalité, pour 191 valeurs du pH sec et du soufre total,

la corrélation est très lâche ( $r = 0,461$ ), alors que pris individuellement, les résultats sont différents selon les séquences (tabl. XXXI).

Tableau XXXI

Corrélation pH - Soufre total  
dans les séquences

Séquence	BASSID	N'DIMSIROH	OUSSOUYE	TOBOR	GAMBIE	BALINGORE
Nombre d'échantillons	49	33	25	21	29	34
pH	3.8	3.6	3.1	4.1	3.5	3.2
S total	16.9	26.5	22.7	53.3	24.3	40.3
Corrélation r	- 0.350	- 0.533	- 0.575	- 0.760	- 0.830	- 0.882

La fig. 35 montre que la corrélation est négative est très bonne, à Tobor, Gambie et surtout Balingore, alors que dans les deux séquences du Saloum et à Oussouye, elle est moyenne à faible. Or, dans le premier cas, il s'agit de séquences à texture homogène et argileuse, alors que dans le Saloum et à Oussouye, comme dans toute la partie Sud de la Casamance, on a des séquences très hétérogènes et à dominance sableuse. A cela, il faut ajouter que dans le Saloum, une salinité très élevée des nappes et des sols contribue à tamponner l'acidité au point que le pH sec y est souvent supérieur au pH "in situ".

Nous avons vu qu'il existait entre les sulfates solubles de l'extrait aqueux et le soufre total une bonne corrélation. Nous avons donc recherché si, parallèlement, il y avait une corrélation entre le pH sec et les sulfates solubles d'autant que VIEILLEFON (1977) avait constaté que les basses valeurs du pH étaient associées à d'importantes quantités de sulfates jusqu'à des teneurs de l'ordre de 25 meq pour 100 g. Au dessus de cette valeur, on n'observe qu'une faible variation du pH.

Pour 205 échantillons provenant des 6 séquences, on trouve entre le pH sec et les sulfates solubles de l'extrait aqueux, une relation de la forme

$$\text{pH} = -0,477 \text{ SO}_4 + 5,07$$

avec une corrélation  $r = -0,569$ , meilleure qu'entre le pH et le soufre total. Sur la figure 36 nous avons porté les valeurs du pH sec en ordonnée et celles des sulfates solubles de l'extrait aqueux au 1/10 en abscisse, et l'on constate effectivement que pour les échantillons de Balingore et de Gambie le pH est compris entre 2 et 3,5 pour des taux de sulfates solubles supérieurs à 25 meq/100 g. S'en écartent cependant plusieurs échantillons de Tobor pour lesquels le pH est supérieur à 3,5. Inversement, de nombreux échantillons de Bassid et d'Oussouye, provenant donc de séquences sableuses ont un pH acide malgré les teneurs en sulfate solubles inférieur à 25 meq. Quant aux échantillons de N'Dimsiroh, limoneux, ils sont regroupés en 2 lots pH compris entre 2 et 2,5 pour des taux de sulfate compris entre 30 et 35 meq et supérieur à 6 pour des taux de sulfates compris entre 5 et 10 meq.

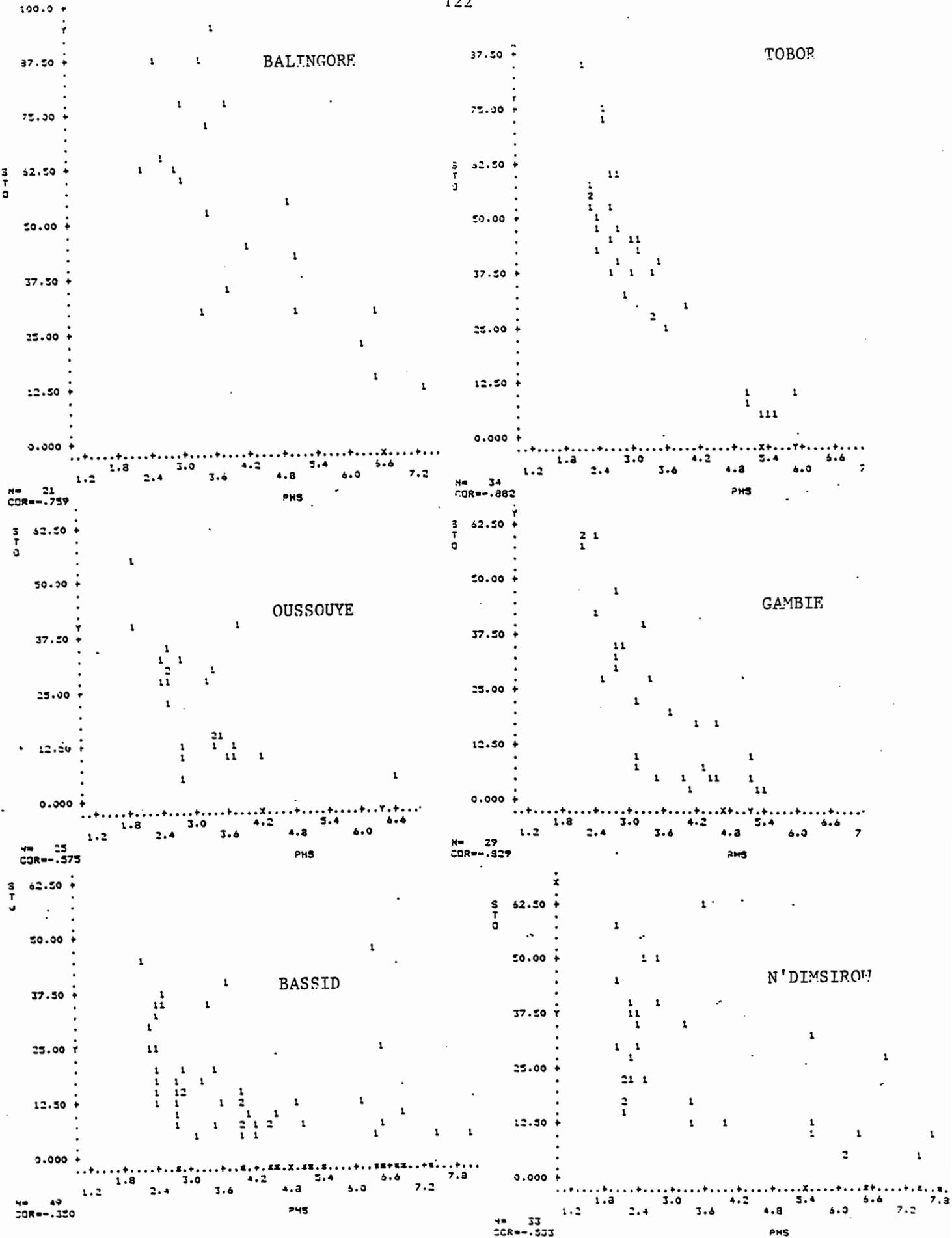


Fig. 35 - Relation pH sec (PHS) - Soufre total (STO)

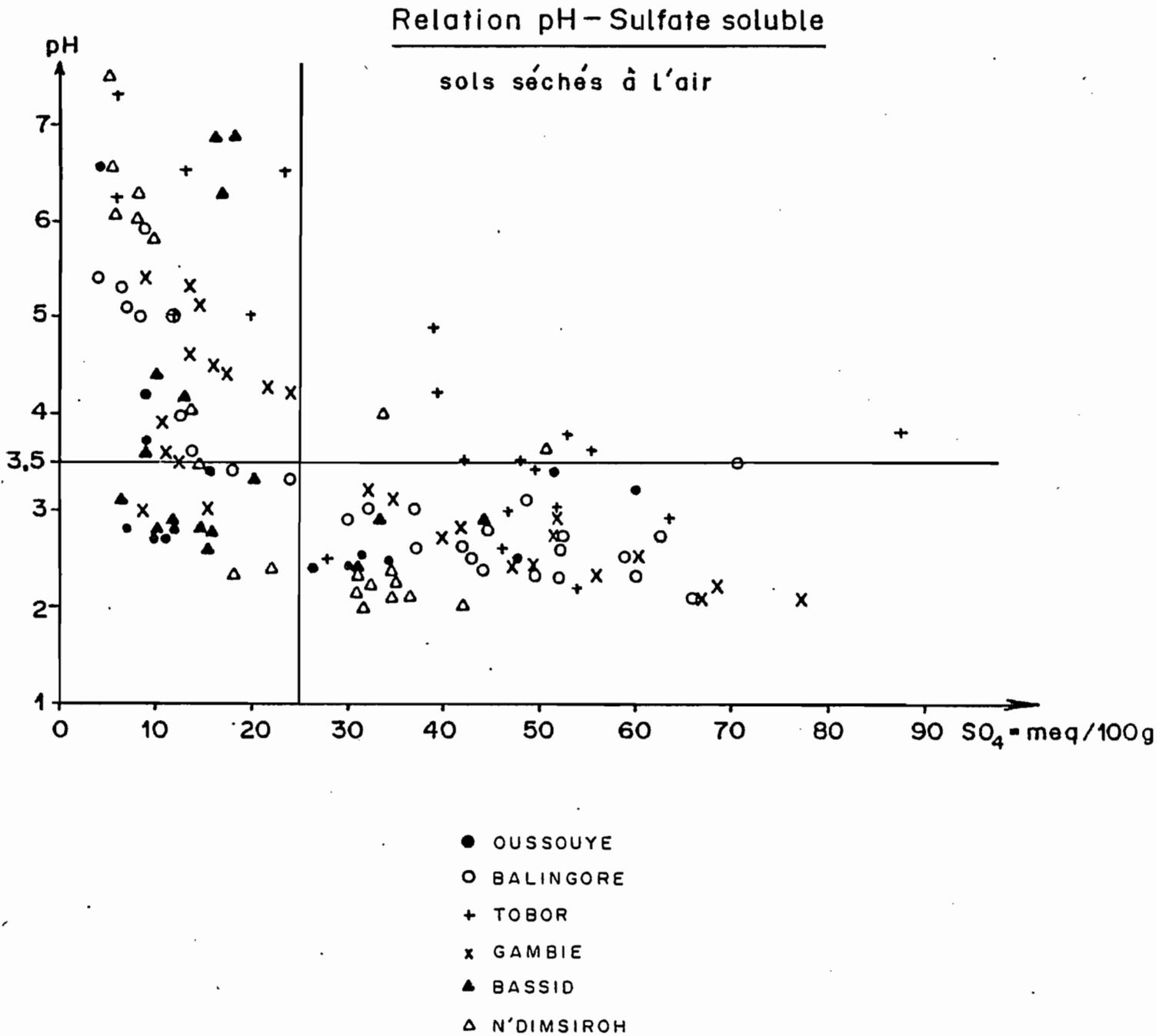


Fig. 36 - Relation pH sec - sulfates solubles

Par ailleurs, si l'on examine les corrélations pH sec - sulfates solubles, séquence par séquence (tabl. XXXII ; fig. 37), on retrouve sensiblement les mêmes résultats que dans le cas des corrélations pH - S total.

Tableau XXXII

Relation pH sec - sulfates solubles  
dans les séquences

Séquences	N'DIMSIROH	BASSID	GAMBIE	TOBOR	BALINGORE	OUSSOUYE
Nombre d'échantillons	34	64	28	21	34	24
Moyenne pH	3.97	4.35	3.45	4.13	3.24	3.08
Moyenne Sulfates	24.20	15.8	32.9	39.95	36.7	23.6
Corrélation	- 0.693	- 0.402	- 0.855	- 0.767	- 0.813	- 0.490

On constate qu'à l'exception des 2 séquences hétérogènes et sableuses (Oussouye et Bassid), la corrélation est généralement bonne à très bonne entre le pH sec et les sulfates solubles. Or, cette forme de soufre représente une fraction relativement constante du soufre total dans les 6 séquences - environ 15 à 20 % - et, par ailleurs, on peut la doser rapidement par une méthode très largement utilisée, alors que, pour les autres formes du soufre, les méthodes varient considérablement d'un auteur à un autre sans qu'on sache d'ailleurs généralement très bien ce qu'on dose en dehors du soufre total, car même dans le cas des sulfates solubles de l'extrait aqueux au 1/10, il n'est pas évident qu'on ait dosé *tous* les sulfates solubles puisque nous avons vu avec les expériences d'assèchement et de réhumectation successifs (MARIUS, 1976 ; VAN BREEMEN, 1976) que l'acidité maximum n'était atteinte qu'au bout de plusieurs mois. Tout au plus, est-on certain que dans l'extrait aqueux au 1/10 on dose l'ensemble des sulfates de la solution du sol et des sulfates produits par le séchage à l'air. Cette méthode a cependant l'avantage d'être facile à mettre en oeuvre tout en présentant une bonne corrélation avec le pH sec. Elle donne donc une bonne idée de l'acidité potentielle d'un sol.

## 8. CONCLUSION

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) ;

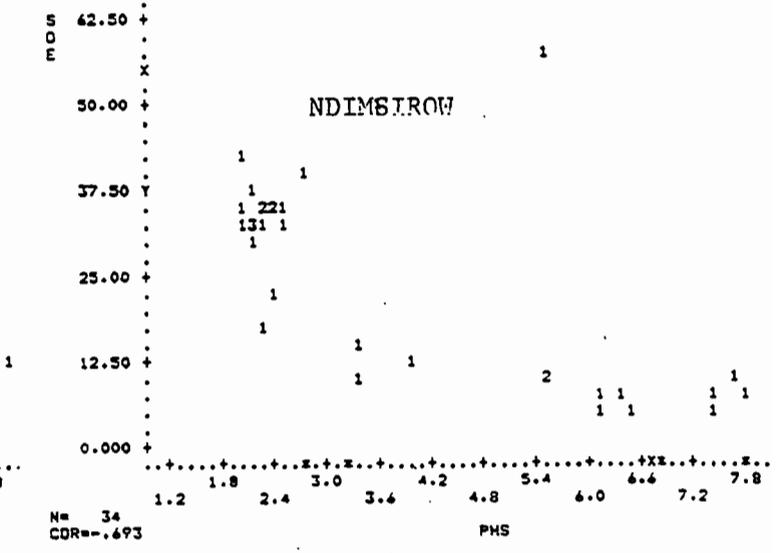
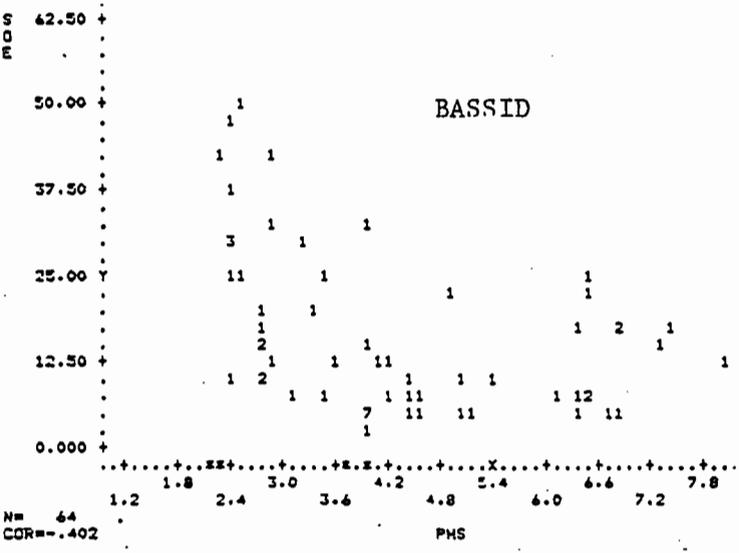
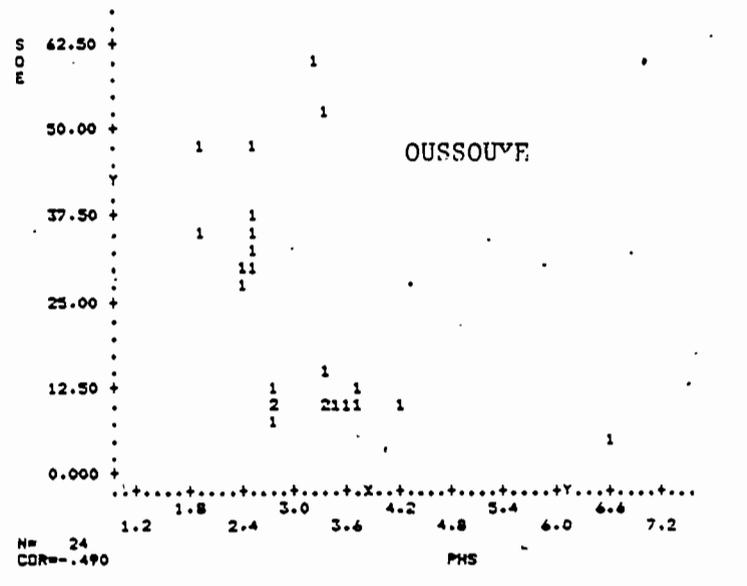
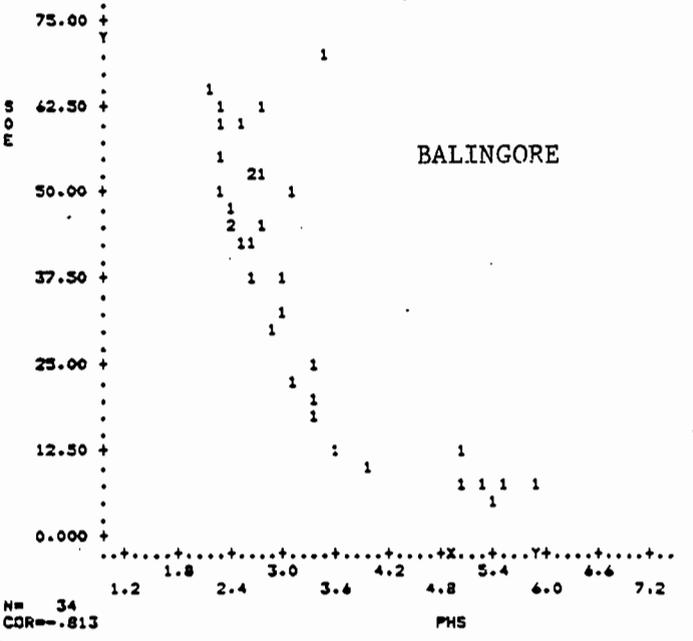
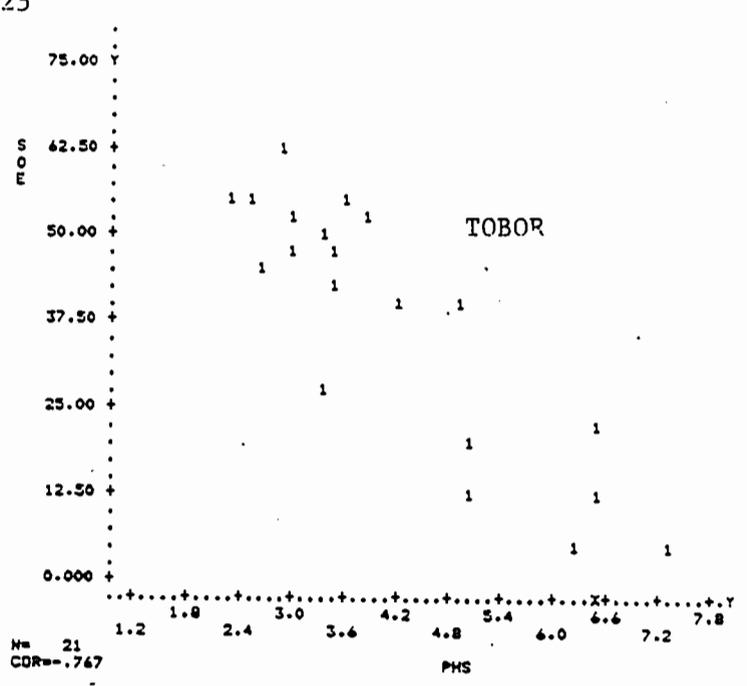
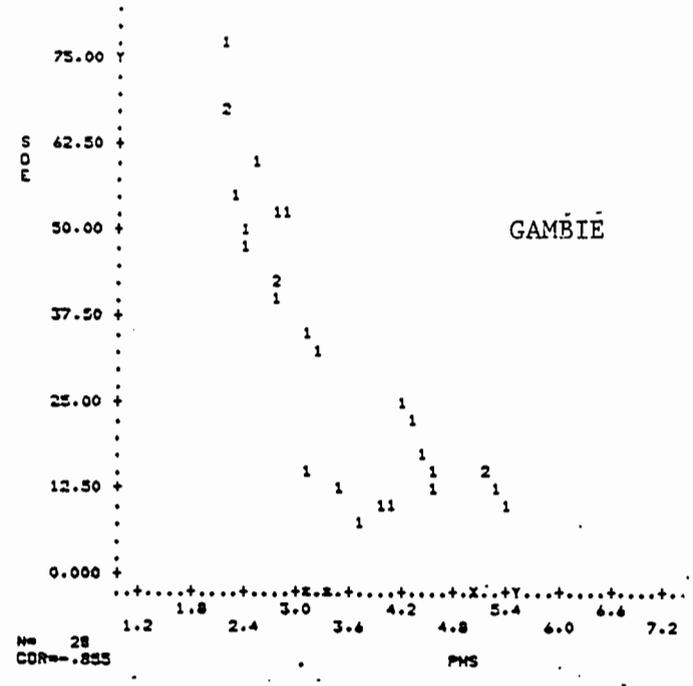


Fig. 37 - Relation pH sec - Sulfates solubles  
 (pHS = pH sec - SOE = sulfates solubles en meq/l)

- 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 sulfaté-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 (Balingore), 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 dessalées 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 sulfaté-acides. En effet dans toutes les régions où les sols de mangroves ont été étudiés, on observe que :

soit, les sols potentiellement sulfaté-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 des 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).



## Chapitre VII

LA MATIERE ORGANIQUE DANS  
LES SOLS DE MANGROVES

## 1. INTRODUCTION - METHODES D'ANALYSE

Dans son introduction à la Géochimie Organique des faciès deltaïques, R. PELET (1974), traitant du dépôt et de la diagenèse de la matière organique dans le delta du Niger écrit "Il est regrettable de ne pas posséder d'études géochimiques des grandes mangroves de l'intérieur du delta, car elles constituent certainement la source la plus importante de la matière organique sédimentée jusque dans la plaine abyssale. D'autre part, elles représentent elles mêmes un milieu géologique bien particulier qui, sans avoir l'étendue et la généralité du faciès deltaïque peut cependant être intéressant par sa concentration exceptionnelle en matière organique. Peut être se trouve-t-on là devant de futurs schistes bitumeux".

Cette réflexion est valable pour toute les mangroves tropicales car si les études concernant la géochimie du soufre sont relativement limitées (Sénégal, Sierra Leone, Thaïlande), celles concernant la matière organique sont inexistantes alors que, comme pour le soufre, la géochimie organique des sédiments marins a fait l'objet de nombreuses études, notamment à l'occasion des différentes missions ORGON (I, Mer de Norvège - II, Côte sédimentaire de l'Amazone, Venezuela - III, Sénégal, Mauritanie) dont le but était d'étudier la sédimentation et la diagenèse précoce de la matière organique sur les marges continentales et de proposer des modèles de sédimentation organique définis dans la nature actuelle et transposables aux bassins sédimentaires fossiles.

Sur tous les échantillons prélevés, soit à l'occasion de notre prospection des îles du Saloum, soit à l'occasion des carottages profonds, soit enfin pour les 6 séquences étudiées ici, on a dosé le Carbone Organique. Ce sont donc des centaines d'échantillons qui ont été analysés, par *voie sèche*, à l'aide du Carmograph 12 de WOSTHOFF. En effet, les méthodes usuelles de dosage du Carbone organique, par voie humide (WALKLEY et BLACK, à froid et ANNE, à chaud) sont inadaptées aux sols salés.

Le principe de la méthode au Carmograph est d'oxyder la matière organique de l'échantillon sous courant d'oxygène, dans une enceinte portée à 1000°. L'anhydride carbonique dégagé est recueilli dans une solution de soude N/25. La variation de conductivité de cette solution permet de connaître la quantité totale de carbone oxydée.

A la sortie du four de combustion le courant gazeux passe dans un petit four contenant de l'oxyde de cuivre. A la sortie de ce four, de la laine d'argent et du iodure de potassium permettent d'absorber les halogènes. Enfin, avant d'arriver dans la cellule contenant la soude diluée, le courant gazeux passe d'abord à travers un piège à perhydrite où le SO<sub>2</sub> formé au cours de la combustion est absorbé, ensuite à travers de la ponce sulfurique qui absorbe la vapeur d'eau.

## 2. RAPPEL DE QUELQUES DEFINITIONS

Les débris végétaux de toutes sortes : feuilles, racines, racicelles... présents à la surface du sol sont plus ou moins rapidement décomposés par l'activité biologique. Il en résulte une masse végétale encore peu transformée : la litière et une matière organique transformée qui constitue ce qu'on appelle couramment "l'humus". L'humus lui-même est composé de deux grandes fractions : une fraction extractible aux solutions alcalines, formée d'acides humiques (AH) et d'acides fulviques (AF) et une fraction non extractible aux solutions alcalines : l'humine.

Dans les acides humiques, on distingue généralement deux groupes : les acides humiques bruns, relativement labiles et faiblement liés aux argiles et les acides humiques gris plus foncés et intimement liés à l'argile. Quant à l'humine, c'est une fraction très hétérogène et DUCHAUFOR (1973) a distingué plusieurs sortes d'humines de nature et d'origine très différentes : humine héritée ou résiduelle, humine d'insolubilisation, humine microbienne, humine évoluée.

La solution alcaline la plus couramment utilisée pour extraire les acides humiques et les acides fulviques est le pyrophosphate de sodium à pH 10 \*\*. Le dosage du Carbone des différentes fractions est ensuite effectué au Carmograph. Le rapport  $\frac{AF + AH}{C \text{ total}}$  représente le *taux d'humification* de la matière organique.

Enfin, parmi les propriétés de la matière organique fraîche, il faut retenir celle de l'Azote, comme accélérateur de l'humification. L'azote total a été dosé par la méthode KJELDAHL (attaque par  $H_2SO_4$  en présence d'un catalyseur et dosage par colorimétrie automatique)<sup>2</sup> et le rapport C/N est l'un des paramètres biochimiques importants, utilisé depuis longtemps pour caractériser le degré de décomposition de la matière organique et le type d'humus. Il est en effet de 10-15 pour le mull, de 15-25 pour le moder et supérieur à 25 pour le mor (DUCHAUFOR, 1977).

## 3. REPARTITION DE LA MATIERE ORGANIQUE

Avant de traiter de la répartition de la matière organique dans les séquences, nous dirons un mot de cette répartition en profondeur.

### A. LA MATIERE ORGANIQUE DES FORAGES

Le Carbone Organique a été dosé sur tous les échantillons de toutes les carottes, sans exception. Les résultats permettent de distinguer deux zones assez distinctes du point de vue des teneurs en C, exprimées en pour cent de sol séché.

- une zone proche de l'embouchure des fleuves où le taux de Carbone est généralement compris entre 1 et 2 %, valeurs comparables à celles observées dans les séries deltaïques ;
- une zone située en amont des marigots où le taux de Carbone est nettement supérieur à 2 %, les teneurs les plus fortes étant observées à Balingore, Guidel et dans certains niveaux d'accumulation

---

\*\* La séparation des acides humiques et des acides fulviques est effectuée en milieu acide avec une solution de  $H_2SO_4$  concentré.

tourbeuse (Baïla, Diouloulou ...).

Parallèlement, on note que le rapport C/N qui mesure le degré d'évolution de la matière organique est compris entre 10 et 20, pour les carottes proches de l'embouchure, indiquant une matière organique relativement bien évoluée alors qu'à l'amont des marigots, le rapport est compris entre 20 et 30 indiquant la présence d'une matière organique moins bien décomposée, en liaison notamment avec les accumulations tourbeuses sous palétuviers.

Le taux d'extraction des composés humiques par les solutions alcalines est, dans l'ensemble, faible et varie de 10 à 50 % (fig. 38) sans que l'on puisse observer sur l'ensemble des carottes, des variations ordonnées en fonction de la profondeur. C'est dans le fleuve Sénégal, le Saloum et à un degré moindre à Tobor, en Casamance que le taux d'humification est le plus élevé. Par contre dans les trois carottes de Gambie et la plupart de celles de Casamance, le taux d'humification est faible indiquant que la plus grande partie de la matière organique est constituée par l'humine. On note, par ailleurs, que dans les composés humiques, ce sont les acides fulviques qui prédominent sur les acides humiques. En effet, dans la très grande majorité des échantillons, le rapport AF/AH est nettement supérieur à 1.

Tous ces résultats s'accordent à indiquer que les acides humiques des sédiments de mangroves sont des acides humiques *terrestres*, car d'après HUC (1973), DURAND (1973) les acides humiques marins d'origine planctonique sont beaucoup plus solubles dans les solutions alcalines et la fraction extraite peut être de 70 à 75 % du Carbone organique, d'une part, et leur rapport AF/AH est très nettement inférieur à 1, d'autre part. Une étude plus détaillée des acides humiques des mangroves (FELLER, en prép.) doit permettre d'identifier les différents composés et de préciser leur origine. Dans deux des carottes : Tobor et Balingore, l'aspect optique de la matière organique a été étudié par C. TISSOT et al. (1983) qui signalent que les deux carottes se composent d'éléments sensiblement identiques mais avec des proportions légèrement différentes selon les niveaux.

A Balingore, le niveau de surface est caractérisé par une prédominance de la matière organique figurée (70 %) dont le taux de représentation diminue avec l'enfouissement (30 %). Il faut noter la présence constante et relativement importante de la pyrite sur toute la carotte (2 à 5 %).

A Tobor, la matière organique amorphe est la plus abondante et elle augmente avec l'enfouissement (60 à 80 %). Les débris ligneux, de plus petite taille, sont moins abondants, en général. La pyrite est très abondante (7 % environ).

D'après ces observations et devant le très faible nombre d'éléments organiques, d'origine extérieure, observés dans les sédiments (pollen ou spores d'origine lointaine, kyste de dinoflagellés ou foraminifères) on peut penser que la matière organique est principalement autochtone et d'origine continentale.

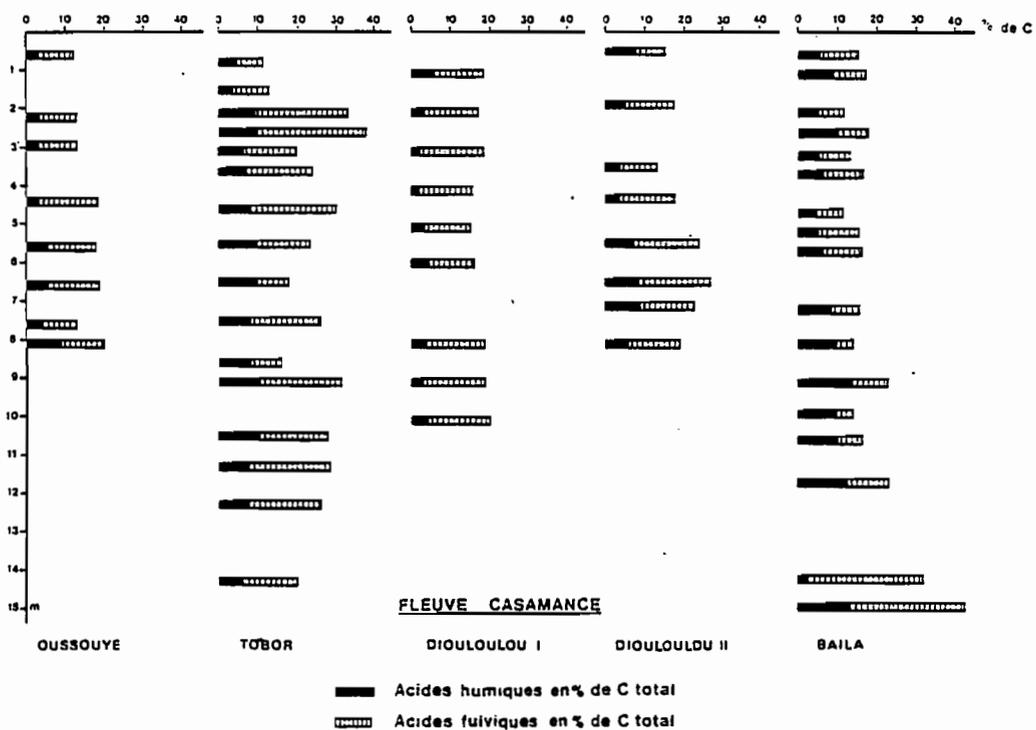
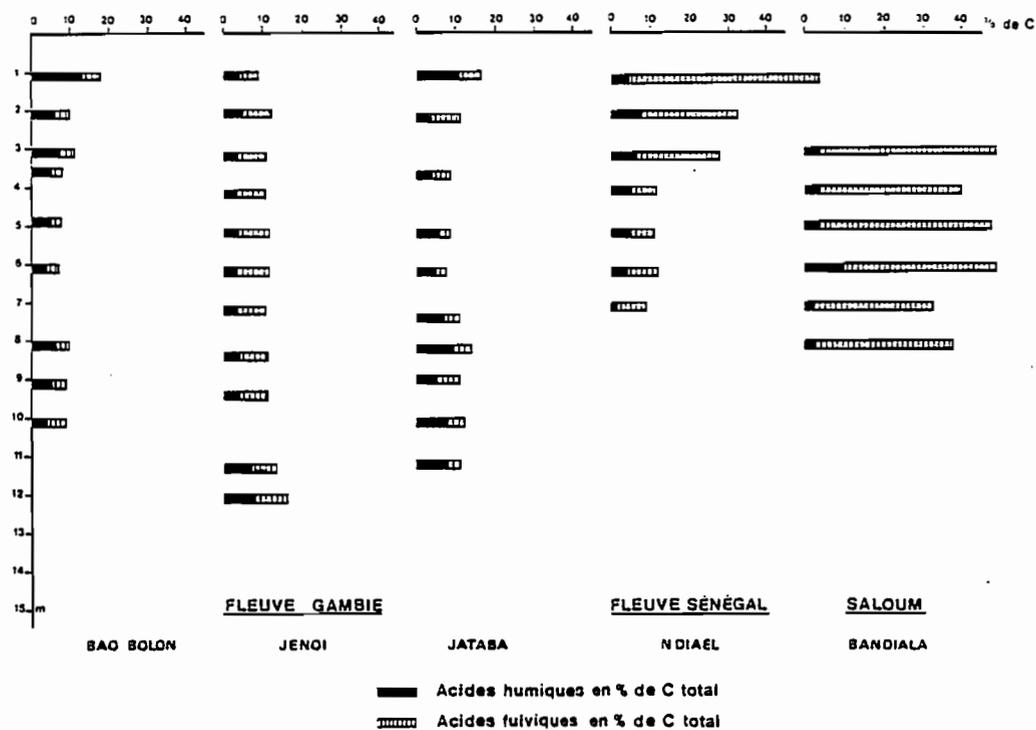


Fig. 38 - Répartition de la Matière organique dans les forages profonds

B. REPARTITION DE LA MATIERE ORGANIQUE DANS LES SEQUENCES

a) Carbone, Azote et taux d'humification

Dans le tableau XXXIII nous donnons, pour plus de 200 échantillons, les valeurs moyennes du carbone et de l'azote, en signalant qu'il existe entre ces deux valeurs une excellente corrélation (fig. 39).

Tableau XXXIII

Teneurs moyennes en C et N - en % du sol séché						
	Nombre d'échantillons	Valeur maximum	Valeur minimum	Valeur moyenne	Variance	Ecart type
Carbone %.	215	155	0.9	28.6	760.4	27.57
Azote %.	212	6.5	0.05	1.04	0.91	0.95

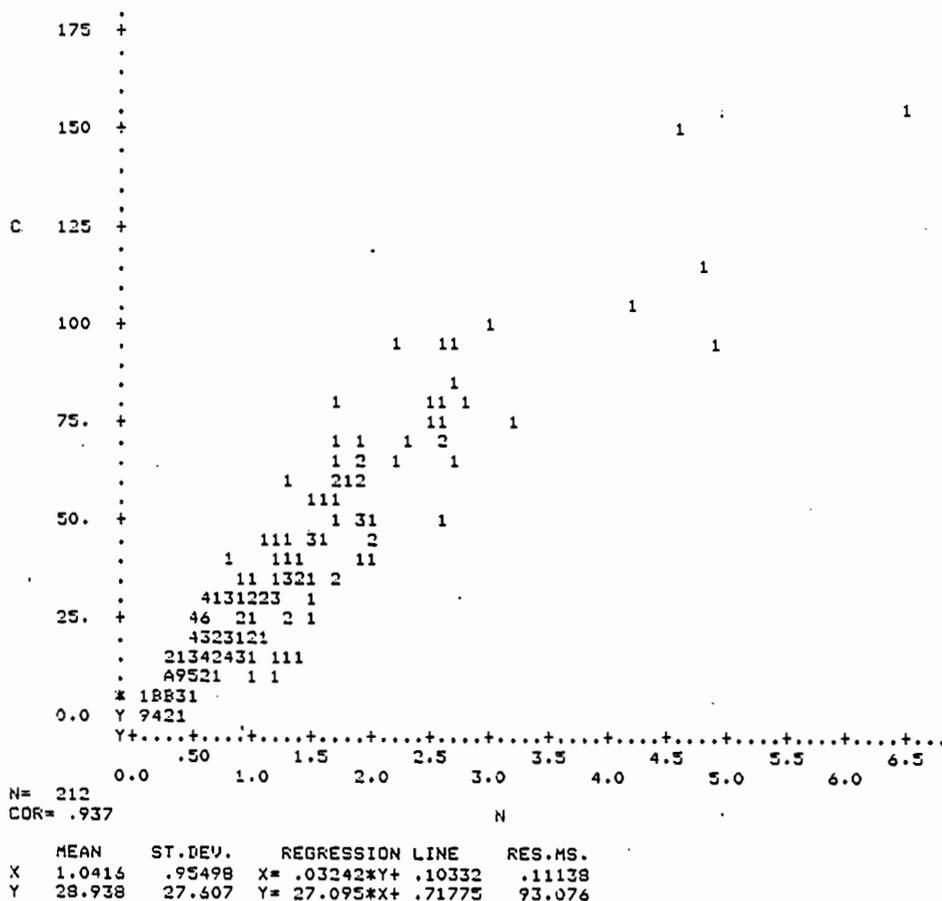


Fig. 39 - Relation C - N dans les séquences

Le rapport C/N est de 27,5 indiquant une matière organique peu décomposée, ce qui est d'ailleurs le cas le plus fréquent comme l'atteste la présence de fibres et de débris végétaux plus ou moins abondants, allant jusqu'à parfois constituer un véritable horizon tourbeux, en surface ou en profondeur. En effet, l'observation des profils a montré que sous *Rhizophora racemosa*, l'horizon de surface, sur 50 cm au moins, est constitué d'un mat de fibres peu décomposées, de couleur rouge à Oussouye, et brune à Balingore et à Bassid.

De la mangrove au tanne, il y a une diminution de la matière organique, en surface, comme le montre le tableau XXXIV.

Tableau XXXIV

Evolution de la Matière organique en surface  
dans les séquences  
en C %

Végétation	R. racemosa	R. mangle	Avicennia	Tanne inondé	Tanne vif	Tanne herbacé
Oussouye	> 10	15	0.5	0.5	0.5	
Tobor		10	5	0.5	1.5	0.6
Balingore	15	5	2		1	2
Gambie	9		3		2	3
Bassid	10	6	2.5	0.4	0.2	1.5
N'Dimsiroh		6.5	2	0.1	0.1	

Si l'on excepte les horizons tourbeux sous *Rhizophora*, on constate que le taux de matière organique n'est pas élevé en surface parce que son accumulation est faible sous *Avicennia* et que, dans les tannes inondés et vifs, il n'y a plus du tout de dépôt et d'accumulation de matière organique, sinon par l'intermédiaire des feuilles de palétuviers transportées par les marées. A Bassid, notamment, dans toute la zone "tanne", inondée ou exceptionnellement inondée, on observe fréquemment une couche superficielle de 2 à 3 cm, très noire, dans laquelle on reconnaît les feuilles de palétuviers décomposées. Au séchage, cette couche noire s'éclaircit très rapidement. A cela, il faut ajouter la présence fréquente dans le tanne inondé, de zones plus ou moins grandes, irrégulièrement réparties, et constituées d'un mat algair recouvrant une mince pellicule verdâtre (pl. VIII). Ce mat algair formé de boursouflures est morphologiquement différent de la "moquette" poudreuse qu'on observe plus généralement soit dans le tanne vif, soit dans les tannes herbacés transformés en tannes vifs par la sécheresse. On retiendra cependant que le mat algair s'observe surtout dans les tannes sableux (Bassid, Oussouye) et jamais dans les tannes argileux (Balingore, Gambie, Tobor).

Dans le tanne herbacé, la pénétration dense des racines contribue à relever le taux de matière organique en surface.

Dans le profil lui-même, la répartition de la matière organique est très désordonnée quand on passe de la mangrove au tanne et cela en liaison soit avec des horizons de texture différente, soit avec la présence d'horizons tourbeux à différentes profondeurs dans le profil (Bassid - Oussouye).

Par contre, on note que dans les séquences à texture homogène, argileuse (Gambie, Balingore) ou limoneuse (N'Dimsiroh) la diminution du taux de matière organique dans les horizons de profondeur est régulière et progressive de la mangrove au tanne.

Il est intéressant de suivre dans les séquences, l'évolution du taux d'humification qui est le rapport du Carbone des matières humiques totales (Acides humiques + Acides fulviques) sur le Carbone Organique total (fig. 40 - 41). On constate que le taux d'humification est faible - de l'ordre de 10 % - sous Rhizophoras et qu'il augmente progressivement pour être de 50 % environ et parfois plus (N'Dimsiroh, Bassid) dans le tanne vif. On remarque, en particulier, que c'est dans l'horizon à taches brunes "purée de marron" que le taux d'humification est généralement le plus élevé. De 50 à 90 % de la matière organique totale serait donc sous forme d'humine.

L'humification plus importante de la matière organique dans les tannes est à relier, semble-t-il, à l'action stimulante des alternances saisonnières contrastées sur la biodégradation et la minéralisation de la fraction labile de la matière organique. Dans la mangrove, milieu saturé d'eau en permanence et caractérisé par une forte anaérobiose, l'activité biologique est considérablement ralentie et la décomposition de la matière organique fraîche est très lente et incomplète, de sorte que les apports excèdent les pertes par minéralisation et l'on obtient une tourbe fibreuse qui répond aux définitions des tourbes acides de DUCHAUFOR (1977) ; à savoir notamment, un pH bas, inférieur à 4 et un rapport C/N très supérieur à 30. Dans le tanne qui est le terme de la séquence évolutive, l'humus est un anmoor, caractérisé par une augmentation marquée de l'ensemble des composés humiques, accompagné d'une certaine maturation et lié aux alternances pédoclimatiques de longue durée.

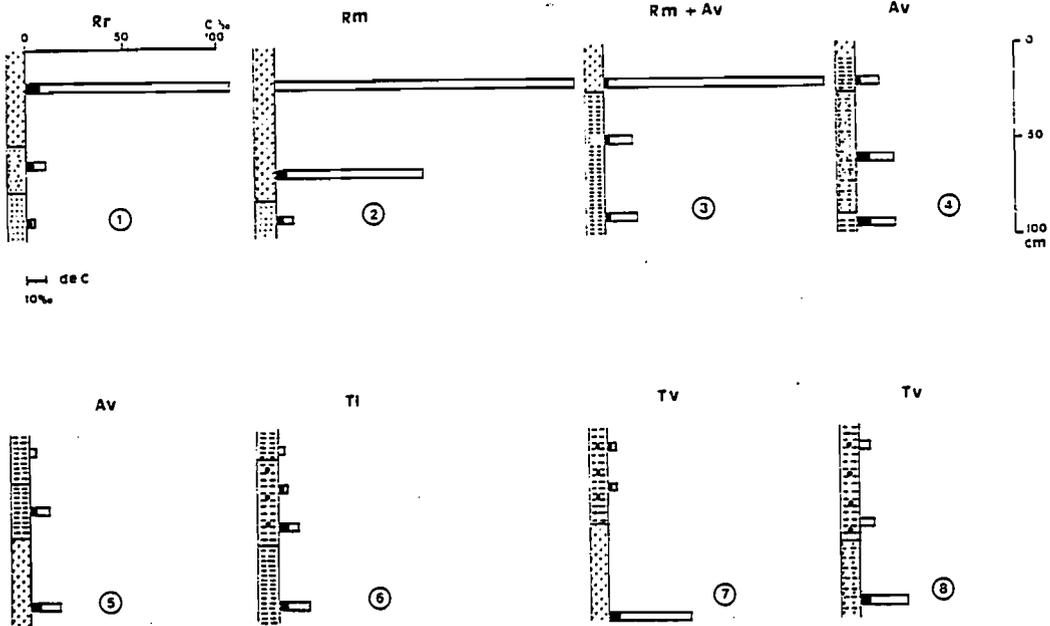
#### *b) Matière organique et rapport C/N*

Nous avons dit que la matière organique de la mangrove était une tourbe acide parce que le rapport C/N était supérieur à 30. En effet, on remarque que dans toute les séquences, le rapport C/N dans l'ensemble du profil des mangroves est voisin ou légèrement supérieur à 30, mais c'est son évolution dans les séquences qu'il est intéressant à considérer. En effet, à Tobor et en Gambie, le rapport C/N décroît progressivement de 30 dans la mangrove à 15-25 dans le tanne sur tout le profil. A Balingore le rapport C/N reste pratiquement constant et voisin de 30 en profondeur dans toute la séquence. A Oussouye et à Bassid - les deux séquences hétérogènes - la variation du rapport C/N dans la séquence est désordonnée et dans certains horizons profonds tourbeux (CMB 8, CMO 8) ce rapport est supérieur à 50, bien que le taux de Carbone ne soit jamais très élevé (2 - 4 %). Il s'agit souvent d'horizons dans lesquels les débris végétaux sont peu décomposés. Dans le Saloum, nous avons pu retrouver à plus de 2 m de profondeur, dans certains profils, des troncs de Rhizophora encore reconnaissables. Ils ont été datés de 5465 B.P. par J.C. FONTES.

A N'Dimsiroh, la variation du rapport C/N dans la séquence est inverse de celle observée ailleurs. On constate en effet, qu'il est plus élevé à partir du profil 3, dans le tanne inondé que dans les profils de mangrove, en profondeur et qu'il augmente assez régulièrement jusqu'au tanne vif. De l'ordre de 25, dans la mangrove, le rapport C/N en profondeur est voisin de 40, dans le tanne inondé (CMN 3 à 6) et de 50 à proximité du tanne vif (CMN 7 à 10). Ceci semble indiquer que dans cette séquence les horizons profonds sont constitués de débris végétaux récents en conditions

OUSSOUYE

Repartition du carbone et du taux d'humification



BALINGORE

Repartition du carbone et du taux d'humification

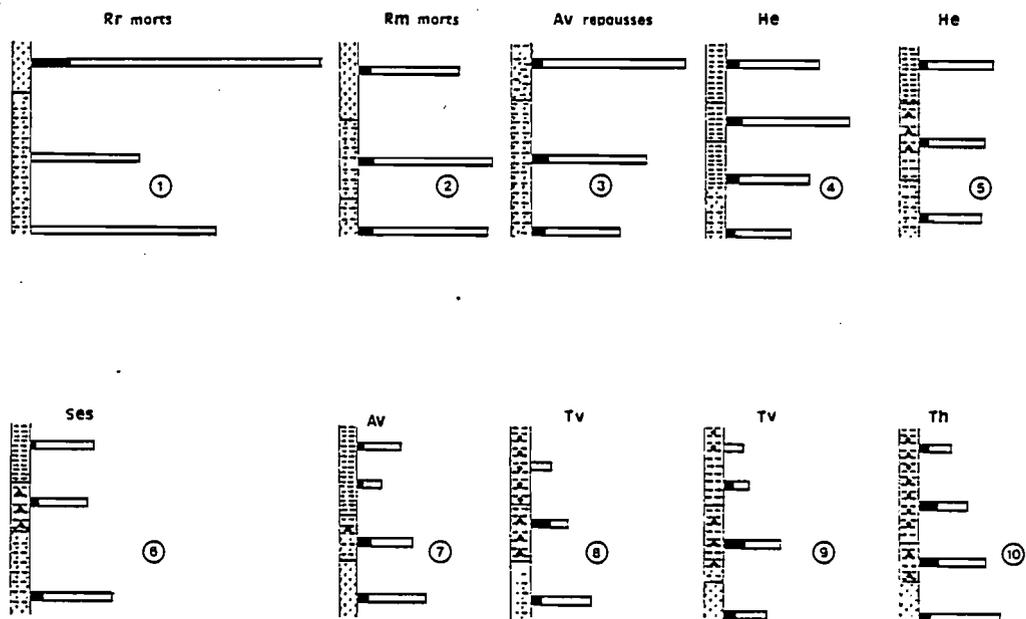
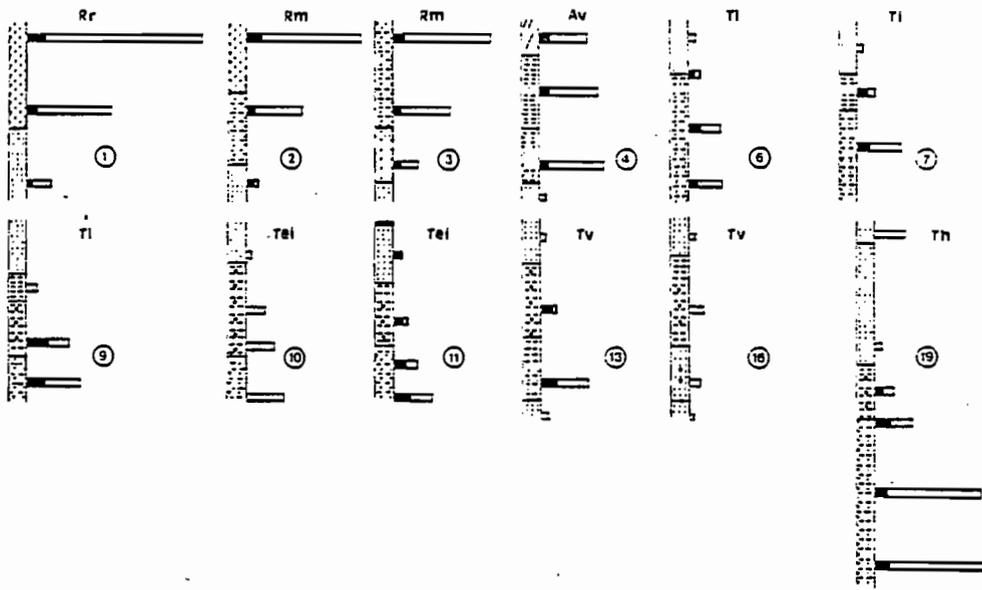
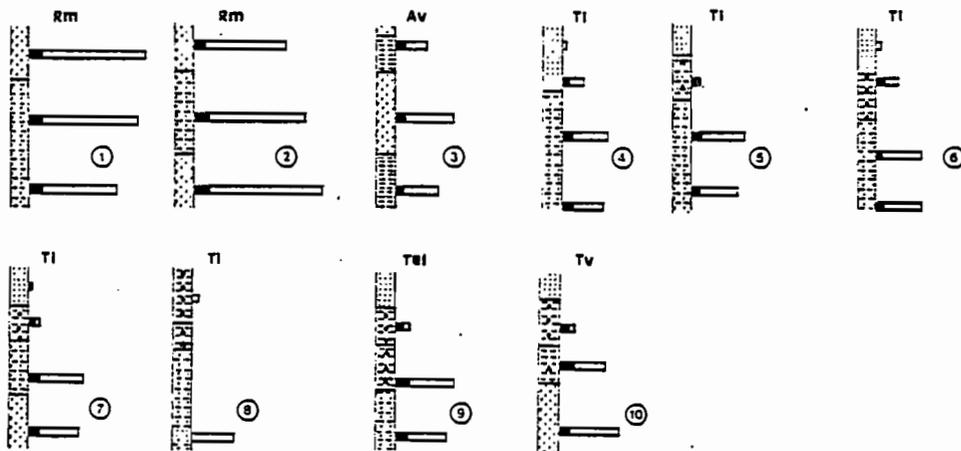


Fig. 40 - 41 - Répartition du Carbone et du taux d'humification dans les séquences.

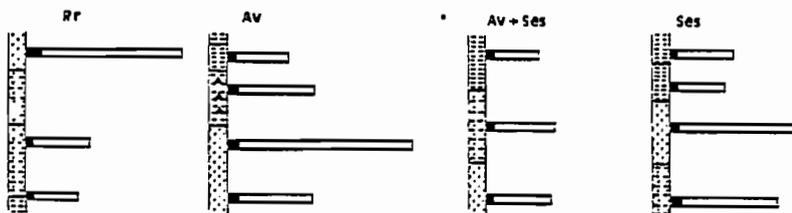
**GASSIO**  
 Repartition du carbone et du taux d'humification



**NDIMSIRON**  
 Repartition du carbone et du taux d'humification



**GAMBIE**  
 Repartition du carbone et du taux d'humification



**LEGENES COMMUNE**

**VEGETATION**

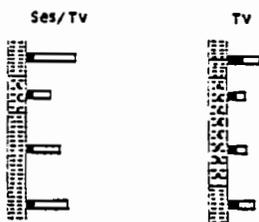
- Rr : *Rhizanora racemosa*
- Rm : mangie
- AV : *Avicennia*
- He : *Heliconia*
- Ses : *Sesuvium*
- TI : Tanne inondé
- Tei : Tanne exceptionnellement inondé
- Tv : Tanne viv
- Th : Tanne herbacé

**PROFIL**

- Soie
- Argile
- Flores
- Argile fibreuse
- Horizon à jarosite
- Horizon purée de marron

0 10 50 Teneur en C %

Taux d'humification %



d'anaérobiose permanente. On note aussi, que d'une manière générale, le rapport C des premiers mètres est plus élevé que celui des couches profondes. En N effet, dans les carottages profonds, le rapport C/N se situe presque partout entre 15 et 25.

La matière organique des mangroves du Sénégal est donc, en grande partie, constituée de débris végétaux (fibres, racines, radicelles) peu décomposés formant une tourbe à rapport C/N élevé et dont l'évolution est plus rapide en milieu argileux et humide. (Casamance) qu'en milieu sableux et sec (Saloum).

*c) Matière organique et consistance*

Nous avons vu, en étudiant les propriétés physiques des sols de mangroves que la consistance était l'une des caractéristiques essentielles de ces sols. Cette consistance, estimée par une valeur n, est liée à la teneur en eau et la densité apparente des sols. Sous les palétuviers et sous Rhizophora, en particulier, le sol est très riche en eau et de densité apparente faible grâce notamment à l'abondance de la matière organique, tourbeuse qui se comporte comme une véritable éponge.

Nous avons donc recherché les corrélations entre la matière organique exprimée en % de Carbone et la teneur en eau en % du sol séché à 105°, d'une part, et entre la matière organique et la densité apparente d'autre part, (fig. 42). Pour plus de 150 échantillons, on constate qu'il y a une très bonne corrélation positive entre le Carbone et la teneur en eau, d'une part (n = 0,846) et que les valeurs sont regroupées entre 30 et 200 % pour la teneur en eau et 0 et 10 % pour la Carbone Organique, d'autre part.

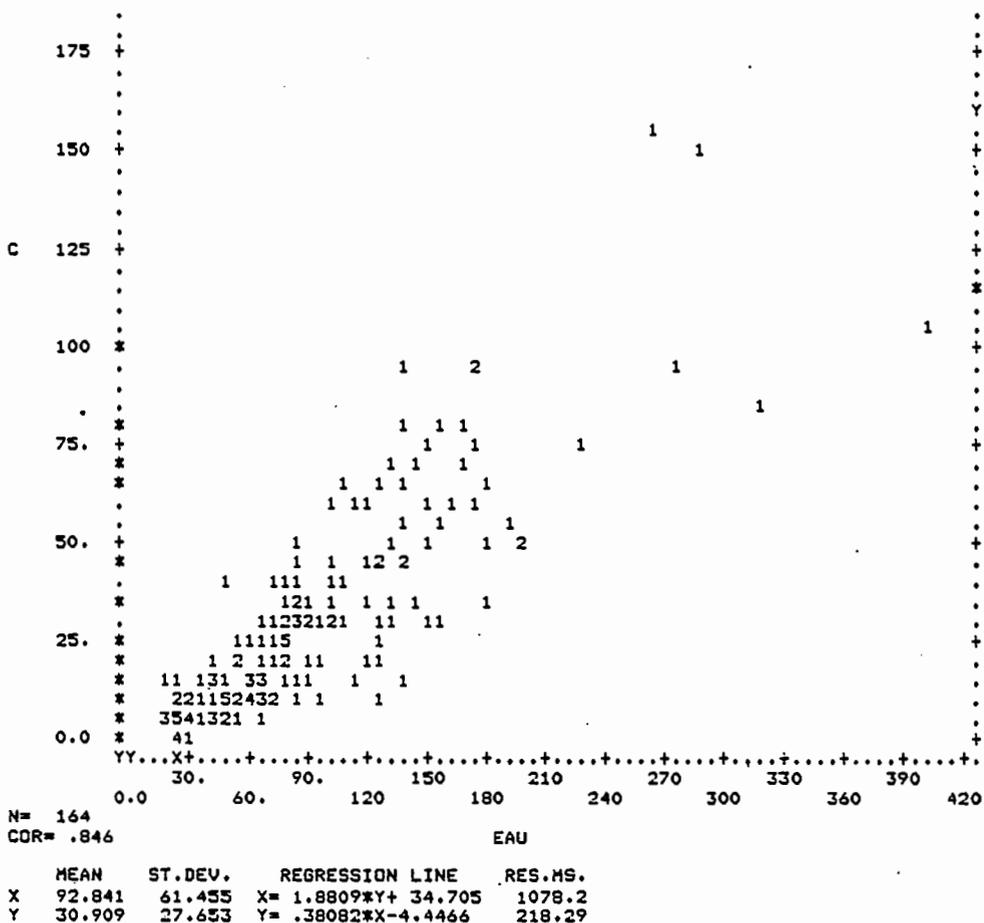


Fig. 42 - Relation Carbone-teneur en eau

Ce résultat est intéressant dans la mesure où il englobe les échantillons de toutes les séquences et qu'il indique que la matière organique est liée à la teneur en eau, indépendamment de la texture du sol. La relation entre le Carbone organique et la teneur en eau étant linéaire, on retrouve entre le Carbone et la densité apparente une bonne corrélation (fig. 43) négative ( $r = -0,725$ ) et une relation identique à celle observée précédemment entre le teneur en eau et la densité apparente. Si l'on considère les différentes séquences on constate que les meilleures corrélations sont observées à Oussouye, Tobor et N'Dimsiroh (tabl. XXXV), trois séquences très différentes l'une de l'autre du point de vue textural, ce qui nous amène à considérer les liaisons de la matière organique avec l'argile. Le diagramme de la figure 44 montre qu'entre le carbone et l'argile, la corrélation est lâche ( $r = 0,428$ ), ce qui confirme que l'humus est peu évolué et en grande partie formée de composés insolubles.: cellulose et lignine. Rappelons aussi que les composés humiques sont à dominance nette d'acides fulviques qui se transforment peu ou pas en acides humiques. HESSE (1961) a étudié la vitesse de décomposition de la matière organique d'une vase

Tableau XXXV  
Relation Carbone - Densité apparente  
dans les différentes séquences

Séquence	Oussouye	Tobor	Balingore	Gambie	Bassid	N'Dimsiroh
Nb d'échantillons	21	11	24	24	51	24
Corrélation r	-0,929	-0,842	-0,707	-0,676	-0,690	-0,807

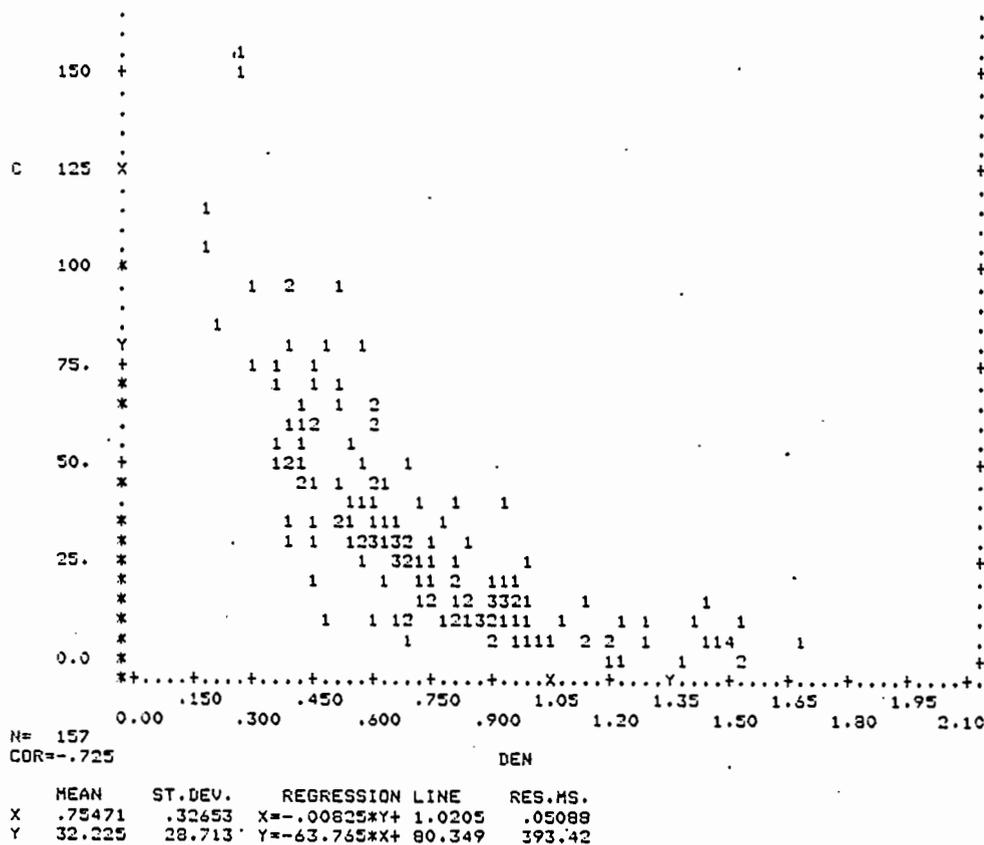


Fig. 43 - Relation Carbone - Densité apparente

fibreuse sous Rhizophora, en Sierra Leone et a montré que cette décomposition était maximale pour une teneur en eau de 50 % et qu'au dessous d'une humidité de 30 %, la décomposition de la matière organique était quasiment nulle, à cause de l'insuffisance de l'activité microbienne. C'est ce processus qui permet d'expliquer que dans certaines séquences, le taux d'humification soit élevé dans les horizons intermédiaires, à taches brunes "purée de marron". Ces horizons sont situés immédiatement au dessus des horizons fibreux réduits et en dessous des horizons oxydés. Dans la séquence de Balingore, ces horizons se sont rapidement développés ces dernières années avec la sécheresse climatique, notamment dans toute la bande occupée antérieurement par Rhizophora mangle.

C'est la décomposition poussée des fibres, associée à une certaine teneur en argile, et en eau qui donne à ces horizons cette consistance "de beurre" si caractéristique et que l'on observe que dans les profils récents en évolution (Guyanes, Malaisie). Par ailleurs, si la matière organique se décompose très mal dans ces milieux, c'est sans doute aussi parce que leur sursalure contribue à inhiber fortement l'activité microbienne.

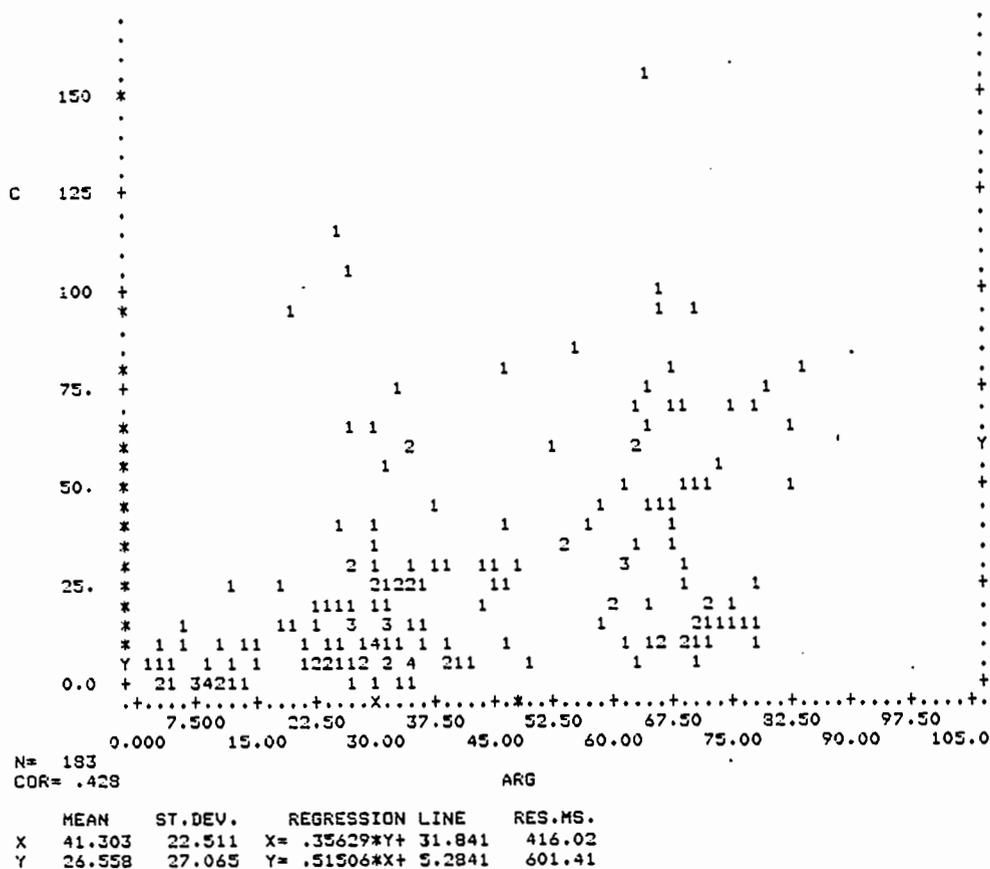


Fig. 44 - Relation Carbone - Argile

d) Matière organique et Soufre

Dans la plupart des sols tropicaux où le soufre est présent en quantités très faibles, il est généralement lié à la matière organique dans un rapport C/S voisin de 100. Ce n'est évidemment pas le cas des sols de mangroves, où, bien que le soufre soit, en partie, lié à la matière organique, sous forme de soufre organique, il est surtout lié au fer sous forme de

pyrite ou de jarosite. Le diagramme de corrélation (fig. 45) établi pour 191 échantillons montre qu'entre le carbone et le soufre exprimés tous deux en %, la corrélation est très lâche ( $r = 0,414$ ), mais la réalité est toute différente dans le cas de séquences prises individuellement (tabl. XXXVI). On constate en effet qu'en Gambie, et à N'DIMSIROH, la corrélation est très bonne alors que dans les autres séquences, elle est très mauvaise. En effet, dans le cas des horizons très fibreux sous *Rhizophora racemosa*, ou Rh. Mangle, (Oussouye, Bassid, Balingore), le taux de carbone est nettement supérieur à celui du soufre mais le rapport C/S ne dépasse jamais 5.

Dans la plupart des séquences, sauf en Gambie, on observe que le rapport C/S est généralement inférieur à 1 dès qu'on quitte la zone à mangrove. Dans les tannes et, en particulier à Balingore et à Tobor, le taux de soufre est très nettement supérieur à celui du carbone et il est donc en grande partie sous forme de pyrite, en profondeur et sous forme de jarosite en surface.

Tableau XXXVI

Relation C - S dans les différentes séquences

Séquence	Oussouye	Tobor	Balingore	Gambie	Bassid	N'Dimsiroh
Nombres d'échantillons	25	21	34	29	49	33
Corrélation r	0,440	0,354	0,208	0,687	0,271	0,740

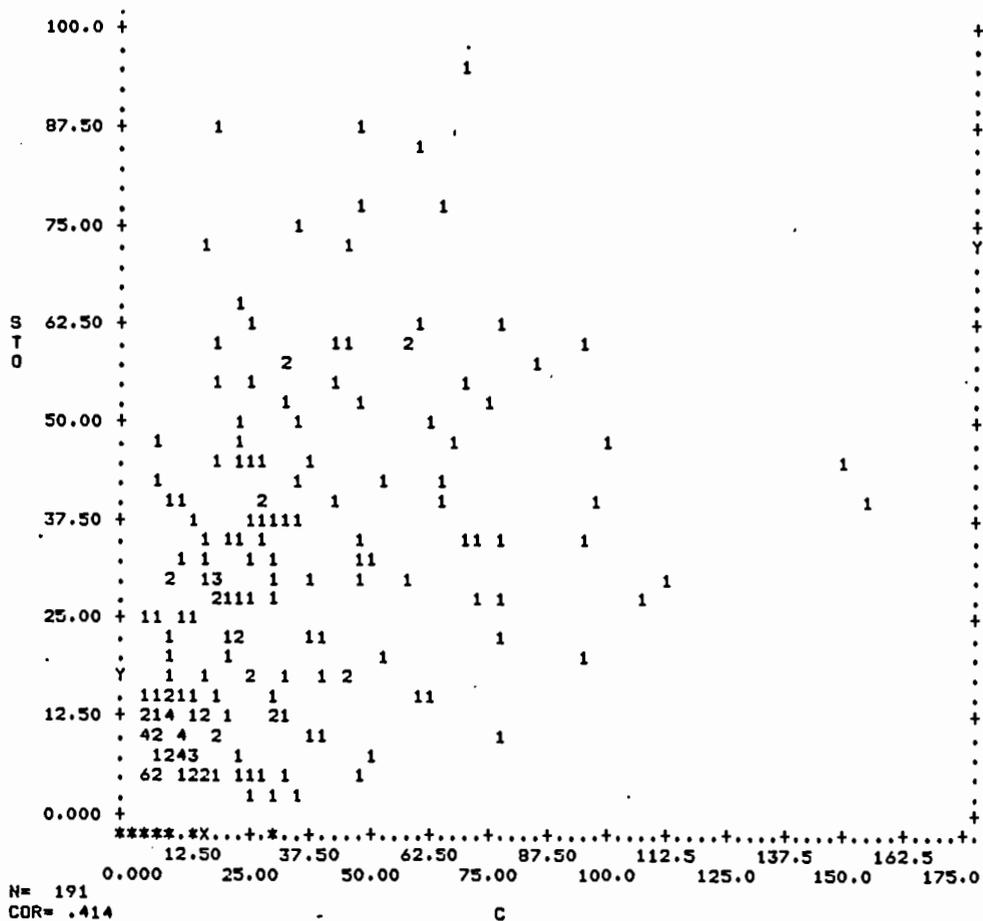


Fig. 45 - Relation Carbone - Soufre

#### 4. CONCLUSION

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, radicelles, 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.

## Chapitre VIII

## LA SALINITE DES EAUX ET DES SOLS DE MANGROVES

### 1. INTRODUCTION

Nous avons vu, à propos de l'étude hydrochimique de la Casamance, de la Gambie et du Saloum, que les 3 fleuves étaient salés pendant la plus grande partie de l'année. C'est ainsi que la Casamance, à Ziguinchor, a la salinité de l'eau de mer pendant toute l'année. L'amont des affluents principaux, Kamobeul, Baïla et Bignona est dessalé pendant 2 ou 3 mois, et l'on peut affirmer qu'actuellement toute la zone fluviomarine de la Casamance est une ria, comme l'Estuaire du Saloum. Par contre, le bief maritime de la Gambie est dessalé pendant 5 à 6 mois, grâce au débit plus important de ce fleuve qui descend des contreforts du Fouta Djallon et qui repousse le flux salé venant de la mer.

D'ailleurs, les premiers travaux cartographiques dans les zones de mangroves du Sénégal ont tous mis l'accent sur la salinité<sup>\*\*</sup> de ces sols et les ont dénommés sols halomorphes (CHARREAU, 1963 - MAIGNIEN, 1961). De même, les premières études entreprises par les bureaux d'études (GERCA, 1963 - ILACO, 1967) en vue de l'aménagement de ces sols pour la riziculture avaient toutes pour objectif la construction de barrages *anti-sels*. N'oublions pas enfin que les tannes, ces grandes zones, soit nues, soit recouvertes d'une pelouse à halophytes sont essentiellement liées à la salinité des sols et des nappes. Partout ailleurs où les sols de mangroves ont été étudiés, on a généralement attaché peu d'importance aux problèmes de salinité, car il s'agissait le plus souvent de sols situés soit dans des régions très humides, soit au débouché de fleuves puissants, soit les deux à la fois, là où, en fait, la salinisation marine ne pouvait pas extérioriser ses défauts, car rapidement et fortement neutralisée par l'eau douce des pluies ou des fleuves.

Ainsi, que ce soit dans les Guyanes, en Sierra Leone, en Thaïlande, en Malaisie ou en Indonésie, la salinité ne pose aucun problème de mise en valeur, alors qu'au Sénégal, les sols de mangroves sont, en permanence, imprégnés d'eau plus ou moins salée selon les saisons, soit par submersion (mangrove et tanne inondé) soit par une nappe salée peu profonde en relation directe avec le fleuve, à salinité marine.

Ces sols ainsi affectés par une salinisation primaire ou naturelle peuvent, à certains égards, être rapprochés des sols salés littoraux du Sud et du Sud Ouest de la France qui ont été étudiés par J. SERVANT (1975). Il faut d'ailleurs signaler que, si les études concernant les sols salés, en milieu continental, sont nombreuses et variées, et pour la plupart situées dans les régions arides, celles concernant les sols salés littoraux sont plutôt rares et constituent même l'exception, comme la thèse de

---

<sup>\*\*</sup> Certains pédologues, notamment ceux d'Afrique du Nord, emploient le terme de "salure", à la place de salinité, quand celle-ci est essentiellement due au chlorure de sodium.

J. SERVANT (1975).

## 2. RAPPEL DE QUELQUES DEFINITIONS

### A. SALINITE GLOBALE

Qu'il s'agisse de sols ou d'eaux, la salinité globale a été mesurée à l'aide d'un conductimètre et exprimée en conductivité électrique à 25° C, en micromhos/cm (ou en millimhos/cm): Sur tous ces échantillons, on a par ailleurs dosé les ions majeurs solubles : Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>=</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>=</sup> pour les anions, Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> pour les cations, et dans certains cas, la silice, l'alumine et le fer. Les ions majeurs sont exprimés en milliéquivalents par litre.

Les eaux des nappes phréatiques ont été préalablement filtrées, sur filtres Millipore, tandis que les eaux interstitielles ont été extraites par ultracentrifugation d'échantillons de sols frais conservés au congélateur.

En ce qui concerne les sols, la salinité et les sels solubles ont été déterminés à partir d'échantillons séchés à l'air soit sur des extraits de pâte saturée, ou extraits aqueux à saturation, que nous désignerons ES (extraits saturés), soit sur des extraits aqueux dilués au 1/10, que nous désignerons EA (extraits aqueux). En effet, la méthode de l'extrait de pâte saturée qui consiste à extraire sous vide la solution d'une pâte obtenue en malaxant le sol avec de l'eau jusqu'au point de liquidité est longue à mettre en oeuvre et peu adaptée aux analyses en série, c'est pourquoi nous ne l'avons utilisée que pour certains profils. En revanche, la méthode de l'extrait aqueux au 1/10 est rapide et adaptée aux analyses en série. Elle a donc été adoptée pour tous les échantillons.

### B. SODICITE

Le paramètre qui sert à caractériser la sodicité est le S.A.R. (sodium absorption ratio) qui s'écrit

$$\text{S.A.R.} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}}$$

les différents cations étant exprimés en meq/l.

Ce paramètre traduit la propriété qu'a une eau de modifier la proportion des cations échangeables et notamment d'augmenter la quantité de sodium quand elle est en contact prolongé avec le sol (irrigation, inondation, remontée de nappe...).

Ce paramètre est souvent utilisé en relation avec la conductivité électrique pour classer les eaux d'irrigation. Il est aussi souvent utilisé en pédologie des sols salés pour prévoir le taux de sodium échangeable d'un sol, grâce à une bonne corrélation existant entre le S.A.R. de l'E.S. et le sodium échangeable en p. cent de la capacité d'échange.

Cette relation traduit d'ailleurs le degré d'alcalinisation des sols.

---

\*\* ou en millisiemens/cm mS/cm

## C. COMPOSITION CHIMIQUE DE L'EAU DE MER MOYENNE

L'eau responsable de la salinité des sols et des nappes des mangroves étant essentiellement d'origine marine il nous paraît intéressant de donner la composition chimique d'une eau de mer moyenne et les rapports caractéristiques résultant de cette composition. (Tabl. XXXVII).

Tableau XXXVII

Composition chimique de l'eau de mer moyenne

Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl/SO <sub>4</sub>	$\frac{Ca}{Mg}$	$\frac{Na}{K}$	SAR
19.6	104.2	9.7	459	535	55.2	2.3	-	9.69	0.19	47.3	58.5

La conductivité de cette eau est d'environ 46 mmhos/cm pour 35,8 g de sels dissous par litre. Le pH est de 8,2. Les chlorures représentent environ 90 % des anions et le sodium environ 75 % des cations. Par ailleurs, on retiendra que l'eau de mer contient très peu de bicarbonates et pas du tout de carbonates. Il s'agit donc d'une eau chlorurée-sodique.

Rappelons que l'eau de la Casamance, malgré les variations saisonnières importantes (chap. II) a une composition chimique identique à celle de l'eau de mer, avec un pH légèrement inférieur, compris entre 7 et 8. C'est donc une eau chlorurée-sodique, à salinité voisine ou supérieure à celle de l'eau de mer pendant la plus grande partie de l'année, qui va, soit par inondation quotidienne ou exceptionnelle aux grandes marées, soit en transitant par la nappe phréatique, imprégner les sols des mangroves et tannes.

## D. BILAN IONIQUE - RELATION CONDUCTIVITE - SOMME DES IONS

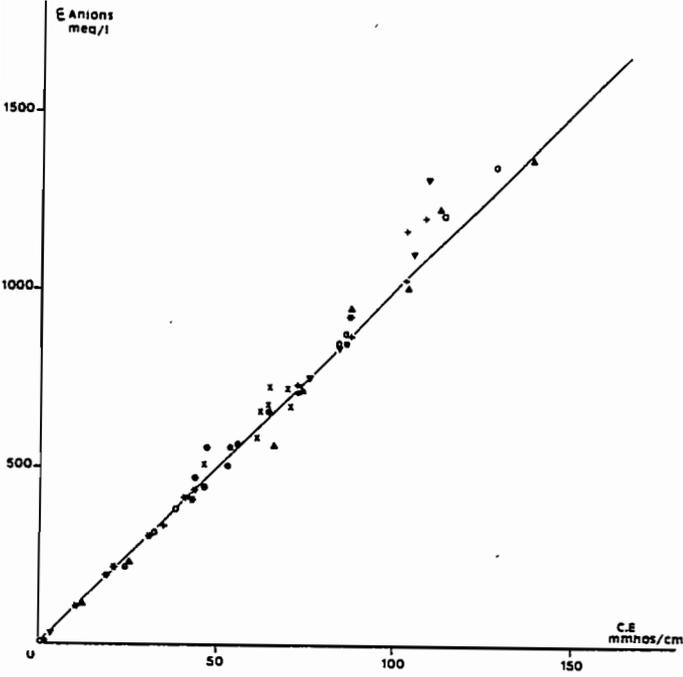
La conductivité des extraits aqueux des sols et des eaux des nappes phréatiques ou interstitielles dépend de la nature et de la concentration des ions présents dans la solution. C'est ainsi, par exemple, qu'à des concentrations égales, les solutions de NaCl auront une conductivité supérieure aux solutions de MgSO<sub>4</sub>. Si l'on considère la somme des anions principaux, exprimée en meq/l, nous avons vu (chap. II) qu'il existait pour les eaux de la Casamance une excellente corrélation entre cette somme des anions et la conductivité exprimée en mmhos/cm. La relation s'écrit  $\Sigma A = 10,6 CE - 15$  avec un coefficient de corrélation :  $r = 0,98$ .

De même, qu'il s'agisse des extraits saturés, des nappes phréatiques ou des eaux interstitielles, on retrouve une bonne corrélation entre la somme des anions et la conductivité (fig. 46).

A titre d'exemples, nous donnons ci-dessous (tabl. XXXVIII) pour 3 séquences : Bassid, Gambie et Balingore, la relation Somme des anions (A) - Conductivité (C.E.). On constate que la somme des anions, en meq/l est égale à environ 10 fois la conductivité exprimée en mmhos/cm. Pour les sols salés du Roussillon, SERVANT (1966) avait trouvé pour l'extrait aqueux 1/5 une relation :  $\Sigma \text{Anions} = 9,9 CE + 0,2$ .

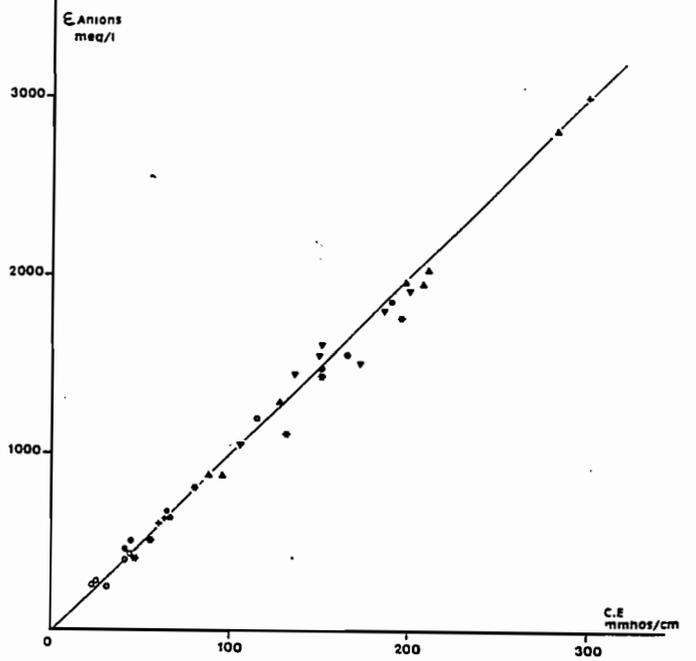
CASAMANCE

- Bona
- Bignona
- △ Baïa
- x p/le St Georges
- ▲ Nyassia
- ◊ Guddel
- Sefa



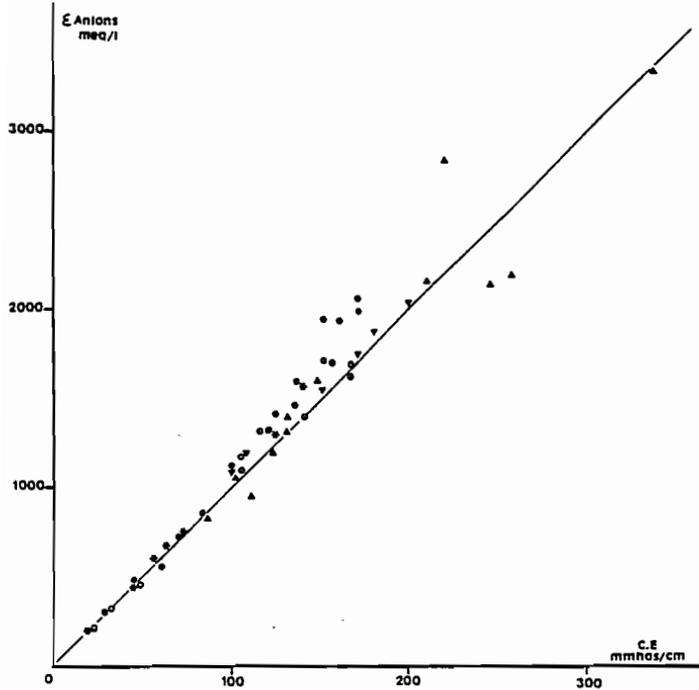
NAPPES PHREATIQUES

- Oussouye
- Balingore
- △ Tobor
- ▲ Bassid
- ▼ Ndimsiron
- Gambie



EAUX INTERSTITIELLES

- Oussouye
- Balingore
- ▲ Bassid
- ▼ Ndimsiron
- Gambie



EXTRAITS SATURÉS

- Oussouye
- Balingore
- △ Tobor
- ▲ Bassid
- ▼ Ndimsiron
- Gambie

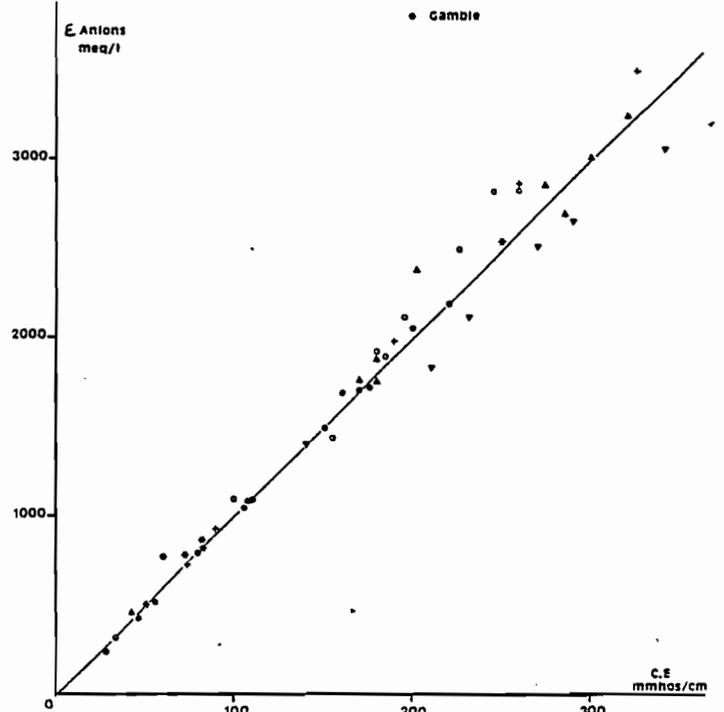


Fig. 46 - Relation Conductivité - Somme des Anions

Tableau XXXVIII

Relation Conductivité - Somme des Anions  
de 3 séquences

Séquence	Bassid	Gambie	Balingore
E.S.	A = 9,99 CE + 70,5 r = 0,99	A = 10,2 CE + 18 r = 0,99	A = 11 CE - 86 r = 0,99
Nappes	A = 8,8 CE - 35,8 r = 0,8	A = 9,4 CE - 30 r = 0,99	A = 9,6 CE + 30 r = 1
Eaux Interstitielles	A = 10 CE + 12 r = 0,99	A = 9 CE + 70 r = 0,85	A = 10,8 CE - 0,4 r = 0,98

### 3. CARACTERES MORPHOLOGIQUES DE LA SALINITE

La manifestation la plus frappante de la salinité est soit, l'absence de végétation dans les tannes vifs, soit la présence d'espèces halophytes caractéristiques telles que *Sesuvium portulacastrum* ou *Philoxerus vermicularis* dans les tannes herbacés. Du point de vue macromorphologique, c'est essentiellement en surface qu'on observe les effets de la salinité, soit sous la forme de croûtes plus ou moins desséchées formant un réseau hexagonal, soit encore sous forme d'un mat algair, soit enfin sous la forme d'un horizon de 2 à 3 cm à efflorescences salines, à structure poudreuse posé comme une véritable "moquette" (pl. VI). Sur les photos aériennes panchromatiques, on distingue aisément les tannes vifs sableux des tannes argileux par leur caractère blanc très brillant, de même que sur les photos infrarouge, fausse couleur, les zones à "moquette" se distinguent aisément des tannes vifs ou des tannes herbacés. Il est évident que l'état de surface des tannes varie constamment en cours d'année en fonction des variations saisonnières et qu'ainsi les zones à "moquette" peuvent se transformer en patinoire quand elles sont inondées, alors qu'en saison sèche, leur surface est brûlante, à certaines heures de la journée. De même, les croûtes hexagonales disparaissent complètement en saison des pluies. Par contre, aucun caractère particulier lié à la salinité ne se manifeste dans le profil lui même, sinon la présence tout à fait exceptionnelle de cristaux de gypse, et on retiendra notamment que même en fin de saison sèche, on a jamais observé dans les profils des tannes les structures "à colonnettes" caractéristiques des sols salés.

Les observations micromorphologiques (Pl. VII) révèlent la présence quasi-constante dans tous les profils de mangroves et de tannes, de cristaux de halite, cubiques, parfois de gypse sous forme d'aiguilles et aussi de cristaux de sels de composition non définie, en forme d'étoiles plus ou moins allongées.

### 4. LES EAUX LIBRES

Au chapitre de l'hydrologie, nous avons donné un aperçu général de la variation mensuelle de la salinité et de la composition chimique moyenne des eaux de la Casamance et de ses affluents (fig. 10). De la même manière, D. GOULEAU (1977) a étudié le profil hydrologique du marigot de Bignona depuis Balingore jusqu'à son embouchure avec la Casamance,

et sur les 9 points de prélèvements effectués en Février 1976, les résultats montraient :

a) une salinité variable d'amont en aval traduisant un estuaire très mélangé. Cependant les grands méandres quasi-fermés provoquent un ralentissement de la propagation de l'onde saline et maintiennent les eaux en contact prolongé avec les mangroves, d'où

b) un cortège ionique des éléments majeurs dissous dans les eaux libres différent de celui que l'on devrait attendre d'une eau océanique par influence de la mangrove :  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  sont plus abondants que ne l'indiquent les rapports constants  $\text{Ca}^{++}/\text{Cl}^-$  et  $\text{Mg}^{++}/\text{Cl}^-$  de l'eau de mer tandis que les alcalins sont dans la même proportion que les eaux océaniques. Les sulfates sont déficitaires dans le marigot et redeviennent en concentration normale près de la Casamance. La silice dissoute est toujours très faible.

## 5. LES NAPPES PHREATIQUES

### - SALINITE

J. VIEILLEFON (1977) a étudié de manière détaillée dans la séquence de Balingore les variations saisonnières de la salinité des nappes phréatiques, en liaison avec la marée d'une part, et l'eau de pluie, d'autre part. Il montre que "L'eau qui circule dans la séquence a une double origine : l'eau du marigot, dont la salure provient de l'eau de mer mais qui subit d'importantes fluctuations au cours du cycle annuel; l'eau de pluie tombant directement sur le sol."

La part de la première diminue progressivement au profit de la seconde quand on passe de la mangrove au tanne. La salinité de la nappe augmente de la mangrove au tanne en même temps que l'amplitude de ses variations saisonnières croît. Cependant la composition relative des eaux varie peu. Au cours de cette étude, la salinité exprimée par la conductivité électrique variait de 50 à 100 mmhos/cm, de la mangrove au tanne. En 1974 et 1975, dans cette même séquence, la conductivité de la nappe avait doublé par rapport à la période d'étude de VIEILLEFON, à la suite des années de grande sécheresse (1972-73) sur les effets desquels nous reviendrons plus loin.

### A. SALINITE DANS LES SEQUENCES

Nous donnons dans le tableau XXXIX les valeurs des conductivités des nappes dans les 6 séquences. On constate que la salinité varie de 20 mmhos environ à 300 mmhos, ce qui correspond à une minéralisation allant de 15 g/l à environ 200 g/l.

Dans le Saloum et en Gambie, les prélèvements ont été faits en fin de saison sèche (Avril - Mai 78), alors que les nappes des séquences de Casamance ont été prélevées en Novembre 1978, à la fin d'une saison des pluies normale.

L'examen du tableau XXXIX et de la figure 47 sur laquelle on a porté la conductivité des nappes en fonction de la distance par rapport au marigot montre que seule la séquence de Balingore a une salinité inférieure à celle de l'eau de mer dans toute la partie mangrove. On est en fin de saison des pluies et c'est la séquence située la plus en

Tableau XXXIX

Conductivités des nappes phréatiques  
dans les séquences.  
(en mmhos/cm à 25° C)

Séquence	Rh. rac.	Rh. mangle	Avicennia	M.D.	T.I.	T.V.I.	T.V.	T.h.
Oussouye	40.4	43.1	62.9	62.9	51.4	188.7	195.2	
Tobor		62.9		60.7	62.9	300.9		
Balingore	21.5	21.8	41.7	21.5		148.5		115.3
Gambie	46		54		65	130		
Bassid		88.1	127		197	283	212	
N'Dimsiroh	104	111	137		148	175		

pH et Salinité des nappes

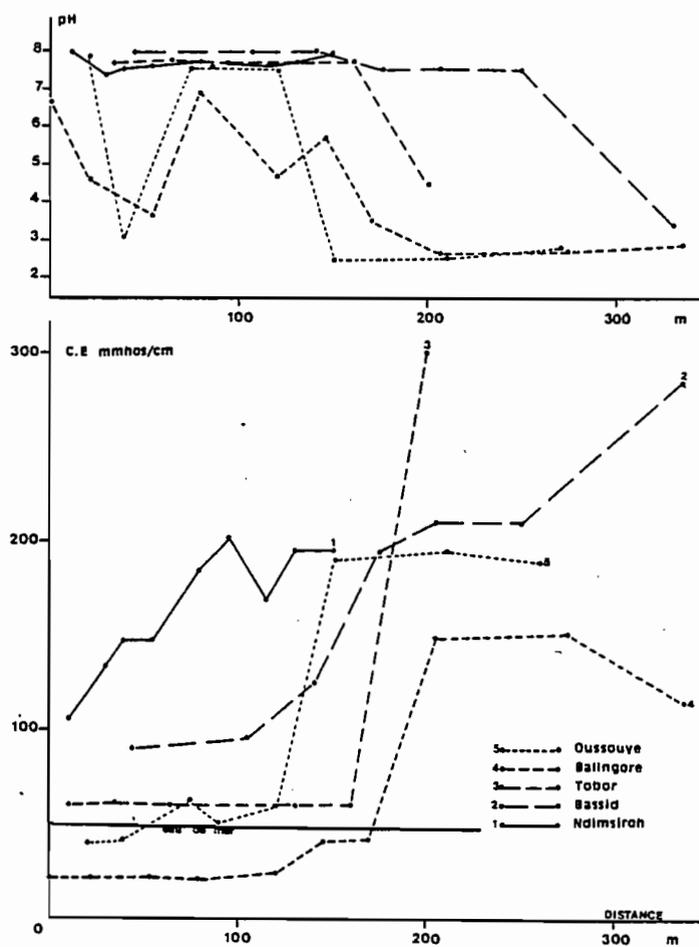


Fig. 47 - Evolution de la Conductivité des nappes phréatiques dans les séquences

amont d'un affleurement qui est dessalé. Toutes les nappes de la zone mangrove ont une salinité voisine de celle de l'eau du marigot. Il en est de même pour la séquence d'Oussouye. A Tobor, les nappes des mangroves ont déjà une salinité supérieure à celle de l'eau de mer et à l'eau du fleuve à Ziguinchor, mais ce qui apparaît très nettement dans la figure 47, c'est la différence très marquée dans l'évolution de la salinité entre les séquences de la Casamance et celles de l'Estuaire du Saloum. Dans le Saloum, la salinité croît de manière importante mais progressive de la mangrove au tanne, alors que pour les 3 séquences de la Casamance, il y a une rupture nette entre la mangrove et le tanne. En quelques mètres, on passe d'une conductivité de 41,7 mmhos à 150 mmhos à Balingore, de 63 mmhos à 195 mmhos à Oussouye et de 63 mmhos à 300 mmhos à Tobor. Dans la zone à mangrove, la salinité sous *Avicennia* est légèrement supérieure à celle sous *Rhizophora*. Dans toutes les séquences, les nappes dans les tannes sont sursalées (2 à 6 fois la salinité de l'eau de mer) et il semble bien que dans les zones argileuses, le transit latéral s'arrête à la mangrove à *Avicennia*.

#### B. VARIATIONS SAISONNIÈRES DE LA SALINITE EN CASAMANCE ET DANS LE SALOUM

La confirmation de cette hypothèse nous est fournie par l'étude de l'évolution des sols et des nappes, à Balingore, de 1974 à 1978 (C. MARIUS, 1976-1980) et illustrée par la figure 48 sur laquelle on a porté les valeurs de la conductivité des eaux des nappes prélevées en 4 points de la séquence de Balingore, à différentes époques de l'année et notamment en fin de saison sèche et en fin de saison des pluies. On constate, d'abord que la salinité est toujours légèrement supérieure sous mangrove à *Avicennia* que sous *Rhizophora*, ensuite que les variations saisonnières sont très marquées, avec un minimum en Novembre et un maximum en Mai-Juin. On note enfin que dans le tanne vif, la salinité ne varie pas en cours d'année et que de Mai 1974 à Novembre 1978 elle se situe entre 130 et 150 mmhos/cm, soit de 3 à 5 fois la salinité de l'eau de mer.

Une étude similaire effectuée à Bassid de 1972 à 1974 (MARIUS, 1975) avait montré, d'une part, que les fluctuations de la nappe étaient plus importantes dans le Saloum qu'en Casamance, et que, notamment, en Casamance, mangroves et tannes étaient inondés sous l'effet combiné des pluies et des marées, alors que dans le Saloum tannes vifs et tannes herbacées ne sont pas submergés, d'autre part, que dans le Saloum, le dessalement des tannes vifs par les pluies était très marqué. Le matériau sableux des mangroves du Saloum favorise en effet d'une part un transit latéral plus libre de l'eau du marigot de la mangrove jusqu'au tanne, d'autre part, un drainage rapide des sels par les eaux de pluies.

Par contre, en Casamance, le matériau argileux favorise la concentration des sels et avec la sécheresse de ces dernières années l'évacuation des sels par les pluies est nettement limitée au point que certaines zones, comme Tobor ou la vallée du Soungrougrou se comportent comme de véritables marais salants. Les analyses de nombreuses nappes phréatiques prélevées pendant la saison sèche 1979, à l'occasion des études pédologiques faites pour le Direction de l'Équipement Rural (Kalounayes, Guidel, Soungrougrou, Baïla...) montrent que toutes les nappes sont sursalées par rapport à l'eau de mer (100 à 200 mmhos/cm).

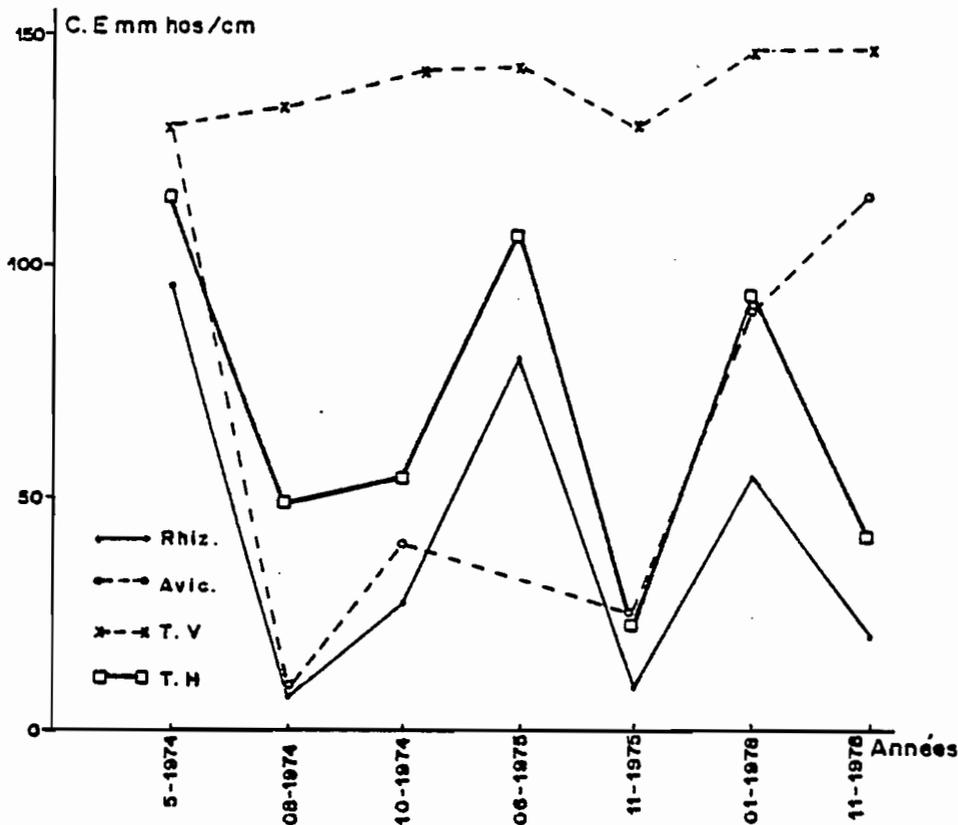


Fig. 48 - BALINGORE : Variations saisonnières de la salinité des nappes phréatiques (1974 - 1978)

## - COMPOSITION CHIMIQUE DES NAPPES PHREATIQUES

### A. CARACTERISATION DES EAUX PHREATIQUES

Les eaux phréatiques ont un faciès chimique comparable à celles de la Casamance, de la Gambie et du Saloum, et d'une manière générale à celle de la mer. Les anions sont essentiellement représentés par les chlorures et les sulfates ; les bicarbonates sont à l'état de traces et les carbonates sont absents. Les cations majeurs sont représentés dans l'ordre suivant :  $\text{Na} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{K}$ . Parmi les autres éléments présents dans les eaux phréatiques il faut signaler la silice, le fer et l'Alumine en quantités appréciables, notamment dans les eaux acides des tannes.

Dans le tableau XL, on donne les proportions relatives des ions majeurs  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  dans les 6 séquences. Les chlorures représentent 90 % des anions et le Na 80 % environ des cations. Viennent ensuite : Mg 15-20 %, Ca 2-4 % et  $\text{K}^+$  1,5-3 %.

L'utilisation de certains rapports caractéristiques  $\text{Cl}/\text{SO}_4$  (SADONIKOV, 1953) et  $\frac{\text{Na} + \text{K}}{\text{Ca} + \text{Mg}}$  (IVANOVA et ROSANOV) pour classer les eaux, nous conduit à caractériser toutes les eaux phréatiques des mangroves du Sénégal comme des chlorurées-sodiques ou chlorurées-sodico-magnésiennes. En effet le rapport  $\text{Cl}/\text{SO}_4$  est toujours supérieur à 5, tandis que le rapport  $\frac{\text{Na} + \text{K}}{\text{Ca} + \text{Mg}}$  est, soit voisin ou légèrement supérieur à 4 (eaux sodiques) soit compris entre 1 et 4 (eaux sodico-magnésiennes), avec dans tous les cas, le rapport  $\text{Ca}/\text{Mg}$  inférieur à 1.

Tableau XL

Proportions relatives des anions et cations  
dans les séquences

Séquence	Oussouye	Tobor	Balingore	Gambie	Bassid	N'Dimsiroh
Cl <sup>-</sup>	90.75	90.6	89.7	88.3	91.3	93.7
Ca <sup>++</sup>	2.75	2.6	3	4	2.2	3.3
Mg <sup>++</sup>	16.25	16.6	15.9	18.6	20	16.8
Na <sup>+</sup>	79.25	79.2	79.6	74.5	76	77.8
K <sup>+</sup>	1.75	1.6	1.5	2.9	1.8	2.1

## B. EVOLUTION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES NAPPES

### a) le pH

Sur la figure 47 contenant l'évolution de la salinité des nappes, nous avons porté aussi les valeurs du pH des nappes. On y constate que

- à N'Dimsiroh, le pH de la nappe est neutre dans toute la séquence ;
- à Bassid et à Tobor, le pH est neutre dans toute la partie périodiquement inondée et s'abaisse brutalement dans le tanne vif, ou herbacé (Tobor), là où précisément la salinité est la plus élevée ;
- à Oussouye et surtout à Balingore, le pH suit une variation en dents de scie et on note en particulier qu'il est très acide dans la zone à Avicennia et qu'il s'abaisse brutalement dans le tanne vif à des valeurs inférieures à 3.

La confrontation des 2 graphiques pH et salinité des nappes est intéressante, car on y observe nettement qu'à une chute brutale et importante du pH, de 7-8 à 2,5-3, quand on passe de la mangrove au tanne vif correspond une augmentation aussi brutale et importante de la salinité, ce qui laisse supposer qu'au moins en Casamance, c'est-à-dire en milieu argileux, il n'y a pas de circulation latérale de la nappe entre la mangrove et le tanne vif.

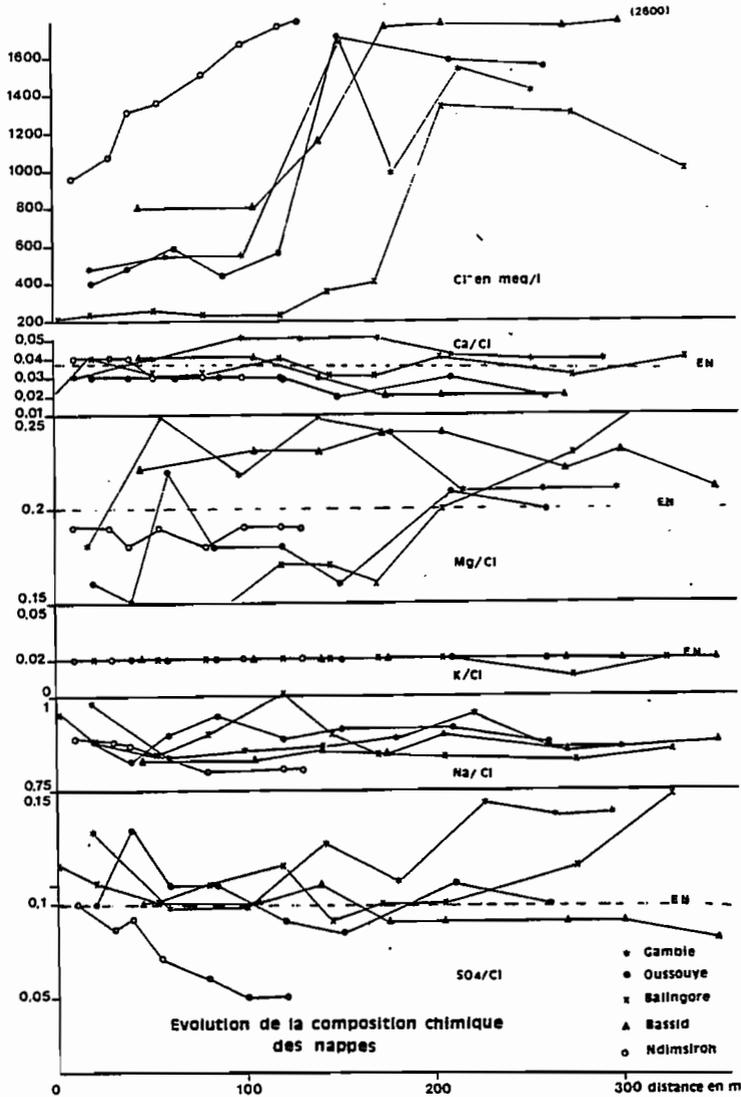


Fig. 49 - Evolution de la Composition chimique des nappes phréatiques des séquences

La nappe, dans le tanne vif, se concentre par évaporation provoquant ainsi une concentration des éléments, largement supérieure à celle de l'eau de mer, mais le comportement des ions majeurs dissous dans l'eau des nappes est différent selon les ions, comme l'indique la figure 49 sur laquelle on a porté l'évolution dans les séquences des rapports ion/ $\text{Cl}^-$  exprimés en meq/l. Ce rapport a, en effet, l'avantage de présenter les variations des différents ions par rapport à l'eau de mer. On constate d'ailleurs que l'évolution de l'ion chlore correspond à celle de la salinité de la figure.

b) le calcium

Dans l'eau de mer, le rapport  $\text{Ca}^{++}/\text{Cl}^-$  est de 0,036 et l'on observe

que dans toute la séquence de Gambie et dans la zone à palétuviers de Bassid et N'Dimsiroh, ce rapport est supérieur à 0,036 surtout en Gambie où il atteint 0,05. A Oussouye on observe un déficit généralisé en  $\text{Ca}^{++}$  de la mangrove au tanne, de même que dans les tannes de Bassid et N'Dimsiroh. A Balingore le  $\text{Ca}^{++}$  suit une variation en "dents de scie".

c) *Le magnésium*

Le rapport  $\text{Mg}^{++}/\text{Cl}^{-}$  est de 0,2 dans l'eau de mer et dans l'ensemble des nappes, il varie entre 0,15 et 0,25. En Gambie et à Bassid, il y a un net excès du Mg dans toute la séquence alors qu'à Oussouye et à N'Dimsiroh, on a plutôt un déficit en cet élément. A Balingore enfin, on passe d'un déficit marqué en  $\text{Mg}^{++}$  dans la mangrove à un net excès dans le tanne.

d) *Le potassium*

Le rapport  $\text{K}^{+}/\text{Cl}^{-}$  est voisin de 0,02 dans l'eau de mer, il est remarquablement invariant et voisin de cette valeur dans les nappes de toutes les séquences.

e) *Le sodium*

Le rapport  $\text{Na}^{+}/\text{Cl}^{-}$  est de l'ordre de 0,85 dans l'eau de mer et dans les nappes, il varie entre 0,8 et 1, avec un excès dans la plupart des séquences, à l'exception de Bassid où il est voisin de l'eau de mer et à N'Dimsiroh où il est légèrement déficitaire.

f) *Les sulfates*

Le rapport  $\text{SO}_4^{=}/\text{Cl}^{-}$ , fréquemment utilisé, est de 0,1 dans l'eau de mer et l'on constate, qu'à l'exception de la séquence de N'Dimsiroh, des profils sous Avicennia et des profils sous tannes vifs à Bassid où il y a un déficit en sulfates, dans toutes les autres séquences et plus particulièrement en Gambie et dans le tanne de la séquence de Balingore il y a un net enrichissement des nappes en  $\text{SO}_4$ .

g) *Silice dissoute*

Alors que les marigots ne contiennent que de très faibles quantités de silice dissoute (0,3 - 1 ppm) toutes les nappes phréatiques sont caractérisées par des teneurs appréciables en  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  qui augmentent de la mangrove au tanne. Sous Rhizophoras les teneurs en  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  vont de 2 p.p.m. à Bassid à environ 20 p.p.m. à N'Dimsiroh. Sous Avicennia et tannes inondés, les teneurs sont de l'ordre de 15 à 60 p.p.m. et dans les tannes vifs on atteint des valeurs en  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  de l'ordre de 90 à 120 p.p.m., proches de la saturation en silice amorphe. Les fortes concentrations en silice dissoute dans les tannes semblent liées à l'acidité des sols et des nappes et indépendantes des salinités. A ces pH acides, la présence de silice amorphe semble liée à l'altération des silicates comme le montre de manière indirecte, la présence de gaines racinaires silicifiées formées d'opale-cristobalite dans certains horizons des tannes à Balingore. Il faut y ajouter la présence de nombreuses frustules de diatomées dans les profils de tannes, comme le montrent les observations micromorphologiques et qui sont sans doute formées de silice amorphe. VAN BREEMEN (1976) a pu mettre en évidence de manière expérimentale que la libération de silice dans les sols sulfaté-acides

de Thaïlande était essentiellement liée à l'acidification de ces sols.

De ces expériences, il tire 2 conclusions :

- L'altération des silicates due à l'acidification conduit à une augmentation marquée en silice dissoute, favorisée en partie par les squelettes des diatomées.
- La relative insensibilité de la silice dissoute aux conditions de dissolutions très variées (eau douce, eau de mer) laisse supposer une rapide interaction entre la silice sous forme solide (ou adsorbée) et la silice dissoute.

#### *h) Le fer*

Sous forme dissoute, le fer est présent dans les nappes des tannes vifs, à Balingore, Oussouye et Gambie ainsi que dans toutes les nappes de la séquence de Bassid. Les teneurs varient de 1 p.p.m. à Bassid à plus de 15 p.p.m. dans le tanne vif de Balingore.

#### *i) Conclusion*

*En résumé*, les eaux phréatiques des mangroves de la Casamance, de la Gambie et du Saloum sont assez différentes les unes des autres et ne correspondent plus aux eaux marines qui leur ont donné naissance.

Si toutes les eaux voient leurs salinités et donc leurs teneurs en  $Cl^-$  augmenter de manière plus ou moins progressive de la mangrove au tanne et corrélativement le pH diminuer, les différences les plus remarquables se situent au niveau de l'évolution des ions alcalino-terreux, des sulfates et de la silice dissoute.

Le léger enrichissement en Calcium quand on passe du marigot à la mangrove à palétuviers est suivi d'un déficit généralisé quand on passe de la mangrove au tanne.

Inversement le Magnésium, déficitaire dans la mangrove s'enrichit fortement quand on s'éloigne vers le tanne.

Quant aux sulfates, ils diminuent dans les séquences du Saloum et augmentent, en Casamance et surtout en Gambie.

Enfin, la silice est constamment présente et ses teneurs élevées dans les tannes vifs sont sans doute le résultat de transformations minéralogiques que nous étudierons plus loin.

## 6. LES SOLS

Nous venons de voir que toutes les nappes phréatiques étaient salées. Il en résulte que tous les sols imprégnés par ces nappes acquièrent un caractère salin en s'enrichissant en sels solubles. Ce processus de salinisation peut être dû soit à une remontée des sels dans le profil à partir d'une nappe phréatique peu profonde, notamment en saison sèche, soit à un entrainement des sels vers le bas sous l'action des eaux de pluie, d'inondation ou d'irrigation.

J. SERVANT (1977) désigne sous le vocable de "profil salin", la répartition des sels solubles dans le profil des sols, à un moment donné. Ce profil salin qui permet de rendre compte de la distribution quantitative et qualitative des divers sels solubles présents à différents niveaux du profil des sols salés, constitue une grandeur fondamentale au cours de l'étude des processus d'halomorphie, car il permet une approche globale de la salinité du sol.

#### - METHODES D'ETUDES

Pour les pédologues, les méthodes d'études de la salinité des sols consistent à choisir les techniques d'extraction des sels solubles appropriées à l'étude envisagée et la méthode la plus fréquemment utilisée est l'extraction des sels solubles sur une pâte saturée qui est désignée extrait aqueux à saturation ou encore "extrait saturé" (E.S.). Cette méthode qui a l'avantage d'extraire une solution proche de celle qui existe dans le sol en place, et que certains assimilent même à la "solution du sol" présente l'inconvénient d'être longue à mettre en oeuvre, notamment pour des analyses en série. Le profil salin obtenu avec cette méthode correspond pour J. SERVANT à un "profil salin agronomique" et on retiendra en particulier que le rapport sel/eau est variable et fonction de la texture de l'échantillon car il faut plus d'eau pour confectionner une pâte saturée avec un échantillon argileux qu'avec un échantillon sableux. La seconde méthode consiste à extraire les sels solubles dans un rapport sol/eau constant et l'extrait ainsi obtenu appelé "extrait aqueux" conduit de par sa forte dilution à une mise en solution complète de tous les sels solubles présents dans l'échantillon sans tenir compte des caractéristiques texturales ou hydriques ni des conditions pouvant réellement régner dans le sol en place. Cette méthode qui a l'avantage d'être rapide à mettre en oeuvre et donc intéressante pour les analyses en série, représente une approche "chimique" de la salinité et le profil salin obtenu sera un profil salin "potentiel". Ces 2 méthodes ont été utilisées pour presque tous les échantillons avec un extrait aqueux au 1/10 et pour certains profils représentatifs des séquences avec l'extrait de pâte saturée. Mais, tous les échantillons étant saturés d'eau il nous a été facile d'en extraire l'eau "interstitielle" qui représente "*la solution du sol*" grâce à une ultracentrifugation à 23000 g, en pots plastiques.

#### - LA SOLUTION DU SOL

##### A. LA SALINITE

Sur la figure 50 nous avons tracé un certain nombre de profils salins et sur la ligne horizontale des 100 cm, nous avons reporté la salinité des nappes. On y distingue 2 familles de profils salins : à N'Dimsiroh, Bassid et Gambie les profils sont peu différenciés et la salinité des horizons de surface est sensiblement identique à celle des horizons profonds, par contre dans les 3 séquences de Casamance les profils salins sont caractérisés par une rupture marquée entre l'horizon de surface très dessalé et les horizons inférieurs sursalés. Cette différence entre les 2 familles de profils salins est à attribuer aux variations saisonnières de la salinité des fleuves et des nappes. Les prélèvements du Saloum et de Gambie ont été effectués en pleine saison sèche alors que ceux de Casamance ont été faits à la fin d'une saison des pluies "normale", à une époque où les nappes de la Casamance étaient fortement dessalées. Si on compare la salinité des solutions du sol à

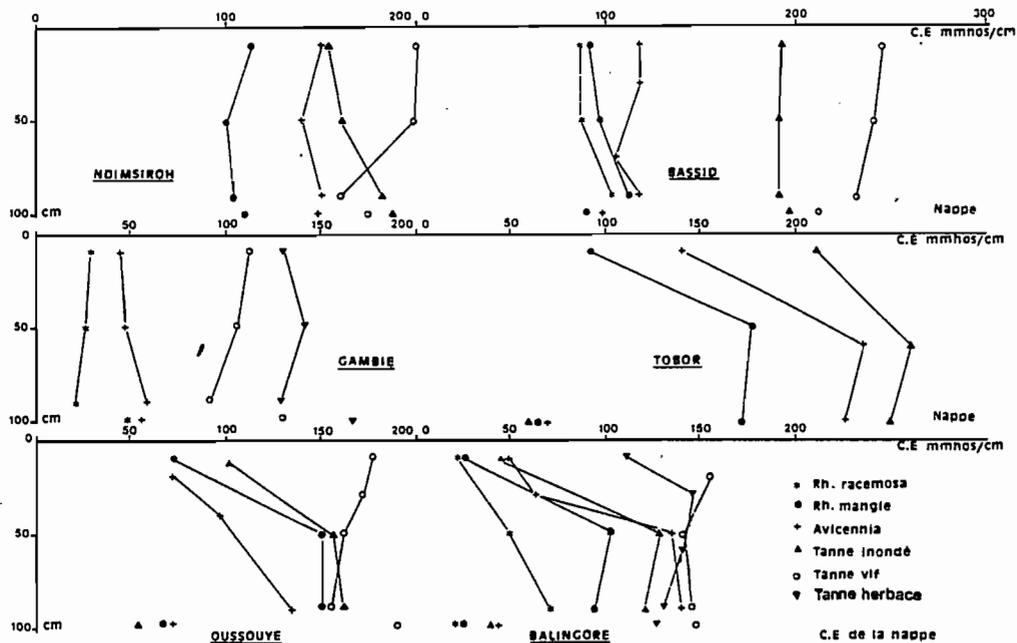


Fig. 50 - Répartition de la salinité des eaux interstitielles (solution du sol).

celle des nappes, on constate que dans le Saloum les salinités des sols et des nappes sont sensiblement identiques.

En Gambie les nappes sont plus salées que les sols et en Casamance, sols et nappes ont sensiblement la même salinité dans les tannes alors que dans la mangrove, les nappes sont dans l'ensemble très dessalées par rapport aux horizons profonds des sols. On retrouve donc ici la rupture entre la mangrove et le tanne avec l'indication que les eaux météoriques ne suffisent pas à lessiver les sels, en milieu argileux.

Nous avons donc recherché s'il y avait une relation entre les valeurs de la conductivité des nappes et celles des horizons 1 et 3 des sols et l'on constate (fig. 51a) en effet qu'il y a une excellente corrélation entre la nappe et l'horizon de surface,  $r = 0,945$  pour 32 échantillons et la relation s'écrit :

$$C_s = 0,8845 C_n + 17,145$$

$C_s$  étant la conductivité de la solution du sol

$C_n$  étant la conductivité de la nappe

La corrélation est moins bonne ( $r = 0,695$ ) entre la nappe et l'horizon de profondeur (fig. 51b) si l'on considère l'ensemble des séquences, alors qu'elle est excellente ( $r = 0,948$ ) si l'on ne tient compte que des séquences du Saloum et de Gambie (fig. 51c). En profondeur, la solution du sol dans les séquences de Casamance est plus salée que la nappe.

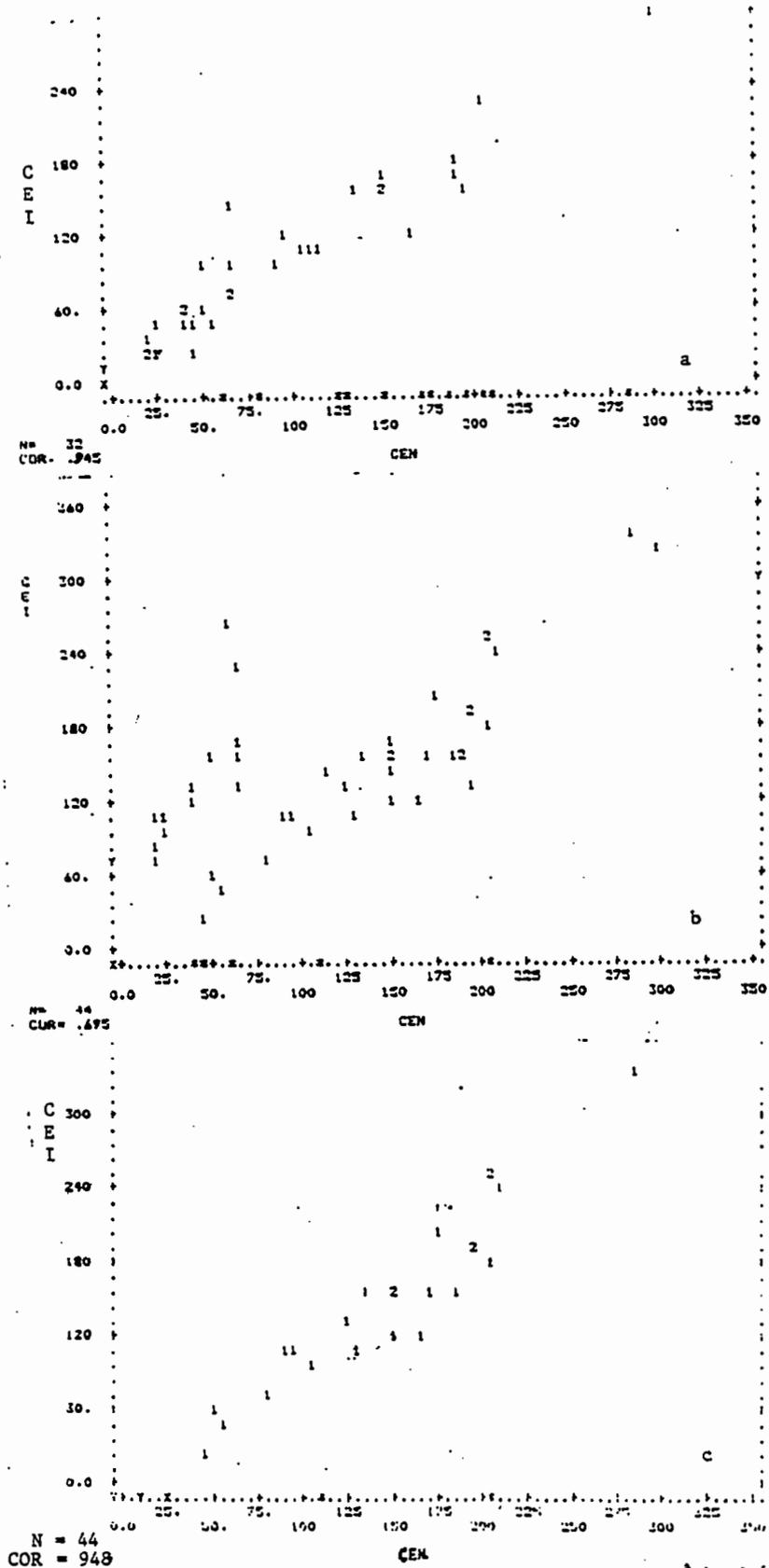


Fig. 51 - Relation Conductivité des nappes CEN) - Conductivité des eaux interstitielles (CEI)

## B. COMPOSITION CHIMIQUE DE LA SOLUTION DU SOL

Afin de pouvoir comparer la solution du sol à la nappe, nous avons porté sur la figure 52 le rapport élément/ $\text{Cl}^-$  des eaux interstitielles de l'horizon de surface et de l'horizon de profondeur pour les 6 séquences, les valeurs étant exprimées en meq/l.

### a) Le potassium

Le rapport  $\text{K}^+/\text{Cl}^-$  est de 0,02 dans l'eau de mer et nous avons vu (fig. 49) que dans les nappes de toutes les séquences ce rapport était de 0,02. Dans la solution du sol, cet élément présente des variations de la mangrove au tanne, selon les séquences, ainsi qu'avec la profondeur.

A Bassid, le rapport  $\text{K}^+/\text{Cl}^-$  est supérieur à celui de l'eau de mer, de l'ordre de 0,03 à 0,04 dans toute la séquence, en profondeur, alors qu'en surface le potassium décroît progressivement de 0,035 dans la mangrove à 0,02 dans le tanne. Dans les autres séquences, sauf à N'Dimsiroh, on observe qu'en surface le rapport  $\text{K}^+/\text{Cl}^-$  est voisin de celui de la mer dans toute la zone à mangrove et qu'il s'abaisse nettement dans toute la partie tanne dans les séquences argileuses. En profondeur, dans les 3 séquences de Casamance et en Gambie, le rapport  $\text{K}^+/\text{Cl}^-$  est inférieur à celui de l'eau de mer, en particulier dans le tanne vif et notamment à Oussouye où il est inférieur à 0,01.

Ce net déficit en potassium dans ces 4 séquences est sans doute à attribuer au fait que cet élément est fixé dans le sol sous forme de jarosite.

A N'Dimsiroh, la teneur en potassium de la solution du sol est sensiblement identique à celle de l'eau de mer dans toute la séquence. Dans les vasières atlantiques étudiées par D. GOULEAU (1975), le potassium est en quantité plus importante dans les eaux interstitielles que dans les eaux marines et il augmente en fonction de la profondeur.

### b) Le magnésium

Le rapport  $\text{Mg}^{++}/\text{Cl}^-$  est de 0,2 dans l'eau de mer et dans la plupart des nappes phréatiques - sauf en Gambie et à Bassid - il était inférieur à cette valeur (fig. 49). On constate qu'à N'Dimsiroh, Bassid et Gambie, la teneur en magnésium de la solution du sol est sensiblement identique à celle de la nappe, dans toute la séquence et dans tout le profil.

A Oussouye  $\text{Mg}^{++}/\text{Cl}^-$  est nettement supérieur à 0,2 dans toute la séquence et plus particulièrement dans le tanne vif. A Balingore le rapport  $\text{Mg}^{++}/\text{Cl}^-$  est très légèrement inférieur à celui de l'eau de mer dans la mangrove et supérieur dans le tanne vif. Toutes séquences confondues, la variation du magnésium de la solution du sol dans les séquences suit sensiblement celle de la nappe phréatique et à l'exception de la Gambie et du tanne vif d'Oussouye et de Balingore où l'on observe un net enrichissement de la solution du sol en magnésium par rapport aux eaux marines, partout ailleurs, la composition de la solution du sol en Mg est voisine de celle de l'eau de mer.

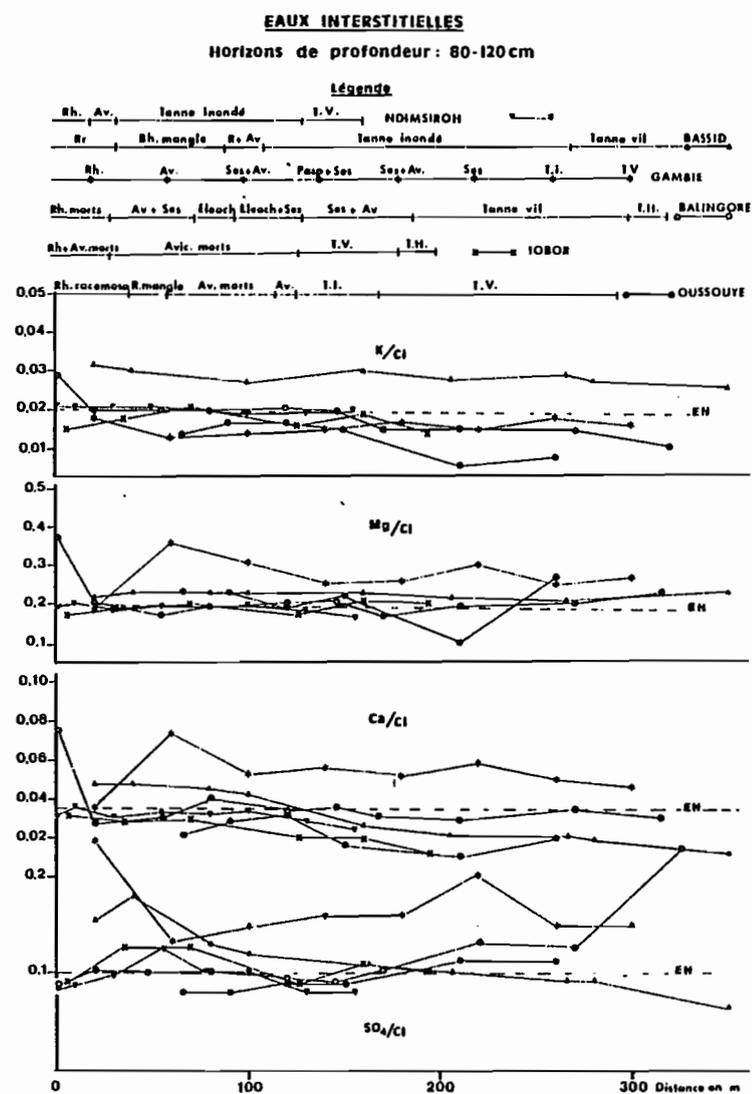
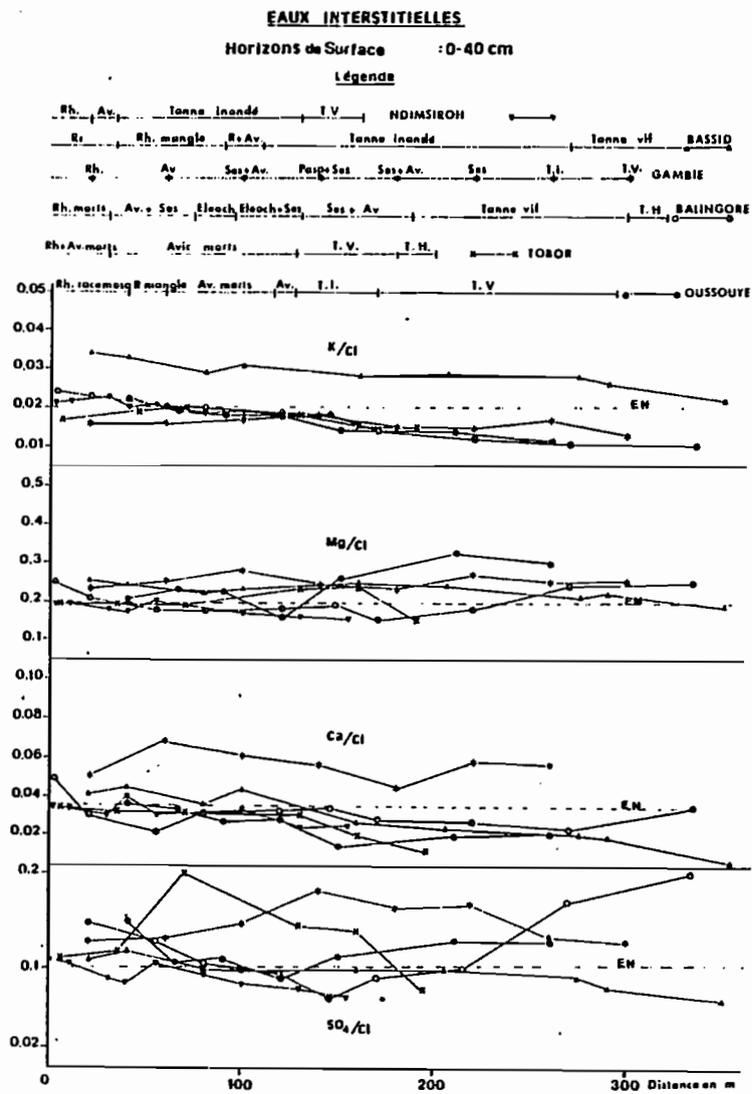


Fig. 52 - Evolution de la composition chimique de la solution du sol.

c) *Le calcium*

A l'exception de la zone à mangrove de Bassid et surtout de toute la séquence de Gambie où la solution du sol est enrichie en calcium, toutes les autres séquences sont caractérisées par un déficit en calcium par rapport à l'eau de mer, déficit très marqué dans les tannes vifs de Oussouye, Balingore et Bassid et sans doute en liaison avec la formation de gypse.

d) *Les sulfates*

Les deux séquences du Saloum ont un rapport  $\text{SO}_4^{=}/\text{Cl}^-$  voisin de celui de l'eau de mer dans la mangrove et l'on observe un déficit en sulfates dans les tannes. En Gambie, toutes les nappes présentent un excès de sulfates. A Balingore et à Oussouye, les sulfates diminuent quand on passe de la mangrove à Rhizophora à la zone à Avicennia et remontent très nettement dans le tanne vif. On constate que, d'une manière générale et surtout à Balingore et à Oussouye la variation des sulfates suit celle du magnésium.

e) *Rapports entre la composition du complexe absorbant et la composition chimique de la solution du sol*

Dans les sols salés, il existe entre le S.A.R. et le Na échangeable une relation qui a été établie à partir de nombreux résultats d'expérimentations par l'U.S.S.L. (1954), et qui s'écrit :

$$\text{Na}/\text{T} = \frac{100(-0,0126 + 0,01475 \text{ S.A.R.})}{1 + (-0,0126 + 0,01475 \text{ S.A.R.})}$$

dans laquelle Na représente le sodium échangeable en meq/100 g et T : la capacité d'échange.

Toutes les classifications des sols salés indiquent que pour des valeurs de  $\text{Na}/\text{T} > 15 \%$ , la quantité de Na fixée sur le complexe absorbant est telle que la structure se dégrade et que se posent de nombreux problèmes d'ordre physique.

Or, tant dans les nappes phréatiques que dans la solution du sol, le S.A.R. est très élevé et généralement très supérieur à celui de l'eau de mer, et apparemment dans les mangroves, comme dans les tannes, on ne remarque pas de dégradation de la structure et la perméabilité est bonne, car en fait, c'est le magnésium qui prédomine sur le complexe absorbant, le sodium étant en grande partie sous forme soluble. Nos observations rejoignent celles de M. DOSSO (1980) dans la vallée de l'Euphrate où dans des conditions pourtant très différentes, conclut que la "salinisation des sols ne s'accompagne pas d'une sodisation du complexe et c'est pourquoi l'utilisation des concepts classiques du S.A.R. et de  $\text{Na}/\text{T}$  s'est révélée inadaptée", conclusion que nous pouvons reprendre à notre compte pour tous les sols de mangroves et tannes du Sénégal.

f) *Conclusion*

En résumé, comme la nappe phréatique dont elle est issue, la solution du sol est caractérisée par une forte et brutale augmentation de la salinité quand on passe de la mangrove au tanne avec cependant des différences marquées entre les horizons de surface et de profondeur dans le cas des séquences argileuses de Casamance. Sa composition ionique est, dans l'ensemble,

assez proche de celle de la nappe phréatique et caractérisée, d'une part, par un déficit en  $K^+$  et  $Ca^{++}$ , d'autre part, par un enrichissement en  $Mg^{++}$  et  $SO_4$  avec cependant une individualisation très nette de la zone à Avicennia, quand celle-ci est présente (Gambie, Balingore, Oussouye).

#### - LES EXTRAITS AQUEUX

Les deux extraits aqueux proviennent de sols séchés à l'air, et nous avons vu en étudiant les composés du soufre que les sulfates solubles dans l'extrait au  $1/_{10}$  présentaient une bonne relation avec l'acidité des sols. Alors que les nappes et les eaux interstitielles ont un pH neutre ou très légèrement acide dans la mangrove, et un pH nettement acide dans le tanne vif, on observe que, d'une manière générale, le pH des extraits saturés ou des extraits aqueux est très acide et souvent inférieur à 3,5 dans la plupart des profils sous mangrove et plus particulièrement dans les horizons de profondeur riches en pyrites. Par ailleurs, alors que dans les nappes et les eaux interstitielles, les teneurs en ions alcalins et alcalino-terreux, exprimées par leurs rapports ion/ $Cl^-$  sont dans l'ensemble voisines de celles de l'eau de mer moyenne, on constate que dans les extraits aqueux (tabl. XLI), les teneurs en ions solubles et en sulfates sont nettement plus élevées que celles des nappes, sauf pour  $K^+$ , dont le taux est pratiquement nul dans tous les échantillons à pH très acide, indiquant ainsi qu'il est fixé sous forme de jarosite. De même, on constate sur la figure 53 que pour 112 échantillons, 92 d'entre eux ont un pH de l'extrait aqueux au  $1/_{10}$  compris entre 2,5 et 3,5 et contiennent des quantités appréciables de fer, les valeurs les plus élevées correspondant aux horizons tourbeux de Balingore, Oussouye et Gambie. Il y a donc libération d'une grande partie du fer liée à la matière organique et qui est sous forme réduite dans la mangrove et les horizons profonds des tannes.

Tableau XLI

Evolution de la Composition chimique des extraits aqueux à BALINGORE et à BASSID

Séquence	BALINGORE										BASSID					
	Profil		Rp	M.d.		T.L.		Av.		T.V.		R.m.		T.L.		T.V.
Echantillon		P	S	P	S	P	S	P	S	P	S	P	S	P	S	P
SO <sub>4</sub> /Cl	E.A	0.66	0.38	0.57	0.29	0.45	0.2	0.34	0.2	0.36	0.37	0.86	0.13	0.25	0.1	0.17
	E.S	0.71	0.36	0.46	0.16	0.35	0.11	0.25	0.2	0.3	0.19	0.4	0.12	0.23	0.1	0.16
	N		0.12	0.14	0.09	0.09	0.09	0.10	0.17	0.11	0.12	0.18	0.1	0.1		
Ca/Cl	E.A	0.05	0.03	0.05	0.04	0.04	0.01	0.06	0.02	0.03	0.05	0.32	0.03	0.03	0.02	0.02
	E.S	0.06	0.16	0.04	0.09	0.03	0.12	0.03	0.04	0.03	0.03	0.15	0.03	0.01	0.02	0.01
	N	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.05	0.02	0.02		
Mg/Cl	E.A	0.3	0.03	0.32	0.14	0.26	0.09	0.25	0.25	0.27	0.23	0.25	0.2	0.22	0.16	0.2
	E.S	0.3	0.04	0.32	0.22	0.26	0.18	0.25	0.28	0.3	0.27	0.23	0.23	0.25	0.19	0.25
	N	0.2	0.02	0.17	0.17	0.2	0.15	0.17	0.23	0.2	0.2	0.22	0.25	0.25		
K/Cl	E.A	-	0.03	-	0.03	-	0.03	-	0.02	-	0.01	0.07	0.02	-	0.03	-
	E.S	-	0.04	-	0.01	-	0.02	-	0.02	-	-	0.02	0.02	-	0.01	-
	N	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03		

\* E.A. = extrait  $1/_{10}$  ; E.S. = extrait saturé ;  
S = surface ; P = profondeur

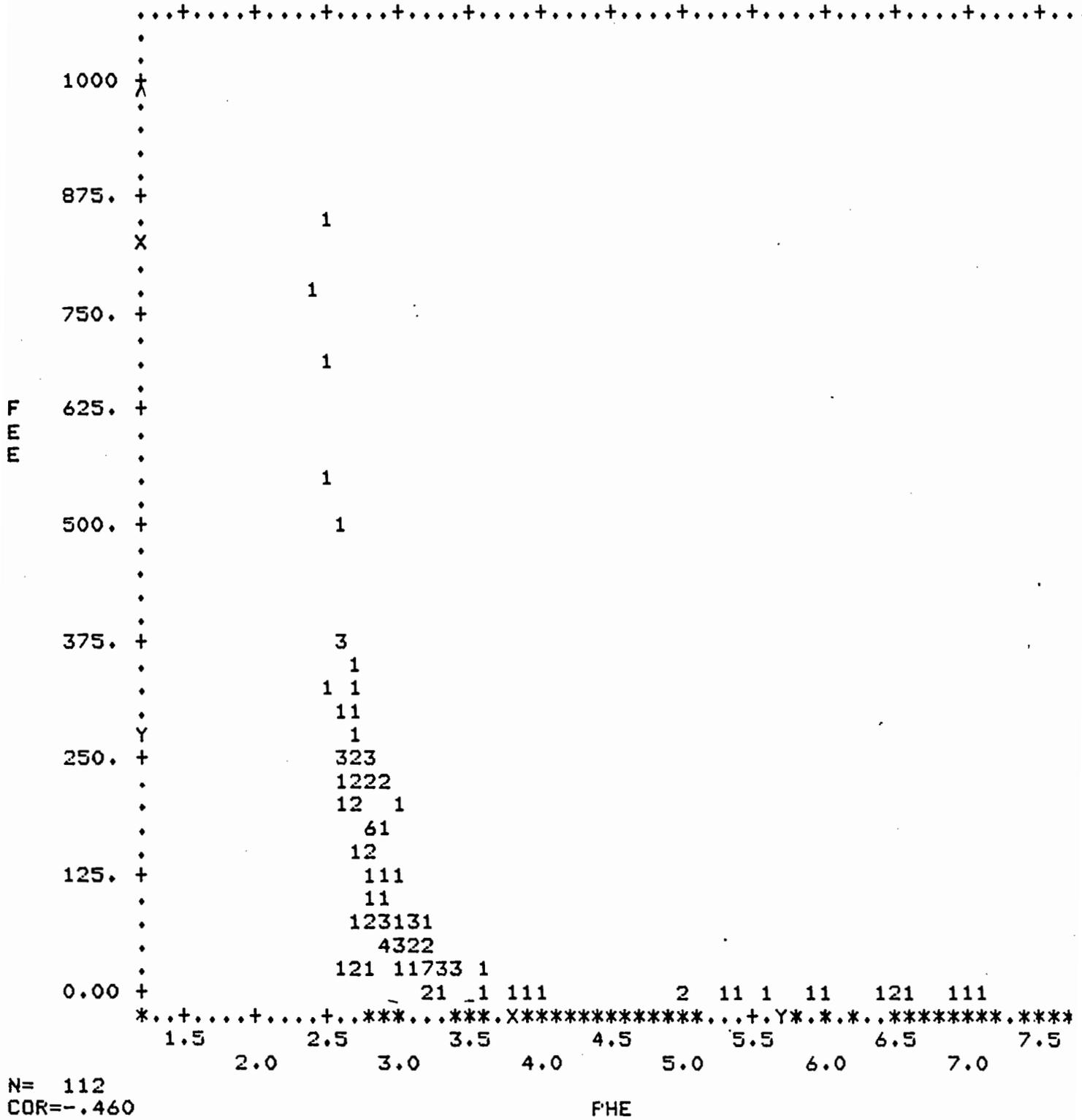


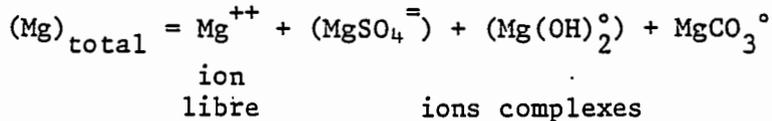
Fig. 53 - Relation pH (PHE) et fer libre de l'extrait aqueux (FEE)

Ces résultats montrent, de manière claire, que dans le cas des sols des mangroves et tannes, les extraits aqueux ne correspondent pas du tout à la "solution du sol" en place, mais représentent la solution du sol séché, c'est-à-dire ayant subi une oxydation rapide.

## 7. EQUILIBRES MINÉRAUX-SOLUTIONS

Les résultats des analyses chimiques donnent les valeurs de concentrations totales d'éléments en solution ; or les ions en solution ne sont pas seulement présents sous forme d'ions simples, mais également sous forme d'ions complexes et d'espèces neutres.

Les ions simples sont, par exemple  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{=}$ ,  $\text{CO}_3^-$ ... Les ions ou espèces aqueuses complexes sont représentés par des combinaisons entre ces ions simples. Ainsi, pour l'élément magnésium on a :



Les parenthèses ( ) désignant les molalités (nombre de moles/kg d' $\text{H}_2\text{O}$ ). Or, ce sont les quantités d'ions libres en solution qui traduisent les équilibres entre la phase liquide et la phase solide.

Avec les résultats analytiques et connaissant les constantes thermodynamiques de dissociation ou de formation des espèces dissoutes, on peut reconstituer la distribution de toutes les espèces aqueuses susceptibles de se former.

### A. RAPPEL DE QUELQUES DEFINITIONS

On trouvera dans les travaux de FRITZ (1975), de DROUBI (1976) ... des explications détaillées sur les équilibres minéraux-solutions et notamment sur les programmes de calcul sur ordinateur mis au point par FRITZ (1975) d'après les travaux de HELGESON (1969), pour calculer, à partir de la composition d'une eau donnée la distribution des ions simples et complexes ainsi que le degré de saturation de la solution par rapport à un grand nombre de sels et de minéraux susceptibles de s'y former (EQUIL), pour simuler les réactions de dissolution d'un mélange initial de minéraux dans une eau de composition chimique donnée (DISSOL), enfin, pour calculer les changements de composition chimique d'une solution au cours de la concentration de cette solution par évaporation (EVAPOR). VAN BREEMEN (1973) a établi un programme basé sur les travaux de GARRELS et THOMPSON (1962) pour calculer les activités ioniques des eaux des nappes des sols de Thaïlande. Tous ces programmes prennent en compte les 3 données suivantes : l'activité ionique, le coefficient d'activité et la force ionique.

#### a) Activité

Pour une espèce  $i$ , il existe à une pression et une température donnée une relation entre l'activité et la molalité qui s'écrit :  $a_i = \gamma_i m_i$  laquelle

$$\begin{aligned} a_i &= \text{activité de l'espèce } i \\ m_i &= \text{molalité de l'espèce en moles/kg } \text{H}_2\text{O} \\ \gamma_i &= \text{coefficient d'activité} \end{aligned}$$

Dans la grande majorité des cas  $\gamma$  est inférieure à 1 et l'activité reste inférieure à la molalité. L'activité d'un ion représente en fait sa concentration efficace ou sa concentration thermodynamique.

b) *Force ionique*

Le coefficient  $\gamma_i$  d'activité de l'ion  $i$  est une grandeur qui dépend de la température, de la charge de l'ion et surtout de la présence d'autres ions dans la solution. Il est calculé par une expression de la loi de DEBYE-HÜCKEL étendue aux solutions concentrées (FRITZ, 1975)

$$-\log_i = \frac{AZ_i^2 \sqrt{I}}{1 + a_i B \sqrt{I}} - CI$$

dans laquelle  $I$  représente la force ionique de la solution, donnée par l'expression :

$$I = 1/2 \sum m_i Z_i^2$$

$m_i$  étant la molalité de l'ion  $i$  et  $Z_i$  sa charge. Pour les eaux naturelles, très diluées et de force ionique très faible, il y a une bonne corrélation entre la conductivité électrique (C.E.) et la force ionique :

$$I = 0,0127 \text{ C.E.} - 0,003 \text{ (en mmhos/cm, à } 25^\circ\text{C)}$$

L'eau de mer a une force ionique de 0,7.

On ne peut calculer la force ionique d'une solution que si l'on connaît la distribution des espèces aqueuses et celle-ci ne peut être déterminée qu'à partir de coefficients d'activité et si, à première vue ce calcul semble irréalisable il a été, cependant possible grâce à un processus d'itérations.

c) *Calcul de la distribution des espèces en solution. Tests de saturation*

Le calcul de la distribution des espèces dissoutes se fait à partir du programme EQUIL auquel on fournit les données suivantes : molalités de tous les éléments chimiques : Ca, K, Na, Mg, Cl, SO<sub>4</sub> pression de CO<sub>2</sub> ou alcalinité, pH, Eh, température. A partir de ces données, le programme calcule la distribution des ions entre ions simples et paires d'ions par itération jusqu'à convergence des molalités, les coefficients d'activité de toutes les espèces aqueuses en présence jusqu'à convergence de la force ionique, la charge totale et les produits d'activité ionique  $Q$  des minéraux qui précipitent. On compare ce produit ionique  $Q$  au produit de solubilité  $K_{ps}$  du minéral en question, calculé à partir de données thermodynamiques. La différence  $\log K - \log Q$  donne le degré de saturation de la solution vis à vis du minéral. Le programme teste ce degré de saturation pour tous les minéraux dont les éléments constituants sont représentés dans la solution initiale :

Si  $\log Q < \log K$ , la solution est sous saturée  
 $\log Q > \log K$ , la solution est sursaturée

## d) Modèle chimique de l'eau de mer

Ce modèle a été étudié par GARRELS et THOMPSON (1962). Il montre que dans l'eau de mer dont la force ionique est égale à 0,7 les interactions entre les différents ions sont suffisamment importantes pour qu'on ne puisse plus les négliger dans les calculs thermodynamiques sans introduire d'erreurs significatives. Nous avons vu que l'eau de mer contient essentiellement 6 éléments majeurs :  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Ca}^{++}$ . D'après les valeurs des constantes de dissociation, il n'y aurait pas formation de complexes entre les cations et l'ion  $\text{Cl}^-$  ou entre  $\text{K}^+$  et  $\text{HCO}_3^-$  ou  $\text{CO}_3^{--}$ . Mais  $\text{K}^+$  réagit avec  $\text{SO}_4^{--}$  et  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  chacun avec les anions  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{CO}_3^{--}$ . On peut donc supposer que les espèces dissoutes les plus importantes dans l'eau de mer sont au nombre de 18 pour lesquelles on a calculé les coefficients d'activité (tabl. XLII) ainsi que la distribution des espèces majeures (tabl. XLIII).

Espèces dissoutes	Coefficient d'activité
$\text{NaHCO}_3$	1,13
$\text{MgCO}_3$	1,13
$\text{CaCO}_3$	1,13
$\text{MgSO}_4$	1,13
$\text{CaSO}_4$	1,13
$\text{HCO}_3^-$	0,68
$\text{NaCO}_3^-$	0,68
$\text{NaSO}_4^-$	0,68
$\text{KSO}_4^-$	0,68
$\text{MgHCO}_3^+$	0,68
$\text{CaHCO}_3^+$	0,68
$\text{Na}^+$	0,76
$\text{K}^+$	0,64
$\text{Mg}^{++}$	0,36
$\text{Ca}^{++}$	0,28
$\text{Cl}^-$	0,64
$\text{CO}_3^{--}$	0,20
$\text{SO}_4^{--}$	0,12

Tableau XLII

Coefficients d'activité des espèces dissoutes dans l'eau de mer (GARRELS et THOMPSON, 1962).

Tableau XLIII

Distribution des espèces majeures dans l'eau de mer (GARRELS et THOMPSON, 1962)

Cations	Molalité totale	% ion libre	% paire Me- $\text{SO}_4$	% paire Me $\text{HCO}_3$	% paire Me $\text{CO}_3$	Anions	Molalité totale	% ion libre	% paire Ca-	% paire Mg-	% paire Na	% paire K
$\text{Na}^+$	0.48	99	1	-	-	$\text{SO}_4^{--}$	0.028	54	3	22	21	0.5
$\text{K}^+$	0.010	99	1	-	-	$\text{HCO}_3^-$	0.024	69	4	19	8	-
$\text{Mg}^+$	0.054	87	11	1	0.3	$\text{CO}_3^{--}$	0.00027	9	7	67	17	-
$\text{Ca}^+$	0.010	91	8	1	0.2	$\text{Cl}^-$	0.56	100	-	-	-	-

Le modèle présenté ne modifie pas fondamentalement l'image que fournit l'analyse chimique pour les cations principaux qui sont essentiellement présents dans l'eau de mer sous forme d'espèces individuelles libres. Une faible proportion de cations - essentiellement  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  - s'appartient avec  $\text{SO}_4$ . Mais la modification la plus importante indiquée par ce tableau concerne les anions  $\text{SO}_4$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{CO}_3^{--}$ . Plus de 30 % de chacun des 2 premiers ions et 90 % des  $\text{CO}_3^{--}$  sont complexés par des cations. La distribution des espèces dans l'eau de mer est modifiée par les variations de température, de pression et de composition de l'eau.

#### B. APPLICATION A L'ETUDE DES EAUX DES NAPPES PHREATIQUES DES SEQUENCES MANGROVES-TANNES.

Le tableau XLIV donne un exemple des résultats fournis par le programme de calcul. La liste des espèces aqueuses, de leurs équations de dissociation et des constantes thermodynamiques qui les caractérisent, ainsi que la liste des minéraux, de leurs équations de dissolution et les produits de solubilité correspondants peuvent être trouvées dans les travaux de FRITZ (1975), DROUBI et al. (1976). En ce qui concerne les eaux, le programme a pris en compte 30 espèces dissoutes et 15 minéraux, en l'absence de fer et 42 espèces dissoutes et 18 minéraux, en présence de fer. Pour la séquence de Bassid, espèces dissoutes et minéraux sont plus nombreux à cause de l'Aluminium qui a été dosé. Les résultats concernant nos nappes ont été calculés pour 25° C et 1 atm. Avant de passer en revue les résultats des tests de saturation pour les différentes séquences nous donnons ci-dessous (tabl. XLV) les produits de solubilité des principaux minéraux pour lesquels les eaux des nappes sont sursaturées ou proches de la saturation.

Tableau XLV

Produits de solubilité de quelques minéraux

Minéral	Formule chimique	Log Kps
Smectite Mg	$\text{Si}_4\text{Mg}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	- 25,02
Calcite	$\text{CaCO}_3$	- 8,37
Magnésite	$\text{MgCO}_3$	- 8,04
Anhydrite	$\text{CaSO}_4$	- 4,26
Gypse	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	- 4,85
Quartz	$\text{SiO}_2$	- 3,999
Silice Amorphe	$\text{MnSiO}_4$	- 2,70
Jarosite	$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	24,89

##### a) Séquence d'Oussouye

La force ionique de la solution varie de 0,46 dans la mangrove à 1,9 dans le tanne vif. Toutes les nappes sont sursaturées par rapport au quartz et proches de la saturation par rapport au gypse. Dans la mangrove, les nappes sont, dans l'ensemble sursaturées en smectite magnésienne (talc), magnésite et calcite alors que dans le tanne, les nappes sont

Tableau XLIV  
 Résultats du programme de calcul

-----  
 INITIAL SOLUTION  
 -----

PIPE'S COORDINATES

CA = .3013 5-01    HG = .217356+00    NA\*E = .743995+00  
 SO4 = .1236 10+00    ALCALE = .537303-06    CL\*HOS = .277645-00

IONIC STRENGTH = .156166+01

ELECTRICAL BALANCE = .137000-00

IONIC STRENGTH = .164935+01

ELECTRICAL BALANCE = -.334990-00

ELEMENTS	MOLES/L. SOL	TOTAL MOLALITY	LOG TOTAL MOLALITY	TOTAL GRAMS/KG H2O	TOTAL PPM	LOG TOTAL PPM
C	.226000-01	.226000-01	-1.6458	.791705+00	.82986+00	2.9243
NA	.115500+01	.115500+01	.0626	.265532+02	.263275+05	4.3351
EA	.256000-01	.256000-01	-1.5436	.116500+01	.135022+04	3.7213
HG	.174000+00	.174000+00	-.7595	.423029+01	.337576+04	3.5294
SI	.592645-03	.522445-03	-3.2274	.565431-01	.521707+02	1.7174
S	.745000-01	.465000-01	-1.3246	.231005+01	.277611+04	3.4434
CL	.154270+01	.159170+01	.1442	.464105+02	.452966+05	4.6555
ALCALINITE		.100000-03				
DENSITY	1.000					
CHARGE TOTALE (G/KG H2O)		91.476				
CORRECTION DE DENSITY		1.000				

PRODUITS INITIAUX EN MOLES/LITRE  
 1 OXYGEN GAS .100000+11  
 2 CARBON DIOXIDE .100000+11

THE IONS ADJUSTED FOR ELECTRICAL NEUTRALITY ARE NA\*E AND CL-

FUGACITY OF OXYGEN = .267617-05    LOG P02 = -57.570  
 FUGACITY OF CARBON DIOXIDE = .116000-05    LOG PCO2 = -5.500

POTENTIEL REDOX (MILLIVOLTS) EMA .570000+05

SPECIES	LOGK	PPM	GRAMS/KG H2O	AQUEOUS SPECIES			
				MOLALITY	LOG MOL	ACTIVITY	LOG ACT
NA*	.000	.743995+00	.220110-01	-1.6574	.132253-01	-1.2756	
NA*	.000	.222747+05	.253125+02	.105754+01	.0243	.705624+00	
CA*	.000	.948847+03	.133553+01	.256404-01	-1.5377	.547770-02	
HG*	.000	.343251+04	.374558+01	.154106+00	-.8122	.434000-01	
H2SiO4	.000	.521694+02	.589425-01	.592439-02	-3.2274	.592439-05	
SO4--	19.216	.254371+04	.277566+01	.284324-01	-1.5391	.351503-02	
CO3--	.000	.505795-04	.552075-07	.919761-09	-9.0222	.134259-09	
CL-	.000	.434305+05	.474545+02	.121560+01	.1267	.804316+00	
OH-	.000	.115900-04	.126571-07	.744331-09	-9.1282	.473257-09	
H+	.000	.215911-01	.235566-04	.233802-04	-4.6312	.179525-04	
H2O	-14.000	.715170+00	.100000+00	.555000+00	1.7444	.944332+00	
AL	2.000	.497625+01	.546245-02	.729992-04	-4.1367	.136373-05	
ASO4-	-.943	.932722+02	.697375-01	.515751-03	-3.2674	.326370-05	
FACL	.000	.294450+04	.321590+01	.347223-01	-1.2597	.801325-01	
FAO3-	-1.273	.193153-05	.210225-06	.254008-08	-5.5952	.176444-08	
ASO4-	-1.000	.461045+04	.505410+01	.424531-01	-1.5721	.290369-01	
CAO3-	-3.200	.736035-04	.801189-07	.800643-09	-7.0966	.116645-09	
CAO3-	-11.500	.739420+00	.774327-05	.745322-05	-5.1158	.552299-05	
CAO3-	-2.310	.343254+03	.374650+00	.275199-02	-2.5604	.431014-02	
CAO3-	-3.400	.512317-05	.595641-06	.105150-07	-7.9782	.153225-07	
MGCO3	-11.200	.236760+01	.259422-02	.302553-04	-4.5148	.231987-04	
ASO4-	-2.250	.217085+04	.237151+01	.176557-01	-1.7019	.289479-01	
ASISO4-	9.900	.614815-03	.671056-06	.705587-08	-9.1514	.476590-08	
NAHCO3	-10.000	.117338+01	.124373-02	.152455-04	-4.8169	.222155-04	
ASO4-	-1.700	.432249+00	.431754-02	.104526-04	-4.9775	.699135-05	
HCO3-	-10.500	.450704+01	.491953-02	.203200-04	-4.0935	.506103-04	
HCO3-	-16.500	.975564+02	.106475+00	.171694-02	-2.7652	.250157-02	
HCL	5.100	.292227-06	.313704-09	.274402-11	-11.0551	.127475-11	
MG(OH)2	-2.500	.445523-03	.538442-06	.123352-07	-7.9099	.800663-08	
CA(OH)2	-1.200	.344457-05	.390537-08	.666240-10	-10.1764	.444347-10	
ELECTRON	.000	.000000	.000000	.000000	.0000	.35-777-08	

FREE ENERGY SUMMARY

GENERAL	LOG K	LOG Q	LOGK-LOGQ
OXYGEN GAS	55.120	52.550	2.570
CARBON DIOXIDE	-13.150	-19.247	6.097
WATER	1.550	-.246	1.796
STRAIT	.780	-1.975	2.755
CALCITE	-.373	-12.133	11.760
ANACRIFITE	-4.200	-4.737	0.537
WATER	-.350	-4.757	4.407
QUARTZ	-3.999	-3.176	0.823
AMORPHOUS SILICA	-2.725	-3.176	0.451
HEMIMORPHITE	-.213	-2.749	2.536
NEPHELINE	-1.160	-2.997	1.837
POLYHALITE	-13.370	-19.454	6.084
ALUMINATE	-2.380	-2.637	0.257
EPSOMITE	-2.150	-3.963	1.813
BISCHOFITE	6.290	-1.631	7.921

très proches de la saturation en silice amorphe et anhydrite.

*b) Séquence de Tobor*

Dans toute la mangrove, la force ionique est sensiblement identique à celle de l'eau de mer ( $I = 0,7$ ), alors que dans le tanne elle est de 3,1. Comme à Oussouye, on constate une sursaturation en Quartz dans toute la séquence, associée à une saturation en smectite magnésienne, magnésite et gypse dans la mangrove.

La nappe du tanne est sursaturée en hématite, jarosite et anhydrite.

*c) Séquence de Balingore*

Elle est différente des deux autres séquences de Casamance du fait que l'eau du marigot de Bignona est diluée par les apports d'eau douce de l'amont, en fin de saison des pluies. Dans toute la partie mangrove, la nappe a une force ionique nettement inférieure à celle de l'eau de mer et elle augmente régulièrement de la mangrove à Rhizophora jusqu'à la limite du tanne vif de 0,24 à 0,47. Dans le tanne vif, la force ionique est de 1,5. Nous avons vu que le pH était acide dans toute la séquence. L'alcalinité est nulle d'où une sous saturation en argile magnésienne, calcite et magnésite. Dans toute la mangrove décadente et le tanne inondé, la nappe est sous saturée par rapport à tous les minéraux sauf un peu en quartz et gypse. Sous Avicennia et surtout dans le tanne vif, la nappe est sursaturée en quartz et proche de la saturation en silice amorphe, anhydrite et gypse.

*d) Séquence de Gambie*

La force ionique varie de 0,45 dans la mangrove à 1,5 dans le tanne. La séquence se caractérise par une sursaturation générale en quartz et en gypse et par l'absence d'argile magnésienne. Magnésite et calcite saturent les nappes des mangroves alors que la silice, les nappes des tannes - inondés et vifs - sont saturées en silice amorphe et en anhydrite.

*e) Séquence de N'Dimsiroh*

La force ionique est supérieure à 1 dans toute la séquence et les eaux sont sursaturées en smectite magnésienne, magnésite, calcite, quartz et gypse. Par ailleurs, les eaux dans la mangrove sont saturées en silice amorphe et celles du tanne inondé en anhydrite.

*f) Conclusion*

L'examen du tableau XLVI montre que toutes les nappes phréatiques -caractérisées par des conductivités généralement très élevées - sont à l'équilibre avec le gypse et de ce fait l'ion sulfate est contrôlé.

- Les eaux de nappes des mangroves de toutes les séquences - sauf Balingore - sont à l'équilibre avec la calcite, la magnésite et parfois la smectite magnésienne (Tobor, Oussouye) ou la silice amorphe (N'Dimsiroh), ce qui indique que les concentrations du calcium, du magnésium et parfois de la silice, sont contrôlées. Le pH de ces eaux est proche de 7.

Tableau XLVI

Equilibres minéraux - eaux phréatiques  
de 5 séquences

Profils	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Séquence										
N'DIMSIROH	Q <sup>+</sup> T <sup>+</sup> M <sup>+</sup> C <sup>+</sup> G S	Q <sup>+</sup> T <sup>+</sup> M <sup>+</sup> C <sup>+</sup> G A	Q <sup>+</sup> T <sup>+</sup> M <sup>+</sup> C <sup>+</sup> G S							
GAMBIE	Q <sup>+</sup> M <sup>+</sup> C G	Q M <sup>+</sup> C G	Q <sup>+</sup> M <sup>+</sup> C G		Q <sup>+</sup> G <sup>+</sup> S A	Q <sup>+</sup> G <sup>+</sup> S A	Q <sup>+</sup> G S A	Q <sup>+</sup> G S A		
BALINGORE	Q	Q	Q	Q	Q	Q <sup>+</sup> S				
			G	G	G	G S	G S	G S	G S	G S
							H J	H J		
TOBOR		Q <sup>+</sup> T <sup>+</sup> M <sup>+</sup> C <sup>+</sup> G	Q <sup>+</sup> T <sup>+</sup> M <sup>+</sup> C G	Q <sup>+</sup> T <sup>+</sup> M <sup>+</sup> C G	Q T M C G	Q A H J				
OUSSOUYE	Q <sup>+</sup> T <sup>+</sup> M <sup>+</sup> C <sup>+</sup> G	Q <sup>+</sup> M <sup>+</sup> C G	Q <sup>+</sup> T <sup>+</sup> M <sup>+</sup> C G	Q <sup>+</sup> T <sup>+</sup> M <sup>+</sup> C <sup>+</sup> G	Q <sup>+</sup> T M C G S	Q <sup>+</sup> G S A	Q <sup>+</sup> G S A	Q <sup>+</sup> G S A		

Q = Quartz ; T = Talc ; M = Magnesite ; C = Calcite ;  
G = Gypse ; S = Silice amorphe ; A = Anhydrite ;  
H = Hematite ; J = Jarosite.  
Le signe + indique une sursaturation.

- Les eaux de nappes des tannes - généralement acides à très acides - sont à l'équilibre avec l'anhydrite, la silice amorphe et parfois la jarosite (pH < 3,5).

- On notera, par contre, que toutes les eaux de nappes sont sous-saturées par rapport à la halite qui est pourtant comme nous le verrons plus loin, le sel cristallisé le plus fréquent dans tous les sols de mangroves et tannes du Sénégal.

### C. APPLICATION AUX EXTRAITS AQUEUX

Le programme EQUIL a été appliqué aux extraits aqueux dilués au 1/10 et aux extraits saturés d'échantillons de sols séchés à l'air.

#### a) Extraits aqueux 1/10

Pour les 20 échantillons étudiés provenant des séquences de Bassid, Gambie, Oussouye et Balingore, les forces ioniques ont des valeurs allant de 0,02 (sous Avicennia à Balingore) à 0,24 (sous Rhizophora à Oussouye). (Tabl. XLVII).

Tableau XLVII

Equilibres minéraux - extraits aqueux 1/10  
pour 4 séquences

C M B						C M G				C M O				C M V					
21	23	51	53	111	114	21	23	81	83	31	33	71	73	21	23	71	73	91	93
Force ionique																			
0.17	0.04	0.08	0.05	0.06	0.2	0.05	0.12	0.1	0.15	0.24	0.11	0.06	0.14	0.11	0.14	0.02	0.16	0.09	0.2
Saturation																			
						Q	Q	Q	Q	Q	Q		Q	Q	Q	Q	Q		Q
							S	S	S	S			S	S	S	S	S		S
G	G		G			G				G	G			G	G				G
	C		C										A						

Alors que la plupart des nappes des mangroves - et parfois des tannes inondés - sont saturées en calcite, magnésite, argile magnésienne, quartz et gypse, on constate que les solutions aqueuses sont toutes sous saturées en argile magnésienne et magnésite et, à l'exception des horizons profonds de la mangrove de Bassid, sous saturées aussi en calcite. Il y a sous saturation par rapport à tous les minéraux pour les horizons à jarosite des tannes vifs, sauf en Gambie.

Dans toutes les séquences, les solutions sont généralement proches de la saturation par rapport au gypse et en ce qui concerne la Gambie et la Casamance (Oussouye et Balingore) les solutions aqueuses de tous les profils sont saturées en quartz et en silice amorphe, alors que, d'une manière générale, seules, les nappes des tannes sont saturées en silice amorphe. Ceci est à lier au fait que les extraits aqueux des sols des mangroves et tannes et, en particulier, les horizons profonds, pyritiques,

ont un pH très acide, souvent inférieur à 3,5. A ces pH, l'extrait aqueux au 1/10 dissout des quantités relativement importantes de  $\text{SiO}_2$  jusqu'à 30 ppm à Balingore - et surtout en milieu argileux - ce qui laisserait supposer que les minéraux silicatés sont décomposés par acidolyse avec libération de la silice de l'aluminium et du fer dans la solution (PEDRO, 1978). En fait, dans la nature, il est rare d'observer des pH aussi bas, sinon dans les horizons superficiels des tannes vifs et dans les zones aménagées par drainage pour la riziculture.

#### D. SIMULATION DE LA CONCENTRATION D'UNE SOLUTION PAR EVAPORATION

Bien qu'une partie importante des mangroves ne soit jamais asséchée grâce à la présence d'une nappe phréatique peu profonde, l'évaporation est intense pendant 7 ou 9 mois au point de donner lieu à la formation d'une "moquette" ou d'une croûte, souvent algaire, dans les tannes vifs et les tannes exceptionnellement inondés. Moquette et croûte sont essentiellement formées de cristaux de halite et de gypse et très rarement, à la suite des années de grande sécheresse on a pu observer la formation en surface d'efflorescences d'alun  $\text{NaAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  ou de tamarugite  $\text{NaAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . FRITZ (1975) a mis au point un programme de simulation de l'évolution de la composition chimique des solutions par évaporation (EVAPOR). A partir d'une solution initiale dont la composition est connue, le programme calcule les modifications intervenues dans la solution soit par simple effet de concentration soit à la suite des précipités pour un taux d'évaporation donné, lorsque dans la solution on parvient au seuil de précipitation  $\log Q = \log K_{ps}$ . La simulation peut être conduite en milieu ouvert ou fermé pour les sels.

##### a) Evaporation de l'eau de mer

L'eau de mer, de salinité normale est sous saturée par rapport au gypse, à l'anhydrite et à la halite. A la température ambiante, on constate que la précipitation du gypse précède toujours celle de la halite et qu'il n'y a jamais de précipitation d'anhydrite. Par ailleurs, si l'eau de mer est considérée comme un mélange électrolytique de  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$  et  $\text{KCl}$ , les calculs montrent (BERNER, 1971) que la halite précipite lorsque la molalité de l'ion chlore atteint la valeur 6,06. La molalité de l'ion chlore dans l'eau de mer normale étant de 0,555, cela suppose une évaporation de l'eau de mer d'environ 10 fois son volume initial.

HARDIE (1967) a montré, en étudiant la constante d'équilibre pour la réaction  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$  dans une large gamme de températures que le gypse était plus stable que l'anhydrite à toute température inférieure à  $50^\circ \text{C}$ . Par ailleurs, dans les eaux sursalées, le gypse est métastable et d'une manière générale, pour des températures supérieures à  $18^\circ \text{C}$ , le mélange gypse-halite est métastable.

D'une manière générale, au cours de l'évaporation, c'est le gypse, plutôt que l'anhydrite qui précipite même quand l'anhydrite semble plus stable.

GUEDDARI (1980) a utilisé le programme de FRITZ pour simuler l'évaporation isotherme de l'eau de mer moyenne, en présence de  $10^{-5}$  mole de  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  et de  $10^{-6}$  mole de magnésite dans la solution initiale afin d'étudier le comportement de Mg vis à vis de la silice. La paragenèse minérale qui résulte de l'évaporation de l'eau de mer dans ces conditions est la

suivante :

Montmorillonite - Mg  $\text{Si}_4\text{Mg}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$   
 Gypse -  $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$   
 Halite -  $\text{NaCl}$   
 Thénardite -  $\text{Na}_2\text{SO}_4$   
 Sylvite -  $\text{KCl}$

D'autres modèles d'évaporation BRAITSCH, VALYASHIKO sont cités par GUEDDARI qui signale que si les minéraux précipités au début (gypse et halite) et à la fin (carnallite et bischofite) sont les mêmes, la séquence minéralogique intermédiaire est différente.

b) Application à l'évaporation d'eaux de nappes

Nous avons choisi 2 eaux de nappes, celle de Tobor (CMT02), à salinité voisine de l'eau de mer et une eau dessalée et légèrement acide (CMV01).

- TOBOR

Sa composition chimique est la suivante en millimoles/litre (tabl. XLVIII).

Tableau XLVIII

pH	force ionique	Ca	Mg	K	Na	Cl	$\text{SO}_4$	$\text{H}_4\text{SiO}_4$	Alcalinité
7.8	0.73	11.25	56	11.1	520	604	30	0.15	1.4

La charge totale est de 38,6 g/kg d' $\text{H}_2\text{O}$ .

Il s'agit d'une eau, à peine plus salée que l'eau de mer et de composition chimique très voisine. Elle est déjà saturée en calcite et en argile magnésienne. (Fig. 54).

- Le gypse apparaît très vite à un facteur de concentration de 2,5, pour une force ionique de 1,8 et une charge totale de 70,35 g/kg  $\text{H}_2\text{O}$ .
- Le minéral suivant à précipiter est la *halite*, à un facteur de concentration de 13,7. Le log de la molalité du  $\text{Cl}^-$  est de 6,3 valeur proche de celle donnée par BERNER. La force ionique est de 7,4 et la charge totale de 387 g/kg  $\text{H}_2\text{O}$  soit exactement 10 fois les valeurs de la solution initiale.
- A ce stade, la paragenèse minérale est modifiée et au lieu de la thénardite, c'est la *kainite*,  $\text{KCl}, \text{MgSO}_4, 3\text{H}_2\text{O}$  qui précipite, à un facteur de concentration de 28 pour une force ionique de 8,3 et une charge totale de 402 g/kg  $\text{H}_2\text{O}$ . La saumure contient alors 609 g de halite pour 54 g de gypse et 55 g de kainite. L'étude de l'évolution de la composition chimique de la solution en fonction du facteur de concentration montre que les molalités totales de  $\text{Cl}^-$  et de  $\text{Na}^+$  augmentent régulièrement jusqu'au point de saturation de la halite. Au delà,  $\text{Na}^+$  décroît régulièrement alors que  $\text{Cl}^-$  continue à augmenter.

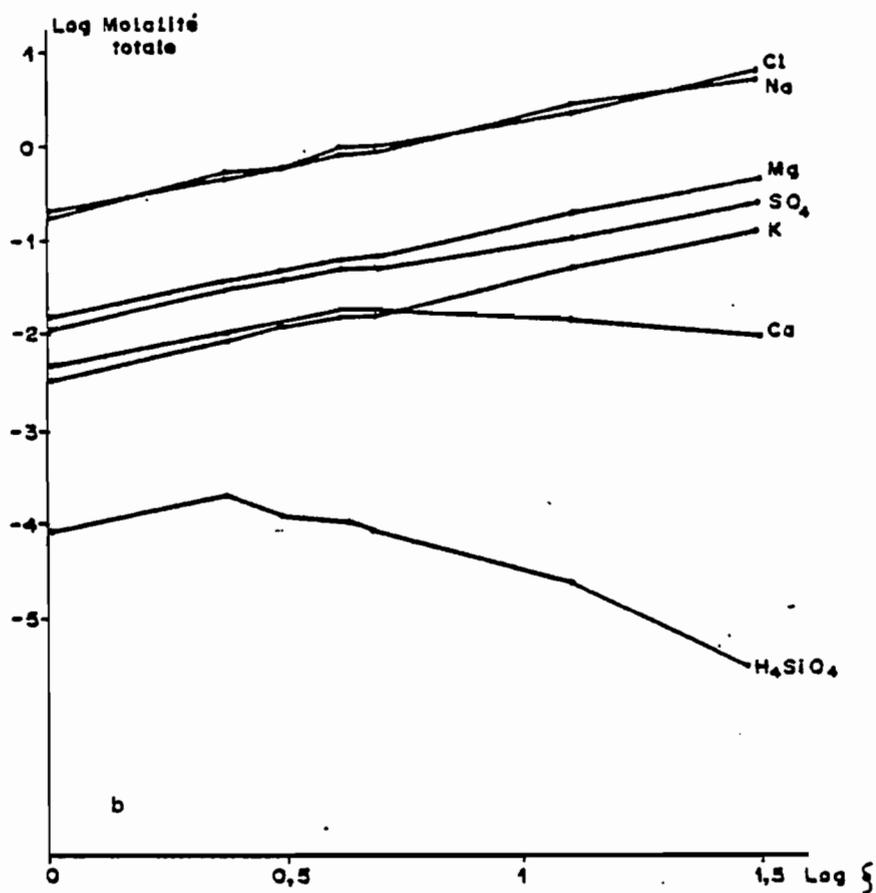
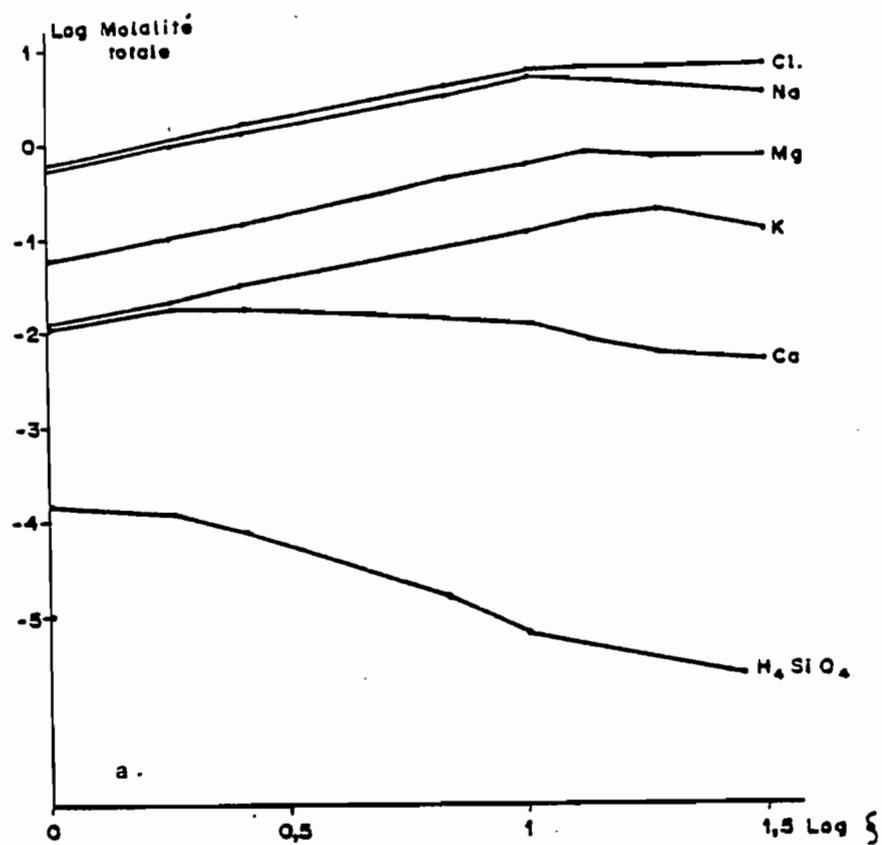


Fig. 54 - Evolution de la composition chimique de la nappe CMT 02 (a) et CMV 01 (b)

- . Le potassium augmente jusqu'à la précipitation de la kaïnite seul minéral potassique qui apparaît au cours de la simulation, et décroît ensuite.
- . Le calcium est soustrait de la solution dès la précipitation de la calcite et du gypse, au facteur  $\delta$  de 1,8.
- . Le magnésium a le même comportement que le potassium jusqu'à la saturation en kaïnite, mais au delà il continue à augmenter mais moins vite.
- . Le sulfate qui est engagé dans la précipitation du gypse et de la kaïnite a le même comportement que le K<sup>+</sup>. Il augmente régulièrement jusqu'à la précipitation de la kaïnite et commence à décroître ensuite.

Le rapport  $\frac{Cl^-}{SO_4^{2-}}$  qui est de 20 au départ, comme dans l'eau de mer, est de 18 en fin de cette simulation. La variation n'est donc pas significative.

Après la précipitation de la kaïnite, il semblerait d'après la valeur de  $\log K - \log Q$  que le minéral suivant à précipiter soit la bloedite ( $\log K - \log Q = -0,098$ ) de formule  $Na_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 4H_2O$

#### - BALINGORE

L'eau de la nappe CMV1 a la composition suivante en millimoles/litre

Tableau XLIX

pH	Force ionique	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	Alcalinité mg/l
6.7	0.25	4.5	15.2	3.7	190	206	12.8	0.07	1.4

Cette eau a une charge totale de 13,7 g/kg d'H<sub>2</sub>O et un pH de 6,7 et représente assez bien les nappes des mangroves situées en amont des affluents de la Casamance en fin de saison des pluies. On constate qu'avec  $0,7 \cdot 10^{-4}$  mole de silice, le talc précipite à un facteur de concentration de 2,3 et à une salinité légèrement inférieure à celle de l'eau de mer (I = 0,6). Suit la calcite, à un facteur de concentration de 3,05 et pour une salinité légèrement supérieure à celle de l'eau de mer (I = 0,77).

La précipitation du gypse est un peu plus rapide que dans le cas de l'eau de Tobor, car elle a lieu pour une force ionique de 1,02 et une charge totale de 55 g/kg, alors qu'à Tobor le gypse précipite pour une force ionique de 1,3 et une charge totale de 70 g/l. En revanche, la halite précipite à des valeurs sensiblement identiques à celles de la nappe de Tobor pour une force ionique de 7 et une charge totale de 394 g/l, c'est à dire à environ 10 fois la salinité de l'eau de mer. L'évolution de la composition chimique de la nappe (fig. 54) est sensiblement identique à celle de Tobor.

En conclusion, l'évaporation des eaux phréatiques de la Casamance fait précipiter, dans l'ordre, les sels suivants :

- Talc
- Calcite

- Gypse, à environ 2 fois la salinité de l'eau de mer
- Halite, à 10 fois la salinité de l'eau de mer
- Kaïnite
- Bloedite et Epsomite (présomés)

mais dans les deux cas, la quantité de halite contenue dans la saumure résiduelle est très largement supérieure aux autres sels (10 fois celle du gypse), d'où la nette prédominance de ce sel par rapport à tous les autres, dans les sols séchés comme on le verra plus loin en étudiant la minéralogie des sols. Par ailleurs, la sécheresse climatique de ces dernières années a eu pour effet de favoriser l'évaporation et la précipitation de halite et de gypse en surface, soit dans la mangrove, soit surtout dans les tannes herbacés transformés en tannes vifs.

## 8. EFFETS DE LA SECHERESSE SUR LA SALINITE DES NAPPES ET DES SOLS

On sait que depuis plus d'une dizaine d'années, le Sahel, en général, et le Sénégal, en particulier sont touchés par une sécheresse dont les conséquences sur la végétation, les cultures et les populations sont considérables. En ce qui concerne les mangroves du Sénégal, déjà en équilibre fragile, une comparaison des photos aériennes de 1978-1979 prises à l'occasion des projets d'études de barrages en Casamance, avec celles de 1969 permet de mesurer l'ampleur des dégâts subis par la mangrove en Casamance où, à notre avis, plus de la moitié des formations à *Rhizophora* ont disparu pour faire place soit à des formations à *Avicennia*, soit à des tannes plus ou moins inondés et dans l'ensemble, on peut affirmer que, par rapport à la Casamance, la mangrove du Saloum a nettement mieux résisté à la sécheresse, grâce, semble-t-il, au matériel sableux plus filtrant qui a permis un lessivage rapide et poussé des sels solubles.

### A. BREF RAPPEL DES DONNEES CLIMATIQUES

La pluviométrie moyenne annuelle était voisine de 1500 mm répartie sur 5 mois en Casamance et de 900 mm, répartie sur 3 mois au Saloum. Depuis 1968, on assiste à une diminution de la pluviométrie dans tout le Sénégal et la fig. 4 montre, pour la période 1968-1979, un déficit généralisé de la pluviométrie en Casamance et au Saloum, mais plus que le déficit annuel, c'est la contraction de la saison des pluies en Casamance qu'il faut prendre en considération. Là, en effet, depuis 10 ans, la saison des pluies se limite à 3 ou 4 mois (Juillet - Septembre/Octobre) au lieu des 5-6 mois habituels, d'où une augmentation marquée de l'E.T.P., avec ses effets, notamment sur les nappes phréatiques et leur salinité et par voie de conséquence sur les sols et la végétation.

### B. EFFETS DE LA SECHERESSE SUR LA SEQUENCE DE BALINGORE (MARIUS, 1976, 1979)

En Janvier 1974, après la sécheresse catastrophique des années 1972 et 1973, une tournée dans les mangroves de Casamance, avec VAN BREEMEN nous avait permis d'observer les changements intervenus dans la végétation et les sols, notamment à Balingore où nous avons, grâce à VIEILLEFON (1976) tous les éléments de comparaison. C'est ainsi que dès cette époque nous avons pu observer la disparition complète des formations à *Rhizophoras* et l'apparition dans les profils du tanne vif de racines silicifiées. Végétation, sols et nappes de cette séquence ont été suivis de manière périodique de Mai 1974 (fin de saison sèche) à Novembre 1978 (fin de saison des pluies).

a) *Végétation*

En Mai 1971, la séquence végétale était la suivante :

Rh. - Rh. - R. mangle - Avicennia - Avic. + Sesuvium - Tanne - Tanne  
 racemosa mangle Paspalum Scirpus Philoxerus vif herbacé  
 + + +

En Mai 1974, suite à deux années de sécheresse catastrophique (1972-1973), tous les Rhizophora avaient disparu, ainsi que la plupart de Avicennia dont il ne subsistait plus que des troncs morts. La séquence se présentait ainsi :

Zone nue - Plages dispersées de Sesuvium - Tapis homogène - Tanne vif  
 rares Paspalum + Eleocharis de Sesuvium

En Mai 1978, après deux années de pluviométrie presque normale (1975-1976), l'année 1977 a été une année fortement déficitaire dont les effets sur la végétation et les cultures ont été beaucoup plus spectaculaires que ceux, consécutifs à la sécheresse de 1972-1973. La caractéristique essentielle est l'invasion de toute la zone à Rh. mangle par Sesuvium portulacastrum formant un tapis herbacé homogène jusqu'au tanne vif. Quelques Eleocharis ont survécu çà et là tandis que Paspalum vaginatum a complètement disparu. En revanche quelques Conocarpus erecta ont fait leur apparition. Un immense tanne vif succède à la zone à Sesuvium portulacastrum. La pl.VIII montre la situation de la séquence à cette époque par rapport à 1969.

En Novembre 1978, après une saison des pluies normale, la séquence se caractérise par une reprise importante des Avicennia et des Eleocharis, reprise généralisée en Casamance, semble-t-il, d'après nos observations en différents points (GUIDEL, KALOUNAYES ...), associée à l'apparition de deux espèces nouvelles : Bacopa Crenata et Sporobolus helvolus. La séquence végétale est la suivante :

Zone nue - Rares Avicennia - Avicennia - Eleocharis - Sporobolus - Tanne vif  
 + + +  
 Sesuvium Sesuvium Sesuvium Bacopa

En résumé, on observe la disparition définitive des Rhizophora, ainsi que de certaines graminées : Scirpus littoralis, Philoxerus vermicularis, Paspalum vaginatum. Ne subsistent plus que Sesuvium portulacastrum, remarquablement adapté à de fortes salures, ainsi qu'Avicennia et Eleocharis.

b) *Morphologie des Sols*

Les changements dans la morphologie affectent essentiellement tous les profils de la mangrove et se caractérisent par l'apparition de taches brunes et le développement d'une consistance de "beurre" dans l'horizon subsurfaciel (40 - 80 cm) qui prend une teinte "purée de marron", résultant de la décomposition des amas fibreuse associés aux racines de Rhizophora.

Dans le tanne vif, les changements se traduisent par la formation plus ou moins temporaire de racines silicifiées et surtout par la présence en surface d'une "moquette" plus ou moins épaisse riche en cristaux de gypse - formant un lit au dessus du profil - et d'un mélange de halite et d'argile.

En de nombreux endroits de la Casamance, la "moquette" a pris la

place du tanne herbacé et constitue une sorte de "mulch" naturel qui protège de la dessiccation le profil et surtout qui concentre la plus grande partie de la salinité. Nous avons pu constater, en effet, à l'occasion des études de la vallée de Guidel et des Kalounayes que l'horizon situé immédiatement au dessous de la moquette est fortement dessalé. A Guidel, pour une conductivité de l'extrait aqueux au 1/10 de la moquette de 12 mmhos/cm, l'horizon 0 - 20 cm avait une conductivité de 0,7 mmhos, en fin de saison sèche.

#### c) Caractères chimiques

Nous avons rassemblé dans le tableau L, les résultats de 8 séries de mesures allant de Mai 1971 (VIEILLEFON) à Novembre 1978 et concernant, d'une part, les horizons de surface (S) et de profondeur (P) de 4 profils, d'autre part, les nappes phréatiques de ces mêmes profils. On constate :

- pour le pH : une légère baisse en saison sèche sous *Rhizophora* une diminution progressive, d'année en année, sous *Avicennia* avec un minimum marqué à la suite de la saison sèche de 1977. 2 minimas, dans le tanne vif, en surface, en Mai 74 et Mai 78, à la suite des 2 saisons sèches.  
Le tanne herbacé est nettement moins acide que le tanne vif ;
- pour la salinité des nappes, des variations saisonnières considérables sous *Rhizophora*, *Avicennia* et tanne herbacé alors que dans le tanne vif, elle varie très peu tout en restant forte et généralement supérieure à 100 mmhos. On notera qu'en Mai 78, la salinité dans la mangrove est plus élevée que dans le tanne ;
- pour la salinité des sols, des variations saisonnières sensiblement identiques à celles de la nappe pour l'horizon de surface, alors qu'en profondeur elle est toujours très élevée et varie peu d'année en année. Exprimée en conductivité de l'extrait aqueux au 1/10, elle est comprise entre 15 et 20 mmhos/cm, soit environ 3 ou 4 fois la salinité de la mer.

#### d) Conclusion

Depuis longtemps, en équilibre avec la mer, la mangrove du Saloum a nettement moins ressenti les effets de la sécheresse climatique que celle de la Casamance, où avant les années 70 les apports d'eau douce par le fleuve et ses affluents neutralisaient au moins pendant 5 à 6 mois l'influence de la marée. Avec la sécheresse des années 70, la Casamance s'est progressivement transformée en une ria et la mangrove se trouve désormais en équilibre avec la mer comme dans le Saloum et de plus, le matériau argileux favorise la concentration des sels par évaporation en saison sèche. L'évolution de la végétation se traduit par une reprise d'*Avicennia* aux dépens de *Rhizophora mangle*, par la disparition de nombreuses espèces d'eaux saumâtres (*Paspalum*, *Scirpus*) par la survivance de *Sesuvium* et éventuellement l'apparition de quelques espèces nouvelles (*Bacopa* ...).

De nombreux survols aériens (1979-1980) et l'examen comparé des photos aériennes de 1978 avec celles de 1969 (pl.VIII) montrent clairement qu'à l'heure actuelle, il y a sans doute plus de palétuviers dans le Saloum qu'en Casamance. La "tannification" qui a démarré en 1974,

Tableau L

Effets de la sécheresse climatique sur l'évolution de la végétation, des sols et des nappes de Balingore

Date		Juillet 71	15 - 5 1974	30 - 8 1974	Octobre 1974	Juin 1975	Novembre 1975	Mai 1978	Novembre 1978	
RHZOPHORA	pH in situ S	6.6	5.7	5.9	6.4		6.3	5.3	6.2	
	pH in situ P	6.9	5.9	6	6.2		6.4	6	5.6	
	E.A I/10 C.E. mmhos S		20.3	12.75	15.7	28.8	7.15	22	13	
	E.A I/10 C.E. mmhos P		13.9	15	14.8	13.1	15.15	12.3	16	
Nappe	C.E. mmhos	50	94.3	6.8	27.4	80	9.5	147.3	21.5	
	pH		2.7	5.7	7.1	6.7	7.1	7.4	6.7	
	AVICENNIA	pH in situ S	6.9	5.5	5.4	5.7		4.9	4.1	5.2
		pH in situ P	5.6	4.8	4.5	4.9		4.7	4.1	4.7
E.A I/10 C.E. mmhos S			7.35	3	2	11.8	1.7	9.5	2.6	
E.A I/10 C.E. mmhos P			14.5	19	13.7	15.6	14.3	16.1	20	
Nappe	C.E. mmhos	70	115.5	48.8	54.2	107	22.6	147.3	41.7	
	pH		3.9	4.2	6.9	2.9	6.9	6.8	3.5	
	TANNE VIF	pH in situ S	6.7	3.3	3.4	3.9		3.9	3	3.5
		pH in situ P	4.9	3.4	3.6	3.4		2.9	3.3	3.4
E.A I/10 C.E. mmhos S			12.2	6.5	7.9	11.8	11.2	15	7.3	
E.A I/10 C.E. mmhos P			17	19	18	16.5	18.8	15	21	
Nappe	C.E. mmhos	100	130	135	142.3	142	130.5	126.1	148.5	
	pH		2.5	2.7	2.4	2.5	2.3	3	2.7	
	TANNE HERBACE	pH in situ S	5.6	4.3	4.5	4.7		4.9	5.3	3.2
		pH in situ P	5.2	6	5.5	6		5.8	4.4	3.7
E.A I/10 C.E. mmhos S			5.7	6.3	5.7	9.5	6.1	9.5	5.2	
E.A I/10 C.E. mmhos P			14.7	16	18	14.3	15.8	14	21	
Nappe	C.E. mmhos	80	130	9.5	40		23	103.6	115	
	pH		4.8	6.2	5.1		6.2	3	2.9	

S = horizon de surface. P = horizon de profondeur.

après la grande sécheresse de 1972-1973 s'est accélérée avec celle de 1977. Elle se traduit notamment par une acidification des horizons sub-superficiels et l'évolution des sols "potentiellement sulfaté-acides" en sols "sulfaté-acides jeunes", généralement plus acides que les sols sulfaté-acides "évolués". La salinité des sols et des nappes a atteint des valeurs telles qu'on a vu se former, en quelques années, des cristaux de gypse, alors qu'avant 1971, les observations et les analyses faites par VIEILLEFON avaient montré l'absence de ce minéral dans toute la mangrove de la Casamance. Ceci montre à quel point l'évolution de ces sols peut être rapide et liée soit aux facteurs climatiques (sécheresse), soit à l'action de l'homme (aménagement agricoles). Aussi, une cartographie de ces sols n'est-elle jamais définitive et devra prendre en compte toutes les évolutions possibles, comme nous l'avons fait pour la vallée de Baïla (AUBRUN, MARIUS, 1981) ou pour la vallée de Guidel (MARIUS, CHEVAL, 1980).

Ces observations montrent enfin que dans les modèles thermodynamiques d'études des équilibres minéraux-solution et d'évaporation, il est nécessaire de faire intervenir la cinétique des réactions.

## 9. ETUDES ISOTOPIQUES DES NAPPES PHREATIQUES

Des analyses isotopiques ont été effectuées au laboratoire d'hydrologie d'ORSAY par FONTES, sur des eaux de nappes prélevées dans différentes séquences (Balingore, Baïla, Bassid ...). Ces analyses concernent l'oxygène 18, le carbone 13 et le soufre 34 pour 4 eaux de la séquence de Balingore, prélevés sous Rh. racemosa, sous Rh. mangle, sous Avicennia et sous tanne vif : les résultats (tabl. LI) ont été étudiés par KALCK (1978) dont les conclusions sont les suivantes :

Tableau LI

Etude isotopique des nappes  
phréatiques de BALINGORE

Vég.	C.E. mmhos/cm	pH	$\delta^{18}\text{O}/\text{SHOW}$	$\delta^{13}\text{C}/\text{PDP}$	Sulfates dissous	
					$\delta^{34}\text{S}/\text{Canon Diablo}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{SHOW}$
ex. Rh. rac.	70	6.1	+ 1.66	- 25.54	+ 20.06	+ 17.50
ex. Rh. mangle	140	5.7	+ 2.01	- 22.93	+ 18.59	+ 18.85
Avicennia	120	5.5	+ 2.94	- 17.85	+ 19.81	+ 18.25
Tanne vif	42	3.2	+ 2.17	- 14.29	+ 14.27	+ 17.10

### a) Oxygène 18

L'étude de l'évolution de  $\delta$  qui traduit l'abondance isotopique de l'élément étudié par rapport à un élément de référence : l'eau océanique moyenne SMOW (standard mean ocean water) montre que l'eau de mer qui pénètre en Casamance y subit une forte évaporation provoquant une augmentation de  $\delta$  dont la valeur est déjà de + 1,66 dans la mangrove à Rhizophora. Dans la séquence de Balingore,  $\delta^{18}\text{O}/\text{SMOW}$  augmente de la mangrove au tanne avec un maximum pour Avicennia, à la limite du tanne vif. Les valeurs obtenues (2,17 - 294) correspondent à celles observées dans les marais salants du Gard (FONTES, 1966).

### b) Carbone 13

Les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  sont données par rapport au  $\text{CO}_2$  total du standard qui est une belemnite de la Pee Dee formation du Crétacé de Caroline du Sud. Les plantes terrestres ont un  $\delta$  très négatif (- 25), car elles tirent leur carbone du  $\text{CO}_2$  de l'air dont le  $\delta$  est déjà nettement négatif par rapport au  $\delta$  des bicarbonates marins utilisés par les plantes aquatiques. Dans la séquence de Balingore,  $\delta$  varie de - 25,54 sous Rhizophora à - 14,29 dans le tanne, en passant par une valeur de - 17,85 sous Avicennia. Il y a donc une augmentation de  $\delta$ , liée sans doute à la libération de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère par suite de la destruction de la matière organique qui évacue préférentiellement le Carbone 12 en enrichissant le milieu en Carbone 13.

*c) Soufre 34 dans les sulfates dissous*

Les valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  sont exprimées par rapport à la troïlite de la météorite Cañon Diablo. Dans les sulfates océaniques  $\delta$  est de + 20,3 sous *Rhizophora racemosa*, la valeur de  $\delta$  est proche de celle des sulfates océaniques 20,06.  $\delta$  décroît ensuite progressivement jusqu'au tanne vif où  $\delta$  est nettement plus faible (+ 14,27). Or, dans le cas de l'évaporation de l'eau de mer, la formation de gypse crée généralement une augmentation de  $\delta^{34}\text{S}$  (PILOT, 1974), car le S 32 est préférentiellement retenu dans cette opération, mais dans le cas de la séquence mangrove-tanne, il semble que l'oxydation de la pyrite en jarosite par voie bactérienne libère du Soufre 32, alors que le Soufre 34 reste dans la phase minérale.

*d) Oxygène 18 dans les sulfates dissous*

Le  $\delta^{18}\text{O}/\text{SMOW}$  est nettement positif, car les sulfates de la nappe sont en équilibre avec la phase minérale qui présente normalement un fort enrichissement en oxygène 18. Il n'y a pas de variation entre la mangrove et le tanne, ce qui semble indiquer que la formation du gypse et de la jarosite n'influence pas le fractionnement de l'oxygène 18 dans les sulfates.

## 10. CONCLUSIONS

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, comme on le verra aux chapitres suivants.

## Chapitre IX

## LA MINÉRALOGIE DES SOLS DE MANGROVES

## 1. LES MINÉRAUX DES SOLS

## A. OBSERVATIONS AUX R.X.

177 échantillons provenant des 6 séquences ont été analysés par diffraction des R.X. sur poudres désorientées. L'examen des diffractogrammes indique la présence quasi générale de quartz, d'argile et de halite auxquels sont souvent associées la pyrite, la jarosite et le gypse ainsi qu'un feldspath plagioclase. L'argile est généralement représentée par la kaolinite avec parfois un peu d'illite, alors que la smectite apparaît très mal sur les diffractogrammes de poudres désorientées. La répartition et l'abondance de ces minéraux sont cependant différentes selon les séquences, comme le montre le tableau ci-dessous (tabl. LII).

Tableau LII

Répartition des principaux minéraux  
dans les sols des séquences

Séquence	N'Dimsiroh	Bassid	Gambie	Tobor	Balingore	Oussouye
Quartz	++	++	+	+	+	+
Kaolinite	++	+	++	++	+++	+
Illite	++		+++		+	+
Halite	++	+++	+	+++	+	+
Pyrite	+	+	+	+	+	+
Jarosite	+	+++	++	++	++	+
Gypse		++	+	++	+	+

+ présent en faibles quantités  
++ présent  
+++ abondant

L'abondance de quartz caractérise les deux séquences sableuses du Saloum. L'illite est relativement abondante dans la séquence de Gambie, sans doute en liaison avec le bassin amont du fleuve. Toutes les nappes sont largement sous saturées en halite mais les sols en sont cependant tous pourvus et si dans certaines séquences (Bassid, Tobor) la halite est représentée en grandes quantités, dans d'autres (Balingore, Oussouye et Gambie) les horizons superficiels n'en contiennent généralement pas, par suite du dessalement superficiel. Dans tous les échantillons, la halite est bien représentée par ses deux raies caractéristiques à 2,8 Å et 1,99 Å. La pyrite est présente dans la plupart des échantillons de profondeur, mais en faibles quantités par rapport à la jarosite.

Rappelons que les déterminations ont été effectuées sur des échantillons séchés et que de ce fait, une certaine fraction de la pyrite a été transformée en jarosite. Celle-ci est en effet présente dans la plupart des échantillons - à l'exception de ceux de la surface des séquences sableuses (Bassid, N'Dimsiroh, Oussouye) - sous forme de jarosite K dont les raies caractéristiques sont 3,08 Å et 3,11 Å. On note cependant la présence dans certains profils de Bassid et de Balingore, de natrojarosite (raies à 5,06 Å et 3,06 Å), mais dans l'ensemble, c'est la jarosite K qui prédomine.

D'une manière générale, les quantités de jarosite sont inférieures à celles de la halite, sauf dans le tanne de Balingore où quantitativement la jarosite prédomine sur la halite, mais on remarque aussi dans les diagrammes que la jarosite est surtout bien représentée dans les horizons superficiels des tannes vifs, là où on a pu les observer sur le terrain. En effet, bien qu'il s'agisse toujours d'échantillons séchés, à pH généralement acide, la jarosite est souvent mal représentée dans les échantillons provenant des horizons réduits pyritiques.

Le gypse est, dans l'ensemble, faiblement représenté dans les profils. Il est surtout abondant dans la croûte saline superficielle du tanne vif à Bassid et à Balingore. Mais les prélèvements ayant été effectués en fin de saison des pluies, une partie du gypse a été dissoute et évacuée vers le marigot.

Dans de nombreux échantillons prélevés en saison sèche (Guidel, Kalou) naves, Balingore), le gypse est beaucoup plus abondant tant en surface qu'au sein des profils.

La figure 55 montre que la plupart des eaux phréatiques des tannes sont saturées en gypse et qu'en particulier toutes les eaux des mangroves de Casamance et de Gambie en sont largement sous saturées.

La calcite dont les nappes sont presque toujours saturées n'est présente que très exceptionnellement dans certains horizons profonds de la séquence de Bassid, riches en débris coquilliers.

Afin d'étudier l'influence de la solution du sol sur la répartition des minéraux, des diagrammes de R.X. ont été effectués sur les échantillons de 2 séquences (Bassid et Oussouye) dont on avait extrait l'eau interstitielle par ultracentrifugation. La comparaison des 2 séries de diagrammes montre (fig. 56) que : d'une manière générale, il y a une parfaite similitude du point de vue qualitatif entre les 2 types d'échantillons. Par contre, les échantillons naturels contiennent toujours des quantités plus élevées des différents minéraux présents, notamment de halite, de jarosite et même d'argile que les échantillons dont on a extrait la solution.

## B. OBSERVATIONS AU M.E.B.

Un certain nombre d'échantillons provenant de séquences ont été observés au microscope électronique à balayage. Par ailleurs, D. GOULEAU (1975), après avoir montré, en étudiant les vasières atlantiques tempérées, que l'interface air-sédiment était le siège d'un phénomène essentiel : l'évapo-ascension capillaire a appliqué ses techniques de prélèvements et d'observations aux sédiments de mangroves dans le cadre de l'A.T.P. "Mangroves et Vasières". Il s'agit notamment de congeler "in situ" les échantillons avec de l'azote liquide puis de les lyophiliser au

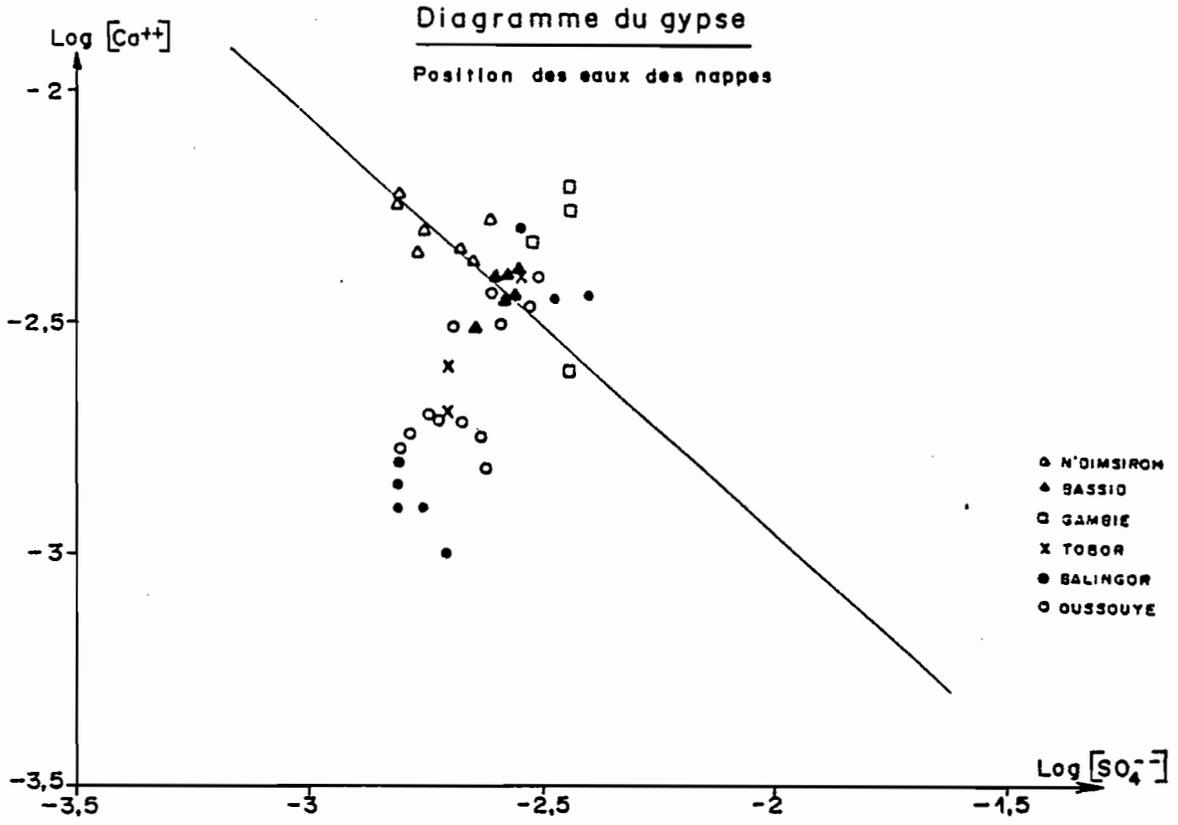


Fig. 55 - Diagramme du gypse  
Position des eaux des nappes

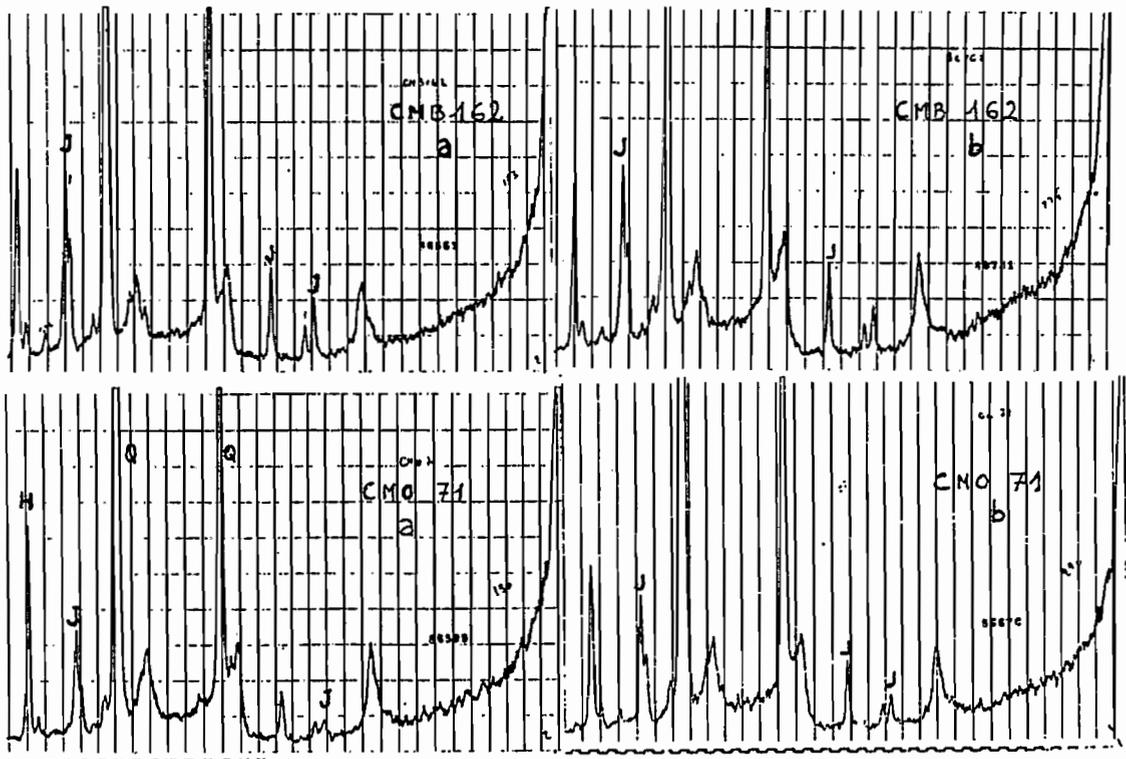


Fig. 56 - Diagrammes de poudres aux R.X.  
(a = échantillons naturels -  
b = échantillons déshydratés)

laboratoire. Les échantillons ont été prélevés dans l'estuaire du Saloum sur vases sableuses et en Casamance sur vases argileuses depuis les bordures de marigots jusqu'au tanne vif, en passant par la slikke et les mangroves (*Rhizophora* et *Avicennia*). Les observations au M.E.B. indiquent la présence assez fréquente de gypse, sous forme d'aiguilles ou de cristaux prismatiques imbriqués, (pl.VII). La pyrite, sous forme sphérique s'observe bien dans certains échantillons lyophilisés de la surface, alors que dans les échantillons séchés, elle est rare. La jarosite, en revanche, est présente dans la plupart des échantillons des séquences (pl.IX), mais ce qu'on observe essentiellement au M.E.B., ce sont les diatomées et les cristaux d'aluminium.

#### a) *Les diatomées*

Leur présence est quasi générale, tant dans les séquences étudiées (Balingore, Tobor, Bassid) que dans la vase superficielle. Que ce soit, en effet, dans la slikke argileuse ou sableuse en bordure des marigots, ou sous la mangrove, GOULEAU (1977) note la présence de diatomées, souvent abondantes qui permettent de fixer la vase superficielle et de la protéger de l'érosion.

A Balingore sur la rive escarpée du chenal de marée soumise à la submersion biquotidienne, un échantillon de vase superficielle prélevé cinq heures après l'émersion montre de très nombreuses diatomées (environ 7000 au mm<sup>2</sup>) bien individualisées (pl. IX). Toujours à Balingore, mais sous la mangrove en voie d'érosion, GOULEAU a effectué des prélèvements sur des vases de différentes couleurs : noirâtre, vert pâle, vert olive, rougeâtre. Au M.E.B., il constate qu'il y a peu de diatomées dans la vase noirâtre et dans la vase rougeâtre, mais qu'elles sont abondantes dans la vase vert pâle et vert olive.

Dans le tanne vif de Balingore, on note la présence de diatomées dans l'horizon réduit (pl.VII).

La colonisation des vasières de mangroves par les diatomées est donc un phénomène général comme dans les vasières tempérées (GOULEAU) protégeant les sédiments de l'érosion.

#### b) *L'aluminium*

Tous les échantillons sont caractérisés, malgré la diversité des lieux de prélèvements, par la présence de cristaux d'aluminium. D'après GOULEAU et al. (1982), il est très difficile sinon impossible de déterminer la quantité de ces cristaux d'aluminium étant donné la faible surface observée au M.E.B. mais leur présence semble abondante partout tant en surface que sous l'interface les cristaux ont des dimensions assez constantes : de 2 à 5 µm en moyenne. Leur forme est aplatie à configuration plus ou moins hexagonale, avec des tronçatures sur les petites faces (pl. X).

Quelque soit le lieu de prélèvement, ces cristaux d'aluminium se présentent à l'état isolé, disséminés à la surface du sédiment, souvent collés par les mucilages des diatomées en petits flocons à structure lâche de 5 à 10 individus ; en flocons plus importants, à structure plus dense, de plusieurs centaines d'individus.

La microanalyse, soit sur des cristaux, soit sur des flocons, montre la seule présence de l'aluminium. Tout au plus peut on parler de cristaux

d'hydroxydes d'aluminium sans pouvoir indiquer de manière précise la variété cristalline.

D'après GOULEAU, (1982) l'origine de ces cristaux d'aluminium serait à rechercher dans les tannes vifs où se trouvent réunies les conditions d'hyperacidité et de forte évapotranspiration favorisant ainsi la précipitation de l'aluminium à l'interface air-sédiment ou à proximité soit par changement du pH, soit par concentration des eaux du sol. C'est à partir des tannes vifs que s'effectuerait la dissémination aérienne des petits cristaux d'aluminium, l'épandage éolien se faisant de manière tout à fait aléatoire sur la surface des mangroves car la succession mangroves - tannes est souvent arbitraire dans le sens des vents dominants.

En résumé, la diffraction aux R.X. et les observations au M.E.B. confirment, en grande partie, les données des observations macromorphologiques et micromorphologiques, à savoir la présence dans les sols de pyrite, de jarosite, de gypse, de halite et de diatomées.

Par ailleurs, le M.E.B. a permis de mettre en évidence la présence quasi constante de cristaux d'aluminium dont la nature et l'origine sont encore mal définies.

## 2. LA FRACTION ARGILEUSE

La fraction inférieure à 2 microns a été étudiée par diffraction de rayons X sur une pâte orientée selon la technique mise au point au laboratoire de l'Institut de Géologie de Strasbourg, sans destruction de la matière organique. Quatre enregistrements sont réalisés pour chaque diagramme: sans traitement, chauffage à 490° C, traitement à l'éthylène glycol, traitement à l'hydrazine.

### A. LA FRACTION ARGILEUSE DES FORAGES PROFONDS

KALCK (1978) a étudié de manière détaillée la fraction argileuse de nombreux échantillons prélevés dans les forages profonds de Casamance, du Saloum et du Delta du Sénégal.

Il montre tout d'abord que la kaolinite et la smectite représentent ensemble plus de 90 % de la fraction inférieure à 2  $\mu$ . Les sédiments proches de l'océan sont à dominance de smectite alors que dans les zones qui en sont éloignées la kaolinite est plus importante. De même, dans certains forages (Balingore, Oussouye) les variations du rapport kaolinite/smectite, dans le sens vertical permettent de suivre les influences relatives des apports continentaux et océaniques. L'ensemble des variations horizontales et verticales des minéraux argileux permet ainsi d'avoir une bonne idée de l'évolution paléogéographique des régions étudiées.

Il montre ensuite que le maximum granulométrique de l'argile appartient à la fraction 0,5 à 0,1  $\mu$  qui contient 75 à 90 % de l'argile totale quel que soit le faciès, kaolinique ou smectitique. L'illite appartient aux plus grandes tailles, alors que la smectite et la kaolinite appartiennent essentiellement aux fractions inférieures à 0,5  $\mu$ . Enfin, le rapport smectite / kaolinite reste constant quelle que soit la taille des particules argileuses.

a) *Etude des kaolinites*

D'après KALCK, l'étude des kaolinites provenant de l'ensemble des régions étudiées et appartenant aux différents faciès observés (continental marin, mangrovien) montre que :

- les plaquettes de kaolinite sont toutes bien formées, ce qui sous-entend un transport limité ou effectué dans un milieu peu agité ;
- les kaolinites sont toutes de type fire-clay et présentent un désordre d'autant plus grand que leur taille est plus petite. Cette constance du type permet de penser que la kaolinite provient uniquement du Continental terminal ;
- enfin les kaolinites ne subissent pas de transformation importante dans le milieu de mangrove.

b) *Etude des smectites*

Les résultats fournis par la géochimie confirment ceux obtenus par l'étude des diagrammes de R.X.

- la prédominance des cations trivalents ( $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ ) sur les ions divalents montre que ces smectites sont dioctaédriques ;
- la présence d'un remplacement tétraédrique montre que ce sont des beidellites ;
- la présence importante de fer dans les octaèdres permet de les classer comme beidellites ferrifères.

Enfin, on retiendra qu'il n'y a pas de différence entre les formules structurales des smectites prélevées dans la mangrove et celles du sédiment marin.

B. LA FRACTION ARGILEUSE DES SOLS DES SEQUENCES

La fraction inférieure à 2 microns a été extraite de la plupart des échantillons des séquences et analysée aux R.X. Il apparaît que comme dans les forages profonds, kaolinite et smectite constituent plus de 90 % de la fraction argileuse, l'illite n'est présente, en quantités appréciables que dans la séquence de Gambie et sous forme de traces à Bassid et à Balingore. Parmi les autres minéraux on citera la présence de jarosite dans les échantillons des tannes vifs, à Bassid et à Balingore, ainsi que du quartz dans certains échantillons de N'Dimsiroh.

Les proportions relatives de kaolinite et de smectite sont variables selon les séquences et grosso modo, on constate que : (fig. 57 a et b)

- dans le Saloum, smectite et kaolinite sont en proportions égales et que parfois - notamment dans le tanne vif - la smectite prédomine légèrement sur la kaolinite. C'est aussi le cas de la séquence de Tobor, en Casamance ;
- à Balingore, Tobor et Gambie, c'est la kaolinite qui prédomine nettement sur la smectite, en particulier dans la zone mangrove - tanne inondé, alors que dans le tanne vif, on observe une légère augmentation de la smectite.

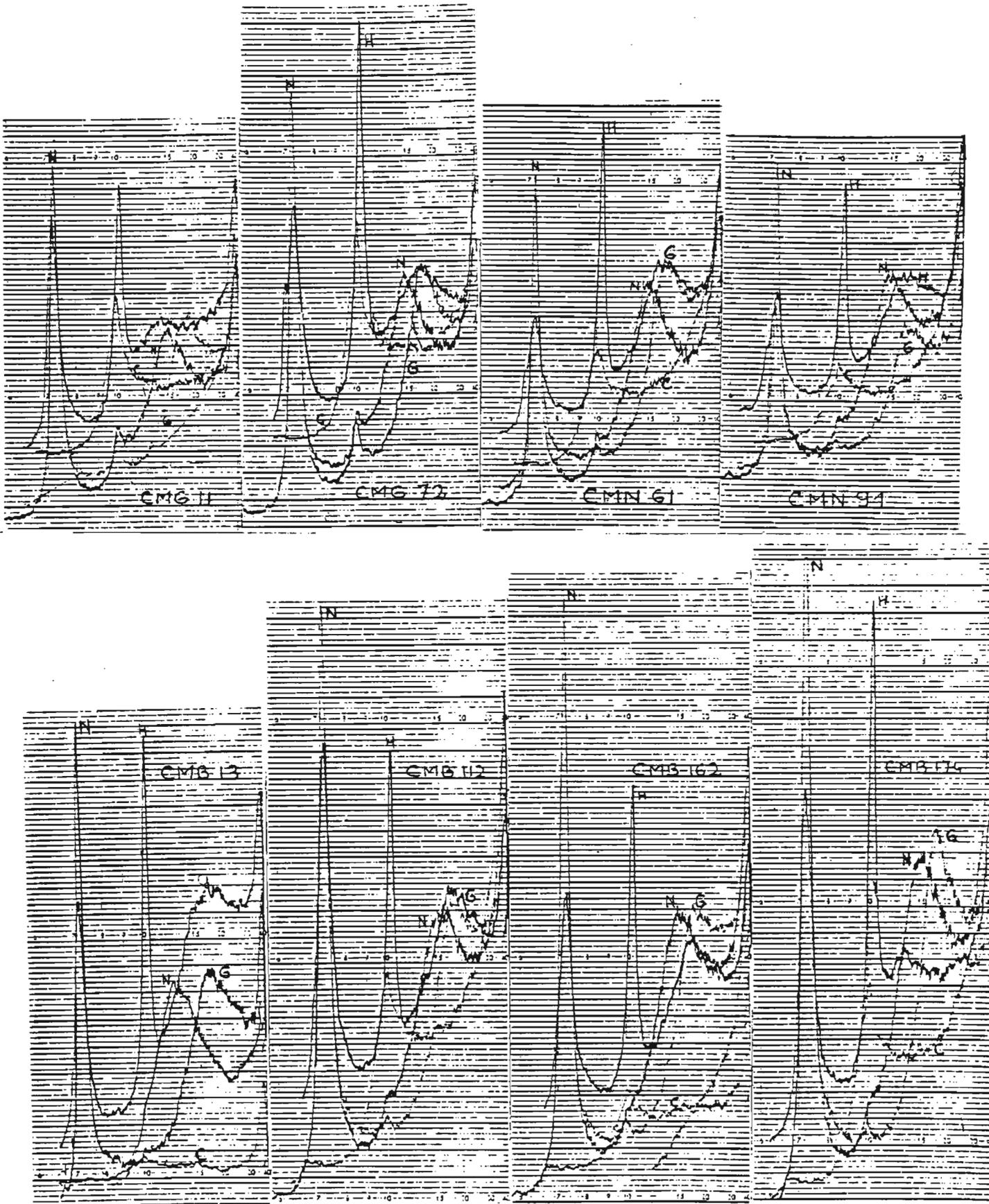


Fig. 57 - Diagrammes de diffraction aux R.X. - Fraction  $< 2 \mu$   
 N = Normal - C = Chauffage - G = Glycolé - H = Hydrazine.

Fig. 57 a

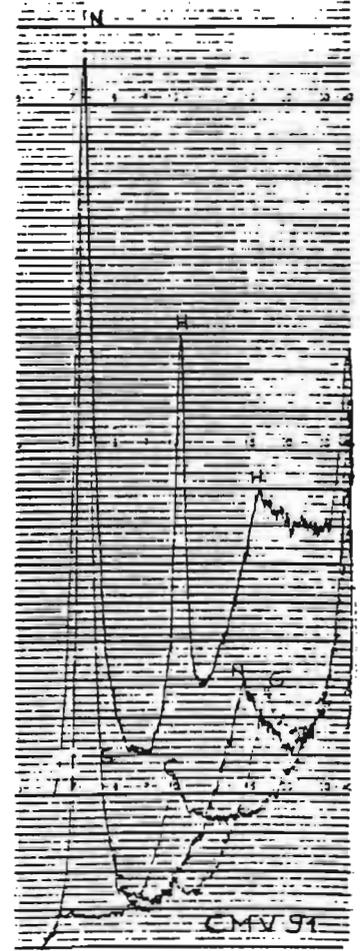
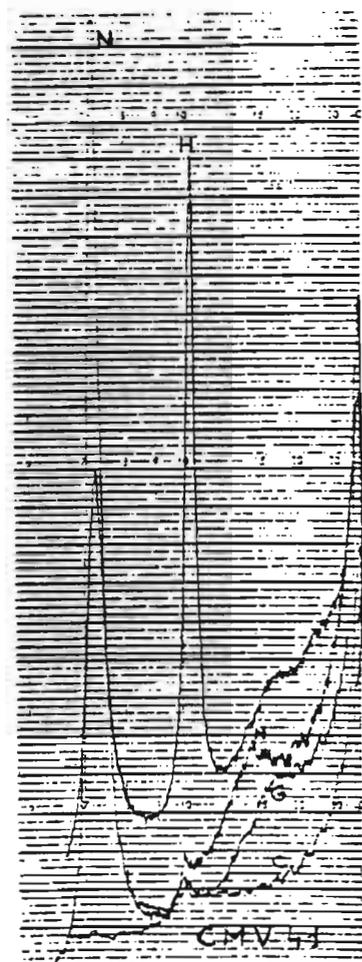
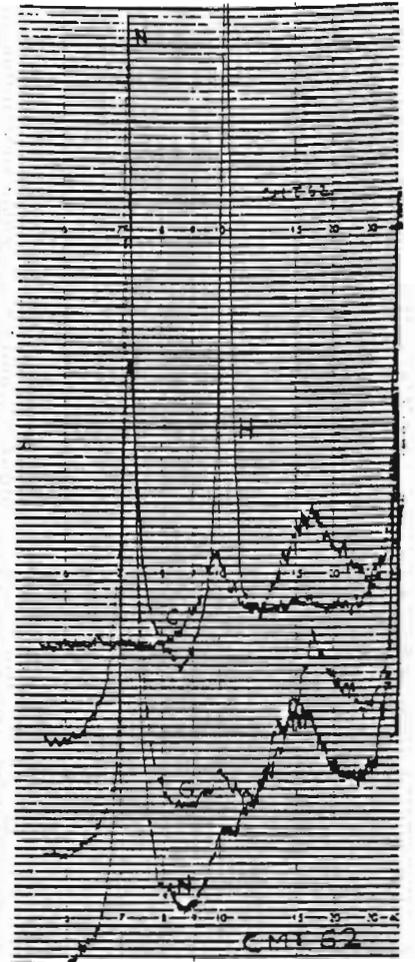
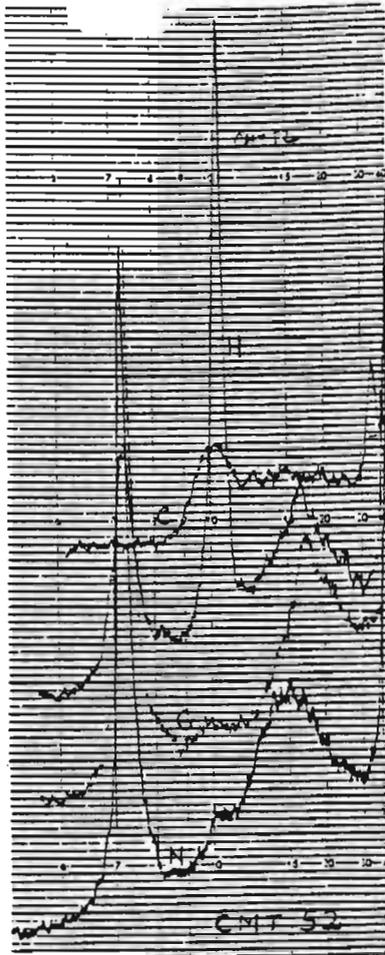
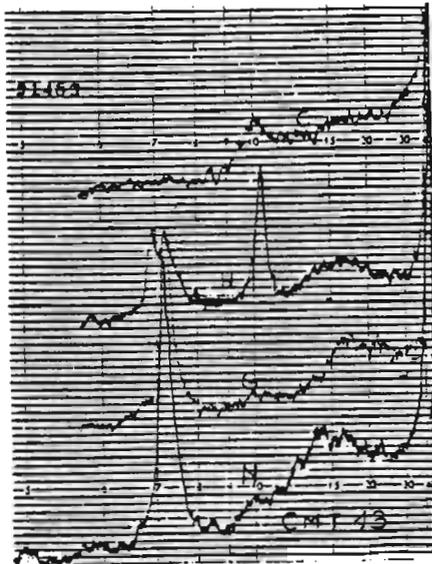


Fig. 57 b

a) *La kaolinite*

Elle est caractérisée par ses raies à 7,1 Å et 3,55 Å. La kaolinite est bien cristallisée dans toute la séquence de Balingore et dans les tannes vifs des autres séquences. Par contre, elle est plus ou moins dégradée dans les zones à mangroves, notamment à Bassid.

Dans tous les échantillons, on constate que le traitement à l'hydrazine - qui permet de distinguer les kaolinites des chlorites - fait apparaître 2 raies très nettes à 7,15 Å et 10,4 Å, indiquant que les kaolinites sont désordonnées. Il s'agit sans aucun doute de kaolinite de type fire-clay.

b) *Les smectites*

L'examen des diagrammes permet de les classer en 4 groupes différents.

Groupe 1 : Les pics des différentes argiles sont nets et bien séparés et le pic des smectites se situe à 14 Å (non traité).

Groupe 2 : Le pic des smectites s'étale entre 10 et 17 Å. Dans ce groupe, on peut distinguer des diagrammes dans lesquels le pic des smectites est à 12 Å.

Groupe 3 : Le pic des smectites forme une bosse qui s'étale entre 10 et 30 Å. Ce type de diagrammes ressemble à celui des argiles de type "pédologique".

Groupe 4 : Les smectites sont pratiquement absentes.

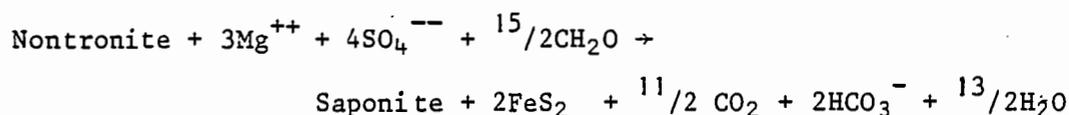
D'une manière générale, le glycolage fait passer la raie 14 Å des smectites à 17-18 Å, tandis que le chauffage à 550° la rabat à 10 Å.

La plupart des échantillons présentent des diagrammes des groupes 1 et 2 et en particulier les horizons à jarosite des tannes vifs ont des pics de smectite à 14 Å bien nets. Seuls, certains échantillons de zones à mangroves et de tannes inondés, en particulier ceux d'Oussouye présentent des diagrammes du groupe 3. Il semble qu'il y ait là une influence de la matière organique car, par ailleurs, pour ces mêmes échantillons, on constate que le chauffage à 550° ne fait pas apparaître la raie à 10 Å qui s'écrase complètement. C'est, en particulier, le cas de tous les échantillons des zones à mangrove-tanne inondé de la séquence de Bassid (profils 1 à 10) où l'on observe que même dans le cas de la présence d'un pic assez net à 14 Å, le pic à 10 Å de l'échantillon chauffé, disparaît complètement.

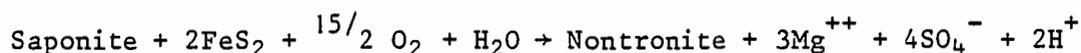
L'allure plus ou moins étalée du pic des smectites sur les diagrammes des R.X. peut être interprétée soit par la formation d'intergrades alumineux dans les feuillettes de smectites, soit par la présence d'interstratifiés. KALCK (1978) a résolu ce problème par un traitement des échantillons au citrate de Na et a pu ainsi montrer que les argiles du groupe 2 étaient des smectites à intergrades alumineux bien développés. Il a, par ailleurs, essayé de caractériser le type de smectite à l'aide des R.X. par l'étude de l'occupation des sites octaédriques d'une part et celui des sites tétraédriques, d'autre part. Dans le premier cas il a constaté que les sites octaédriques étaient occupés par des cations trivalents et que donc, les argiles appartenaient à la série dioctaédriques. Ensuite, il a vérifié expérimentalement la présence d'une charge tétraédrique indiquant ainsi

que les smectites observées sont des beidellites et l'ensemble des formules structurales calculées à partir de la composition chimique des fractions argileuses montre que les smectites ont une composition intermédiaire entre la beidellite et la nontronite et, de ce fait, sont des beidellites ferrifères.

DREVER (1971) a suggéré que dans les sédiments marins récents, le fer est extrait de la smectite et remplacé par le magnésium de la solution marine au cours de la formation de la pyrite, selon une réaction du type :



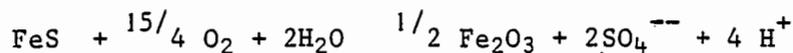
$\text{CH}_2\text{O}$  étant la matière organique métabolisée pendant la sulfato-réduction. Partant de cette réaction, VAN BREEMEN (1976, 1980) a montré que dans les sols de la Plaine Côtière de Thaïlande, la réaction inverse pouvait se produire, au cours de l'oxydation de la pyrite, résultant de l'aération des sédiments, à savoir



Dans ces 2 réactions, la saponite et la nontronite représentent d'évidence, les pôles extrêmes de formation des minéraux.

Il y a très peu de résultats pour prouver d'une part, qu'il y a un déplacement significatif du  $\text{Mg}^{++}$  de la solution au cours de la sulfato-réduction et de la formation de la pyrite dans les zones à mangroves d'autre part, que l'argile est en réalité, riche en silicates ferriques et pauvre en  $\text{Mg}^{++}$  avant son dépôt, et cela, en grande partie, parce que les déterminations analytiques sont effectuées sur des échantillons séchés, donc oxydés. En revanche, l'augmentation relativement importante du  $\text{Mg}^{++}$  dans les solutions du sol et dans les nappes quand on passe de la mangrove au tanne indique qu'il y a une transformation de type Saponite  $\rightarrow$  Nontronite.

Par ailleurs, on note que dans la réaction de cette transformation une seule mole d' $\text{H}^+$  est libérée alors que dans la réaction d'oxydation de la pyrite en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , ce sont 4 moles d' $\text{H}^+$  qui sont libérées.



Il en résulte que les  $\frac{3}{4}$  de l'alcalinité dissoute produite lors de la réduction des sulfates sont stockés dans les smectites sous forme de  $\text{MgO}$ . Cette alcalinité sera ainsi disponible pour une neutralisation ultérieure de l'acidité.

En fait, dans les zones à mangroves du Sénégal, la source principale du fer de la pyrite est constituée par les oxydes ferriques provenant de l'altération des grès du Continental Terminal plus que des smectites et une grande partie de l'alcalinité formée au cours de la sulfato-réduction est évacuée par l'action de la marée (tidal-flushing) sous forme de bicarbonates. Il en résulte que le sédiment est plus fortement "potentiellement acide". C'est le cas de la plupart des marais estuariens abrités derrière des cordons et disséqués par de nombreux chenaux de marée (tidal creeks).

On peut se demander si dans le tanne, milieu fortement acide, il n'y a pas une certaine altération des minéraux argileux et notamment des smectites. En effet, la formation de kaolinite à partir de smectite dans les milieux acides a été démontrée expérimentalement par KITTRICK (1970) et les diagrammes de R.X. montrent que d'une manière générale, les pics de la kaolinite des horizons acidifiés des tannes sont nettement plus intenses et plus effilés que ceux des horizons des profils de mangroves.

Des preuves indirectes de l'altération des minéraux argileux sont fournies par la silicification des racines de palétuviers et formation d'opale cristobalite, associée à la présence de quantités relativement importantes de  $\text{SiO}_2$  amorphe, d'une part, et à la néoformation d'hydroxydes d'aluminium (GOULEAU et al., 1982), d'autre part. Ces deux types de néoformation sont liés à l'hyperacidité du milieu.

Les figures 58 et 59 montrent 2 diagrammes de stabilité, à  $25^\circ\text{C}$  et 1 atm, tracés l'un, pour le système  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O}$  comportant les phases microcline, muscovite, kaolinite, gibbsite et une beidellite K ; l'autre, pour le système  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{MgO}$ , avec les phases chlorite-Mg, beidellite-Mg, kaolinite et gibbsite.

On y observe trois nuages de points qui se distinguent nettement l'un de l'autre :

- un premier ensemble qui correspond à la plupart des eaux de nappes des mangroves et tannes inondés (sauf Balingore) et dont les points sont situés à la limite des phases kaolinite et muscovite (fig. 58) et à la limite des 3 phases chlorite-kaolinite et beidellite Mg (fig. 59). D'après BERNER (1971), ce premier ensemble est sensiblement identique à celui des échantillons d'eau de mer et leur situation autour d'un point triple montre qu'il y a une instabilité relative des minéraux argileux ;
- un second ensemble qui englobe exclusivement les eaux des mangroves de Balingore, est situé dans la phase kaolinite. Il s'agit d'eaux de mer dessalées par les apports d'eaux douces d'amont, à pH acide ;
- enfin, la plupart des eaux des tannes vifs s'alignent entre la phase kaolinite et beidellite.

Ces diagrammes confirment, de manière claire, que les eaux des tannes vifs sont très différents de celles de la mangrove. En effet, nous avons vu que dans la mangrove, le transit dans la nappe se faisait latéralement du marigot vers la mangrove et retour au marigot et de ce fait, la composition chimique des nappes - proche de celle de la mer - varie peu en cours d'année, alors que dans le tanne, les oscillations saisonnières et verticales de la nappe, donnent lieu à des variations importantes des conditions physico-chimiques - notamment du pH et du Eh - qui peuvent être responsables d'une certaine altération des minéraux argileux.

A cela, il faut ajouter l'importance du rôle joué par les frustules de diatomées dans la néoformation des argiles. Les observations au M.E.T. de fractions fines, inférieures à  $2 \mu$  - extraites de plusieurs échantillons montrent, d'une part la présence quasi constante de frustules de diatomées sous mangroves comme sous les tannes, d'autre part que dans les horizons supérieurs des profils sous tannes (CMB 112 - CMV 91) certaines de ces frustules sont en voie d'altération (planche IX). Ces altérations sont comparables à celles signalées par BADAUT (1981) dans

Diagrammes de stabilité de  
diverses smectites à 25°C et 1 atm.

d'après DREVER, 1971 - VANBREEMEN, 1972

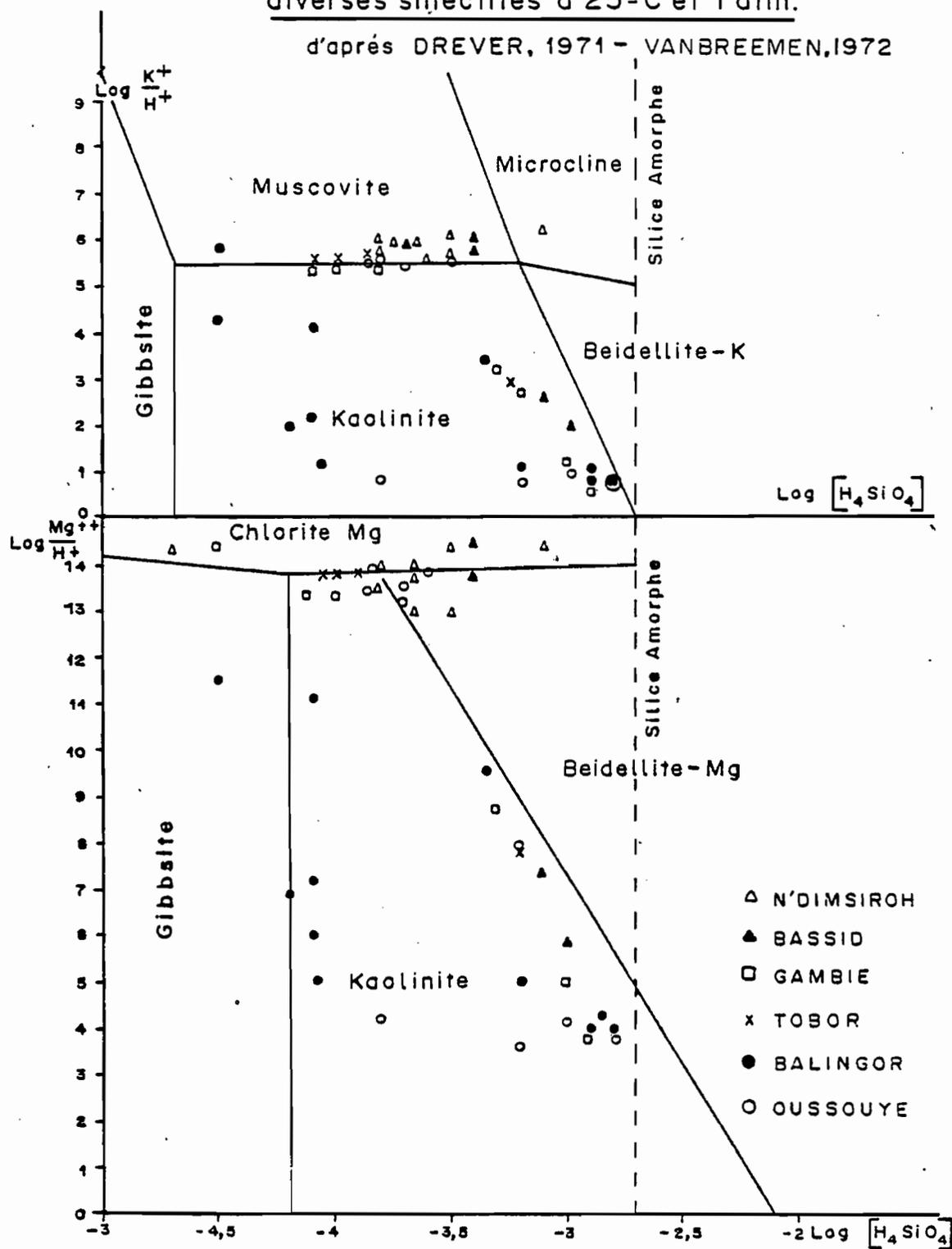


Fig. 58 et 59 - Diagrammes de stabilité de diverses smectites  
à 25° C et 1 atm  
(d'après DREVER, 1971 - VAN BREEMEN, 1972)

l'étude de la néoformation des smectites, à partir de frustules de diatomées dans les lacs salés de l'Altiplano bolivien. Elle a montré en effet que les frustules de diatomées étaient le support d'une néoformation d'argile et que la silice biogénique participait au nourrissage de cette formation. L'argile qui se forme est une smectite magnésienne. Le contexte géochimique est ici celui d'un milieu confiné où la concentration des eaux en silice dissoute est importante et le pH élevé. De même HOFFERT (1980) observe dans les sédiments superficiels du bassin de Panama, la croissance de smectite ferrifères sur des diatomées en voie de dissolution. Il s'agit ici d'un milieu franchement marin.

Dans la mangrove, on a pu constater que la marée apporte de manière permanente et régulière des diatomées dont la vase superficielle comme les sols en sont largement pourvus.

La dissolution de ces organismes en leur sein libère de la silice qui peut, au moins en partie, contribuer à la néoformation des smectites.

### 3. CONCLUSIONS

Tous les sols de mangroves et tannes du Sénégal sont caractérisés :

- par la présence de halite, jarosite, pyrite et gypse, minéraux liés à l'abondance du soufre et des sels marins ;
- par l'abondance des diatomées, tant dans la vase superficielle qu'au sein des profils et cette colonisation des mangroves par les diatomées est comparable à celle des vasières tempérées, ce qui les protège en partie de l'érosion ;
- par une fraction argileuse composée essentiellement de kaolinite du type fire clay et de smectite du type beidellite ferrifère avec une dominance de la smectite dans la mangrove du Saloum et de la kaolinite dans celle de la Casamance ; cette différence étant liée à l'influence plus importante des apports marins dans le Saloum qu'en Casamance ;
- par des transformations des minéraux argileux dans le tanne où l'hyperacidité du milieu conduit semble-t-il, à la fois à une altération des smectites en kaolinites et à une néoformation de ces mêmes smectites par dissolution des diatomées.



## Chapitre X

## LA GEOCHIMIE DES SOLS DE MANGROVES

## 1. LES METHODES

L'analyse chimique totale a été effectuée de deux façons :

- Par l'attaque triacide sur la plupart des échantillons des 6 séquences, méthode qui permet de séparer la silice des silicates (argiles) du quartz (résidu insoluble).
- Par spectrométrie d'arc à lecture directe et par spectrométrie de flamme, 18 éléments - en plus de la perte au feu - ont été dosés, à Strasbourg par les méthodes décrites par Y. BESNUS et al. (1978). Il s'agit de 9 éléments majeurs : Si, Al, Mg, Ca, Fe, Mn, Ti, Na et K et de 9 éléments traces : Sr, Ba, V, Ni, Cr, Zn Cu, Y et Zr.

Les résultats sont exprimés en pourcentage pondéral d'oxyde pour les éléments majeurs et en p.p.m. pour les éléments traces.

## 2. REPARTITION DES ELEMENTS MAJEURS

La répartition des éléments chimiques majeurs dosés par attaque triacide est portée sur la figure 60. Pour chacune des séquences, nous avons choisi 4 profils: sous Rhizophora - sous Avicennia - sous tanne inondé - sous tanne vif. On remarque l'abondance du résidu insoluble dans les séquences sableuses, en particulier dans les horizons de surface (Bassid, Oussouye, N'Dimsiroh), alors que dans les séquences argileuses, une fraction importante de la silice est liée aux silicates.

A Bassid, on observe dans le tanne inondé et surtout dans le tanne vif une accumulation d'argile entre 20 et 50 cm, liée plus à une hétérogénéité du sédiment qu'à une néoformation de minéraux argileux. L'analyse détaillée des résultats des éléments majeurs et traces des 36 échantillons montre que : (tabl. LIII ).

a) *La perte au feu* est, pour la grande majorité des échantillons, comprise entre 10 et 25 %. Seuls quelques échantillons sableux d'Oussouye et - plus rarement de Bassid - ont une perte au feu inférieure à 10 %, tandis que les valeurs les plus élevées (40-50%) correspondent aux niveaux tourbeux des échantillons sous Rh. racemosa à Balingore et à Oussouye. La perte au feu est, en grande partie, liée à la teneur en matière organique, comme le montre la figure 61. Pour les 36 échantillons, la corrélation est excellente ( $r = 0,9$ ) entre la perte au feu et le carbone et la relation s'écrit :

$$P.F. \% = 2,25 C \% + 7,3$$

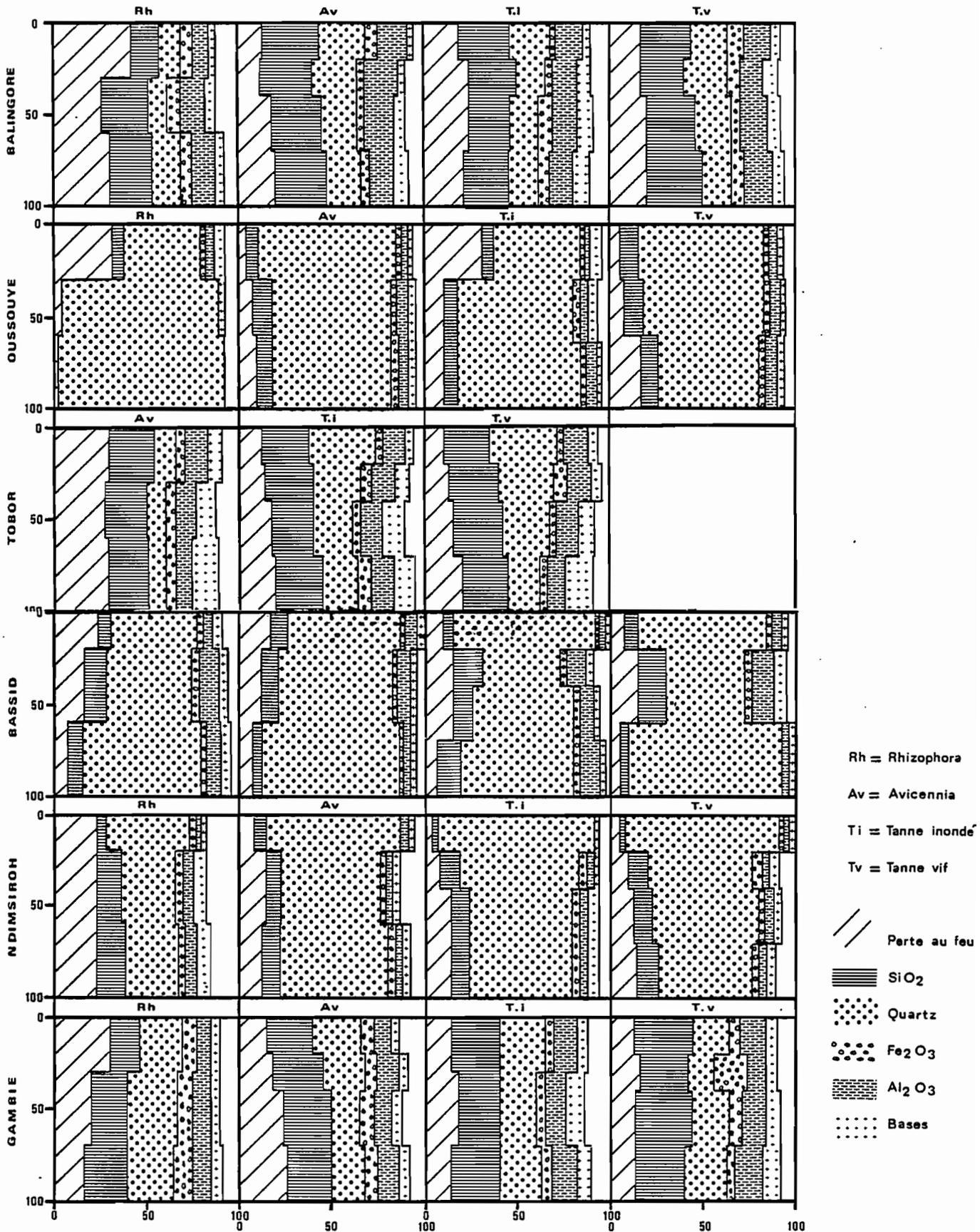


Fig. 60 - Répartition des éléments chimiques majeurs dosés par attaque triacide

Tableau LIII

Composition chimique de quelques échantillons de séquences  
(les teneurs en oxydes et la perte à 1000° C sont mesurées  
sur l'échantillon séché ; elles sont exprimées  
en g/100 g de l'échantillon sec)

Numéro Echantillon	Perte à 110	Somme	Perte à 1000	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
CMB 11	6.02	87.25	20.01	65.1	4.3	.78	.5	2.3	.010H	.47	3.32	.44
CMB 12	6.45	95.81	14.24	66.1	7.8	.72	.2H	3.5	.015	.51	2.19	.57
CMB 21	2.32	95.98	9.47	73.7	5.2	.70	.4	2.6	.010	.51	2.92	.45
CMB 41	6.29	98.05	15.04	73.9	4.3	.53	.2H	1.3	.010H	.47	2.00	.44
CMB 42	.88	94.88	2.61	69.5	12.0	1.01	.3	4.4	.021	.77	3.42	.78
CMB 112	2.89	99.26	5.24	85.7	1.8	.36	.2H	1.3	.010H	.38	1.19	.30
CMB 113	4.40	97.02	12.16	70.0	6.3	.68	.2H	3.0	.010H	.59	3.00	.76
CMB 132	4.40	98.66	12.16	66.6	6.7	.99	.2H	4.9	.010H	.58	5.58	1.12
CMB 133	7.68	97.00	17.49	56.2	10.2	1.16	.2H	4.0	.015	.68	6.39	.87
CMB 184	3.00	100.38	5.89	81.7	7.5	.40	.2H	2.4	.010H	.67	1.20	.52
CMO 21	10.46	96.50	48.86	25.7	6.4	1.69	.7	3.1	.011	.48	6.92	.55
CMO 22	7.21	96.60	26.25	53.6	7.2	.93	.3	3.3	.013	.54	3.97	.44
CMO 51	1.13	98.09	3.70	83.9	5.9	.29	.2H	2.2	.010H	.92	.76	.36
CMO 52	2.47	100.17	7.55	78.3	9.0	.43	.2H	2.2	.011	.97	1.25	.42
CMO 71	2.18	101.19	6.38	81.3	7.6	.47	.2H	2.5	.010H	.94	1.51	.58
CMO 72	2.18	93.39	7.08	74.0	6.1	.41	.2H	2.7	.010H	.76	1.73	.62
CMT 11	9.27	97.34	34.16	36.5	13.8	1.43	.6	4.2	.017	.85	5.09	.68
CMT 12	10.82	98.49	28.68	34.7	16.2	1.80	.5	6.1	.043	.81	8.47	.88
CMT 13	10.69	99.41	24.88	38.9	16.5	1.82	.5	6.6	.063	.89	7.87	.88
CMN 12	7.65	97.66	21.77	48.6	13.9	1.48	.3	5.5	.030	.83	4.19	1.02
CMN 22	7.93	93.15	24.26	43.3	13.6	1.53	2.1	6.6	.041	.77	5.02	.96
CMN 102	3.07	99.35	10.05	69.8	7.3	.66	.2H	6.0	.016	.70	3.54	1.17
CMG 21	6.02	98.98	14.86	53.3	16.1	1.15	1.1	8.7	.042	1.13	1.33	1.30
CMG 22	6.07	97.88	17.15	51.2	18.0	1.29	.5	5.4	.044	1.20	1.64	1.43
CMG 71	6.99	99.40	12.20	52.5	21.3	1.26	.2H	6.7	.030	1.13	2.58	1.57
CMG 72	6.97	99.74	14.53	42.6	16.2	1.09	.2H	0.1	.057	.92	2.05	2.08
CMG 11	8.82	99.34	28.50	44.6	12.2	1.09	.4	9.0	.057	.84	1.64	.99
CMG 12	6.97	99.11	19.25	51.6	13.8	1.08	.3	9.6	.062	.95	1.28	1.11
CMG 13	6.35	98.89	15.20	53.9	15.7	1.29	.2	9.2	.081	1.02	1.13	1.17
CMV 11	10.14	99.86	43.38	31.7	13.8	1.06	.5	6.4	.033	.73	1.74	.52
CMV 13	10.60	98.11	22.62	42.9	19.2	1.26	.2H	7.1	.102	1.04	2.89	.84
CMV 71	5.35	99.37	12.66	55.9	20.8	.65	.2H	6.2	.024	1.27	.92	.84
CMV 72	5.72	99.24	11.38	57.4	23.1	.78	.2H	3.0	.019	1.38	1.24	.76
CMV 91	7.18	98.80	15.41	49.8	19.9	.93	.2H	7.8	.020	1.20	2.18	1.57
CMV 92	7.33	99.31	15.83	50.3	18.8	1.17	.2H	6.7	.023	1.23	3.71	1.36
CMV 93	9.18	98.51	18.57	47.5	19.6	1.35	.2H	4.7	.037	1.15	4.82	.64

H : valeur inférieure à la limite inférieure de détection.

### b) Aluminium

D'une manière générale, on observe que tous les éléments majeurs et traces sont plus ou moins corrélés à l'argile, c'est-à-dire à Al et de ce fait, on distingue 2 groupes d'échantillons qui correspondent aux séquences sableuses, d'une part (Bassid et Oussouye) et aux séquences argileuses, d'autre part (Tobor, Gambie, Balingore).

Les teneurs en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont inférieures à 10 % dans les séquences sableuses et comprises entre 12 et 25 % dans les séquences argileuses, la séquence de Balingore étant la plus riche en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

### c) Fer

Les teneurs en fer sont dans l'ensemble faibles - inférieures à 5 % dans les séquences sableuses et comprises entre 5 et 10 % dans les séquences argileuses - à l'exception de l'horizon à jarosite en Gambie où Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 20 %. La figure 62 montre que la corrélation entre Fe et Al est assez bonne

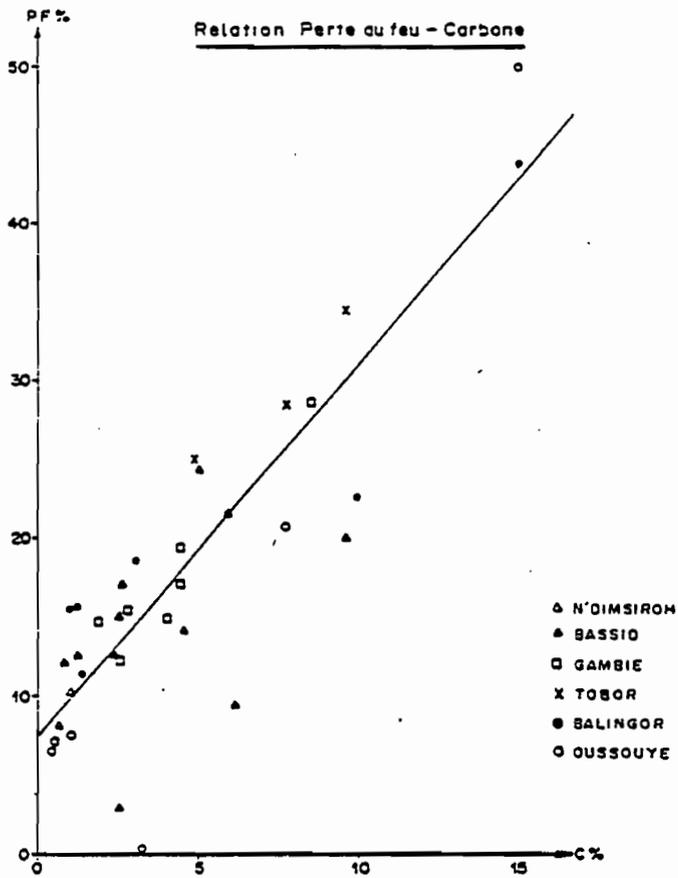


Fig. 61 - Relation Perte au feu - Carbone

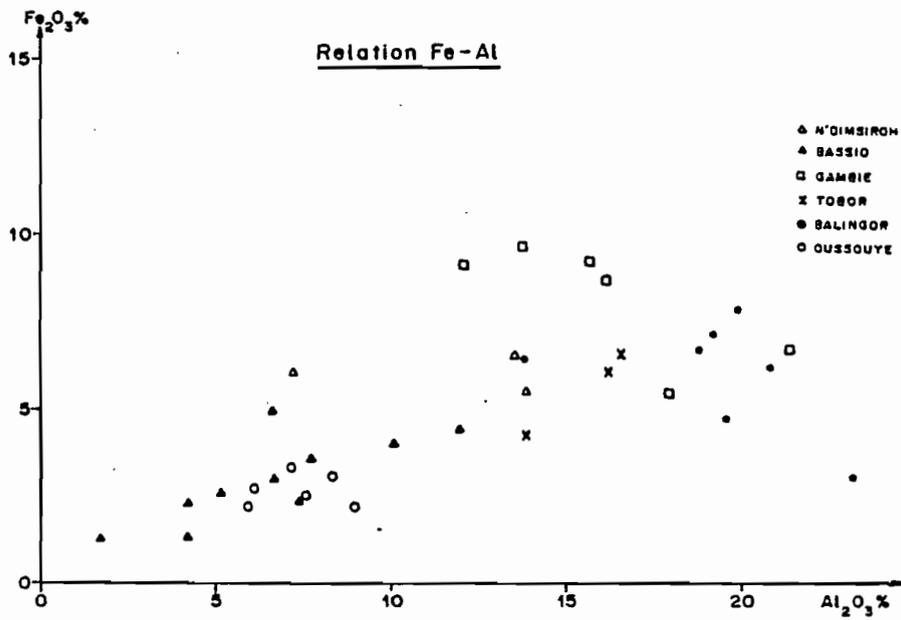


Fig. 62 - Relation Fer - Aluminium

( $r = 0,64$ ) sauf pour certains échantillons de Gambie et de Balingore. Dans les séquences, on remarque une nette accumulation du fer dans les horizons à jarosite (CMB 132 - CMG 72 - CMV 91) et un lessivage marqué de cet élément dans les horizons subsuperficiels sous Avicennia (CMO 52, CMG 22 - CMV 72).

Si l'on excepte les horizons superficiels des tannes vifs où la plus grande partie du fer est sous forme d'oxyde ferrique ou lié à la jarosite, partout ailleurs et notamment dans tous les horizons profonds, le fer est sous forme de fer ferreux dissous. Dans les diagrammes de R.X. et, malgré le séchage des échantillons, les oxydes ferriques et notamment la goethite sont mal représentés.

Dans les sols sulfaté-acides, les oxydes ferriques se forment soit par oxydation directe du fer ferreux dissous (sols sulfaté acides jeunes) soit par hydrolyse de la jarosite (sols sulfaté-acides évolués). Dans le premier cas, les taches d'oxyde ferrique formées sont généralement brunes ou brun-rouges. C'est ce que l'on observe fréquemment au Sénégal dans l'horizon situé entre le substratum réduit et l'horizon oxydé à jarosite - notamment à Balingore - alors que dans le cas des oxydes ferriques résultant de l'hydrolyse de la jarosite, les taches sont plus rouges et généralement situées dans l'horizon de surface (sols de la Plaine de Bangkok, de la vallée de Baïla, du Delta du Sénégal).

Nous avons vu, à propos de la salinité, que les extraits aqueux au  $1/10$  - en particulier ceux des échantillons à pH inférieur à 3,5 - contiennent des quantités appréciables de fer (fig. 53). De même, le fer libre - extrait par la méthode ENDREY - qui représente environ 20 à 30 % du fer total dans les profils sous mangroves, s'abaisse à moins de 10 % dans les horizons superficiels sous Avicennia, pour s'élever à plus de 50 % du fer total dans les horizons à jarosite du tanne vif (fig. 63). Il y a là une certaine redistribution du fer liée à sa mobilité en milieu organique et acide. En fait, dans ces sols jeunes, relativement peu évolués et à nappe phréatique proche de la surface pendant la plus grande partie de l'année, il semble que la migration du fer dans les profils soit peu influencée par les réactions d'échange solide - solution.

Par contre, elle est sans doute plus liée, d'une part à la présence des gaines racinaires de Rhizophora puisque c'est essentiellement là qu'on observe les précipitations de jarosite et d'oxydes ferriques, d'autre part aux variations saisonnières puisque c'est en saison sèche, au moment où la nappe baisse, qu'ont lieu les phénomènes d'oxydation. D'après HARMSSEN et al. (1975) environ  $1/5$  seulement du fer ferrique formé en surface serait entraîné en profondeur par les pluies alors que la migration du fer vers le haut, en saison sèche serait beaucoup plus importante. Par ailleurs, dans ces sols inondés périodiquement, ce sont les phénomènes d'oxydation qui prédominent nettement sur les phénomènes de réduction, en particulier dans les horizons subsuperficiels, à jarosite. En effet, de nombreuses expériences menées "in situ" et au laboratoire par VAN BREEMEN, en Thaïlande et PONNAMPERUMA et al., aux Philippines (1973) ont montré que, d'une part dans les sols sulfaté-acides, les phénomènes de réduction n'affectent que la couche tout à fait superficielle, avec des quantités importantes de fer ferreux et un Eh négatif, alors que l'horizon subsuperficiel à jarosite reste oxydé avec un Eh

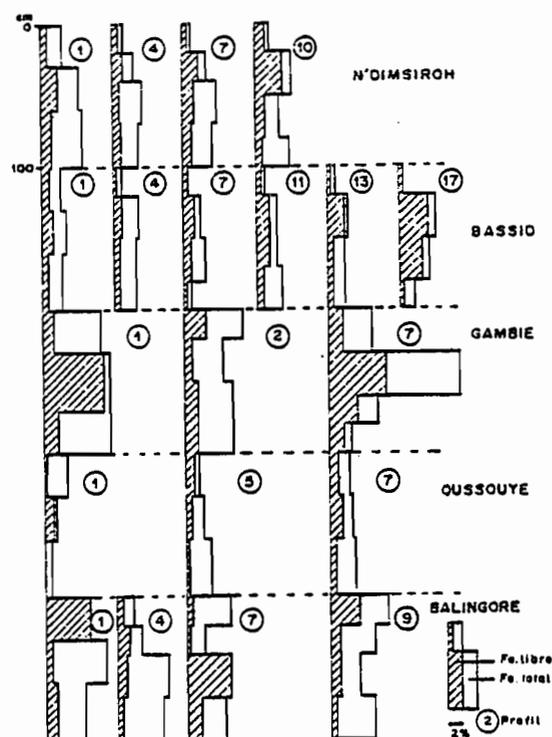


Fig. 63 - Répartition du Fer libre dans les profils

positif, d'autre part, l'intensité des phénomènes de réduction est nettement plus faible dans les sols sulfaté-acides que dans les sols "normaux", non acides. Il semble que dans les horizons jarositiques des sols sulfaté-acides, la persistance des conditions oxydées soit due à la forte acidité du milieu qui freine l'activité microbienne et à la présence d'oxydes ferriques relativement insolubles.

Ces observations et ces résultats auront des conséquences importantes pour l'aménagement de ces sols en vue de la riziculture.

#### d) Manganèse

Alors que dans les sols sulfaté-acides très évolués du Delta du Sénégal, on observe souvent des taches noires d'oxydes de manganèse, celles-ci font totalement défaut dans les sols de mangroves du Saloum, de Gambie et de Casamance.

Les teneurs en Mn exprimées en % de  $Mn_3O_4$  sont très faibles - inférieures à 0,01 % dans les séquences sableuses de Bassid et d'Oussouye et comprises entre 0,02 et 0,08 % dans les séquences argileuses, des valeurs les plus élevées correspondant aux horizons profonds des profils sous *Rhizophora* (CMV 13 - CMG 13 - CMT 13). Il semble qu'une grande partie du Mn soit mobilisée en milieu acide et évacuée par les nappes.

#### e) Titane

La teneur moyenne de la croûte terrestre en  $TiO_2$  est de 0,65 %. Or, que ce soit dans les forages profonds ou dans les sols des séquences, les teneurs en  $TiO_2$  sont, dans l'ensemble, supérieures à cette valeur, en

particulier dans les séquences argileuses où la teneur en  $TiO_2$  dépasse 1 %. Le titane serait en grande partie détritique et liée en partie à l'argile et en partie aux minéraux lourds de la fraction sableuse: rutile, anatase, ilménite, généralement issus de l'altération des basaltes de la Presqu'île du Cap Vert. Ces minéraux sont transportés par les courants N-S et déposés sur les cordons littoraux. L'importance des quantités d'ilménite dans les sables des cordons littoraux a justifié l'élaboration d'un projet d'extraction du titane, à partir de ces sables.

#### f) *Les alcalino terreux*

L'une des caractéristiques principales des sols de mangroves est leur teneur très faible en calcium et dans l'ensemble inférieure à la limite de détection (0,2 % de CaO). Cette caractéristique est évidemment à relier à l'acidité de ces sols et seuls, quelques très rares échantillons de sols contenant des débris de coquilles possèdent une certaine quantité de calcium (CMN 22 - CMG 21).

Le magnésium est nettement mieux représenté avec des teneurs comprises entre 0,35 % (CMB 112) et 1,82 % (CMT 13).

Dans les profils, les teneurs les plus faibles en Mg se situent sous *Avicennia* et dans les horizons à jarosite. On remarquera cependant que les teneurs en Mg des sols de mangroves du Sénégal, sont dans l'ensemble plus faibles que celles des sols de mangroves de Thaïlande ou de l'Inde, par exemple, cette différence étant à attribuer à la nature des minéraux argileux, semble-t-il, plus kaoliniques au Sénégal et plus smectitiques en Asie (MARIUS, 1982).

#### g) *Les alcalins*

Les teneurs en Na sont variables d'une séquence à une autre et dans un même profil entre les différents horizons. Les teneurs les plus faibles sont observées en Gambie et dans les horizons superficiels des séquences de Balingore et Oussouye. Il y a une bonne relation entre les teneurs en Na et la salinité des nappes et des eaux interstitielles étudiée au chapitre 9. Na n'est pas lié à l'argile et augmente quand on passe de la mangrove au tanne.

Les teneurs en K sont, dans l'ensemble, faibles - inférieures à 1 % de  $K_2O$  - à l'exception des échantillons de Gambie où les teneurs plus élevées en K sont en liaison avec la présence d'illite et aussi de feldspaths. Dans les séquences, la caractéristique principale est l'augmentation très marquée de la teneur en K dans les horizons superficiels à jarosite des tannes vifs; généralement double de celle des horizons inférieurs à pyrite et cela, bien que tous les échantillons aient été séchés.

### 3. REPARTITION DES ELEMENTS TRACES

Sur l'ensemble des sédiments carottés, KALCK (1978) avait noté que les teneurs en éléments traces étaient généralement faibles, sauf pour le Bore. Par ailleurs, en utilisant la méthode des groupes à intercorrélations positives, il a montré qu'il y avait une "phase traces" caractérisée par l'absence d'éléments majeurs et qui pouvait être l'empreinte de l'apport animal à la mangrove. Cette phase traduirait l'ancienne présence d'organismes carbonatés (foraminifères, lamellibranches, crabes...) détruits par l'acidité du milieu.

Sur les 36 échantillons des séquences les éléments traces suivants ont été dosés : Sr, Ba, V, Ni, Cr, Cu, Zn et Zr. Dans le tableau LIV sont consignées les valeurs moyennes des éléments traces dosés pour 4 séquences : Bassid, Gambie, Balingore et Oussouye.

Tableau LIV

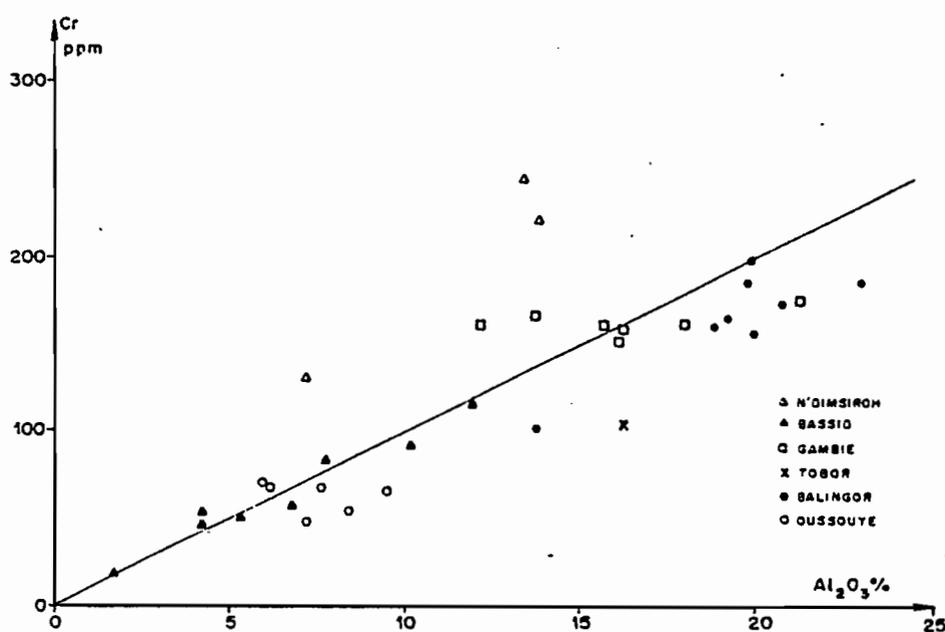
Valeurs moyennes des éléments traces  
pour 4 séquences

Séquence	Sr	Ba	V	Ni	Cr	Zn	Cu	Zr
BASSID	72.2	104.5	47.7	23.8	66		12.6	519.3
GAMBIE	103.5	287.6	115.6	37.6	139	60.4	23.7	319
BALINGORE	112.8	159.7	80.7	34.3	162.7	66.7	20.6	328.3
OUSSOUYE	58.8	54.3	39.5	17.8	62.6		14	650

Ce tableau montre que :

- la répartition des éléments traces est très variable d'une séquence à une autre ;
- Ni et Cu sont les deux éléments les plus faiblement représentés dans les 4 séquences, avec le Zn dont les teneurs sont insignifiantes dans les séquences sableuses : Oussouye et Bassid. Dans l'ensemble c'est la séquence d'Oussouye qui est la plus pauvre en éléments traces et la séquence de Gambie la plus riche, notamment en Ba et V.

La corrélation des différents éléments avec la perte au feu n'est pas significative. Il en est de même pour l'argile, avec laquelle un seul élément est bien corrélé - le Cr ( $r = 0,81$ ) (fig. 64).



- Fig. 64 - Relation Cr - Argile

Toutes les séquences sont particulièrement riches en Zirconium, élément qui est essentiellement lié à la fraction sableuse, comme le montre la bonne corrélation Zr - SiO<sub>2</sub> (r = 0,75) et qui confirme l'abondance du Zircon parmi les minéraux lourds.

Si la répartition des éléments traces est variable d'une séquence à une autre, on observe qu'à Bassid et à un degré moindre à Balingore, cette répartition peut aussi varier de manière importante d'un horizon à un autre dans le même profil (tabl. LV) . Ces variations concernent principalement 4 éléments : V, Ni, Cr et Zn, alors que le Cu varie peu ou pas et que celles du Sr et Ba existent mais sont de moindre importance que celles des 4 éléments cités précédemment.

Tableau LV

Répartition des éléments traces dans les profils

Echantillon	Sr	Ba	V	Ni	Cr	Zn	Cu	Zr
CMB 41 (0-20)	65	104	36	19	47	<2	17	446
CMB 42 (40-60)	91	144	72	36	116	17	17	419
CMB 112 (45-65)	46	101	20	9	18	<2	3	592
CMB 112 (65-85)	90	114	47	16	57	7	5	452
CMV 11	113	89	57	31	102	45	11	212
CMV 13	96	128	80	32	165	54	12	296

L'étude géochimique montre qu'à l'exception de la silice et en partie de l'alumine, les éléments majeurs et traces sont peu abondants dans les sols des mangroves et tannes. On note en particulier un déficit très marqué de ces sols en Ca, résultant sans doute du déficit de cet élément dans le bassin versant lui-même. Déficit aussi du Mn, très soluble en milieu acide. Les autres éléments majeurs sont en partie, liés à l'argile et notamment aux smectites (Mg, K, Fe) en partie à la pyrite ou à la jarosite (Fe, K). Na est essentiellement lié à la phase liquide, ainsi qu'une certaine fraction de Mg et de K.

Ti et Zr appartiennent en grande partie à la fraction sableuse, sous forme de minéraux lourds (rutile, Zircon ...). Enfin, la plupart des autres éléments traces sont liés soit à la matière organique, soit à l'argile, soit au Fer.

Les résultats obtenus sont peu différents de ceux de KALCK pour les sédiments profonds des estuaires du Sénégal. Ce qui semble indiquer qu'il y a eu homogénéisation de la composition chimique des sédiments au moment de l'élévation du niveau de la mer à l'Holocène.

Comme le signale P. COOK (1980) pour l'Estuaire de BROADSOUND en Australie, les sédiments estuariens sont géochimiquement beaucoup plus

homogènes que les sols du Bassin versant et c'est l'environnement du dépôt sédimentaire d'une part, et les conditions post-sédimentaires, d'autre part qui exercent une plus grande influence sur la géochimie des sédiments estuariens que la géochimie du bassin versant lui même.

## - Chapitre XI

**LA SEQUENCE MANGROVE – TANNE CARACTERISTIQUE  
DE MILIEUX LITTORAUX TROPICAUX VARIES**

## 1. DEFINITION

C'est à VIEILLEFON (1966) que l'on doit l'association du tanne vif à la mangrove, grâce à la notion de "chronoséquence", et on se rappellera que MAIGNIEN (1961) qui avait cartographié les zones alluviales de la région de Sedhiou, situées un peu en amont de Ziguinchor, n'avait pas associé les sols à jarosite - acides - aux mangroves qui bordaient la Casamance.

Plus au Nord, dans le delta du Sénégal, de nombreuses cuvettes (Khant, Savoigne, N'Diael...) correspondent à d'anciennes mangroves et n'ont pu être identifiées comme telles qu'à l'occasion des travaux d'aménagements hydro-agricoles.

L'étude géochimique a montré que le domaine du tanne vif, c'est-à-dire celui qui n'est inondé qu'aux marées exceptionnelles, avait un comportement différent de celui de la mangrove, du fait des fluctuations verticales de la nappe, peu influencées par le fleuve et plus liées à l'aridité climatique. Et, de fait, on a pu observer qu'au cours de la sécheresse de ces dernières années, tous les changements se sont produits essentiellement dans le domaine de la mangrove et plus particulièrement en Casamance. Depuis 1972, les effets de la sécheresse se sont traduits dans cette région par l'extension considérable des mangroves décadentes et des tannes inondés, formations qui n'existaient pas ici avant 1972. Par ailleurs, à la suite d'une année pluvieuse normale (1978) on a observé la reprise d'*Avicennia* de manière monospécifique. Or il est bien connu qu'*Avicennia* est l'espèce la plus ubiquiste et la mieux adaptée aux variations de salinité grâce à sa faculté de pomper le sel et de l'excréter par les feuilles, mais la sursalure excessive la fera quand même disparaître ici, comme la dessalure totale la fera également disparaître dans les mangroves de Guyane. De plus la reprise d'*Avicennia* a été favorisée par la facilité de dispersion de sa graine par flottaison et sa rapidité de croissance et elle n'a pu reprendre que là jusqu'où la marée a pu la transporter, c'est-à-dire dans le domaine de la mangrove.

On peut ainsi définir le domaine de la mangrove comprenant, les formations à palétuviers, les mangroves décadentes et les tannes inondés, comme étant un domaine d'inondation quasi permanente, d'humidité élevée, d'évaporation faible, à variations saisonnières élevées de la salinité des nappes liées à la salinité des eaux du fleuve, à kaolinite prédominante dans les argiles. Dans ce domaine en voie d'évolution plus ou moins rapide, tout est possible et notamment une reprise de la végétation, comme sa disparition, celle-ci étant sélective en fonction de la salinité.

Par contre, le tanne vif, de par sa position topographique légèrement surélevée n'est atteint que par les marées exceptionnelles. Par la suite,

la nappe salée, généralement proche de la surface, se concentre sur place par évaporation et le dessèchement prolongé de l'horizon superficiel conduit à la formation d'une croûte ou d'une moquette qui interdit toute végétation, bien que le plus souvent, l'horizon situé immédiatement en-dessous de la croûte ou de la moquette soit dessalé. Le domaine du tanne vif se caractérise donc par son inondation rare ou exceptionnelle, par une *évaporation intense*, un assèchement prolongé de l'horizon superficiel favorisant la concentration des sels remontés par capillarité et par une argile à dominance de smectite, donc plus imperméable et, semble-t-il, favorable même au développement de certains caractères de type vertique. C'est un domaine figé que seule une action humaine peut transformer.

## 2. LA SEQUENCE MANGROVE-TANNE CARACTERISTIQUE DE MILIEUX LITTORAUX TROPICAUX VARIÉS

Le tanne est le mot vernaculaire au Sénégal pour désigner une "zone nue" sursalée, associée ici à la mangrove, parce que généralement on y a retrouvé en profondeur des racines de palétuviers et notamment de Rhizophora.

Dans l'étude des milieux littoraux tropicaux, les zones nues-sursalées ont souvent été signalées, mais rarement associées à la mangrove, sinon ces dernières années à la suite notamment des études effectuées au Sénégal. Et l'on constate que ces zones nues existent dans des milieux climatiques variés et que donc, leur formation est liée à d'autres facteurs que la sécheresse climatique, mais on peut déjà faire remarquer que ces "zones nues" (que nous désignerons tannes) sont toujours associées à des mangroves d'estuaires ou de fonds de baies et jamais à des mangroves littorales (de front de mer).

### A. MADAGASCAR

Les mangroves sont essentiellement localisées sur la côte Ouest, au débouché de la plupart des grands fleuves, dans de grandes zones deltaïques. La pluviométrie, sur cette côte, varie de 300 mm dans le Sud (Tuléar) à 2000 mm, dans le Nord (Ambanja). HERVIEU (1965) qui a étudié l'alluvionnement sur toute cette côte occidentale définit le milieu fluvio marin comme un domaine sédimentologique et biogéographique comprenant un secteur semi-terrestre correspondant à la zone des mangroves et des plages et un secteur terrestre correspondant aux zones intermédiaires à sol nu ou végétation halophile. Ce second secteur est caractérisé par la présence d'une nappe salée permanente à faible profondeur et on y observe localement des cuvettes à sel. D'après HERVIEU, le développement de ces zones intermédiaires n'est pas obligatoirement lié à celui des mangroves et dépend essentiellement du remblaiement de l'alluvionnement fluvial qui provoque l'émersion de plus en plus prolongée de ces zones. Il ajoute cependant que "la mangrove se dégrade par assèchement prolongé et sursalure des horizons de surface. C'est l'*Avicennia* qui résiste le plus longtemps, mais peu à peu cette espèce elle-même dépérit et il est fréquent d'observer sur la frange interne de nombreuses plaines deltaïques des troncs de palétuviers morts. Lorsqu'on fait des sondages dans les zones nues et les cuvettes salines, il n'est pas rare de trouver des troncs ou racines de palétuviers à faible profondeur".

L'examen des profils décrits par HERVIEU et des résultats analytiques montre que les sols sont hydromorphes et salés et que le minéral argileux

dominant est la montmorillonite. Il n'y a pas de sols sulfaté-acides et ceci est à relier au fait que la mangrove est à dominance d'*Avicennia*.

WEISS (1967, 1973) qui a étudié les mangroves de la région de Tuléar, signale dans sa carte phytosociologique des zones à "évaporites" entre les mangroves à palétuviers et les formations terrestres, ces zones caractérisent essentiellement les mangroves de "fond de baie" ou estuariennes de cette région, alors qu'elles sont absentes dans les mangroves "littorales" ou dans les mangroves "intermédiaires" en cours d'évolution.

Dans tous les cas, HERVIEU et WEISS signalent - comme au Sénégal - la présence d'une ceinture d'*Avicennia* rabougris ou nains entre la mangrove à palétuviers et les tannes. En résumé, on peut dire qu'il y a, sur la Côte Occidentale de Madagascar, une séquence mangrove-tanne qui caractérise les zones estuariennes et qui est liée à la progression du remblaiement et de la mangrove vers l'aval, d'où il en résulte une émergence de plus en plus prolongée des zones internes qui se transforment en tannes par dessèchement des horizons de surface et leur sursalure par évaporation et remontée d'une nappe salée permanente. On remarquera cependant qu'à la différence des sols de mangroves et tannes du Sénégal, ceux de Madagascar ne possèdent pas de caractères liés à la présence de soufre et que donc l'acidification des horizons superficiels n'intervient pas ici dans la formation des tannes. Les sols de mangroves et tannes de la Côte Ouest de Madagascar ne sont donc pas des sols sulfaté-acides.

#### B. NOUVELLE CALEDONIE :

Dans le delta de la Dumbea, étudié par BALTZER (1969, 1983) la pluviométrie moyenne annuelle est d'environ 1000 mm répartie en 2 saisons des pluies et 2 saisons relativement sèches mais en fait, aucun mois n'est tout à fait sec. Là aussi, comme à Madagascar, BALTZER distingue les mangroves littorales des mangroves fluviomarines ou d'estuaires et parmi ces dernières les unes sont associées aux bancs et levées sédimentaires tandis que les autres, plus étendues couvrent les dépressions marginales du delta. C'est au sein de ces dépressions qu'on observe généralement des zones nues ou recouvertes d'un voile algair, situées dans les zones internes et faisant suite à trois formations à palétuviers : la mangrove externe à *Rhizophora*, la mangrove moyenne à *Rhizophora* + *Bruguiera*, la mangrove interne à dominance d'*Avicennia officinalis*. (fig. 65)

A cette zone nue est associée une plante très halophile : *Salicornia*. Son extension est cependant très réduite et liée à la sursalinité et à la sécheresse des horizons de surface. Cette zone nue est située à plus d'1 m 70 au dessus du niveau des plus basses mers et n'est inondée qu'aux marées exceptionnelles.

#### C. AUSTRALIE

Dans une importante étude consacrée aux mangroves des côtes orientale et méridionale de l'Australie MAC NAE (1966) montre que l'extension des zones nues (bare areas) associées aux mangroves est assez considérable et presque générale sur les côtes australiennes. En effet, sur ces côtes, on note qu'à l'exception de quelques zones très limitées, le climat est caractérisé par 2 saisons contrastées. Dans les zones à pluviométries élevées - supérieure à 2000 mm - la séquence végétale complète serait de type :

- Forêt à *Avicennia* et *Sonneratia*
- Forêt de *Rhizophora*
- Forêt de *Bruguiera*
- Fourrés de *Cerriops*
- Zone Interne à *Avicennia Marina*
- Forêt d'*Eucalyptus*.

Cette séquence est modifiée par le développement de zones nues, généralement dès que la pluviométrie est inférieure à 2000 mm et par l'interaction d'autres facteurs, tels que la fréquence et la durée d'inondation par les marées, l'évaporation et les apports d'eaux douces par les fleuves. D'après MAC NAE, le débit des rivières est très variable et influe peu sinon pas du tout sur l'évolution des mangroves. Par contre, il montre le rôle important joué par la fréquence et la durée de la submersion par les marées et comme au Sénégal, les zones nues sont plus ou moins régulièrement inondées par les marées (tannes inondés). *Avicennia marina* serait l'espèce la plus résistante aux fortes salinités.

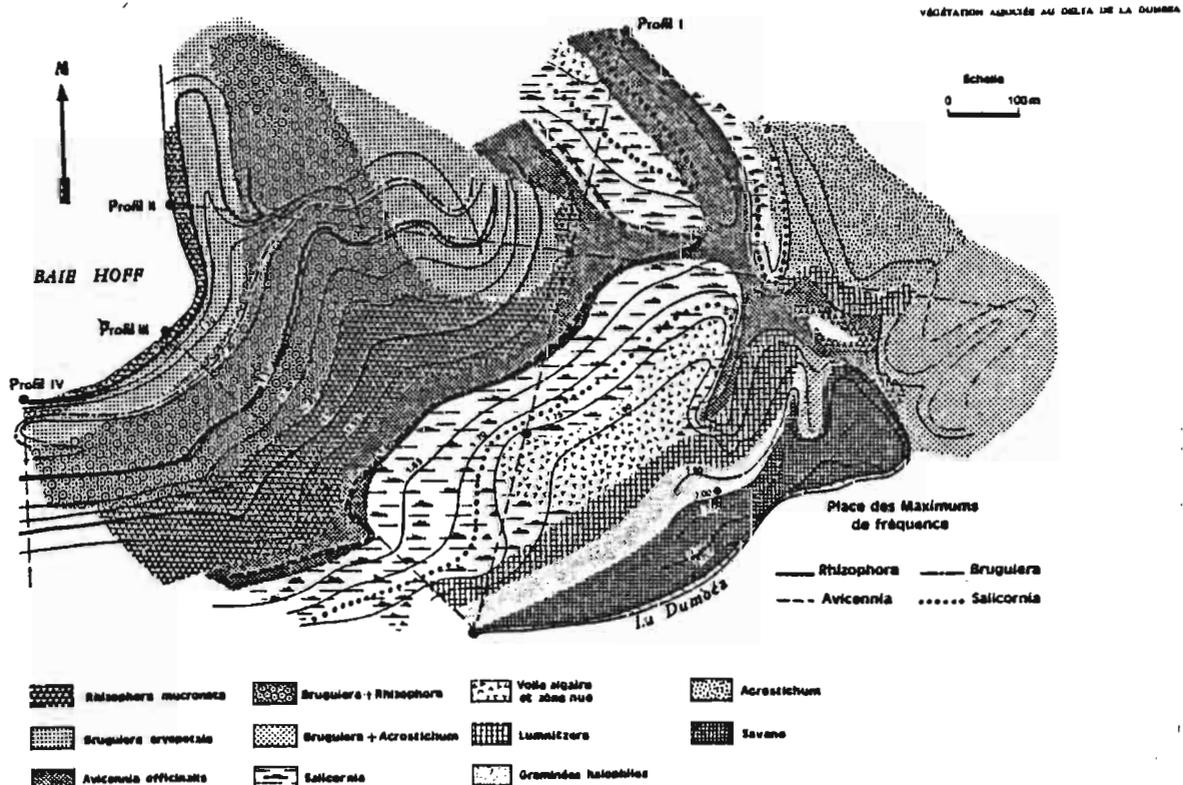


Fig. 65 - Séquence végétale de la baie de la Dumbea (BALTZER, 1969)

Le développement des tannes vifs est considérable et caractéristique des zones à mangroves situées sous des pluviométries comprises entre 750 et 1000 mm (fig. 66), mais même sous une pluviométrie de 2000 mm - concentrée en quelques mois - comme à Darwin, il y a un développement des tannes vifs. P. COOK (op. cit.), signale qu'à Broad Sound, située sur la côte Est (Queensland) les tannes vifs caractérisent toute la zone "supratidale" dont l'extension est relativement importante. Les données analytiques concernant les tannes de ces régions sont rares. D'après P. COOK, les sédiments de la zone supratidale ont un pH neutre ou légèrement acide et reposent sur un sédiment réduit et très acide. La salinité des sédiments et des eaux de cette zone supratidale serait de 3 fois supérieure à celle de l'eau de mer et la croûte superficielle généralement algale et desséchée, contient du gypse, en abondance, de la halite et de petites quantités de bischofite ( $MgCl_2, 6H_2O$ ) et de bassanite ( $CaSO_4, \frac{1}{2}H_2O$ ). La calcite et l'aragonite sont aussi présentes, de même que la dolomite, ce qui indique que le milieu est très différent de celui des tannes du Sénégal.

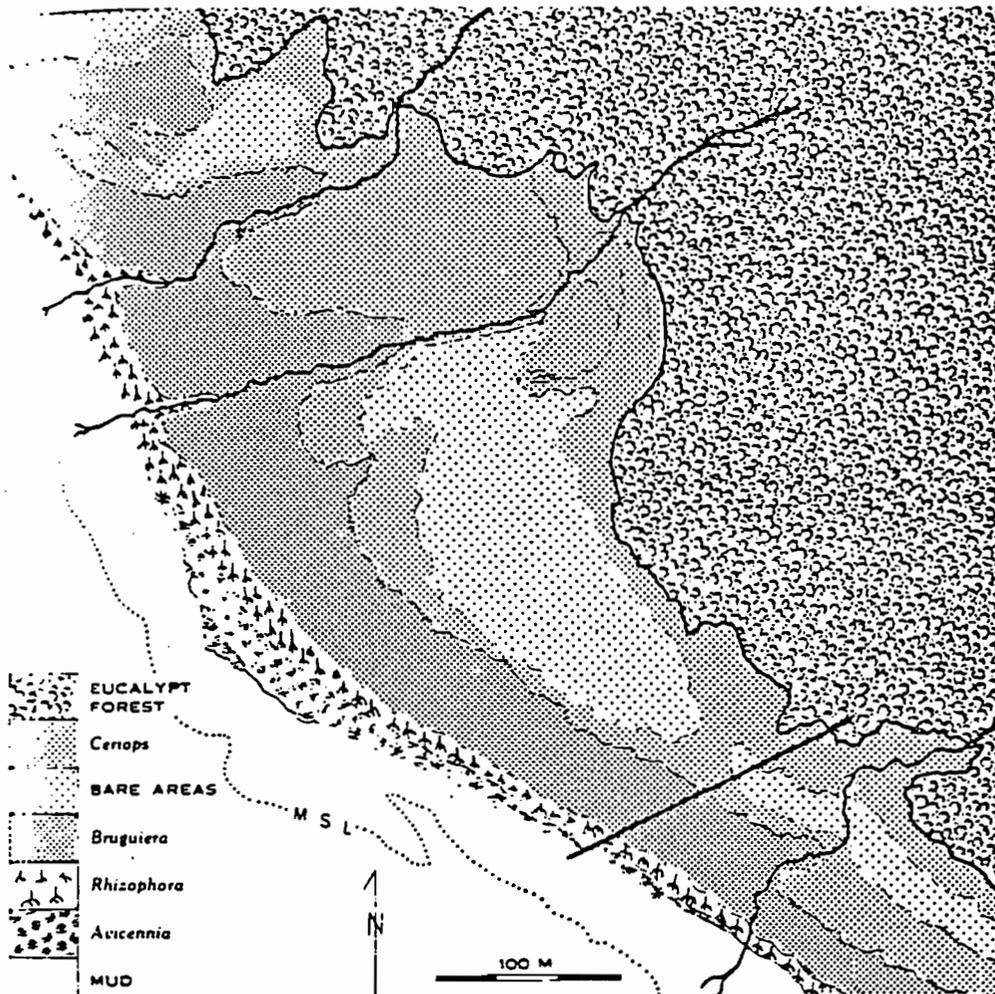


Fig. 66 - Séquence Mangrove - Tanne du littoral australien (MACNAE, 1966)

## D. INDE

Les zones nues sursalées, associées aux mangroves ont été décrites par RAO (1967) dans le Saurashtra et étudiées de manière détaillée par R. KERREST (1980) sur une séquence de la côte Sud Est que nous avons observé nous mêmes en 1977 avec KERREST et en 1982. Il s'agit de la séquence de Pichavaram, qui, d'après nos observations, présente de nombreuses analogies avec les séquences mangroves-tannes, du moins en ce qui concerne l'évolution phytosociologique. La mangrove de Pichavaram est située sur la côte de Coromandel dans le delta de la Cauvery qui est le plus grand fleuve du Sud de l'Inde. Le climat est de type tropical humide, à 2 saisons - une saison sèche (Janvier-Juin) et une saison humide (Juillet-Décembre). La pluviométrie annuelle moyenne est de 1374 mm sur 20 ans. En fait, aucun mois n'est tout à fait sec et les variations d'une année à l'autre peuvent être importantes. Du point de vue géomorphologique, il s'agit d'une mangrove de type lagunaire, séparée de la mer par un cordon sableux. Les chenaux sont peu profonds et leur largeur varie de 5 à 200 m. KERREST a étudié les divers groupements floristiques, leur répartition en fonction de la durée d'inondation par la marée et de la salinité des sols et des nappes. La séquence étudiée comporte plusieurs zones nues (fig. 67) situées dans les zones intérieures. La végétation est à dominance d'*Avicennia marina* qui, comme partout ailleurs, supporte les plus fortes salinités.

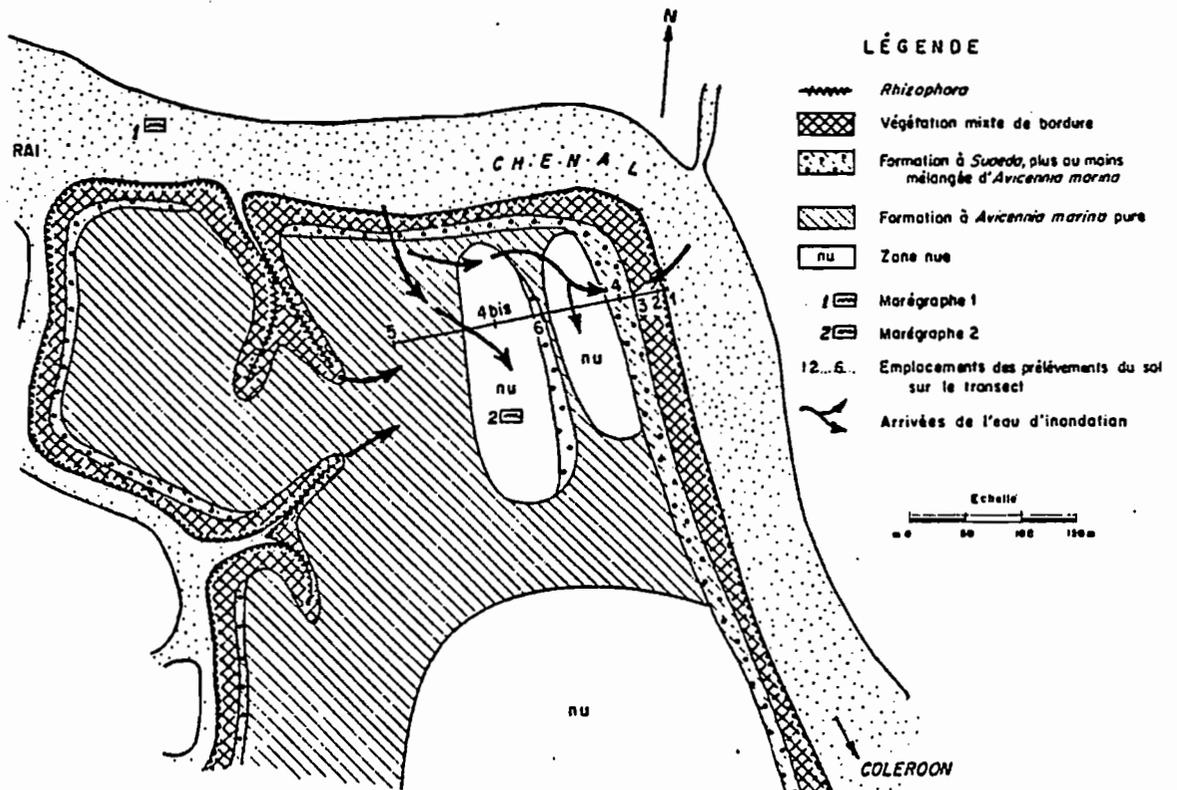


Fig. 67 - Séquence Mangrove - Tanne de Pichavaram (Inde du Sud, KERREST, 1980)

L'étude des conditions édaphiques de ces zones basée notamment sur l'étude des variations saisonnières de l'eau et des sels dans le sol, montre notamment que :

- du point de vue de l'humidité

- . la zone 5 très humide cumule une faible évaporation et une longue stagnation de l'eau
- . la zone 4 la plus sèche, associe une forte évaporation à une inondation rare
- . la zone 4 bis est plus sèche et plus sensible aux saisons que la zone 5 à cause de l'absence de végétation
- . la zone 6 est la plus humide.

- du point de vue de la salinité

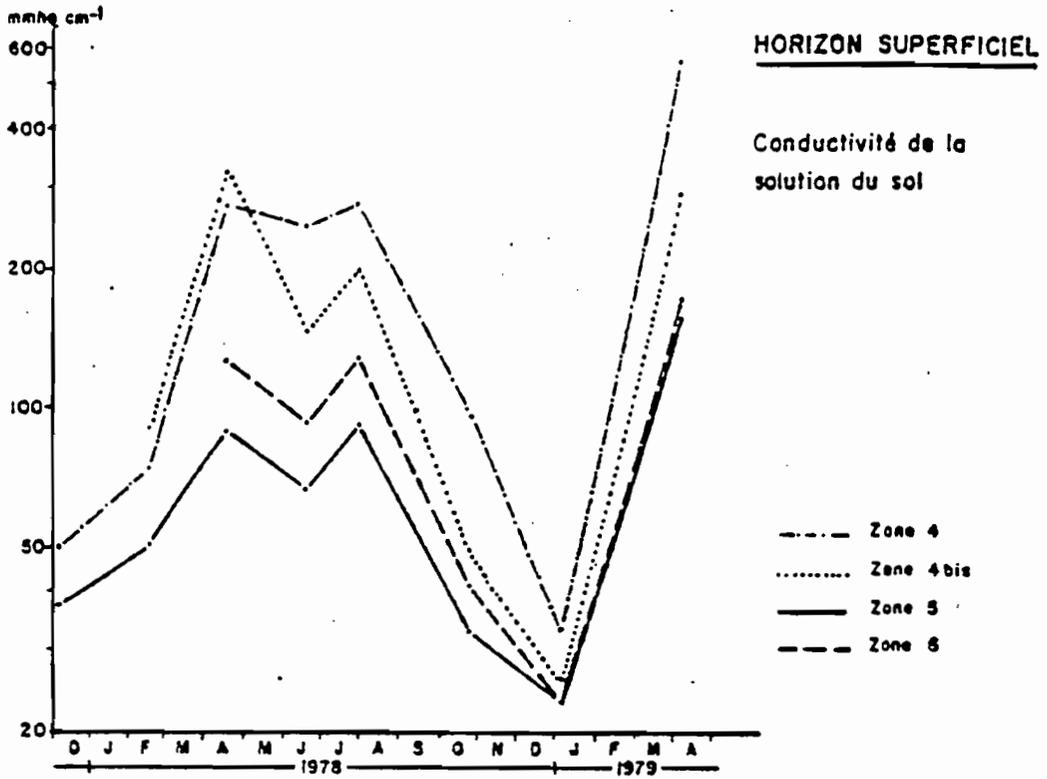
La salinité des sols subit de fortes variations saisonnières dans toutes les zones et les horizons profonds sont le siège d'accumulations de sels.

En surface, la salinité des sols varie en fonction inverse de l'humidité, la zone la plus riche (4) est la plus salée puis les zones 4 bis, 6 et 5 (fig. 68a).

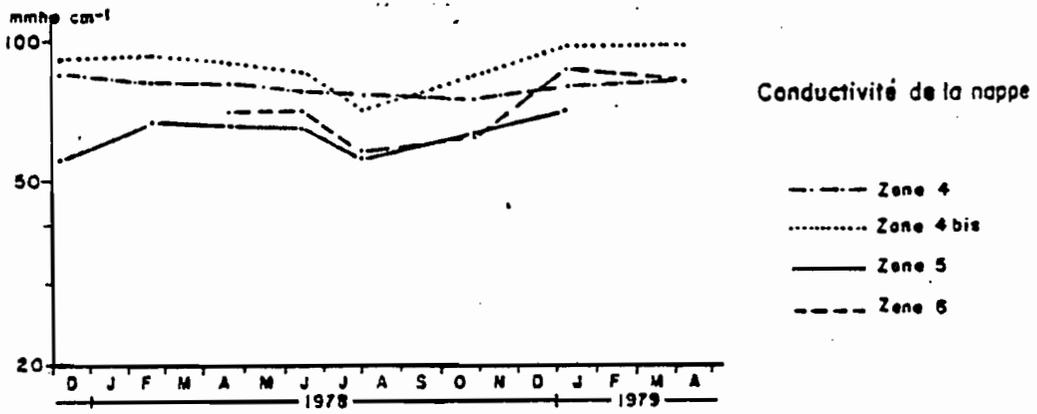
En revanche, et ce qui est frappant, *la salinité de la nappe dans les 4 zones varie très peu en cours d'année*, ce qui semble indiquer qu'il n'y a pratiquement pas de transit latéral à partir de la rivière (fig. 68b).

Toutes ces zones sont moins inondées par la marée que les mangroves du Sénégal, comme l'indique la profondeur de la nappe (fig. 68c) et les horizons superficiels semblent être desséchés pendant une assez longue période de l'année. En Août 1982, nous avons pu constater qu'en surface, cette séquence présentait de nombreuses analogies avec celles du Sénégal, notamment de grandes surfaces de mangroves décadentes et des tannes vifs recouverts d'une moquette épaisse au-dessus d'un lit de cristaux de gypse (pl. VI). Par contre tous les profils observés étaient caractérisés par une grande sécheresse -sur presque 1 m- et leur forte consistance. La nappe était à plus de 50 cm de profondeur. Par ailleurs, à la différence des sols de mangroves du Sénégal, les sols de Pichavaram ne contiennent pas de soufre et de ce fait, ne sont pas acides. Les résultats montrent qu'il sont, dans l'ensemble, plus riches en argile et en bases que les sols du Sénégal, et que le sol du tanne se différencie par des teneurs plus faibles en Ca et plus élevées en Na et Mg que ceux des mangroves (tabl. LVI ). On remarquera aussi que les teneurs en Na, Mg, Ca et K sont, dans l'ensemble, plus élevées que celles des mangroves du Sénégal.

Mais la différence la plus significative est due au fait que l'argile est essentiellement formée de smectite. (KERREST, MARIUS, à paraître).



a) Variations saisonnières de la conductivité de la solution du sol en surface (Zones intérieures)



b) Variations saisonnières de la profondeur et de la conductivité de la nappe (Zones intérieures)

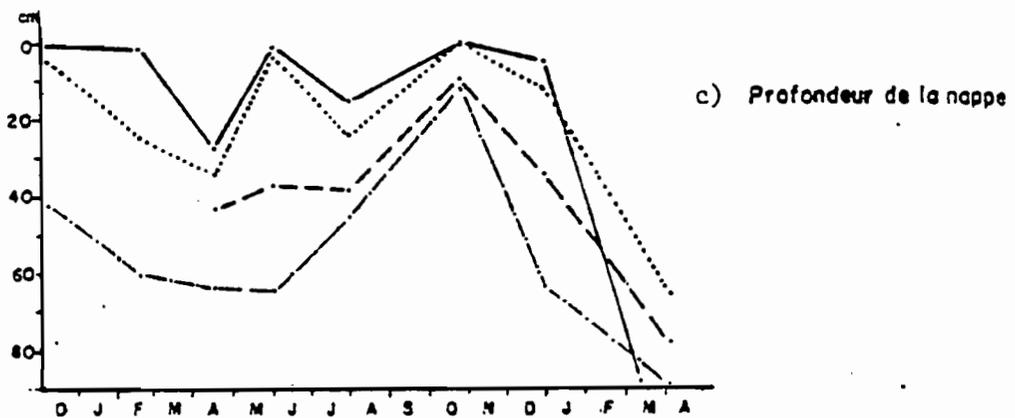


Fig. 68 - Variations saisonnières de la salinité des sols et des nappes à Pichavaram (KERREST, 1980)

Tableau LVI

Composition chimique des sols de mangroves de Pichavaram

Numéro échantillon	Profondeur cm	Perte à 1000	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
CMP 11	0 - 30	12.32	51.2	16.1	2.79	1.8	8.7	.084	.67	3.52	1.60
CMP 12	30 - 60	11.18	52.4	16.7	2.58	1.9	8.5	.118	.69	3.30	1.63
CMP 13	60 - 90	5.77	61.8	15.7	2.00	2.7	6.6	.111	.72	3.37	1.80
CMP 21	0 - 20	11.02	49.6	18.4	2.86	.5	9.6	.079	.71	3.93	1.53
CMP 22	20 - 40	12.08	54.4	17.1	2.50	1.4	7.7	.047	.72	3.53	1.59
CMP 23	40 - 60	10.55	54.5	16.6	2.26	1.7	8.0	.069	.71	3.33	1.73
CMP 24	60 - 80	6.77	56.4	14.7	1.98	2.6	6.7	.072	.69	3.46	1.81
CMP 30	Croute	13.03	51.3	15.9	3.07	1.7	8.5	.075	.69	3.65	1.75
CMP 31	0 - 20	6.47	59.3	15.9	2.27	2.2	7.4	.079	.71	3.39	1.81
CMP 32	30 - 50	5.92	61.8	14.8	2.08	2.8	6.8	.084	.72	3.58	1.79
CMP 33	50 - 70	5.81	60.1	16.3	1.99	2.4	7.8	.210	.74	3.50	1.78
CMP 40	Moquette	12.05	48.1	15.9	3.86	1.0	8.6	.113	.70	3.44	1.87
CMP 42	40 - 50	10.85	50.8	18.1	3.10	1.0	9.8	.179	.72	4.53	1.63
CMP 43	60 - 70	10.20	50.4	16.8	2.87	1.2	9.1	.054	.72	4.38	1.61
CMP 44	80 - 90	11.48	49.9	18.1	3.04	.7	9.5	.046	.70	4.67	1.58
CMP 50	Moquette	16.80	40.8	14.5	3.71	.7	8.1	.031	.58	8.52	1.68
CMP 51	30 - 40	12.34	49.4	18.5	2.91	.6	8.2	.046	.73	4.81	1.59
CMP 52	40 - 60	13.17	48.0	17.5	2.98	.8	8.3	.039	.67	6.15	1.52
CMP 53	60 - 80	14.82	46.4	17.6	2.97	.6	7.9	.035	.64	6.30	1.57

(CMP 1 : Rhizophora - CMP 2 : Avicennia marina - CMP 3 : Suaeda + Sesuvium - CMP 4 : Zone nue + Suaeda - CMP 5 : Zone nue)

### E. GABON

A l'occasion d'une étude générale des mangroves du Gabon, LEBIGRE (1983) a pu mettre en évidence dans la baie de la Mondah, plusieurs séquences mangroves-tannes et une étude phytopédologique de ces séquences est en cours (LEBIGRE et MARTUS, à paraître). Les mangroves de la Mondah forment un ensemble de près de 35.000 ha, situés autour de la baie du même nom, au N.E. de Libreville (fig. 69). Le climat est de type équatorial de transition caractérisé par une forte pluviométrie (3000 mm) et une saison sèche de 3 mois. L'étude d'une séquence (LEBIGRE, MARIUS, 1981) montre de la crique Moka vers la terre ferme (fig. 70) la succession suivante : un rideau de *Rhizophora harrissonii*, une zone à *Avicennia nitida*, une zone de sol nu, une zone herbeuse et une "forêt littorale". L'analyse minéralogique et chimique des échantillons montre qu'ils contiennent pour la plupart de la halite et du quartz avec parfois de la jarosite. Les profils sous *Avicennias* et sous tannes sont généralement salés, avec des conductivités de l'extrait aqueux  $1/10$  souvent supérieures à 10 mmhos. Les nappes ont une conductivité voisine ou supérieure à celle de l'eau de mer. En ce qui concerne les éléments chimiques majeurs, on observe que les sols de la séquence sont pauvres en Fe, très pauvres en Ca et relativement riches en Na et K. Le tableau LVII, montre une différence nette dans la

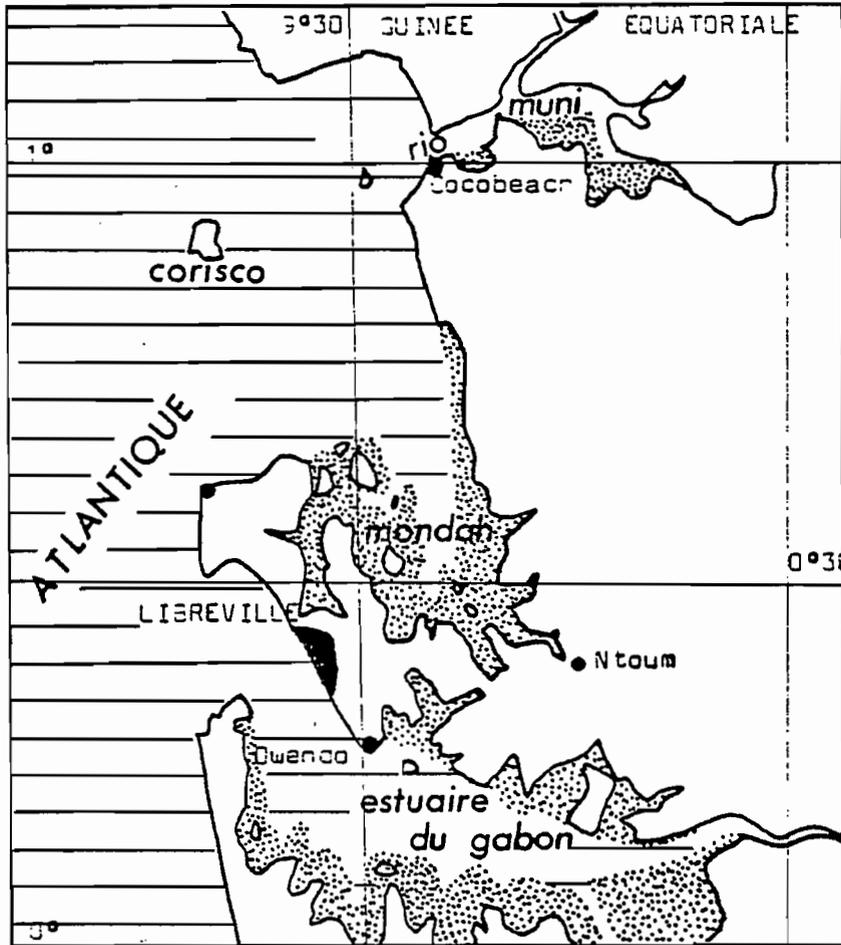


Fig. 69 - Les mangroves de la baie de la Mondah

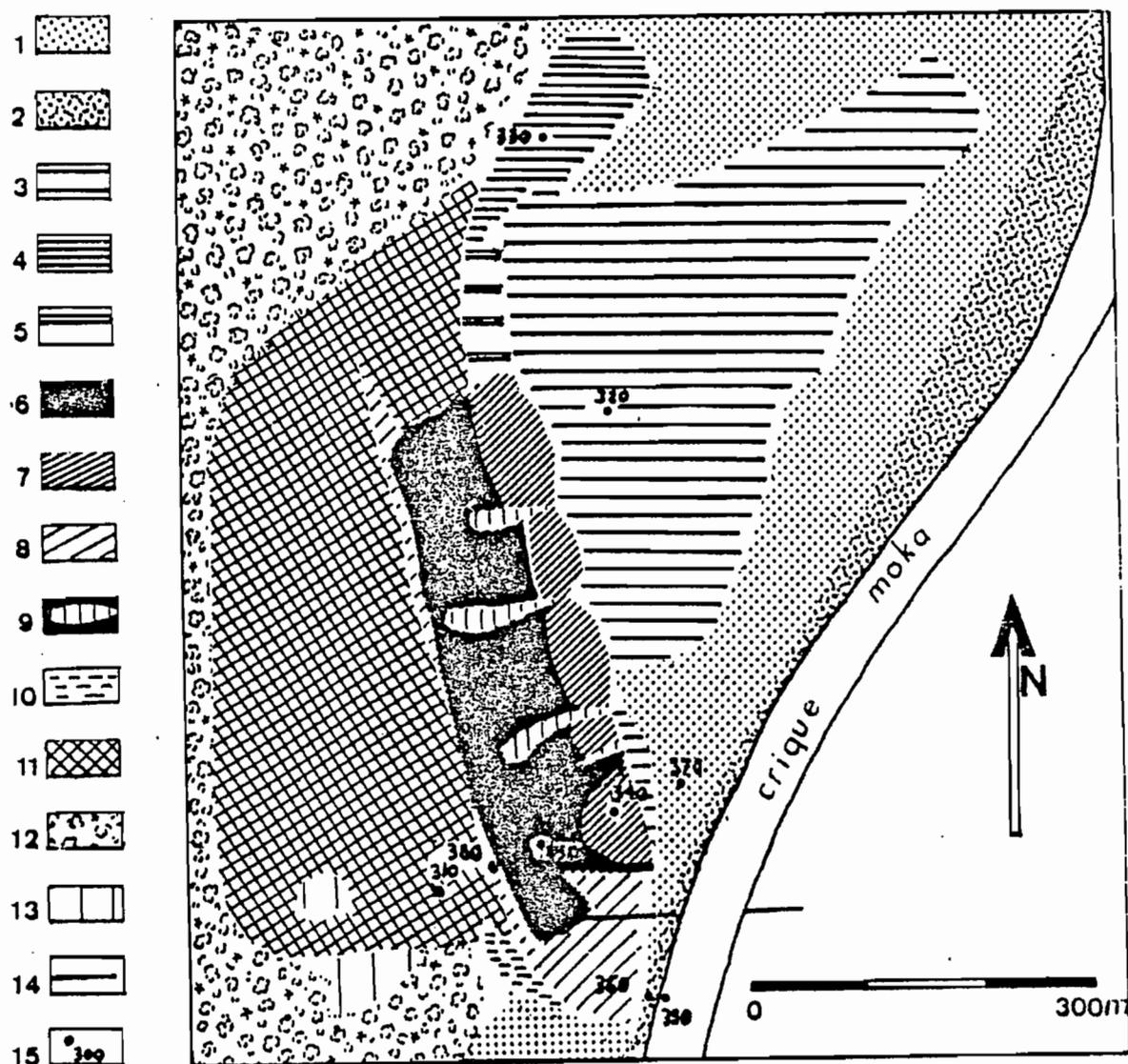
répartition du Mg et du K entre les échantillons de mangroves et ceux des tannes.

L'évolution géochimique des sols de cette séquence est sensiblement identique à celle des sols de mangroves du Sénégal, et cela malgré une pluviométrie élevée, parce que la baie de la Mondah est essentiellement soumise à l'influence marine et que, comme au Sénégal, ce sont des mangroves de rias.

### 3. CONCLUSION

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



- Le tanne de Moka : 1. *Rhizophora Harrisonii* ;  
 2. Rideaux de *Rhizophora racemose* ou *Harrisonii* ;  
 3. *Avicennia nitida* : formation basse ;  
 4. *Avicennia nitida* : formation haute ;  
 5. *Avicennia nitida* : formation éparsée ;  
 6. Tanne vif ; 7. Tanne à *Sesuvium portulacastrum* ;  
 8. Tanne herbeux ; 9. Petites galeries : *Avicennia*  
 et *Conocarpus* ; 10. *Phoenix reclinata* ;  
 11. Forêt littorale à *Syzygium* ; 12. Forêt ombrophile ;  
 13. Savane ; 14. Layon (profil sismique) ;  
 15. Profil.

Fig. 70 - Séquence Mangrove - Tanne de Moka  
 (LEBIGRE, MARIUS, 1981)



## Chapitre XII

## LA CLASSIFICATION DES SOLS DE MANGROVES

## I. INTRODUCTION

Tout au long de cette étude nous avons pu constater que la genèse et l'évolution des sols de mangroves du Sénégal étaient essentiellement liées à la présence des composés soufrés, principalement des pyrites (mangroves) et de la jarosite et/ou du gypse (tannes), d'où les termes de sols "potentiellement sulfaté-acide" ou "sulfaté-acide", couramment utilisés pour désigner ces sols.

La salinité, autre facteur de la genèse de ces sols, en grande partie chlorurée-sodique et liée à l'aridité climatique ne se manifeste que superficiellement (efflorescences, croûte, moquette) et varie en fonction des saisons. Par ailleurs, si le caractère "sulfaté acide" est acquis et est commun à de nombreux sols de mangroves tropicales et même à certains sols de la zone tempérée (Pays Bas), la salinité n'est qu'un caractère transitoire, presque exclusif, des mangroves du Sénégal.

Or, il s'avère qu'aucune des classifications françaises "officielle", et notamment celle du C.P.C.S. (1967), n'ont pris en compte ce caractère "sulfaté-acide" des sols de mangroves et dès 1967 nous avons proposé (MARIUS-TURENNE) une classification pour les sols de mangroves des Guyanes. Par la suite, grâce à nos connaissances des sols de mangroves d'autres régions (Gabon, Inde, Sénégal) nous avons fait des propositions pour une classification française des sols de mangroves tropicales (MARIUS, 1977).

Et le projet de classification O.R.S.T.O.M. des sols (SEGALEN et al., 1979) a pris en considération le caractère particulier de ces sols et retenu en partie nos propositions.

## 2. CLASSIFICATION DES SOLS DE MANGROVES DU SENEGAL ET DE LA GAMBIE

Nous avons vu que la sécheresse climatique de ces dernières années (ch. VIII) ou des aménagements hydro-agricoles (ch. XIII) avaient provoqué une évolution rapide des sols de mangroves. Il est donc bien évident qu'une classification de ces sols ne peut être que provisoire, du moins en ce qui concerne les sols des mangroves à palétuviers, des mangroves décadentes et des tannes inondés, alors que les sols des tannes vifs ou herbacés sont évolués et leur classification peut donc être considérée comme définitive.

C'est la classification américaine (Soil Taxonomy) qui, la première, s'est intéressée à ces sols (1970), suivie par la F.A.O. en 1974 et ce n'est qu'en 1979 que le "projet" de classification O.R.S.T.O.M. s'est inspiré des 2 premières pour classer les sols de mangroves. Nous allons donc essayer de ranger les sols de mangroves et tannes du Sénégal dans les 3 classifications : américaine, F.A.O., française.

## A. SOIL TAXONOMY

La dernière édition de cette classification qui date de 1975 définit au préalable le matériau *sulfidique* et l'horizon *sulfurique*.

- Le matériau *sulfidique* est un matériau organique ou minéral qui contient 0,75 % ou plus de soufre, principalement sous forme de sulfures. Le pH qui, normalement, est proche de la neutralité à l'état frais, peut s'abaisser à des valeurs inférieures à 2 après séchage.

L'oxydation des sulfures conduit à la formation de sulfates de fer et/ou d'aluminium. Le sulfate de fer formé - la jarosite - a une couleur jaune pâle qui sert à caractériser l'horizon sulfurique.

- L'horizon *sulfurique* est formé d'un matériau minéral ou organique qui présente à la fois un pH < 3,5 ( $1/1$  eau) et des taches de jarosite (hue de 2,5 Y ou plus jaune et chroma de 6 ou plus).

L'horizon sulfurique résulte de l'oxydation naturelle ou artificielle d'un matériau riche en sulfures (*sulfidique*).

Ces horizons diagnostiques étant définis, les sols à pyrite (potentiellement sulfaté-acides) et les sols à jarosite (sulfaté-acides) se classent dans 2 groupes de sols : les *sulfaquents*, appartenant à l'Ordre des Entisols et les *sulfaquepts*, dans l'Ordre des Inceptisols, définis respectivement ainsi :

a) *Sulfaquents*

Ce sont des Aquepts (Entisols saturés d'eau) caractérisés par la présence d'un matériau sulfidique sur 50 cm, avec peu ou pas de carbonates. Les profils ont une valeur  $n > 1$  sur la plupart des horizons, un pH généralement neutre à l'état frais et un épipédon souvent organique. Nonobstant tous les autres caractères, un seul sous groupe a été défini - *Typic Sulfaquents*.

D'après cette définition, tous les sols du domaine de la mangrove au Sénégal et en Gambie seraient des *Typic Sulfaquents*. En fait, il est apparu au cours du 2ème Symposium sur les sols sulfaté-acides de Bangkok (1981) que, d'une part la définition du matériau sulfidique devait être légèrement modifiée, notamment en ce qui concerne la valeur  $n$ , puisqu'au Sénégal les mangroves sableuses ont une valeur  $n < 1$ , et qu'en fait, la meilleure dénomination de ce matériau était tout simplement "matériau potentiellement acide", d'autre part que 4 sous-groupes supplémentaires, au moins, devaient être proposés. Il s'agit notamment des :

- *Humic Sulfaquents*, caractérisés par la présence d'un horizon à matière organique décomposée, avec une variante au cas où les 50 cm superficiels seraient fibreux : les *Sulfihemists*.

On voit que tous les profils sous *Rhizophora racemosa* ainsi que la plupart des profils sous *Rhizophora mangle* ou sous formation mixte Rh. *mangle* - *Avicennia africana* sont des *Sulfihemists*, alors que les profils des mangroves décadents (*Oussouye*, *Balingore* ...) seraient des *Humic Sulfaquents* ou des *Typic Sulfaquents*.

- *Sulfuric Sulfaquents*, caractérisés par la présence de taches de jarosite sur les 50 cm superficiels, mais l'horizon réduit sulfidique apparait lui aussi avant 50 cm -  $n > 1$ . La plupart des profils des tannes inondés de Bassid, de N'Dimsiroh appartiendraient à ce sous groupe.
- *Halie (ou Salie, ou Natric) Sulfaquents*, caractérisés par une salinité très élevée sur les 50 cm superficiels, en dehors des autres caractères. C'est le cas des profils des tannes inondés de Tobor, Balingore, Oussouye...
- *Tropaqueptic Sulfaquents*, caractérisés par la présence d'un horizon cambique sur le matériau sulfidique. Ce sous groupe n'existe pas au Sénégal.

#### b) *Sulfaquepts*

A Bangkok, les sols de ce groupe ont été définis comme ayant un pH frais inférieur ou égal à 3,5, avec des taches de jarosite constituant plus de 2 % de l'horizon une valeur de  $n < 0,7$ , mais aucune limite n'a été fixée pour le taux de soufre. Il a même été proposé de désigner l'horizon diagnostique : horizon jarositique.

Comme pour les sulfaquents, plusieurs sous groupes ont été proposés, parmi lesquels on retiendra pour les sols du Sénégal :

- *Sulfaquentic sulfaquept*, caractérisés par des taches de jarosite sur 50 cm surmontant un horizon sulfidique de 50 à 100 cm avec  $n > 1$ .

De nombreux profils des tannes vifs entrent dans ce sous groupe.

- *Tropaqueptic sulfaquept*, caractérisés par un horizon à taches de jarosite, mais à pH compris entre 3,5 et 4,3 avec  $n > 1$ . Pour les sols du Sénégal, très salés, ce sous groupe pourrait devenir *Halaqueptic Sulfaquept*.
- *Halie Sulfaquept*, caractérisés par un horizon à jarosite sur 1 m, à pH  $< 3,5$  et à salinité élevée - avec  $n < 1$ . C'est le cas de certains profils évolués en surface (Guidel).

On voit que la valeur de  $n$  joue un rôle important dans la classification de ces sols et que sans doute, d'autres sous groupes seront, dans l'avenir, proposés.

#### B. CLASSIFICATION F.A.O.

Cette classification a été élaborée pour la légende de la Carte des Sols du Monde, à 1/5.000.000e, donc pour une échelle très petite. Elle s'est, en grande partie, inspirée de la Soil Taxonomy et a donc créé le groupe des "Thionic fluvisols" pour les sols fluvio marins récents, définis comme ayant un matériau sulfidique ou un horizon sulfurique - sans distinction - sur 125 cm. En fait, tous les sols du domaine de la mangrove sont des *Thionic fluvisols*, et ceux du tanne sont des *Gleyic Solontchak*.

#### C. CLASSIFICATIONS FRANCAISES

La classification française officielle est toujours celle du C.P.C.S. (1967) et c'est celle qui a été utilisée pour la carte au 1/100.000e de la

Basse Casamance (VIEILLEFON, 1975) pour celle du 1/50.000<sup>e</sup> des Iles du Saloum (MARIUS, 1977) et pour la plupart des cartes à grande échelle des bolons de la Casamance. Disons tout de suite que dans cette classification, comme dans toutes les classifications françaises qui l'ont précédé (AUBERT, DUCHAUFOR) rien n'a été prévu pour les sols à sulfures ou à sulfates et que généralement, dans toutes les cartes, les sols de mangroves ont été classés : sols humiques à gley salés ou sols salins, c'est-à-dire dans les classes des sols hydromorphes et des sols halomorphes. Or, nous allons voir que, comme pour les Guyanes, les sols de mangroves du Sénégal se répartissent dans plusieurs classes.

*a) Classification C.P.C.S. (1967)*

- La vase nue de la slikke a été classée : Sol minéral brut - non climatique - d'apport - marin.
- Les sols sous mangroves des zones proches de l'embouchure de la Casamance ont été classés par VIEILLEFON : Sols peu évolués - non climatiques - d'apport - hydromorphes.

Nous avons classé tous les sols sous mangroves de l'Estuaire du Saloum : Sols peu évolués - non climatiques - d'apport - à sulfures.

- Les sols sous mangroves à *Rh. racemosa* des zones internes de la Casamance ont été classés : Sols hydromorphes - organiques - tourbeux - Eutrophes (VIEILLEFON). - Sols peu évolués - non climatiques - d'apport - organiques (MARIUS).
- Les sols sous mangroves à *Rh. mangle* + *Avicennia* ont été classés : sols hydromorphes - moyennement organiques - humiques - à gley salés.
- Les sols des tannes vifs, non acides, ont été classés : Sols halomorphes - à structure non dégradée - Salins. A efflorescences salines.
- Les sols des tannes vifs, à jarosite ont été classés : Sols halomorphes - A structure non dégradée - salins - acidifiés.
- Les sols des tannes herbacés ont été classés : Sols hydromorphes - minéraux - à gley - salés.

On constate que les principaux facteurs de la pédogenèse qui interviennent dans cette classification sont : l'hydromorphie, la salinité, la matière organique et jamais la présence de soufre. Ceci nous a conduit à adopter pour la cartographie détaillée - à l'échelle du 1/20.000<sup>e</sup> - de certaines vallées (Baïla, Guidel) une classification tout à fait personnelle - dont voici, un exemple qui est celui de la légende de la carte 1/10.000<sup>e</sup> de la vallée de Guidel (MARIUS, CHEVAL, 1983) inspirée en partie de la carte de Baïla (AUBRUN, MARIUS, 1980). On y a distingué 7 unités pour les zones naturelles et 6 pour les zones aménagées.

*b) Classification GUIDEL (1983)*

- Zones Naturelles

Sols peu évolués organiques P.S.A. (potentiellement sulfaté-acides) sous mangrove à *Rhizophoras*.

Sols peu évolués - P.S.A.  
sous mangrove décadente

Sols peu évolués - salés - P.S.A.  
sous tanne inondé

Sols salins acidifiés  
sous tanne vif - à "moquette" sursalée

Sols sulfaté-acides  
sous tanne vif - argileux

Sols salins  
sous tanne vif - sableux

Sols para-sulfaté-acides  
sous tanne herbacé ou rizières abandonnées

- Zones Aménagées

Sols peu évolués - P.S.A. (ILACO) \*  
sous ancienne mangrove à Rhizophoras

Sols salins acidifiés - P.S.A. en profondeur (ILACO)  
sous tapis herbacé à Philoxerus, Sesuvium, Helecharis

Sols évolués en surface - P.S.A. en profondeur (ILACO)  
sous repousses d'Avicennia sur tapis herbacé à Sesuvium + Philoxerus

Sols sulfaté-acides (ILACO)  
sous tanne vif.

Sols hydromorphes - salés - P.S.A. en profondeur  
sous rizières profondes traditionnelles

Sols hydromorphes - P.S.A. en profondeur  
sous ancienne mangrove à Avicennia

*c) Le projet de classification "O.R.S.T.O.M." (1979)*

D'après les auteurs de ce projet de classification, les critères retenus et hiérarchisés sont ceux qui sont considérés comme véritablement issus des facteurs et des processus de formation des sols. Ceux concernant les constituants ont été présentés dans l'ordre qui est apparu le plus important et traduisant une stabilité croissante des minéraux secondaires produits. Les critères présentés ensuite sont ceux qui ont trait à l'organisation morphologique du pèdon, c'est à dire successivement les horizons humifères, les horizons minéraux, le matériau originel.

Un vocabulaire "euphonique" nouveau a été adopté et les différences avec la classification C.P.C.S. sont importants.

C'est ainsi qu'en ce qui concerne les classes, seuls les produits de l'altération des matériaux primaires ont été retenus. Pour les sous-classes, on a abandonné la notion de pédoclimat difficile à préciser au

\* I.L.A.C.O. : International Land Consultant (Société hollandaise d'Aménagement)

profit de différences dans les constituants minéraux et organiques et il a été notamment jugé utile de créer des classes ou sous classes nouvelles pour rendre compte de l'accumulation secondaire, de gypse, de calcaire, de *sulfates* ou de *sulfures* ...

C'est ainsi qu'en ce qui concerne les sols de mangroves, deux ensembles minéraux diagnostiques ont été définis :

- le *thion* qui correspond à un matériau contenant des produits où le soufre est à l'état réduit et répondant aux critères suivants :

. Les constituants sont des sulfures ou polysulfures de métaux (plus de 0,75 % de soufre). Le pH est sur le terrain proche de la neutralité et s'acidifie très vite jusqu'à pH 3,5.

- le *sulfon* qui correspond à un matériau contenant des produits acides où le soufre est à l'état oxydé et répondant aux critères suivants :

. Constituants des sulfates ferriques particuliers (jarosite) et de l'acide sulfurique libre. Caractérisation : Identification de la jarosite par la couleur (hue > 2,5 Y et chroma > 6) pH < 3,5.

On constate que la définition de ces deux matériaux est sensiblement identique à celle du matériau sulfidique et sulfurique de la Soil Taxonomy, à ceci près que la valeur de n n'a pas été prise en considération.

Les sols des mangroves et tannes du Sénégal appartiendraient à la classe des *Selsols* et se répartiraient dans les deux grandes sous classes des *thiosols* et des *sulfosols*, définis respectivement par la présence d'un thion et d'un sulfon.

Au niveau des sous classes, les sols du domaine de la mangrove seraient des *halithiosols* et ceux du tanne des *halisulfosols*. Deux autres sous classes ont été proposées à ce niveau de la classification qui constituent, à notre avis, une erreur. Il s'agit en effet, d'une part, des *gypsi-thiosols* et des *gypsisulfosols*, caractérisés par la présence de gypse, d'autre part, des *thiasols* carboxiques et des *sulfosols* carboxiques, caractérisés par la présence de carbonates. Or, on sait que ces caractères (gypse et carbonates) ne constituent que de très rares exceptions dans la gamme des sols sulfaté-acides et qu'en général les sols à jarosite ne contiennent pas de carbonates. Leur présence à un niveau aussi élevé de la classification ne se justifie pas du tout.

Il apparaît qu'au moins, aux niveaux supérieurs de la classification - et au vocabulaire près - le projet O.R.S.T.O.M. et la Soil Taxonomy présentent de nombreuses ressemblances, les *thiosols* correspondant aux *Sulfasols* et les *sulfasols* aux *Sulfaquepts*.

Par contre, plusieurs groupes et sous groupes du projet O.R.S.T.O.M. ne correspondant pas à la réalité et dans l'attente de nouvelles propositions, c'est la Soil Taxonomy qui, à notre avis, est encore la mieux adaptée, pour le moment, à la classification des sols de mangroves tropicales.

#### D. ESSAI DE CORRELATION DES CLASSIFICATIONS

Le tableau ci-dessous (tabl. LVIII ) synthétise la répartition des sols des mangroves et tannes du Sénégal dans les différentes classifications énumérées ci-dessus.

Tableau LVIII

Répartition des sols des mangroves et tanne du Sénégal  
dans les différentes classifications.

Végétation	Mangrove à Rh. racemosa	Mangrove à Rhizophora mangle + Avicennia	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 - tour- beux - 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 dé- gradée - Salins - Acidifiés	S. hydromorphes minéraux - A gley - Salés
O.R.S.T.O.M. (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 Solonchak	



## Chapitre XIII

**LA MISE EN VALEUR ET L'AMENAGEMENT  
DES SOLS DE MANGROVES****1. INTRODUCTION**

Il y a eu dans le passé, un grand nombre d'utilisations des produits de la mangrove et B. ROLLET (1975) a recensé dans la bibliographie plus de 1000 références consacrées aux usages de la mangrove, parmi lesquelles les plus importantes sont liées à l'alimentation, à la médecine, à l'agriculture, à la pêche et surtout au bois (tanin, bois de feu, charbon, bois d'oeuvre et plus récemment pâte à papier).

Mais une bonne partie de cette littérature a beaucoup vieilli et la plupart des usages cités n'ont plus qu'une valeur historique et pour de nombreux produits : tanin, vin, alcool, charbon, on observe des périodes d'essor et de décadence par suite de la modification des marchés et de l'épuisement de la matière première par surexploitation. En revanche, l'attention s'est portée ces dernières années sur les problèmes d'aménagement des sols de mangroves pour la riziculture, notamment dans des deltas surpeuplés (Asie, Afrique de l'Ouest et Guyanes), et sur les possibilités touristiques des zones à mangroves (parcs naturels).

Avant de traiter de manière détaillée des problèmes d'utilisation et d'aménagement des mangroves du Sénégal, nous verrons dans le paragraphe suivant comment sont mises en valeur et aménagées d'une manière générale les mangroves dans le monde.

**2. MISE EN VALEUR ET AMENAGEMENT DES MANGROVES**

Les zones à mangroves sont caractérisées par une grande variété de sols et non, comme on le croit généralement, uniquement formées de sols potentiellement sulfaté-acides et salés. Cette variété de sols est liée aux conditions climatiques hydrologiques, géomorphologiques et à la végétation sous climat équatorial ou tropical humide, la plupart des sols de mangroves ne sont pas salés, et selon les conditions géomorphologiques et de végétation, les sols sont complètement différents - sous des climats sensiblement identiques - C'est notamment le cas des sols des mangroves du Sénégal et de la Côte Orientale de l'Inde (MARIUS, 1982).

C'est en Asie que les mangroves ont été mises en valeur depuis longtemps (Indonesie, Malaisie, Thaïlande, Viêt-nam ...) à cause de la pression démographique, mais aussi parce que le riz qui est la principale culture adaptée à ces sols est originaire et connu dans ces régions depuis très longtemps.

En Afrique, seule une frange côtière occidentale a été mise en valeur en Guinée, Sierra Leone, Guinée Bissau et Sénégal.

Enfin, en Amérique c'est uniquement dans les Guyanes (Suriname et Guyana) que ces sols ont été aménagés sur une grande échelle.

L'aptitude des sols de mangroves à l'aménagement pour une utilisation agricole dépend, en grande partie, d'un certain nombre de contraintes liées aux conditions locales du climat, de l'hydrologie et des caractères physiques et chimiques des sols (salinité et acidité) (MOORMANN, PONS, 1974). Après avoir brièvement analysé ces contraintes, nous donnons quelques exemples d'aménagements connus (Sierra Léone) ou que nous avons observés (Guyanes, Indonésie)

#### A. ETUDE DES CONTRAINTES

##### a) Contraintes liées à l'hydrologie

Les sols de mangroves sont le plus souvent, de texture fine et peu perméables, aussi selon le degré d'alluvionnement et de drainage, ils peuvent, quand ils viennent d'être récemment aménagés, soit être encore complètement réduits soit présenter un mince horizon oxydé sur un sous-sol réduit et même, dans ce dernier cas, ils sont généralement inondés de manière prolongée pendant la saison des pluies, donc en conditions réduites. Pour une utilisation agricole de ces sols, 2 possibilités s'offrent aux aménageurs.

- Ou l'on ne peut pas investir dans le drainage et alors seules les cultures adaptées aux conditions d'hydromorphie sont possibles, ce qui limite les spéculations agricoles au riz.
- Ou l'on dispose de capitaux pour investir dans le drainage et s'assurer une parfaite maîtrise de l'eau et alors la gamme de cultures possibles est importante, notamment celles de cultures industrielles pouvant permettre d'amortir les frais investis (cocotier, palmier à huile, canne à sucre, légumes, agrumes ...), c'est ce qu'ont fait le Suriname ou la Malaisie, par exemple. Il ne faut cependant pas perdre de vue que le drainage mal contrôlé peut conduire à une acidification des sols.

Parmi les contraintes liées aux conditions hydrologiques, il faut aussi retenir les inondations de différentes sortes, et notamment les inondations par les eaux salées soit dans les régions à déficit pluviométrique et où les eaux douces apportées par les rivières sont insuffisantes (Casamance) soit dans des régions touchées par les cyclones (Delta du Gange, Delta du Fleuve Rouge)

##### b) Contraintes liées à la salinité

Les sols de mangrove, récemment aménagés, sont plus ou moins salés et donc adaptés uniquement à des cultures tolérantes aux sels. S'il y a suffisamment d'eau douce provenant soit des pluies, soit des cours d'eaux, la salinité peut être éliminée, soit temporairement durant la saison des pluies, soit de manière permanente par une poldérisation et un drainage judicieux.

De ce point de vue, il faut distinguer la zone tropicale humide où la salinité ne pose plus de problèmes quelques années après l'aménagement de la zone tropicale à longue saison sèche où la salinité peut constituer une contrainte permanente même dans les zones poldérisées, car la resalination en saison sèche par évaporation et remontée capillaire est un phénomène courant et saisonnier. Les cultures ne peuvent être faites qu'en

saison des pluies et encore, à condition d'être assuré d'avoir suffisamment d'eau douce fournie par les rivières. C'est le cas du Sénégal sur lequel nous reviendrons.

*c) Contraintes liées à l'acidité*

Les sols de mangroves sans acidité potentielle peuvent être aménagés sans problèmes. Bien drainés pour être dessalés, ils peuvent fournir des rendements en riz très élevés.

En revanche les sols de mangroves potentiellement sulfaté-acides se transforment rapidement en sols sulfaté-acides quand on les draine, avec toutes les conséquences chimiques lorsque le pH s'abaisse au dessous de 4 - 3,5.

BLOOMFIELD et COULTER (1973) ont passé en revue toutes les toxicités chimiques liées à l'acidification des sols de mangroves. Nous retiendrons celles qui sont les plus importantes, à savoir :

- la toxicité aluminique et ferrique qui se développe à des pH inférieur à 3,5 et sur lesquelles nous reviendrons plus loin ;
- la toxicité manganique ;
- les toxicités liées aux acides organiques solubles dans le cas des sols tourbeux ;
- les carences en éléments nutritifs, notamment en phosphore, Azote et éléments traces (Cu et Zn) sont importantes et générales dans les sols sulfaté-acides.

Toutes ces contraintes chimiques liées à l'acidité peuvent être surmontées par un aménagement approprié. Une première méthode utilisable dans le cas de la riziculture est de limiter le drainage au minimum absolu (30 - 50 cm). On évite ainsi l'acidification du sous sol et donc la remontée capillaire de substances acides toxiques. Quand cela n'est pas prohibitif et si le sol n'est pas trop acide, on peut le chauler pour neutraliser l'acidité, au moins en surface.

*d) Contraintes physiques*

Les contraintes physiques au développement des sols à mangroves pour l'agriculture sont les plus sévères pendant l'aménagement de ces sols. Le défrichement du sol de mangrove, particulièrement de celui sous *Rhizophora* est très difficile à cause de la mauvaise accessibilité. Les sols de mangroves qui ne sont pas maturés ou seulement très superficiellement ont une capacité de portance faible, ce qui exclut la mécanisation du défrichement et la préparation initiale du sol. Les sols sous *Rhizophora* ont une capacité de portance accrue par l'existence d'un mat racinaire épais entrelacé, mais une fois que ces racines meurent et se décomposent après le défrichement, la capacité de portance diminue considérablement. Particulièrement difficile est aussi l'aménagement des sols à couche de tourbe superficielle (Guyanes, Bornéo). L'amélioration de la capacité de portance et l'accessibilité n'ont lieu qu'après une aération raisonnable des couches profondes et la maturation des sols. Et la mécanisation n'est possible que si les 50 cm superficiels sont maturés. Cela signifie que les sols potentiellement sulfaté acides qu'il ne faut pas aérer pour prévenir toute oxydation ne sont pas aptes à être mécanisés.

Il en est de même pour les sols tourbeux où la mécanisation n'est possible que lorsque la couche de tourbe a disparu par oxydation ou a été brûlée.

## B. EXEMPLES D'AMENAGEMENTS DES MANGROVES

Nous citerons 3 exemples d'aménagements agricoles pris sur chacun des 3 continents : Asie (Bornéo), Afrique (Sierra Leone) et Amériques (Guyanes), en précisant que nous avons eu l'occasion d'observer sur le terrain les aménagements des Guyanes (1964, 1969) et ceux de Bornéo (1983).

### a) Kalimantan (Bornéo - Indonésie)

Dans une île réputée pour sa sous population (9 h au km<sup>2</sup>) par rapport à Java, les zones marécageuses situées dans les estuaires sont surpeuplées. A l'occasion de l'étude de l'Estuaire du Barito (Août 1983), nous avons pu observer les techniques d'utilisation et d'aménagement de ces sols. On estime à environ 250 000 ha les superficies cultivées, en riz principalement, mais aussi en cocotier, bananier, caféier, canne à sucre, agrumes, ananas.

L'utilisation actuelle de ces sols tourbeux est le résultat de très nombreuses années d'expérience acquise par les populations locales. Le principe est de maintenir les sols inondés en permanence afin d'empêcher leur oxydation et donc leur acidification. Par ailleurs, l'inondation est exclusivement assurée par la marée dont l'eau à l'avantage d'être ici toute l'année douce (2mmhos en saison sèche). C'est donc une *riziculture inondée tidale*.

Depuis 1922 et à l'occasion des programmes de transmigration, plusieurs systèmes d'aménagements ont retenu l'attention des autorités :

- le système du "*drainage contrôlé*" (VAN WIJK) dans lequel les inondations saisonnières et l'eau stockée dans les couches de tourbe épaisses devaient fournir l'eau nécessaire à l'irrigation ;
- en 1958, le "*tidal swamp system*" proposé par PANGERAN M. NOOR, basé sur l'irrigation par les marées hautes, suivie du drainage par gravité, à marée basse. Mais dans les zones internes où l'influence de la marée est limitée, ce système n'a pas donné les résultats escomptés car les sols se sont acidifiés ;
- la *polderisation*, proposée en 1950 par SCHOPHUYS, et en partie réalisée plus tard. Ce système nécessite la construction de canaux l'installation de pompes et de valves automatiques pour l'irrigation avec l'eau du fleuve, l'installation de valves automatiques pour contrôler le drainage, l'utilisation d'engrais, la mécanisation ... Compte tenu du coût élevé des investissements, ce système n'a pas été utilisé à une grande échelle.
- Système "*Gadjah Mada University*". C'est finalement ce système qui est utilisé à grande échelle dans la région. Le principe est fourni dans la figure 71 et il est inspiré des méthodes traditionnelles. Un canal primaire, perpendiculaire à la rivière se divise en 2 canaux secondaires qui se terminent eux-mêmes dans des bassins réservoirs. Des canaux tertiaires partant des canaux secondaires permettent la pénétration effective de l'eau à marée haute. Les entrées des canaux tertiaires sont plus resserrées à proximité de la rivière qu'à l'intérieur des terres afin d'obtenir une décharge égale de tous les canaux tertiaires à marée basse.

Les bassins réservoirs stockent les eaux de drainage qui sont ensuite remises dans le circuit pour l'irrigation, ce qui pose naturellement des problèmes, les eaux de drainage étant souvent acides et il semble qu'à l'avenir, il faudra songer à isoler les 2 systèmes : irrigation et drainage.

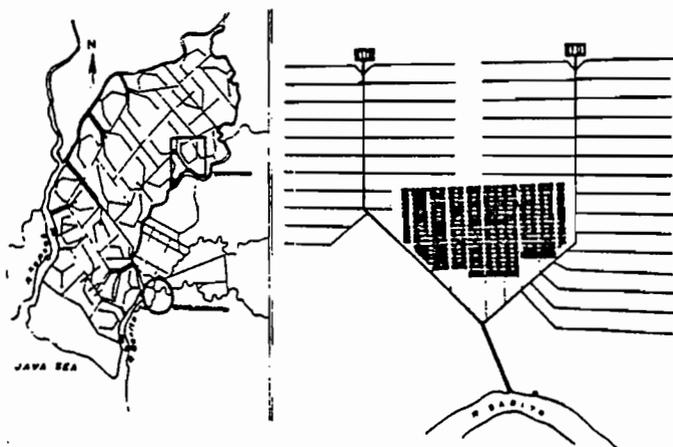


Fig. 71 - Système d'aménagement Gadjah Madah University (DRIESSEN, 1975)

#### b) Guyanes

A la suite de plusieurs missions effectuées en Suriname et en Guyana, nous avons publié 2 articles (MARIUS et al., 1964 ; MARIUS et al., 1969) dans lesquels nous avons consigné nos observations sur l'aménagement des sols de mangroves dans ces 2 pays, car c'est là que s'est développée toute l'agriculture, notamment ces dernières années, à l'inverse de la Guyane Française qui, malgré l'exemple de ses voisins n'a pas su tirer parti de la fertilité des "Terres Basses" et a développé son agriculture sur les Terres Hautes.

Le choix des surfaces à mettre en valeur dans la zone des argiles marines récentes fait appel à une série de critères fondamentaux concernant le sol. Le type de culture est sélectionné ensuite en fonction des critères humains et économiques.

On étudie -les possibilités d'accès : cordons sableux, fleuves navigables ;

-les caractéristiques pédologiques, morphologie du profil, perméabilité, épaisseur et nature de la couche de tourbe, évolution probable de l'argile marine, acidité, développement de la structure ...

-les possibilités d'apport d'eau douce pour l'irrigation : fleuves ou rivières dont on contrôle le front de salinité, savanes marécageuses à tourbe épaisse pouvant servir de réservoir (Guyana).

Dans les 2 Guyanes, la culture principale est le riz qui est faite par de petits agriculteurs en Guyane, alors qu'en Suriname, elle est faite sous forme de grandes exploitations mécanisées, de plusieurs milliers d'hectares (WAGENINGEN Polder, PRINZ BERNARD Polder ...)

La riziculture exige qu'on enlève la couche de tourbe, alors que pour le bananier, on choisit les sols à couche de tourbe de l'ordre de 20 à 50 cm, aussi l'option prise au départ est-elle importante, car le style d'évolution du polder est souvent irréversible. Les 2 Guyanes étant, dans l'ensemble, très sous peuplées, c'est donc essentiellement sous forme de "polders" qu'ont été aménagées les zones marécageuses, mais l'endiguement de ces zones n'a pas été identique. En effet, en Guyana, les premiers colons hollandais ont réalisé le tour de force de jeter une digue à l'extérieur de la mangrove séparant le continent de la mer et à l'heure actuelle, Georgetown, la capitale est au dessous du niveau de la mer. Le rideau de palétuviers a fait place à des prés salés et toute la bande côtière est habitée.

Tandis que la canne à sucre s'est établie le long des fleuves, le riz s'est implanté à partir des terres salées proches de la mer et progresse vers l'intérieur. L'irrigation est assurée par l'eau stockée dans la tourbe épaisse des savanes marécageuses.

Ce sont d'ailleurs les 2 principales spéculations agricoles de ce pays.

Au Suriname, le choix s'est porté sur les argiles à couche de tourbe épaisse. On a délimité et endigué à l'intérieur de la Plaine Côtière, les zones adéquates, laissant ainsi intacts, en aval, la mangrove et les sols salés à couche de tourbe peu épaisse.

Outre le riz et le bananier déjà cités, les cultures sont plus variées : Agrumes, canne à sucre, pâturage, cacaoyer ...

En Guyane Française, c'est à la suite d'une impossibilité à choisir une spéculation agricole que le polder "Marie-Anne" de 360 hectares, aménagé pendant les années soixante, a dû être abandonné. Le choix était entre la riziculture et le bananier, c'est-à-dire donc, entre enlever la couche de tourbe ou la maintenir. Des contraintes économiques : riz moins cher au Suriname et Antilles productrices de bananes ont fait abandonner le projet.

#### c) La Sierra Leone

L'étude de l'aménagement des mangroves pour la riziculture a fait l'objet de très nombreuses études des chercheurs de la station de Rokupr, en particulier de HART, CARPENTER, JEFFERY (1963). Les sols sont, en majorité, potentiellement sulfaté-acides et le schéma d'aménagement proposé est le suivant :

- établissement de polders ;
- assèchement aussi complet que possible pour obtenir le maximum d'oxydation ;
- réintroduction de l'eau de mer, pour entraîner rapidement les acides et apporter des ions métalliques qui déplacent  $H^+$  ;
- établissement d'un polder permanent ;
- chaulage ;
- lessivage par les eaux pluviales pour dessaler les sols.

### C. AQUICULTURE

S'agissant de l'aménagement des mangroves nous avons surtout insisté jusqu'à présent sur leur mise en valeur agricole et principalement sur la riziculture. Or il existe d'autres options d'aménagement des mangroves et notamment des mangroves salées ou saumâtres. Il s'agit de l'aquiculture qui se développe de plus en plus dans cet écosystème d'autant que parfois cette option est plus rentable que la riziculture. En effet, les mangroves salées sont généralement riches en poissons, crevettes, crustacés, huîtres et coquillages de toutes sortes. C'est là que se trouve souvent le point de départ d'une chaîne alimentaire importante, aussi la destruction de la mangrove peut elle avoir des conséquences désastreuses sur la pêche hauturière.

Certaines techniques aquicoles peuvent accroître les rendements des pêches côtières et la méthode la moins dangereuse du point de vue écologique est l'aquiculture en eau libre, car la pose de nasses ou de cages fixes n'a qu'une faible incidence sur le milieu physique de la zone de mangrove adjacente et ne perturbe donc pas l'équilibre de l'écosystème. Par contre l'aquiculture en bassin présente certains dangers pour le milieu environnant puisqu'il faut abattre des arbres pour dégager le terrain et y construire des digues ou autres systèmes de rétention des eaux saumâtres et quand les marées, les substrats et la composition chimique des eaux sont favorables, les prises de poissons et de crevettes peuvent être considérables. Mais cette aquiculture intensive en bassin fait courir les plus grands dangers à l'environnement, car les risques de pollution sont élevés en raison de l'emploi massif d'engrais, d'aliments et de produits antiparasites que cette technologie exige et les mangroves peuvent même disparaître totalement à la suite des coupes auxquelles il a fallu procéder pour aménager les bassins et construire les bâtiments, les voies d'accès, etc...

### 3. UTILISATIONS ACTUELLES DES MANGROVES DU SENEGAL ET DE LA GAMBIE

Les 2 activités dominantes sont l'agriculture et la pêche, avec, ces dernières années, un développement sensible du tourisme en Casamance.

#### A. ESTUAIRE DU SALOUM

L'activité dominante est ici, la pêche et pendant toute la saison sèche, les populations des îles "les Niominkas" émigrent très loin pour pêcher, en Gambie, en Casamance et même en Guinée Bissau, dans les Rivières du Sud.

Remarquables pêcheurs, les niominkas sont presque entièrement motorisés depuis 1970, grâce aux coopératives de pêcheurs et l'on retiendra que la pêche artisanale est l'un des secteurs de l'économie sénégalaise qui a remarquablement progressé ces dernières années. Par ailleurs, dans la plupart des villages, les femmes ramassent les coquillages sur les bancs de sable à marée basse pendant que les hommes sont à la pêche. Poissons et coquillages (huîtres et arches) sont séchés, salés et consommés en partie, le reste étant destiné à l'exportation.

Le travail de la terre qui n'a lieu qu'en hivernage est surtout consacré à la riziculture, mais la sursalure des terres limite considérablement les potentialités agricoles, la pluviométrie étant largement

insuffisante pour dessaler les sols.

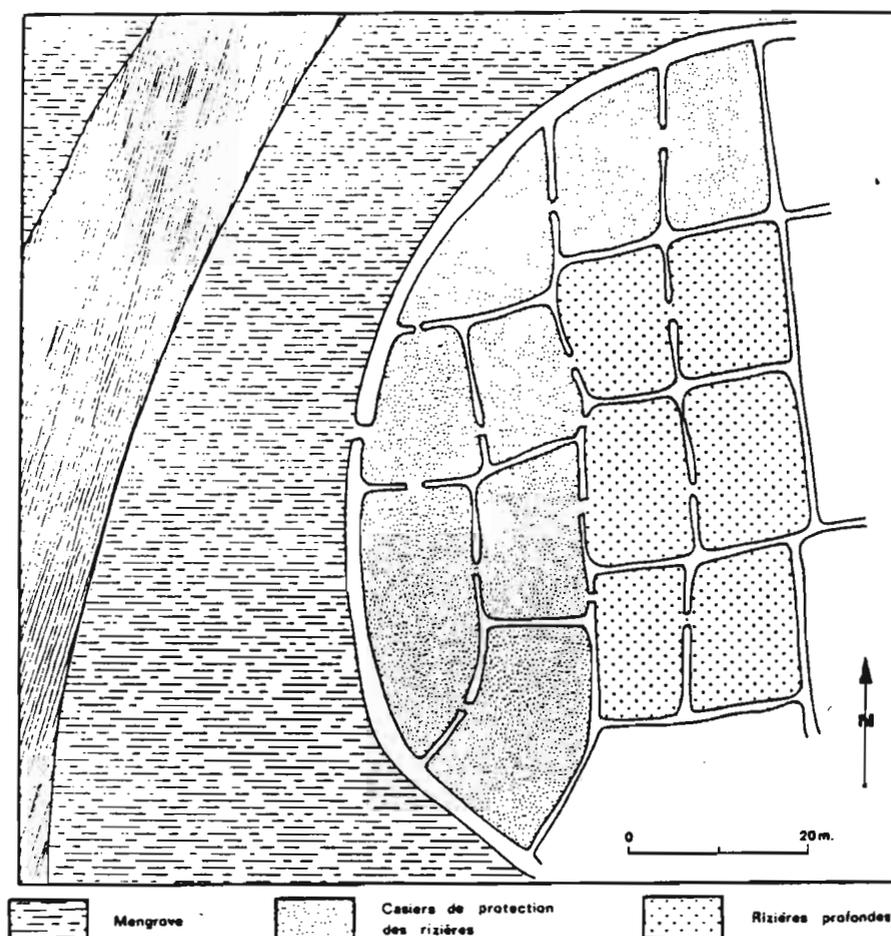
Par ailleurs, les "Iles du Saloum" sont un attrait touristique certain et sont dénommées, à juste titre "La Polynésie du Sénégal", mais leur enclavement et surtout l'absence d'eau douce ont limité jusqu'à présent les grands projets de développement touristique de cette région.

Enfin l'extraction du sel constitue l'une des activités importantes de cette région. Elle s'effectue soit par les méthodes artisanales, dans les tannes vifs, soit par les méthodes industrielles par les Salins du Midi, à Kaolack.

#### B. ESTUAIRE DE LA CASAMANCE

L'activité dominante est ici, de loin, la riziculture, bien que ces dernières années, la pêche et surtout celle de la crevette, ait pris un certain essor, ainsi que le tourisme. Médiocres pêcheurs, les populations locales, les Diolas sont d'excellents riziculteurs, certainement les meilleurs du continent africain, compte tenu des difficultés considérables que présentent ces sols pour leur utilisation.

Les techniques de cette riziculture "diola" ont été remarquablement bien étudiées par PELISSIER (1966) dans "les Paysans du Sénégal" et voici comment cet auteur décrit le schéma d'aménagement des rizières de mangroves qu'on désigne couramment "les rizières profondes" (fig. 72).



- Fig. 72 - Aménagement des "rizières profondes" de la Basse Casamance (PELISSIER, 1966)

L'aménagement de telles rizières, implique un travail considérable, parfois collectif, toujours étalé sur plusieurs années. Il entraîne la transformation en véritables polders de zones inondables par l'eau de mer. Il représente une authentique conquête de sols cultivable, conquête exigeant de la part de l'homme une connaissance précise des sols de mangroves et des marées, et la disposition de techniques assez savantes pour maîtriser celles-ci et transformer ceux-là.

Ces rizières profondes sont établies sur des emplacements occupés à l'état naturel, par la mangrove et non pas, ou très rarement, sur les tannes.

Le périmètre choisi pour être transformé en rizière est d'abord ceinturé par une digue puissante destinée à l'isoler du reste de la mangrove et à interdire ou, au moins, contrôler l'invasion du flot de marée. C'est en effet dans la zone soumise au jeu des marées, par conséquent découverte aux basses eaux, que sont toujours établies les rizières profondes. Cette digue atteint au moins un mètre d'élévation et a souvent la même largeur à sa base ; elle est nécessairement plus haute que le niveau des plus fortes marées et doit être assez robuste pour résister à leur pression. Son épaisseur dépend essentiellement de la situation de la rizière si celle-ci est au contact direct d'un marigot parcouru par les courants, elle doit être protégée par une digue plus large et plus puissante que si elle est établie à l'intérieur de la mangrove où la pression des marées est amortie par la végétation. En général, les paysans ont la prudence d'élever les digues périphériques à une vingtaine de centimètres au-dessus du niveau des plus hautes marées. De loint en loint les digues sont traversées par des drains mettant en communication rizière et marigot ; leur rôle est de permettre tantôt l'évacuation à marée basse de l'eau retenue dans la rizière, tantôt l'entrée, à marée montante, de l'eau du marigot à l'intérieur du périmètre endigué. Ces drains sont généralement établis au pied de la digue ; d'autres à mi-hauteur ; parfois - ce système se rencontre fréquemment dans les rizières de la Pointe-Saint-Georges - trois drains voisins sont superposés ; le plus bas n'est alors utilisé que pour vider complètement la rizière, le second sert à régler la hauteur de l'eau pendant les pluies, le troisième n'est fermé qu'à l'époque où l'eau peut sans inconvénient s'accumuler dans la rizière. Ces drains sont généralement des troncs évidés de palmiers-roniers, noyés dans la terre au moment de la construction de la digue ; tout bois creux peut en faire office, par exemple la carcasse d'une vieille pirogue. Un bouchon de fibres de palmier ou de feuilles de bananier calmaté d'argile sert à obstruer le drain. Certains paysans sont assez ingénieux pour établir un système automatique de fermeture et d'ouverture du bouchon lorsque le drain fonctionne à sens unique. Le bouchon, placé par exemple à l'orifice extérieur du tuyau de ronier, est attaché de telle sorte qu'à marée descendante la pression de l'eau contenue dans la rizière le repousse et ouvre le drain tandis qu'à marée montante, au contraire, l'eau du marigot applique le bouchon sur le tuyau et rebouche automatiquement celle-ci. Le long de certains marigots où la marée est moins forte que dans l'estuaire proprement dit, ces drains n'existent pas mais sont remplacés par des coupures établies de loin en loin dans la digue, coupures qui sont obstruées par un fascinage colmaté de terre à l'époque des cultures ; on maintient cependant à ce moment, au-dessus du niveau des marées hautes, au sommet des fascines, une échancrure en forme de déversoir destinée à assurer le passage des eaux en excédent.

Les mottes de vase empilées qui forment les remparts extérieurs des rizières profondes, sont souvent empruntées à leurs pieds, de sorte qu'ils

dominant alors un fossé de profondeur sensiblement égale à leur propre hauteur. Ce fossé, situé tantôt à l'extérieur, tantôt à l'intérieur du périmètre endigué, sert de canal facilitant le drainage de la rizière.

Dans la plupart des cas observés, les digues périphériques prennent appui vers l'amont soit sur une autre digue de rizière profonde antérieurement établie soit sur les levées de terre ceinturant les plus basses rizières non salées qui arrivent souvent jusqu'au bord de la mangrove. Aussi n'y a-t-il fréquemment aucune solution de continuité entre rizières établies sur sols salés et sur sols non salés et est-il difficile de préciser les limites exactes qu'atteignait la mangrove avant le défrichement ; il y a même automatiquement continuité entre les deux types de rizières chaque fois qu'aucune étendue notable de tanne ne sépare les unes des autres, c'est-à-dire lorsque la vase vient au contact direct des langues de sable de l'estuaire ou des alluvions cultivables des vallées.

Après la construction de la digue extérieure qui interdit la venue de l'eau à marée haute, on procède au défrichement du périmètre ainsi asséché. Le peuplement de palétuviers doit être complètement détruit ; les arbustes, attaqués à quelques décimètres au-dessus du niveau du sol, sont abattus au coupe-coupe ou à la hache ; leur bois mis en fagots est soigneusement récupéré et transporté par les femmes au village où il sert comme bois de feu ou pour la construction des maisons. Il faut ensuite dessoucher soigneusement le défrichement, extirper de la vase gluante toutes les racines de la mangrove qui sont mises en tas, séchées et brûlées. Ces deux opérations, abattage des palétuviers et enlèvement de leurs racines ne peuvent pas être effectuées pendant les pluies et occupent fréquemment plusieurs saisons sèches consécutives.

Dans les hivernages intermédiaires, on commence à dessaler le sol en fermant les drains au moment des pluies ; l'eau douce séjourne alors sous le défrichement et dissout les sels contenus dans les sols ; de temps à autre, à la faveur d'une marée basse accentuée, on ouvre les drains et l'eau chargée de sels est évacuée vers le marigot.

Lorsqu'elle est totalement nettoyée de toute végétation naturelle, deux ou trois ans après le début du défrichement, la future rizière subit un profond labour. La couche superficielle de vase est découpée par plaques et retournée au kayendo\* mais le labour ne s'effectue pas à plat ; des banquettes d'une largeur qui peut atteindre un mètre, séparées entre elles par d'étroits et profonds fossés, sont édifiées dans la rizière ; par suite du creusement des fossés dont la terre est rejetée sur les banquettes, celles-ci sont un peu plus élevées que le niveau du défrichement avant le labour.

---

\* Le "kayendo" est une longue pelle oblongue (pl. XII) tranchante à son extrémité (légèrement concave dans le sens longitudinal et dont la largeur et la coupe transversale varient selon la nature du terrain auquel on le destine) faite de caillcedrat ; la pelle du kayendo est d'autant plus large et aplatie que les sols à labourer sont légers et sableux et d'autant plus étroite et incurvée que les sols sont lourds.

En général, au moment du premier labour et du pénible travail d'édification des banquettes, le sols, protégé contre l'invasion du flot de marée depuis la construction de la digue périphérique, est totalement desséché et sa surface forme une croûte compacte, véritable ciment argileux craquelé par les fentes de retrait, inattaquable au kayendo. On ouvre alors les drains ou l'on procède à une coupure dans la digue pour permettre l'invasion du défrichement par l'eau du marigot pendant quelques marées. Le sol humide est alors plus aisément labourable. Lorsque la rizière est entièrement aménagée, elle n'est pas immédiatement cultivable. Pendant plusieurs hivernages consécutifs il faut procéder au dessalement du sols qui est alors systématiquement et littéralement lavé par les eaux de pluie. Le procédé employé consiste à interdire complètement l'accès du polder aux eaux marines ; les eaux de pluie et de ruissellement inondent alors la rizière, se chargent de sels et s'accumulent dans les fossés et les canaux de drainage. Lorsque le niveau de l'eau dans la rizière est jugé suffisant et menace par exemple de submerger les billons, les drains sont ouverts à marée basse et l'eau est évacuée ; pendant l'hivernage, les eaux de pluie sont ainsi périodiquement éliminées du défrichement après avoir filtré à travers les billons et s'être chargées des sels qu'ils contenaient. C'est naturellement la couche superficielle des billons, celle qui reçoit directement la pluie, qui est la première et la plus totalement dessalée tandis que les sels s'accumulent dans les couches profondes et sur les parois des fossés ; ces sels entraînés en profondeur par l'eau filtrant du sommet des banquettes, restent un danger pour la rizière ; en saison sèche ils peuvent envahir à nouveau l'horizon superficiel sous l'effet de l'évaporation qui provoque la remontée par capillarité de solutions issues des couches profondes toujours humides. Aussi est-il fréquent que des rizières profondes, déjà cultivées depuis plusieurs années, soient à nouveau envahies en surface par les sels en saison sèche et doivent subir un lavage systématique durant les premières semaines d'hivernage ; les premières pluies sont alors évacuées et les drains ne sont obstrués qu'un mois ou deux après le déclenchement des tornades, ce qui est rendu possible par deux facteurs : d'une part ces rizières profondes étant les plus humides et les plus facilement inondées, il n'est pas indispensable d'y emmagasiner les premières chutes d'eau ; d'autre part c'est dans ces rizières que le repiquage du riz est le plus tardif.

La conquête des sols de mangroves et leur aménagement en rizières se déroulent dans toute la Basse Casamance selon le schéma qui vient d'être décrit. Cependant il est possible d'enregistrer dans la plupart des villages des particularités qui tiennent soit à des habitudes propres issues de l'isolement soit à des difficultés nées des conditions locales du milieu. Dans tous les villages établis le long de la Casamance et des marigots les plus proches de l'estuaire, les rizières profondes doivent être protégées contre les courants de marée qui peuvent prendre une force considérable, en particulier au moment des grosses tornades d'hivernage. D'une part, on ne défriche jamais jusqu'au bord de la rivière ou du marigot afin de laisser un rideau de palétuviers sur le front des rizières pour couper le courant et amortir la pression du flot. D'autre part, dans les secteurs les plus exposés, la mangrove est compartimentée par les digues prolongeant vers l'aval celles qui ceignent les rizières proprement dites ; en somme, les périmètres où la végétation naturelle est tantôt respectée tantôt émondée, semblables à des rizières profondes inachevées, servent de cloison entre les parcelles cultivables et la mangrove vierge. Ces casiers sont munis de drains comme s'ils étaient cultivés, ce qui permet d'évacuer l'eau en excédent des rizières situées

à l'amont et les rend accessoirement utilisables comme viviers à poissons. Dans l'estuaire, où l'amplitude des marées et la force des courants sont maxima et où les tornades peuvent déclencher de sérieuses tempêtes aux vagues redoutables, toutes les rizières établies à la périphérie des îles sont ainsi protégées par un rideau de mangrove et de casiers incultivés, appelés Kagnala à Niomoum, enserrés par de puissantes digues.

Il en est de même au long des larges marigots qui bordent la Pointe-Siant-Georges ; Kagnout, par exemple, les rizières profondes ou kohint sont protégées vers l'aval par au moins deux casiers non défrichés nommés bouit ; si le défrichement progresse vers les rives du marigot, de nouveaux bouit sont établis dans la mangrove jusqu'alors vierge tandis que les casiers qui en faisaient office sont défrichés, dessalés et transformés à leur tour en kohint.

En remontant vers l'amont, les courants deviennent moins violents, les tempêtes moins redoutables et ce système de protection des défrichements profonds disparaît progressivement. Avant que les rizières atteignent les rives des marigots, il existe une zone intermédiaire où l'écran protecteur se réduit soit à une frange de palétuviers soit à un casier incultivé.

Il faut ajouter que les diolas cultivent aussi du riz dans tous les fonds de vallées, situés en amont des zones influencées par la marée et les bordures plus ou moins colluviales du Continental Terminal, de part et d'autre de la mangrove. Ces zones sont alimentées par les pluies en hivernage et par l'écoulement de la nappe du C.T.

Ces zones, dénommées "rizières douces" ont des surfaces très réduites par rapport aux rizières profondes. Ces dernières années, les diolas se sont aussi lancés dans la riziculture des tannes : tannes herbacés, en premier lieu, mais aussi les tannes vifs. La technique de mise en valeur des tannes est la suivante : confection de billons et d'une diguette pour ceinturer la zone à cultiver. On attend ensuite quelques années pour que les pluies dessalent et désacidifient la surface du sol. La culture du riz est ensuite possible, sans gros inconvénients surtout dans les tannes argileux.

Malgré certains inconvénients : lenteur de la dessalinisation des sols, risque de ressalinisation au cours des années sèches et absence d'un réseau de drainage superficiel pour accélérer la dessalinisation de la partie superficielle des sols et pour maîtriser les inondations cette technique est encore la meilleure pour les tannes comme le confirme l'exemple d'un aménagement de ce type à Tobor qui continue à donner de très bons résultats, à côté d'un aménagement ILACO qui, lui a dû être définitivement abandonné.

Dans tous les cas, on constate que le succès de la riziculture diola est, en grande partie, lié à une pluviométrie normale permettant le dessalement des sols et des marigots. Or, la sécheresse de ces dernières années a souvent rendu aléatoire et parfois réduit à néant la production rizicole de la Basse Casamance.

### C. ESTUAIRE DE LA GAMBIE

La riziculture traditionnelle pose moins de problèmes qu'en Casamance, le fleuve étant dessalé pendant plus de 6 mois. La mangrove est endiguée et la riziculture se fait à plat, avec un drainage très super-

ficiel. Il est intéressant de noter la présence de nombreux bouquets de *Rhizophora* au milieu des rizières pendant l'hivernage (pl. XII) alors qu'en fin de saison sèche, elles sont recouvertes d'un tapis uniforme de *Sesuvium portulacastrum*.

#### 4. AMENAGEMENT DES MANGROVES DE LA CASAMANCE

Dès les premiers jours de l'Indépendance, le gouvernement sénégalais avait élaboré un programme d'aménagement hydro-agricole de la Casamance et les premières études ont été effectuées par le GERCA en 1963. Deux périodes se distinguent nettement dans les projets d'aménagements de la Basse Casamance. La période 1963-1975 que l'on pourrait qualifier la période "ILACO" du nom de la société qui a effectué toutes les études et démarré une partie des travaux. Il s'agit de International Land Consultants et la période post ILACO qui commence en 1975 et au cours de laquelle nous avons participé activement à l'élaboration des projets d'aménagements et à une partie des études pédologiques. Nous passerons brièvement en revue ces 2 périodes, après avoir, au préalable indiqué le principe qui a guidé ces projets.

##### A. PRINCIPE

L'idée de départ a été qu'on disposait de grandes surfaces vierges de mangroves en bordure des affluents de la Casamance et que l'aménagement de ces terres pour la riziculture ne se heurtait pas à des problèmes fonciers comme c'était le cas pour les rizières douces.

Les aménagements envisagés consistaient à maîtriser la salinité des eaux et des sols grâce à la construction de digues et barrages anti-sels et à un drainage des sols de manière à les dessaler. Une digue en terre, barre le lit majeur du marigot au dessus du niveau des plus hautes eaux. Sur le lit mineur est construit un "barrage clapet" en béton, muni de portes battantes en bois qui permet l'évacuation des eaux d'amont (donc le dessalement des terres d'amont) et s'oppose à l'invasion du marigot par les eaux marines d'aval. En empêchant pendant tout l'hivernage le mélange des eaux de pluies avec les eaux marines d'aval, le barrage assure une meilleure efficacité du lessivage naturel et donc un dessalement plus précoce.

*Après la fin de l'hivernage, il s'oppose au reflux des eaux marines dans les marigots.* En outre, le marigot bénéficie d'apports complémentaires d'eau douce grâce au drainage de la nappe du Continental Terminal (fig. 73). Le barrage empêchant le mélange des eaux douces et des eaux marines, le lit majeur pouvait être cultivé en riz pendant une période suffisamment longue pour que la production rizicole devienne sûre.

Comme on peut le constater, tout avait été axé sur le *dessalement* des terres et rien n'avait été prévu pour lutter contre l'*acidification* éventuelle de ces sols.

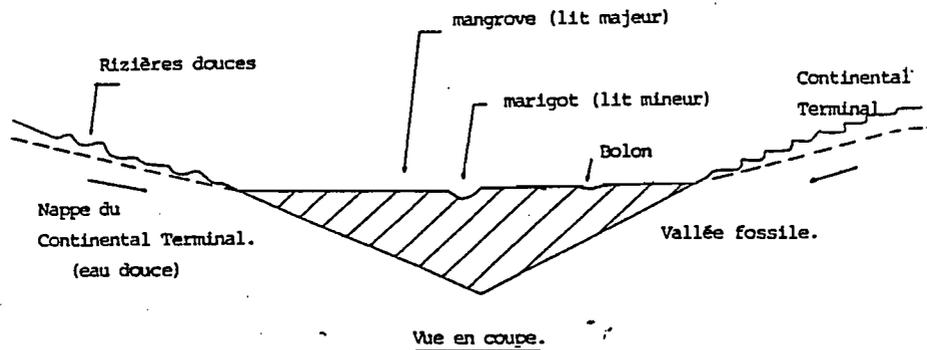


Fig. 73 - Principe de l'Aménagement des vallées affluentes de la Casamance - Vue en coupè

### B. PERIODE ILACO

La société ILACO a axé ses travaux sur 2 vallées : la vallée de Guidel, située sur la rive gauche de la Casamance, en amont de Ziguinchor, et sur la vallée de Nyassia, bras principal du Kamobeul bolon. Elle a effectué l'étude complète du milieu naturel de ces 2 vallées et élaboré les projets de barrages. Parallèlement, elle a réalisé des études et quelques petits aménagements dans les vallées de Baïla, Bignona, Soun-grougrou et Tobor. Les problèmes de dessalement et d'acidification ont été étudiés dans 2 polders expérimentaux : Medina et N'Dieba par G. BEYE (1972, 1973, 1975). La note explicative accompagnant la carte des sols au 1/20 000<sup>e</sup> de Guidel, de l'ILACO montre que la majeure partie de la partie aval de la vallée était recouverte d'une mangrove mixte à Rh. mangle et Avicennia et 3 grandes unités de sols ont été distinguées : les sols sur Continental Terminal, les sols de transition (50 cm de sédiments marins sur C.T.) et les sédiments marins formés de sols de mangroves et de tannes l'ILACO concluait son étude en ces termes : "Les sols des mangroves sont très aptes à l'aménagement des rizières, à cause de leurs fortes teneurs en matières organiques ..." "La crainte autrefois exprimée que le pH des sols de mangroves serait très bas, après dessèchement ne s'est pas réalisée. Les pH s'abaissent jusqu'à 3,9 en moyenne (5 en moyenne) et par humidification, par eau douce, remontent de nouveau (5,5 - 6) pour que la riziculture soit possible". Plusieurs centaines d'hectares de mangroves ont ainsi été aménagées, notamment avec des canaux de drainage profonds, pour lessiver les sels.

On notera que dans toutes ces études préliminaires, tant pour Nyassia que pour Guidel, les teneurs en Soufre des sols n'ont pas été évaluées. Le résultat le plus immédiat et le plus spectaculaire de ces aménagements a été une baisse rapide et importante du pH. Dans les parcelles aménagées de Tobor, nous avons relevé en 1972 un pH de 2,5 qui ne s'est jamais relevé. Si on ajoute à cela une sursalure généralisée des sols et des eaux résultant des années de grande sécheresse (1972-1973), on comprendra aisément que la plupart de ces aménagements aient dû être abandonnés.

### C. PERIODE POST-ILACO

Elle démarre vers 1976 avec l'établissement, par la Direction de l'Équipement Rural du Sénégal, des projets d'aménagements rizicoles de tous les marigots (bolons) de la Basse Casamance.

Nous avons collaboré activement, d'une part, à l'élaboration des termes de références pour la partie pédologique des projets, d'autre part à la prospection et à la cartographie de 2 marigots (Baïla et Guidel). A l'exception du marigot de Bignona, étudié par une mission " chinoise, pour lequel nous ne disposons d'aucune donnée, toutes les autres vallées ont été cartographiées au 1/20 000<sup>e</sup>, grâce à une couverture photographique aérienne infra-rouge, de la même échelle. Les travaux ont été réalisés par DAFFE et TOUJAN (1980) pour le Soungrougrou, par BROUWERS (1980) pour le Kamobeul, par AUBRUN et MARIUS (1980) pour Baïla et par MARIUS et CHEVAL (1980) pour Guidel. La comparaison des photos I.R.C. récentes (78-79) avec celles de 1969 confirme de manière claire nos observations sur la séquence de Balingore, notamment la disparition massive de la mangrove à palétuviers réduite généralement à un mince rideau en bordure des marigots et l'extension considérable de la mangrove décadente et des tannes à moquette aux dépens de la mangrove mixte à Rh. mangle et Av. africana.

Par ailleurs, dans toutes les zones aménagées par l'ILACO et abandonnées (Guidel, Kamobeul) on observe une importante reprise d'Avicennia sur un tapis dense de Sesuvium portulacastrum et au terme de notre étude de la vallée de Guidel, nous avons pu conclure que : "Les effets conjugués de la sécheresse et des aménagements ont provoqué une importante transformation des 40 - 50 cm superficiels. Il y a eu tassement, baisse du taux de matière organique - mieux évoluée - acidification modérée et baisse du taux de soufre en surface. En revanche il y a eu une augmentation considérable de la salinité des sols et des nappes. Mais on notera que dans l'ensemble, l'évolution de ces sols a été moins catastrophique qu'on aurait pu le penser, et que, somme toute, la sécheresse n'a fait qu'accélérer une évolution naturelle de ces sols, parce que non provoquée par l'homme. Ils sont donc en voie de "tannification". En conclusion, tous les projets d'aménagements de ces vallées doivent résoudre les contraintes liées à la salinité, d'une part et à l'acidité, d'autre part".

#### *a) Contraintes liées à la salinité*

Le riz aquatique et notamment le riz prégermé supporte des salinités relativement élevées et surtout n'exige pour pouvoir être repiqué, qu'un dessalement assez peu profond, d'environ 10 à 20 cm. BROUWERS (1980) a calculé les quantités d'eau douce nécessaires, en mm, pour ramener la salinité du sol au seuil de tolérance pour le riz. (tabl. LVIX ). On constate, d'après ce tableau, que le riz peut être repiqué après un excédent hydrique de 300 à 500 mm si le seuil de tolérance au sel est de 5 mmhos et après 250 à 500 mm si ce seuil est de 7,5 mmhos. Or ces conditions sont réalisées entre le début et la mi-Août, les années normales et entre mi et fin Août les années sèches, et l'on remarquera, que de manière empirique, les populations locales repiquaient le riz vers la fin Août. Par ailleurs, dans le cas de sols très salés, il est souhaitable de démarrer le lessivage des sels avec l'eau des marées de vives-eaux, en hivernage, pour éviter une floculation brutale des vases et donc leur imperméabilisation, mais en tout état de cause, la confrontation des données du tableau, avec les données climatiques montre que si le dessalement annuel de terres même très salées, peut être facilement réalisé, l'excédent hydrique n'est cependant pas suffisant pour assurer le cycle de croissance du riz jusqu'à son terme, notamment les années sèches et qu'il manque environ 2 mois d'eau douce pour maintenir les sols dessalés.

---

\* L'étude pédologique du marigot de Bignona est prévue en 1984 par AUBRUN et MARIUS.

Tableau LVIX

## BESOINS EN EAU POUR DESSALER LES TERRES

(d'après BROUWERS, 1980)

Quantités d'eau douce nécessaires pour ramener la salinité du sol au seuil de tolérance pour le riz, en mm

a) Pour une profondeur de dessalage équivalente à 10 cm eau à H.S.

Seuil de tolérance (ECe en $\mu\text{mho}$ )	Type de sol (exprimé en % H.S.)				
	20	35	62	80	125
<u>Salinité initiale (EC<sub>10</sub>) : 20 000 <math>\mu\text{mho}</math></u>					
5 000			550	500	450
7 500			500	450	400
12 000			450	400	350
<u>Salinité initiale (EC<sub>10</sub>) : 10 000 <math>\mu\text{mho}</math></u>					
5 000	600	500	450	400	350
7 500	550	450	400	350	300
12 000	500	400	350	300	250
<u>Salinité initiale (EC<sub>10</sub>) : 5 000 <math>\mu\text{mho}</math></u>					
5 000	500	450	350	350	300
7 500	450	400	300	300	250
12 000	400	350	250	200	150

b) Pour une profondeur de dessalage équivalente à 20 cm eau à H.S.

Seuil de tolérance (ECe en $\mu\text{mho}$ )	Type de sol (exprimé en % H.S.)				
	20	35	62	80	125
<u>Salinité initiale (EC<sub>10</sub>) : 20 000 <math>\mu\text{mho}</math></u>					
5 000			950	900	800
7 500			850	800	700
12 000			750	700	600
<u>Salinité initiale (EC<sub>10</sub>) : 10 000 <math>\mu\text{mho}</math></u>					
5 000	1050	900	800	750	650
7 500	950	750	700	650	550
12 000	900	700	600	550	450
<u>Salinité initiale (EC<sub>10</sub>) : 5 000 <math>\mu\text{mho}</math></u>					
5 000	900	800	650	600	500
7 500	800	700	550	500	400
12 000	700	600	450	400	300

H.S. humidité à saturation totale

En ce qui concerne le dessalement des sols par drainage, G. BEYE (1975) a établi le bilan de cinq années d'études de dessalement des sols du polder de Medina sur la vallée de Nyassia. Il constate un dessalement absolu pour tous les modes de drainage utilisés. Le dessalement de l'hivernage est essentiellement tributaire de la pluviométrie, seule source d'eau. Le resalement de saison sèche est général mais son intensité dépend du type de drainage. Le drainage par gravité avec fossés peu profonds communiquant directement avec le marigot en saison des pluies, joint à un assèchement en saison sèche, s'avère le plus favorable car il permet un dessalement suffisant pendant l'hivernage en année normale. Quand au dessalement par pompage il s'avère que le drainage le plus efficace est le drainage par fossés de 1 m de profondeur, avec 20 m d'écartement.

D'autres techniques comme le paillage ou le mulch peuvent favoriser aussi le dessalement (BEYE, 1973). A cet égard, on peut signaler que la présence d'un tapis épais de *Sesuvium* dans les zones aménagées est un facteur favorable pour le dessalement, car il limite l'évaporation pendant la saison sèche.

#### *b) Contraintes liées à l'acidité*

A l'état naturel, les sols de mangroves ont un pH voisin de 6 et on a vu que le drainage profond de ces sols avait conduit à une baisse brutale du pH allant jusqu'à 2,5 (Tobor). A Guidel, et dans la plupart des aménagements abandonnés, les 50 cm superficiels sont sulfaté-acides, avec de la jarosite, et un pH de l'ordre de 4. De même, la plupart des sols des tannes vifs ou herbacés ont un pH de 3,5 - 4. Mais dans tous les cas, ce sont des sols sulfaté-acides et les transformations chimiques qui se produisent dans ces sols, lorsqu'ils sont inondés pour la riziculture sont d'un intérêt particulier.

En effet, la réduction de ces sols à la suite de leur inondation provoque une augmentation rapide et importante de deux éléments toxiques pour le riz : le fer ferreux dissous et l'aluminium dissous. A des taux supérieurs à 300 - 400 p.p.m., le fer ferreux est toxique pour le riz, or des valeurs nettement plus élevées ont été signalées dans des sols sulfaté-acides, inondés et riches en matière organique.

A des pH inférieurs à 3,5 - 4, la toxicité aluminique affecte la croissance du riz, et inhibe totalement les effets des engrais azotés, phosphatés et calciques et il semble qu'en milieu salé les effets de ces 2 toxicités soient accrus par les taux de fer et d'aluminium, plus élevés, libérés dans la solution du sol (PONNAMPERUMA, 1976). VAN BREEMEN et PONS (1978) signalent que d'une manière générale, la toxicité ferrique est fréquente et très marquée dans les sols sulfaté-acides jeunes et beaucoup plus rare dans les sols développés (para-sulfaté-acides). En l'absence de toxicité aluminique et ferrique, les sols sulfaté-acides salés ont une déficience marquée en phosphore.

#### D. TECHNIQUES D'AMENAGEMENT ET DE MISE EN VALEUR DES SOLS DE MANGROVES DE BASSE CASAMANCE

Ces techniques doivent avoir pour objectifs de dessaler au mieux la partie superficielle de ces sols, tout en prévenant leur acidification et en ce qui concerne la Basse Casamance, 3 cas sont à envisager :

- Les sols de mangroves - potentiellement sulfaté-acides - non évolués.
- Les sols des zones aménagées de l'ILACO et des tannes, évolués en surface qui sont des sols sulfaté-acides jeunes.
- Les sols des tannes vifs, rarement atteints par les marées, à profils très développés mais dont les surfaces sont généralement limitées.

*Dans tous les cas, il faut chercher à limiter l'oxydation de la pyrite et essayer de freiner le développement de l'acidité existante en maintenant la nappe phréatique au dessus de l'horizon pyritique réduit et proche de la surface.*

*a) Les sols de mangroves, ne s'acidifiront pas tant qu'ils seront sous l'influence des marées. Il faut donc chercher à dessaler l'horizon superficiel et les techniques d'aménagement ne peuvent que s'inspirer des méthodes traditionnelles pour les améliorer en leur adjoignant notamment des réseaux de fossés peu profonds (30 - 50 cm) et peu espacés (20 - 25 m) dans lesquels pourrait circuler librement l'eau de la marée. Or, nous avons vu que le facteur limitant principal, résultant de la sécheresse de ces dernières années était le manque d'eau douce en fin d'hivernage pour permettre au riz de finir sa croissance. Et ce sera, à notre avis, la fonction essentielle des barrages prévus dans les différentes vallées.*

L'eau des marigots est généralement dessalée en Août et Septembre et elle doit circuler librement pour dessaler la partie superficielle des sols. En fin d'hivernage (Octobre - Novembre), le barrage serait fermé pour stocker l'eau douce et empêcher la remontée des eaux salées dans les rizières. Après la récolte du riz, le barrage serait réouvert pour permettre à l'eau de la marée de circuler à nouveau et neutraliser les produits acides éventuellement formés.

*b) Les sols sulfaté-acides jeunes*

Ce sont les sols les plus difficiles à récupérer, notamment quand l'acidification résulte d'un drainage artificiel. En effet, c'est dans ces sols que les phénomènes de réduction sont les plus intenses et que les taux de fer ferreux dissous sont les plus élevés, quand ils sont inondés. L'eau de la nappe est par ailleurs souvent acide. 2 voies sont possibles pour leur récupération :

- Un drainage profond et intensif avec lessivage massif des composés soufrés, de préférence avec de l'eau de mer pendant plusieurs années (5 - 10 ans, ou plus). Ils pourront être ensuite "poldérisés" de manière définitive, comme les sols de type (c), mais nécessiteront des amendements calciques importants pour relever le pH.
- Il faut essayer de limiter au maximum les effets de la toxicité ferrique en jouant simultanément avec l'eau de la marée pour relever le pH et une quantité suffisante d'eau douce pour que la plus grande partie du fer dissous puisse être, soit éliminé par la chasse tidale, soit précipité sous forme de sulfure insoluble et l'on revient aux sols de type (a).

*c) Les sols des tannes évolués*

Ils peuvent être "poldérisés" et, à terme, définitivement dessalés par un aménagement en casiers et réseaux de fossés. Pour empêcher leur resalini- sation par la nappe en saison sèche, diverses techniques peuvent être uti- lisées : paillage, avec la paille de riz restée après la récolte, pratique du mulch végétal, ou même couverture avec des espèces tolérantes au sel (*Paspalum*).

Ces techniques qui permettent de réduire fortement l'évaporation en saison sèche sont déjà utilisées par les populations locales, avec un certain succès (Baïla, Tobor) et elles présentent l'avantage de pouvoir être utilisées sur des surfaces réduites avec des moyens de terrassements simples.

*d) Morphodynamique actuelle et risques d'érosion*

Au plan morphodynamique, la Basse Casamance est une zone actuellement "stable" et les phénomènes d'érosion ou d'alluvionnement sont très limi- tés. L'examen des photos aériennes depuis 1954 montre que le cours des chenaux n'a pas changé. De même, le réseau des fossés creusés par l'ILACO dans les années 60 est encore intact. Les seules manifestations morpho- dynamiques observées sont :

- Les accumulations éoliennes, sous forme de "lunettes" dont l'extension est relativement importante, à mesure qu'on remonte vers le Nord (vallée de Baïla). Ces lunettes qui sont essentiellement sableuses sont souvent colonisées par une végétation halophyte herbacée et sont relativement étendues dans le cas de lunettes anciennes ; les plus petites quand elles se sont formées au cours de la décade sèche.
- Des entailles à rigoles d'érosion pluviale qui se forment au contact tanne vif - rizières abandonnées et tanne vif - bolon. Elles sont dues à une combinaison particulière de circonstances édaphiques, à savoir :
  - . dans le premier cas, ces entailles sont dues au resalage des terres, suite à l'absence d'entretien des diguettes qui les protégeaient contre les hautes marées d'hivernages, ce qui provoque la disper- sion de l'argile de l'horizon superficiel ;
  - . dans le second cas, c'est le dessalage sous l'effet des pluies qui fait perdre à la surface du sol sa cohésion.

En résumé, 3 facteurs contribuent à donner à la Basse Casamance sa stabilité morphodynamique actuelle :

- la grande platitude de la région ;
- la faible vitesse du courant dans les marigots ;
- l'aménagement traditionnel sous forme de petits casiers.

Tout aménagement ou modernisation de l'agriculture traditionnelle risque de rompre l'équilibre actuel et en ce qui concerne les mangroves, leur point faible se situe au niveau des berges qu'il faut protéger de l'éro- sion en maintenant une frange de palétuviers dont les racines assurent la cohésion du matériau. Il faut aussi éviter que les bateaux à moteur puis- sant et rapide empruntent les marigots pour que les vagues qu'ils provo- quent n'affouillent les berges.

## 5. CONCLUSIONS

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'oeuvre, charbon de bois, produits des palmiers, sans parler d'espèces de poissons nombreuses et très appréciées. 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 populations 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 potentialité,

- *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.

## CONCLUSIONS GENERALES

Situées à la limite du continent et de l'océan, d'une part, et à la limite septentrionale du littoral ouest africain, d'autre part, les mangroves du Sénégal et de la Gambie présentent de nombreuses originalités par rapport à la plupart des mangroves tropicales.

Alors que la mangrove de Gambie se développe dans un véritable estuaire où l'influence des eaux douces venant de l'amont neutralise de façon sensible l'influence de la mer, les mangroves de Casamance et du Saloum sont localisées dans des bras de mer où prédomine de manière presque exclusive l'influence de la mer. *Ce sont donc des mangroves d'eau salée marine*, alors que la plupart des mangroves tropicales sont des mangroves d'eau douce ou d'eau saumâtre.

Par ailleurs, ces mangroves se sont développées, à l'arrière de cordons littoraux, dans des milieux tidaux à nombreux chenaux de marée, très disséqués, dans lesquels la sédimentation est faible et sous un climat tropical à saison sèche marquée. Il en résulte que le milieu est plus ou moins évaporitique et caractérisé par la présence en arrière des formations à palétuviers et dans les zones supratidales non atteintes par les marées quotidiennes, de formations nues ou recouvertes d'une végétation herbacée halophyte : les tannes "vifs" ou "herbacés".

L'étude de la répartition des espèces végétales montre que de loin, c'est *Rhizophora mangle* qui est l'espèce dominante et l'on peut dire que les mangroves du Sénégal et de la Gambie sont *des mangroves à Rhizophora mangle*. Cette végétation présente une zonation caractéristique liée au gradient croissant de la salinité et qui est, grosso modo, la suivante : *Rhizophora racemosa* - *Rh. mangle* - *Paspalum* - *Scirpus* - *Eleocharis*, *Avicennia* - *Sesuvium*.

Mangroves et tannes se différencient par la périodicité et la durée d'inondation par la marée et aussi par les formes d'accumulations superficielles.

La mangrove est la zone quotidiennement inondée par les marées et caractérisée par la présence en surface de *Tympanotonus fuscatus*.

Le tanne inondé qui caractérisait surtout la mangrove du Saloum avant la sécheresse est la zone "mouillée" par les marées quotidiennes et exondée aux périodes de grandes marées basses (Janvier-Février). Il est caractérisé par un tapis algaire et de nombreux trous de crabes.

Le tanne vif n'est inondé qu'aux marées exceptionnelles et caractérisé par les efflorescences salines, les croûtes et du pseudo-sable (moquette).

Le sédiment sur lequel se développe la mangrove présente une granulométrie variable, d'un estuaire à un autre. En grande partie sableuse dans le Saloum elle est argileuse en Gambie et dans les zones internes de la Casamance, alors qu'à l'embouchure de la Casamance et dans le Kamobeul bolon, elle est hétérogène.

Ces différences de granulométrie ont un rôle important dans l'installation et le développement de la mangrove d'une part, et dans la "maturation" des caractères physiques et chimiques, d'autre part.

En effet, la mangrove s'installe et se développe plus rapidement et mieux sur la vase argileuse que sur la vase sableuse, d'où l'extension plus importante des slikkes dans le Saloum qu'en Casamance. Par ailleurs, le matériau sableux étant plus filtrant que le matériau argileux, la circulation latérale des eaux salées du marigot ou verticale des eaux pluviales est plus facile dans le Saloum qu'en Casamance, mais dans l'ensemble et par suite d'une macroporosité élevée due au système racinaire des Rhizophoras et à l'activité des crabes, la perméabilité des sols de mangroves est, en général, assez élevée permettant ainsi à la marée de faire sentir son influence très loin, freinant ainsi en partie les effets de l'évapotranspiration potentielle.

Enfin, la présence d'une nappe phréatique permanente confère à ces sols une teneur en eau élevée, une densité apparente faible et une consistance peu développée ; autant de caractères indiquant une maturation physique faible.

Du point de vue morphologique, le développement des profils se manifeste essentiellement par l'apparition d'un horizon de couleur "purée de marron" et à consistance "de beurre", lié à la décomposition des amas fibreux et par la présence de taches de jarosite résultant de l'oxydation de la pyrite dans les horizons superficiels des tannes vifs, mais, dans l'ensemble, les *profils* sont peu évolués.

Du point de vue chimique, les deux caractères dominants des sols de mangroves du Sénégal sont l'acidité potentielle et la salinité, l'un étant lié au stock relativement important de soufre et l'autre à l'influence de la mer. *Les sols de mangroves au Sénégal, sont tous potentiellement acides et salés.*

- Le caractère d'acidité potentielle est à relier principalement à la végétation à dominance de Rhizophora et dont le système racinaire constitue un véritable piège à stocker les pyrites, toutes les conditions favorables à la formation de ces pyrites étant, par ailleurs, réunies : abondance de sulfates fournis par l'eau de mer et de fer fourni par le bassin versant, milieu réduit riche en matière organique et en bactéries sulfato-réductrices.

- Sauf dans le cas d'un aménagement mal conduit de ces sols, provoquant une oxydation brutale des sulfures et une baisse considérable du pH, l'oxydation naturelle de la pyrite dans les horizons superficiels des tannes ne provoque pas nécessairement une chute importante du pH, et la jarosite, principal produit d'oxydation de la pyrite, semble être stable dans des milieux moins acides et moins oxydants que ceux que lui assignent les diagrammes de stabilité Eh-pH.

L'étude des relations entre le pH et le soufre total d'une part, et les différents composés du soufre, d'autre part, montre que la meilleure corrélation s'établit entre le pH et les sulfates solubles.

Le caractère salé des sols est essentiellement lié à l'eau de mer qui inonde la mangrove ou qui circule dans la nappe phréatique jusqu'au tanne. Il est principalement chloruré sodique, donc neutre et même acide dans le tanne par suite du contact avec les produits d'oxydation de la pyrite. Alors que dans tout le domaine de la mangrove, le déplacement de la nappe se fait latéralement du marigot à la mangrove et retour au marigot, dans le tanne le déplacement de la nappe est vertical. C'est aussi au caractère salé qu'il faut attribuer l'individualisation du tanne par suite de la concentration sur place des sels - et principalement de la halite - provenant de l'évaporation de l'eau de mer, arrivée là aux grandes marées. *Une fois individualisé, le fonctionnement du tanne est en grande partie indépendant de celui de la mangrove* d'où la présence de ces grandes zones - nues aujourd'hui - mais généralement recouvertes d'espèces halophytes avant la sécheresse que sont, par exemple le Bao Bolon, défluent de la Gambie, ou le Khant, le N'diael, le N'diasseou ..., dans le delta du Sénégal. Ce sont autant de tannes herbacés devenus vifs, sous l'influence de la sécheresse climatique actuelle. En effet, l'étude des effets de cette sécheresse depuis 15 ans montre que :

- au cours de cette période, toutes les années, ou presque, ont été déficitaires du point de vue pluviométrique, avec trois années "catastrophiques" (1972, 1977, 1983), ce qui laisse supposer que *la sécheresse serait désormais plutôt chose normale avec des "crises" d'aridité climatique.*
- Cependant, les conséquences de cette sécheresse sur l'écologie des mangroves au Sénégal sont très différentes selon les estuaires et l'on retiendra que c'est la mangrove de la Casamance qui a été, de loin, la plus atteinte par cette sécheresse alors que celle du Saloum n'a pratiquement pas été touchée et à l'heure actuelle la mangrove à palétuviers est mieux développée dans le Saloum qu'en Casamance où en de maints endroits, le paysage est comparable à celui du delta du Sénégal. A quoi attribuer cette différence ?
- D'une part, à la répartition de la pluviométrie qui n'a pas changé dans le Saloum, où il pleut toujours pendant trois mois, alors qu'en Casamance, le nombre de mois pluvieux est passé de cinq à trois, avec parfois un mois d'Août sec et donc un bilan hydrique fortement déficitaire ;
- d'autre part, à la nature du matériau sableux et donc filtrant, dans le Saloum qui favorise une évacuation rapide des sels vers le marigot, alors que dans le matériau argileux, imperméable de Casamance, les sels se concentrent et s'accumulent sur place provoquant une sursalure des nappes en saison sèche. Par ailleurs, le lessivage par les pluies des sels accumulés en surface (croûte, moquette) conduit généralement à une augmentation de la salinité du fleuve et de ses affluents en début d'hivernage et en l'absence d'une pluviométrie normale, le front de salinité remonte très loin dans les marigots au point que l'affluent principal : le Soungrougrou, ne se dessale pas du tout.

Les conséquences de cette sécheresse se manifestent :

- d'une part, *sur les sols*, par le développement d'un horizon, à taches brunes ou "purée de marron", par l'approfondissement des horizons à jarosite, par la silicification des racines de palétuviers et surtout par la présence généralisée du gypse, soit en surface, soit au sein des profils, depuis 1972 ;

- d'autre part, *sur la végétation*, où l'on observe une diminution spectaculaire de la zone à *Rhizophora mangle* au profit d'une mangrove décadente ou d'un tapis à *Sesuvium*, ainsi que le développement considérable des tannes vifs aux dépens des tannes herbacés.

Ces changements dramatiques dans les sols et dans la végétation provoqués par quelques années sèches montrent à quel point l'équilibre écologique de la mangrove est fragile. Des changements semblables ont dû se produire dans le passé, comme l'indiquent la présence des fibres de *Rhizophora* dans les profils, et la régénération d'*Avicennia* en peuplements purs à la suite d'une année pluviométrique normale peut aussi indiquer que ce palétuvier a remplacé *Rhizophora* à la suite d'un cycle de sécheresse. En tout état de cause, on peut s'attendre à ce qu'un nouvel équilibre naturel des sols et de la végétation puisse s'établir avec le temps et que notamment, l'acidité actuelle des sols diminue pendant les périodes sèches par suite de la neutralisation des acides libres par les solutions sursalées et, à la limite, le pH pourrait remonter jusqu'à des valeurs de l'ordre de 5 à 6.

Tout ceci indique aussi que les deux principaux caractères de ces sols : *acidité et salinité ne sont, en fin de compte, pas définitivement acquis et qu'ils sont donc transitoires*. Ce qui pose évidemment des problèmes pour leur classification qui elle aussi, ne peut être que provisoire et à l'heure actuelle c'est la classification américaine (Soil Taxonomy) qui est, à notre avis, la mieux adaptée pour ces sols.

Du point de vue géochimique le déséquilibre entre la mangrove et le tanne se manifeste par une augmentation relativement importante dans le tanne, d'une part, de la silice par suite de la dissolution, en partie du quartz, mais surtout des frustules de diatomées, d'autre part, du Magnésium par suite d'une transformation des argiles. En effet, il semble que dans le milieu hyper acide des tannes il y ait à la fois une altération des smectites en kaolinite et une néoformation des smectites par dissolution des diatomées.

Les tannes, zones nues associées aux mangroves, ne caractérisent pas uniquement les zones littorales tropicales à climats très contrastés et la séquence climatique des mangroves tropicales proposée par VIEILLEFON (1977) et MARIUS (1977) ne correspond plus tout à fait à la réalité. En effet, on trouve des tannes associés aux mangroves aussi bien en climat équatorial (Gabon) qu'en climat de mousson (Inde), dans des baies abritées à l'arrière de cordons, sans apport d'eau douce (Gabon), mais surtout dans un matériau argileux à smectite dominante.

Fruits de mer, sel marin et riz sont les principaux produits des mangroves du Sénégal et de la Gambie. Le relief plat des zones intertidales argileuses et la régularité des amplitudes de marée facilitent la construction de petits polders, de digues et de canaux ainsi que l'aménagement hydraulique dans les salines, les rizières et les bassins à poissons. Les palétuviers fournissent le bois nécessaire au chauffage et à la construction.

1500 mm de pluie, au moins, sont nécessaires pour une culture de riz. Aussi en Gambie et en Casamance, les conditions climatiques étaient elles favorables à la riziculture avant le cycle de sécheresse et les techniques traditionnelles d'aménagement hydraulique et les pratiques culturales étaient bien adaptées aux conditions naturelles jusqu'en 1972. Depuis, on se trouve dans une situation où, les disponibilités en eau douce ayant

considérablement diminué, l'acidité potentielle des sols est devenue un facteur limitant aussi important que l'hypersalinité.

Aussi, dans l'état actuel de nos connaissances sur la pédogenèse et la dynamique des sols de mangroves avons nous proposé quelques solutions techniques pour l'aménagement et la mise en valeur de ces sols. Ces solutions impliquent notamment une meilleure utilisation de l'eau douce disponible et un système de drainage beaucoup plus superficiel. Ces deux exigences peuvent être combinées avec une désalinisation des horizons superficiels (30 - 40 cm) et avec des pratiques culturales qui réduisent sensiblement la contamination des horizons superficiels par les sels, les acides et autres éléments toxiques provenant des horizons profonds.

Des systèmes d'irrigation et de drainage séparés pourraient améliorer une utilisation efficiente de l'eau. On peut utiliser de l'eau modérément salée pour lessiver les sels de sols très salés et le lessivage initial des horizons profonds hypersalés pourrait être réalisé avec de l'eau saumâtre ou même de l'eau de mer plutôt qu'avec de l'eau douce. L'eau de pluie ne devrait être utilisée que pour lessiver les sels des horizons superficiels comme dans le système traditionnel.

Enfin, tout doit être mis en oeuvre pour tirer le meilleur parti de cet écosystème - sans doute le plus riche des régions tropicales - mais aussi l'un des plus fragiles, par le développement de toutes les possibilités : agriculture, pêche, aquaculture, tourisme, etc...



## BIBLIOGRAPHIE

- ABEYWICKRAMA B.A. (1964) - The estuarine vegetation of Ceylon. Proc. Dacca Symp. 1964. UNESCO p. 206-210.
- A.F.E.S. - Sulphur Institute (1972) - Symposium International sur le Soufre en Agriculture. Versailles 3-4 déc. 1970. *Ann. Agro*, N° hors-série, 1972.
- ALLEN E.T., CRENSHAW J.S. et JOHNSON J. (1912) - The mineral sulphides of iron. *Amer. J. Sci.*, 33, p. 169-236.
- ALLEN G.P., LAURIER D. et THOUVENIN J. (1979) - Etude sédimentologique du delta de la Makakam. Notes et Mémoires n° 15. TOTAL. 155 p.
- ALTSCHULER Z.S., SCHNEPPE M.M., SILBER C.C. et SIMON F.O. (1983) - Sulfur diagenesis in Everglades. Peat and Origin of pyrite in Coal. *Science*. 221, p. 221-225.
- AMSON, F. van (1966) - Some aspects of clay soils in the Demerara formation of Suriname. Bull. Landb. proef station Suriname 84.
- ANDRIESSE J.P., BREEMEN N. van et BLOKHUIS W.A. (1973) - The influence of mudlobsters on the development of acid sulphate soils in mangrove swamps in Sarawak. in : Acid Sulphate soils - DOST (éd.) Publ. ILRI<sup>\*\*</sup> 18 - Wageningen, vol. II, p. 11-39.
- ARKESTEYN G.J.M.W. (1980) - Contribution of microorganisms to the oxidation of pyrite. These Ph. D. - Wageningen, 80 p.
- AUBERT G. et DUCHAUFOR Ph. (1956) - Projet de classification des sols. C.R. 6ème Congrès Intern. Sci. du Sol. Paris, p. 597-604.
- AUBREVILLE A. (1964) - Problème de la mangrove d'hier et d'aujourd'hui. *Adamsonia*, 4 (1) p. 19-23.
- AUBRUN A. et MARIUS C. (1980) - Programme de développement de la vallée de Baïla. Etude pédologique - ORGANISATION et ENVIRONNEMENT, Paris, 116 p., 6 cartes au 1/20.000e.
- AURIOL P.F. (1934) - Etudes sur les terres et les eaux alunées. *Bull. Econ. de l'Indochine*. Hanoi, p. 221-266.
- BADAUT D. (1981) - Néof ormation de smectites à partir de frustules de diatomées. Le cas des lacs salés de l'Altiplano de Bolivie. Thèse 3e cycle, U.L.P. Strasbourg. Octobre 1981, 73 p.
- BALTZER F. (1969) - Les formations végétales associées au delta de la Dumbea (Nouvelle Calédonie) et leurs indications écologiques, géomorphologiques et sédimentologiques mises en évidence par la cartographie. *Cah. ORSTOM*, série Géol. 1, p. 59-84.
- BALTZER F. (1982) - Géodynamique de la sédimentation et diagenèse précoce en domaine ultrabasique (Nouvelle Calédonie). *ORSTOM Trav. et Doc.*, 152, 283 p.

---

\*\* ILRI : Institute for Land Research and Improvement, P.O. Box 45, WAGENINGEN, PAYS-BAS.

- BALTZER F. et LAFOND L.R. (1971) - Marais maritimes tropicaux. *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.*, 13 (2), p. 173-196.
- BEATON J.D., BURNS G.R. et PLATOV J. (1968) - Determination of sulphur in Soils and Plant Material. The Sulphur Institute - Tech. Bull 14, 56 p.
- BEERS W.F.J. van (1962) - Acid Sulphate Soils. I.L.R.I. Wageningen, Bull. 3, 31 p.
- BEGHEIJN L. Th., BREEMEN N. van et VELTHORST E. (1978) - Analysis of sulfur compounds in Acid Sulfate soils and other recent marine soils. *Soil Science and Plant Analysis*, 9 (9), p. 873-882.
- BEMMELEN J.M. van (1886) - Bidrage lot de kennis van de alluviale bodem in Nederland. *Verhandelingen Academie Wetenschappen, Amsterdam*, 25 : 33.
- BERNARD H.A. et LEBLANC R.J. (1965) - Résumé of the Quaternary geology of the northwestern gulf of Mexico. The Quaternary of the U.S. Princeton, N. Jersey, Princeton Univ. Press VII INQUA Cong. p. 137-185.
- BERNER R.A. (1964) - Distribution and diagenesis of sulfur in some sediments from the Gulf of California. *Marine Geology*, 1, p. 117-140.
- BERNER R.A. (1970) - Sedimentary pyrite formation. *Amer. J. Sci.*, 268, p. 1-23.
- BERNER R.A. (1971) - Principles of chemical sedimentology. Mc Graw Hill, New York, 240 p.
- BERNER R.A. (1972) - Sulfate reduction, Pyrite formation and the Oceanic Sulfur Budget. *Nobel Symposium*, 20, p. 347-362.
- BESNUS Y. et MOSSER C. (1976) - Les groupes à intercorrélations positives, une méthode statistique pour déterminer la répartition des éléments chimiques entre les phases constitutives d'une roche. *C.R.A.S.*, 283, Série D, p. 587-590.
- BEYE G. (1973) - Une méthode simple de dessalement des sols de tanne de Casamance : le Paillage. *L'Agro. Trop.*, 5, p. 538-549.
- BEYE G. (1975) - Bilan de cinq années d'études du dessalement des sols du polder de Medina. *L'Agro. Trop.*, 3, p. 252-259.
- BEYE G. (1973) - Acidification of mangrove soils after empoldering in Lower Casamance. Effects of the type of reclamation system used. in : Acid Sulphate Soils - DOST (éd.) Publ. ILRI 18, Wageningen, vol. 2, p. 359-372.
- BLOOMFIELD C. (1972) - The oxidation of iron sulphides in soils in relation to the formation of acid sulphate soils and of ochre deposits in field drains. *J. Soil. Sc.*, 23, p. 1-16.
- BLOOMFIELD C. et COULTER J.K. (1973) - Genesis and management of acid sulfate soils. *Adv. in Agronomy*, 25, p. 265-326.

- BODHISANE J. (1974) - Sols hydromorphes et sulfaté-acides de Basse Casamance. Etude de 2 chronoséquences. ORSTOM Dakar, rapport d'élève, 182 p.
- BOISSEZON P. de (1970) - Etude du complexe absorbant des sols ferrallitiques forestiers de Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM*, série Pédo VIII, p. 391-418.
- BOUCHET Ph. (1977) - Distribution des mollusques dans les mangroves du Sénégal. *Malacologia*, 16 (1), p. 67-74.
- BOWMAN H.H.M. (1917) - Ecology and physiology of red mangrove. *Proc. Am. Philos. Soc.*, 56, p. 589-672.
- BOYE M. (1961) - Les palétuviers du littoral de la Guyane française. *Cah. d'Outre Mer*, 15, p. 271-290.
- BRAITSCHE O. (1971) - Salt deposits, their origin and composition. Springer Verlag Ed. Berlin, Heidelberg, New-York, 297 p.
- BREEMEN N. van (1971) - Methods of analysis I) Ground and surface water samples II) Sulphur fractions in soils. Laboratory Inform. Paper 3, Soil Survey Division, Bangkok, 23 p.
- BREEMEN N. van (1973)a - Calculation of ionic activities in natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, p. 101-107.
- BREEMEN N. van (1973)b - Soil forming processes in acid sulphate soils. in : Acid Sulphate soils. DOST (éd.), Publ. ILRI 18, vol. I, Wageningen, p. 66-130.
- BREEMEN N. van (1976) - Genesis and solution chemistry of acid sulfate soils in Thailand. Wageningen. Pudoc. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 263 p.
- BREEMEN N. van (1980) - Magnesium-ferric iron replacement in smectite during aeration of pyritic sediments. *Clay Minerals*, 15, p. 101-110.
- BREEMEN N. van et MOORMANN F.R. (1978) - Iron toxic Soils. in : Soils and rice. I.R.R.I. "Los Baños Philippines, p. 780-799.
- BREEMEN N. van et PONS L.J. (1978) - Acid Sulfate Soils and rice. in : Soils and Rice. I.R.R.I. Los Baños Philippines, p. 739-761.
- BRINKMAN R. (1982) - Social and economic aspects of the reclamation of acid sulfate soil areas in : Proceed. of the Bangkok Symposium of acid sulphate soils. DOST (éd.). Publ. ILRI 31, Wageningen, p. 21-36.
- BRINKMAN R. et PONS L.J. (1973) - Recognition and prediction of acid sulphate conditions. in : Acid Sulphate soils. DOST (éd.) Publ. ILRI 18, vol. I, Wageningen, p. 169-203.
- BROPHY G.P., SCOTT E.S. et SNELGROVE R.A. (1962) - Sulfate studies : II. Solid solutions between alunite and jarosite. *Am. mineral.*, 47, p. 112-126.

---

\* I.R.R.I. : International Rice Research Institute. Los Baños - Manila - Philippines.

- BROPHY G.P. et SHERIDAN M.F. (1965) - Sulfate studies : IV. The jarosite-natrojarosite-hydronium jarosite solid solutions series. *Am. Mineral.*, 50, p. 1595-1607.
- BROUWERS M. (1980) - Etude économique et technique du barrage de Kamobeul. Etude pédologique, Vol. 1, I.R.A.T., Montpellier, 80 p.
- BROWN J.B. (1970) - A chemical study of some synthetic potassium-hydronium jarosites. *Can. Mineral.*, 10, p. 696-703.
- BRUNET-MORET (1969) - Etudes hydrologiques en Casamance. Rapport définitif. Rapport interne ORSTOM, 52 p.
- BUURMAN P., BREEMEN N. van et HENSTRA J. (1973) - Recent silicification of plant remains in acid sulphate soils. *Neues Jahrb. Mineral. Monatsch.*, 1973, p. 117-124.
- CARROL D. (1958) - Role of clay minerals in the transportation of iron. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 14, p. 1-28.
- CHARREAU C. (1963) - Carte des Sols au 1/100.000e du Sine Saloum. Région de M'Bour.
- CHAPMAN V.J. (1944) - The 1939 Cambridge university expedition to Jamaica. *J. Linn. Soc. (Bot)* 52, (346), p. 407-533.
- CHAPMAN V.J. (1970) - Mangrove phytosociology. *Trop. Ecol.*, 11, p. 1-19.
- CHAUDRY I.A. et CORNFIELD A.H. (1966) - The determination of total sulfur in soil and plant material. *Analyst.* (London) 91, p. 528-530.
- CLARKE L.D. et HANNON N.J. (1967) - The mangrove swamp and salt marsh communities of the Sydney district I. Vegetation, soils and climate. *J. Ecol.*, 55, p. 753-771.
- CLARKE L.D. et HANNON N.J. (1969) - The mangrove swamp and salt marsh communities of the Sydney district II. The holocoenotic complex with particular reference to physiography. *J. Ecol.*, 57, p. 213-234.
- CLARKE L.D. et HANNON N.J. (1970) - The mangrove swamp and salt marsh communities of the Sydney district III Plant growth in relation to salinity and waterlogging. *J. Ecol.*, 58, p. 351-369.
- COLEMAN R. (1966) - The importance of sulfur as a plant nutrient in world crop production. *Soil Sc.*, Vol. 101 (4), p. 230-239.
- COLEMAN J.M., GAGLIANO S.M. et SMITH W.G. (1970) - Sedimentation in a Malaysian high tide tropical delta. Deltaic sedimentation : Modern and Ancient. S.E.P.M. Spec. Bull., n° 15.
- COOK P. et MAYO W. (1977) - Sedimentology and Holocene history of a tropical Estuary (Broad Sound). *B.M.R. Bull.*, 170, 206 p.
- COOK P.J. et MAYO W. (1980) - Geochemistry of a tropical estuary and its catchment. Broad Sound, Queensland. *B.M.R. Bull.*, 182, 211 p.
- COULTER J.K. (1968) - Acid sulphate soils in Malaya. Report of the Pedology Departement. Rothamsted. Vol. 1, p. 253-274.

- COULTER J.K. (1973) - The management of Acid Sulphate and pseudo acid sulphate soils for agriculture and other uses in Acid Sulphate Soils. DOST (éd.) Publ. ILRI 18, Vol I, p. 253-274. Wageningen.
- C.P.C.S. (1967) - Classification des Sols. Ec. Nat. Sc. Agr. Grignon-Paris, 67 p.
- DAFFE et TOUJAN (1979) - Etude pédologique de factibilité pour l'aménagement rizicole de la vallée du Soungrougrou. SONED-Dakar, 28 p.
- DAM D. van et PONS L.J. (1973) - Micromorphological observations on pyrite and its pedological reaction products. Acid Sulphate Soils. DOST (éd.) Publ. ILRI 18, Vol. II, p. 169-196.
- DAVIS J.H. (1940) - The ecology and geologic role of mangroves in Florida. Publ. Carnegie Institut. 517,,p. 303-412.
- DAY J.H. et MORGANS J.F.C. (1956) - The ecology of South African estuaries. The biology of Durban Bay. *Ann. Natal Mus.*, 13, (3), p. 259-312.
- DEBYSER J. (1961) - Contribution à l'étude géochimique des vases marines. I.F.P., Ed. Technip., 239 p.
- DENT J.M. (1947) - Some soil problems of empoldered ricefields in Sierra Leone. *Emp. J. Exp. Agric.*, 15, p. 206-212.
- DENT D.L. (1980) - Acid sulphate soils : morphology and prediction. *J. Soil Science*, 31, p. 97-99.
- DENT D.L. et RAISWELL R.W. (1982) - Quantitative models to predict the rate and severity of acid sulphate development. A case study in Gambia. in : Proc. of the Bangkok Symposium on Acid Sulphate Soils. DOST (éd.), Publ. ILRI, 31, Wageningen, p. 73-95.
- DESCAMPS C., THILMANS G. et THOMMERET J. (1974) - Données sur l'édification de l'amas coquillier de Diorom Boumak. *Bull. liaison A.S.E.Q.U.A.*, 41, p. 67-84.
- DESCAMPS C. et THILMANS G. (1979) - Les tumulus coquilliers des îles du Saloum. *A.S.E.Q.U.A., Bull. liaison*, 54-55, p. 81-91.
- DIEMONT W.H. et VAN WIJNGAARDEN W. (1975) - Sedimentation patterns, soils, mangrove vegetation and land use in the tidal areas of West Malaysia. Proc. Int. Symp. on Biology and management of mangroves. East-West Center Honolulu (1975), p. 513-528.
- DING HOU (1960) - A review of the genus *Rhizophora* with special reference to the Pacific species. *Blumea*, 10 (2), p. 625-634.
- DIOP E.S. (1978) - L'Estuaire du Saloum et ses bordures. Etude géomorphologique. Thèse 3e cycle, U.L.P. Strasbourg, 247 p.
- DOSSO M. (1981) - Géochimie des sols salés et des eaux d'irrigation. Aménagement de la basse vallée de l'Euphrate en Syrie. Thèse 3e cycle, Univ. Paul Sabatier, Toulouse, 181 p.
- DOST H. (1963) - Soil survey and soil classification in Suriname. Congr. Agr. Research in the Guiana. Paramaribo. 1963, p. 119-124.

- DOST H. (1973) - Acid Sulphate Soils. Proceedings of the 1st International Symposium on Acid Sulphate Soils. Publ. ILRI 18, Wageningen, 2 vol., 295 p. - 406 p.
- DOST H. et BREEMEN N. van (1982) - Proceedings of the Bangkok Symposium on acid Sulphate Soils. Publ. ILRI 31, Wageningen, 450 p.
- DOYNE H.C. (1933) - Some swamp rice growing soils in Sierra Leone. *Trop. Agric.*, Trinidad, 10, (5), p. 132-138.
- DOYNE H.C. (1937) - A note on the acidity of the mangrove swamp soils. *Trop. Agric.*, Trinidad, 14, (10), p. 286-287.
- DREVER J.I. (1971) - Magnesium iron replacements in clay minerals in anoxic marine sediments. *Science*, 172, p. 1334-1336.
- DRIESSEN P.M. et ISMANGUN (1973) - Pyrite containing sediments of southern Kalimantan, Indonesia. Their soils, management and reclamation. Acid. Sulphate Soils, DOST (éd.), Publ. ILRI 18, vol. II, p. 345-356.
- DROUBI A. (1976) - Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. *Mém. Sc. Géol.*, 46, 177 p.
- DROUBI A., FRITZ B. et TARDY Y. (1976) - Equilibres entre minéraux et solutions. Programmes de calcul appliqués à la prédiction de la salure des sols et des doses optimales d'irrigation. *Cah. ORSTOM*, série Pédo, XIV, (1), p. 13-38.
- DUCHAUFOR P. (1977) - Pédogenèse et classification. *PEDOLOGIE*, Tome 1, Masson (éd.), 475 p.
- DUCHAUFOR P. (1973) - Action des cations sur les processus d'humification. *Sci. du Sol*, 3, p. 151-163.
- ELOUARD P. et ROSSO J.C. (1977) - Biogéographie et habitat des mollusques actuels laguno-marins du delta du Saloum. *Géobios*, 10, 2, p. 275-299.
- FRANCIS-BOEUF C. (1946) - Recherches sur le milieu fluvio marin et les dépôts d'estuaires. *Ann. Inst. Océan.*, 23 (3), p. 149-344.
- FONTES J.C. (1966) - Intérêt en géologie d'une étude isotopique de l'évaporation. Cas de l'eau de mer. *C.R. Ac. Sc.*, Paris, 263, série D, p. 1950-1953.
- FOSBERG F.R. (1961) - Vegetation free zone on dry mangrove coasts. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 424, p. D216-D218.
- FRENEY J.R. et STEVENSON F.J. (1966) - Organic sulfur transformations in soils. *Soil. Sc.*, vol. 101 (4), p. 307-316.
- FRITZ B. (1975) - Etude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions. Application à la géochimie des altérations et des eaux continentales. *Mém. Sc. Géol.*, 41, 152 p.
- GARRELS R. M. et CHRIST C.L. (1965) - Solutions, Minerals and Equilibria. Harper et Row Ed. New York, 450 p.
- GARRELS R.M. et THOMPSON M.E. (1962) - A chemical model for sea water at 25°C and one atmosphere total pressure. *Amer. J. Sci.*, 260, p. 57-66.

- GERLACH S.A. (1958) - Habitats in the mangrove regions of tropical coasts. *Z. Morphol. Ökol. Tiere*, 46, p. 637-730.
- GIGLIOLI M.E.C. et THORNTON I. (1965) - The mangrove swamps of Keneba, lower Gambia river basin. 1/ Descriptive notes on the climate, the mangrove swamp and the physical composition of their soils. *J. Appl. Ecol.*, 2, p. 81-103.
- GIGLIOLI M.E.C. et KING D.F. (1966) - The mangrove swamps of Keneba, lower Gambia river basin. 3/ Seasonal variations in the chloride and water content of soils... *J. Appl. Ecol.*, 3, p. 1-19.
- GOLDHABER M.B. et KAPLAN I.R. (1974) - The sulfur cycle. The Sea, vol. 5, Marine Chemistry. Ed. E.D. Golberg - John Wiley. New-York, p. 569-655.
- GONI J. et PARENT Ch. (1966) - Etude géochimique d'une tranche de sédiments fins actuels (Baie de la Vilaine). Méthodologie, paléosalinité, diagenèse. *Bull. B.R.G.M.*, 5, p. 19-62.
- GOULEAU D. (1975) - Les premiers stades de la sédimentation sur les vasières littorales atlantiques. Rôle de l'émersion. Thèse d'Etat, Nantes, 2 vol.
- GOULEAU D., KALCK Y., MARIUS C. et LUCAS J. (1982) - Cristaux d'hydroxydes d'aluminium néoformés dans les sédiments actuels des mangroves du Sénégal (Sine Saloum - Casamance). *Mem. Soc. Géol. Fr.*, N.S. 144, p. 147-154.
- GUEDDARI M. (1980) - Géochimie des sels et des saumures du Chott el Jerid (Sud Tunisien). Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Toulouse, 2427, 131 p.
- GUISAN (1788) - Traité sur les terres noyées de Guyane appelées communément Terres Basses. Imprimerie du Roy, Cayenne, 360 p.
- HARDIE L.A. (1967) - The gypsum-anhydrite equilibrium at one atmosphere pressure. *Am. mineralogist*, 52, p. 171-200.
- HARMSSEN G.W. (1954) - Observations on the formation and oxidation of pyrite in soils. *Plant & Soil*, 4, p. 324-348.
- HARMSSEN K. et BREEMEN N. van (1975) - Translocation of iron in acid sulfate soils. II. Production and diffusion of dissolved ferrous iron. *Proc. Soil Sc. Soc. Am.*, 39, p. 1148-1153.
- HART M.G.R. (1959) - Sulfur oxidation in tidal mangrove soils in Sierra Leone. *Plant & Soil*, 11, p. 215-236.
- HART M.G.R. (1962) - Observations on the source of acid in empoldered mangrove soils. I/ Formation of elemental sulphur. *Plant & Soil*, XVIII, 1, p. 87-98.
- HART M.G.R. (1963) - Observations of the source of acid in empoldered mangrove soils. II/ Oxidation of soil polysulphides. *Plant & Soil*, XIX, 1, p. 106-114.

- HART M.G.R., CARPENTER A.J. et JEFFERY J.W. (1965) - Problems in reclaiming saline mangrove soils in Sierra Leone. *Sols Africains*, 10 (1) p. 71-75.
- HELGESON H.C. (1969) - Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures. *Amer. J. Sci.*, 267, p. 729-804.
- HERVIEU J. (1966) - Contribution à l'étude de l'Alluvionnement en milieu tropical. *Mém. ORSTOM*, N° 24, 465 p.
- HERVIEU J. (1966) - Contribution à l'étude du milieu fluviomarín de Madagascar. *Rev. de Géogr.*, Madagascar, n° 8, p. 2-65.
- HESSE P.R. (1961) - Some differences between the soils of Rhizophora and Avicennia mangrove swamps in Sierre Leone. *Plant & Soil*, 14 (4), p. 335-346.
- HESSE P.R. (1961) - The decomposition of organic matter in a mangrove swamp soil. *Plant & Soil*, XIV, 3, p. 249-263.
- HOFFERT M. (1980) - Les "argiles rouges" des grands fonds dans le Pacifique centre Est. Authigenèse, transport, diagenèse. *Sc. géol. Mem.*, 41, 231 p.
- HUC A.Y. (1973) - Contribution à l'étude de l'humus marin et de ses relations avec les kérogènes. Thèse Univ. Nancy, 60 p.
- JORDAN H.D. (1963) - The vegetation of mangrove swamps in West Africa. *Agro. Trop.*, 18 (8), p. 796-797.
- JORDAN H.D. (1964) - The relation of vegetation and soil to development of mangrove swamps for rice growing in Sierra Leone. *J. Appl. Ecology*, 1, p. 209-212.
- KALCK Y. (1978) - Evolution des zones à mangroves du Sénégal au Quaternaire récent. Etudes géologiques et géochimiques. Thèse 3e cycle, U.L.P. Strasbourg, 117 p.
- KAWALEC A. (1973) - World distribution of acid sulphate soils. References and Map. in Acid sulphate soils. DOST (éd.) Publ. ILRI, Wageningen, n° 18, vol. 1, p. 293.
- KERREST R. (1980) - Contribution à l'étude écologique de la mangrove de Pichavaram. Thèse 3e cycle, Toulouse, 98 p.
- KEVIE W. van der (1968) - Report on the soil survey in the Yang Manittract. Chao Phya Irrigation project VIII Soil Survey report 66. Land Development Department Bangkok.
- KEVIE W. van der (1972) - Morphology, genesis, occurrence and agricultural potential of acid sulphate soils in Central Thailand. *Thai J. Agric. Sci.*, 5, p. 165-182.
- KEVIE W. van der (1973) - Physiography, classification and mapping of acid sulphate soils. Acid sulphate soils, DOST (éd.) Publ. ILRI 18, vol. 1, Wageningen, p. 204-222.

- KIENER A. (1965) - Contribution à l'étude écologique et biologique des eaux saumâtres malgaches. Les poissons euryhalins. *Vie Milieu*, 16 (2c), p. 1013-1149.
- KIENER A. (1973) - Les mangroves du globe : aspects écologiques biocénologiques et physiologiques particuliers, mise en valeur. *Bull. Mus. Nat./Hist. Nat.*, Paris, 20, p. 317-331.
- KITTRICK J.A. (1970) - Precipitation of kaolinite at 25° C et 1 atm. *Clays and Clay minerals*, 18, p. 261-267.
- KRUL M.A. (1976) - A micromorphology research on some cat clay soils and potential catclay soils in Senegal. M. Sc. Thesis, Wageningen, 59 p.
- LEBIGRE J.M. et MARIUS C. (1981) - Etude d'une séquence mangrove-tanne en milieu équatorial, Gabon. *Symp. Int. Lag. Côtières*, Bordeaux, 9 p.
- LEPRUN J.C., MARIUS C. et PERRAUD E. (1976) - Caractérisation de la pédogenèse durant le dernier millénaire sur les amas coquilliers des Iles du Saloum. *Bull. ASEQUA*, p. 13-26.
- LESCURE J.P. (1978) - La mangrove guyanaise, architecture des jeunes stades et vie avienne. *Cah. ORSTOM*, série Biol. XII (4), p. 371-376.
- LEVEQUE A. (1962) - Mémoire explicatif de la Carte des sols des Terres Basses de Guyane Française. *Mém. ORSTOM*, n° 3, 83 p.
- LINARES DE SAPIR O. (1971) - Shell middens of Lower Casamance and problems of Diola protohistory. *West Afric. J. Archaeology*, Nigeria, 1, p. 23-54.
- LUCAS J., GOULEAU D., KALCK Y. et MARIUS C. (1977) - Rapport final A.T.P. "Mangroves et Vasières" n° 655.1656. Rapport interne, Strasbourg.
- LUCAS J., KALCK Y. et GOULEAU D. (1979) - Aspects minéralogiques et géochimiques des sédiments et des sols de mangroves du Sénégal. *Sc. Géol.*, 53, p. 53-56.
- LUGO A.E. et SNEDACKER S.C. (1974) - The ecology of mangroves. *Ann. Rev. Ecology & Systematics*, 5, p. 39-64.
- LYNN W.C. et WHITTIG L.D. (1966) - Alteration and formation of clay minerals during cat clay development. *Proc. 14th Nat. Conf. Clays Clay mineral.*, p. 241-248.
- MACNAE W. (1966) - Mangroves in eastern and southern Australia. *Austr. J. Bot.*, 14, p. 67-104.
- MACNAE W. (1968) - A general account of the fauna and flora of mangrove swamps and forests in the Indo-west Pacific region. *Adv. Marine Biol.*, 6, p. 72-270.
- MAIGNIEN R. (1961) - Les sols des plaines alluviales de la Casamance aux environs de Sedhiou, ORSTOM - Dakar, *multiogr.*, 42 p.

- MARIUS C. (1969) - Notice explicative de la carte pédologique au 1/50.000e CAYENNE. ORSTOM, Paris, 44 p.
- MARIUS C. (1971) - Note sur les sols de mangroves de l'Estuaire du Gabon. ORSTOM Libreville, *multigr.*, 21 p.
- MARIUS C. (1972) - Végétation et Ecologie des Mangroves. Bull. de liaison thème C, 2, p. 21-54.
- MARIUS C. (1973) - Les Sols de l'Estuaire du Saloum. ORSTOM Dakar, *multigr.*, 25 p.
- MARIUS C. (1975) - Physiographie et Classification des sols de mangroves de Basse Casamance. 3rd F.A.O. meeting for Soil Correlation in West Africa, Dakar, p. 241-260.
- MARIUS C. (1975) - Evolution des sols dans deux chronoséquences de l'Estuaire du Saloum. ORSTOM Dakar, *multigr.*, 76 p.
- MARIUS C. (1976) - Effets de la sécheresse sur l'évolution des sols de mangroves (Casamance - Gambie). ORSTOM Dakar, *multigr.*, 62 p.
- MARIUS C. (1977) - Notice explicative de la carte pédologique au 1/50.000e Iles du Saloum. ORSTOM Dakar, *multigr.*, 47 p., 1 carte.
- MARIUS C. (1977) - Propositions pour une classification française des sols de mangroves tropicales. *Cañ. ORSTOM*, série Pédo, 15, 1, p. 89-102.
- MARIUS C. (1978) - Etude pédologique des carottages profonds dans les mangroves. ORSTOM Dakar, *multigr.*, 45 p.
- MARIUS C. (1979) - Les Mangroves du Sénégal. Ecologie. Pédologie. Utilisation. ORSTOM Dakar, *multigr.*, 85 p.
- MARIUS C. (1980) - Effets de la sécheresse sur l'évolution phytogéographique et pédologique de la mangrove en Basse Casamance. Bull. IFAN, Série 1, p. 669-691.
- MARIUS C. (1981) - Caractérisation et utilisations de quelques sols sulfatés-acides de Thaïlande et de Malaisie. ORSTOM - Institut de Géologie, Strasbourg, *multigr.*, 20 p.
- MARIUS C. (1982) - Acid sulphate soils of mangrove area in Senegal and Gambia. in DOST (éd.). Proceed. of the Bangkok Symposium on acid sulphate soils. Publ. ILRI, Wageningen, n° 31, p. 103-135.
- MARIUS C. (1982) - Les sols de mangroves du Sénégal et de la Côte Orientale de l'Inde. Etude Comparative. Comm. au 12e Congrès Int. de la Sc. du Sol. New Delhi, Fév. 1982.
- MARIUS C. et CHEVAL M. (1979) - Les sols des mangroves et tannes de la région des Kalounayes. ORSTOM Dakar, *multigr.*, 10 p.
- MARIUS C. et CHEVAL M. (1980) - Note sur les sols de la vallée de Guidel. ORSTOM Dakar, *multigr.*, 13 p.

- MARIUS C. et LUCAS J. (1982) - Evolution géochimique et exemple d'aménagement des mangroves au Sénégal (Casamance). *Oceanologica Acta*, n° Sp., p. 151-159.
- MARIUS C., PAYCHENG C. et LOPEZ J. (1976) - La détermination du soufre et de ses composés au laboratoire ORSTOM de Dakar, ORSTOM Dakar, *multigr.*
- MARIUS C. et TURENNE J.F. (1968) - Problèmes de classification et de caractérisation des sols formés sur alluvions marines récentes dans les Guyanes. *Cah. ORSTOM*, Série Pêdo VI, 2, p. 151-201.
- MICHEL P. (1973) - Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. Mém. ORSTOM 63 (3 tomes), 752 p.
- MIEDEMA R., JONGMANS A.J. et SLAGER S. (1974) - Micromorphological observations on pyrite and its oxidation products in four holocene alluvial soils in the Netherlands. G.K. Rutherford (ed.) *Soil Microscopy*, p. 772-794.
- MILLARD N.A.H. et HARRISSON A.D. (1955) - The ecology of South African estuaries Richard's bay. *Trans. R. Soc. S. Afr.*, 34 (1), p. 157-179.
- MOLDENKE H.N. (1960) - Materials toward a monograph of the genus *Avicennia*. *Phytologia*, 7, p. 259-292.
- MOORMANN F.R. (1963) - Acid sulfate soils (catclays) of the tropics. *Soil Sci.*, 95, p. 271-275.
- MOORMANN F.R. et BREEMEN N. van (1978) - Rice, Soil, Water, Land. I.R.R.I. Los Baños-Laguna. Philippines, 185 p.
- MOORMANN F.R. et PONS L.J. (1975) - Characteristics of mangrove soils in relation to their agricultural land use and potential. Proc. Int. Symp. on biology and management of mangroves. East-West Center Honolulu, p. 529-547.
- ORSTOM (1979) - Projet de Classification des Sols. Doc. interne, 301 p.
- OTTMANN (1965) - Introduction à la géologie marine et littorale. Masson (éd.) 259 p.
- PAYCHENG C. (1980) - Méthodes d'analyses utilisées au laboratoire commun de Dakar. ORSTOM Dakar, *multigr.*, 103 p.
- PELET R. (1974) - Introduction à la géochimie organique des faciès deltaïques. *Rev. A.F.T.P.*, p. 21-27.
- PELISSIER P. (1966) - Les paysans du Sénégal. Imprimerie Fabrègue, St Yrieix, 939 p.
- PELISSIER P. (1967) - Une civilisation ouest africaine : les Diola de la Basse Casamance. *Acta geographica*, p. 3-6.
- PENDLETON R.L. (1947) - The formation, development and utilization of the soils of the Bangkok plain. *The Siam Society Natural history Bulletin*, Vol. 14 (2), Bangkok, Thailand.

- PETERSEN L. (1969) - Chemical determination of pyrite in soils. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 19, p. 40-44.
- PHLEGER F.B. (1969) - A modern evaporite deposit in Mexico. *Am. Assoc. Petrol. geol. Bull.*, Vol. 53, p. 824-829.
- PONNAMPERUMA F.N. (1964) - Dynamic aspects of flooded soils. The Mineral nutrition of the rice plant. Proc. of a Symposium. I.R.R.I. Philippines John Hopkins - Baltimore, p. 295-328.
- PONNAMPERUMA F.N. (1972) - The Chemistry of Submerged soils. *Adv. Agron.*, 24, p. 29-88.
- PONNAMPERUMA F.N., ATTANANDANA T. et BEYE G. (1973) - Amelioration of three acid sulphate soils for lowland rice. *Acid Sulphate Soils*, DOST (éd.) Publ. ILRI, 18, Wageningen, p. 391-406.
- PONNAMPERUMA F.N., LOY T.A. et TIANCO E.M. (1969) - Redox equilibria in flooded soils : The manganese oxide system. *Soil Sci.*, 108, p. 48-57.
- PONNAMPERUMA F.N., TIANCO E.M. et LOY T.A. (1967) - Redox equilibria in flooded soils : The iron hydroxide system. *Soil Sci.*, 103, p. 374-382.
- PONS L.J. (1964) - Pyrites as a factor controlling chemical "ripening" and formation of "cat clay" with special reference to the coastal plain of Suriname. *Agr. Expl. Stat. Paramaribo, Bull.* 82, p. 141-161.
- PONS L.J. (1970) - Acid sulphate soils (soils with cat clay phenomena) and the prediction of their origin from pyrites muds. *Fysich Geografisch. Bodenkundig Laboratorium. From field to laboratory.* 16, p. 93-107.
- PONS L.J. (1973) - Outline of genesis, characteristics, classification and improvement of acid sulphate soils. *Acid sulphate soils. Publ. ILRI Wageningen, vol. I, n° 18*, p. 3-27.
- PONS L.J. et BREEMEN N. van (1982) - Factors influencing the formation of potential acidity in tidal swamps. *Proceed. of the Bangkok Symposium on Acid Sulphate soils. Publ. ILRI, Wageningen*, 31, p. 37-51.
- PONS L.J., BREEMEN N. van, et DRIESSEN P. (1981) - Coastal sedimentary environments influencing the development of potential soil acidity. *A.S.A. special publication.*
- PONS L.J. et KEVIE W. van der (1969) - Acid Sulphate soils in Thailand. Morphology, genesis and agricultural potential of soils with cat clay. *Soil survey reports. Land Development Department, Thailand, N° 81*, 65 p.
- PONS L.J. et ZONNEVELD I.S. (1965) - Soil ripening and soil classification. Initial soil formation in alluvial deposits and a classification of the resulting soils. *ILRI Publ.* 13, Wageningen, 128 p.
- POSTGATE J.R. (1965) - Recent advances in the study of the sulphate reducing bacteria. *Bacteriol. Rev.*, 29, p. 425-441.
- PRITCHARD D.W. (1967) - What is an estuary : physical viewpoint. LAUFF G.H. (éd.) *Estuaries. Am. Ass. Adv. Sci. Publ.*, 83, p. 3-5.

- QUISPEL A., HARMSSEN G.W. et OTZEN D. (1952) - Contribution to the chemical and bacteriological oxidation of pyrite in soils. *Plant and Soil*, 4, pL 43-55.
- RAO T.A., MUKHERJEE A.K. (1967) - Ecological studies of Saurashtra coast and neighbouring islands. *Bull. Bol. Survey India*, p. 1-4.
- RASMUSSEN K. (1961) - Transformations of inorganic sulphur compounds in soil. These Copenhagen, 176 p.
- REINOLD R.J. et QUEEN W.H. (1974) - Ecology of halophytes. Academic Press. Inc., 605 p.
- RICHARDS L.A. (1954) - Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U.S.D.A. Agricultural handbook n° 60, 160 p.
- RICKARD D.T. (1969) - The chemistry of iron sulphide formation in aqueous solution and its relation to the depositional environment. *Min. Dep.* 4, p. 18-29.
- RICKARD D.T. (1975) - Kinetics and mechanism of pyrite formation at low temperatures. *Amer. J. Sci.*, 275, p. 636-652.
- RICKARD D.T. (1970) - The origin of framboids. *Lithos*, 3, p. 269-293.
- RICKARD D.T. (1973) - Sedimentary iron sulphide formation. Acid Sulphate Soils. Publ. ILRI, Wageningen, 18, vol. 1, p. 28-65.
- RIVIERE A. (1977) - Méthodes granulométriques. Techniques et interprétations. Masson (éd.), 167 p.
- ROBERTS W.M.B., WALKER A.L. et BUCHANAN A.S. (1969) - The chemistry of pyrite formation in aqueous solution and its relation to the depositional environment. *Min. Dep.*, 4, p. 18-29.
- ROLLET B. (1975) - Les utilisations de la mangrove. *J. Agric. Trop. Bot. Appl.*, 22 (7-8-9), p. 203-235 ; (10-11-12), p. 297-340.
- ROLLET B. (1980) - Bibliography on mangrove research (1600-1975). UNESCO, 480 p.
- SALL M. et DIOP E.S. (1975) - Le Gandoul et les Iles Betanti (Saloum). Etude géomorphologique. *Bull. liaison ASEQUA*, 44-45, p. 47-54.
- SEGALEN P. (1977) - Les classifications des sols. Revue Critique. Doc. interne ORSTOM - S.C.D., Paris, 175 p.
- SERVANT J. (1975) - Contribution à l'étude des terrains halomorphes. L'exemple des sols salés du Sud et du S.O. de la France. Thèse d'Etat, Montpellier, AO 10856, 2 vol.
- SERVANT J. et SERVAT E. (1966) - Introduction à l'étude des sols salés littoraux du Languedoc-Roussillon. *Ann. Agro.*, 17, (1), p. 53-74.
- SNEDAKER S.C. (1974) - A Bibliography of the mangrove literature. Int. Symp. on Biology and Management of mangroves. East West Center, Honolulu, Oct. 8-11, 1974.

- SNEDAKER S.C. (1982) - Mangrove species zonation : why ? Tasks for vegetation Sciences. Vol. 2, SEN D. et RAJPUROHIT K.S. (éd.), p. 111-125.
- SOURDAT M. et MARIUS C. (1964) - Mission pédologique en Guyane Britannique. *Bull. Biblio. de Pédo*, XIII, 4, p. 22-25.
- SPEK J. van der (1934) - Contributions to the study of acid soils in the Netherlands alluvium. *Versl. Landbouw. Ouderz.*, n° 4013, p. 409-503.
- STARKEY R.L. (1966) - Oxidation and reduction of sulfur compounds in soils. *Soil Science*, 101 (4), p. 297-306.
- STERN W.L. et VOIGHT G.K. (1959) - Effect of salt concentration on growth of red mangrove in culture. *Bot. Gaz.*, 121, p. 36-39.
- STUMM W.J. et MORGAN J.J. (1970) - Aquatic chemistry. John Wiley (éd.), New York, 583 p.
- TAYLOR B.W. (1959) - The classification of lowland swamp communities in northeastern Papua. *Ecology*, 40, p. 703-711.
- THOMAS P. et VARLEY J.A. (1982) - Soil survey of tidal sulphidic soils in the tropics : a case study. Proc. of the Bangkok Symp. on Acid Sulfate soils, Publ. ILRI, 31, p. 73-95.
- TISSOT C., MARIUS C. et FELLER C. (1983) - Continuité des paléofaciès palynologiques et physico-chimiques des sédiments récents en milieu de mangrove au Sénégal. C.E.G.E.T. Travaux et Documents de géographie tropicale, 49, p. 99-115.
- TOMLINSON T.E. (1957) - Relationship between mangrove vegetation, soil texture and reaction of surface soil after empoldering saline swamps in Sierra Leone. *Trop. Agric.*, Trin. 34 (1), p. 41-50.
- TOMLINSON T.E. (1957) - Changes in a sulphide containing mangrove soil on drying and their effect upon the suitability of the soil for the growth of rice. *Emp. J. Exp. Agric.*, 25, p. 108-118.
- TRAORE S. (1978) - Contribution à l'étude in situ des bactéries sulfo réductrices dans quelques sols tropicaux. ORSTOM Dakar, *multi-gr.*, 36 p.
- U.S.D.A. (1975) - Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Soil Survey Staff. 754 p.
- VANSTEENIS C.G.G.J. (1962) - The distribution of mangrove plant genera and its significance for palaeogeography. Proc. K. Ned. Acad. Wet 65 (2), p. 164-169.
- VERGER F. (1968) - Marais et Wadden du littoral français. Bordeaux, Biscaye Frères Impr., 541 p.
- VERHOOP J.A.D. (1940) - Chemical and microbiological conversion of iron sulphides in the soil. Thesis Leiden.

- VLEK P.L.G., BLOM T.J.M., BEEK J. et LINDSAY W.L. (1974) - Determination of the solubility product of various iron hydroxides and jarosite by the chelation method. *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.*, 38, p. 429-432.
- VIEILLEFON J. (1961) - Notices sur les cartes pédologiques de reconnaissance 7. ANTONIBE ORSTOM, Tananarive, 58 p.
- VIEILLEFON J. (1963) - Notices sur les cartes pédologiques de reconnaissance. ANTOSOMILY ORSTOM, Tananarive, 57 p.
- VIEILLEFON J. (1968) - Mise au point bibliographique sur le dosage des composés soufrés dans les sols formés sur alluvions fluviomarins. ORSTOM Dakar, *multigr.*, 18 p.
- VIEILLEFON J. (1969) - La pédogenèse dans les mangroves tropicales. Un exemple de chronoséquence. *Science du Sol*, 2, p. 115-148.
- VIEILLEFON J. (1971) - Contribution à l'étude du cycle du Soufre dans les sols de mangrove. Ses rapports avec l'acidification naturelle ou provoquée. *Cah. ORSTOM, Série Pédo.*, 9, p. 241-270.
- VIEILLEFON J. (1973) - Sur quelques transformations sédimentologiques et minéralogiques dans les sols sulfatés acides du Sénégal. in : Acid Sulphate Soils, Publ. ILRI, n° 18, Vol. II, p. 99-113.
- VIEILLEFON J. (1975) - Notice explicative de la carte pédologique au 1/100.000e de la Basse Casamance. (Domaine fluviomarine). ORSTOM Paris, 58 p.
- VIEILLEFON J. (1977) - Les sols des mangroves et tannes de Basse Casamance. Mém. ORSTOM, n° 83, 291 p.
- VIEILLEFON J. CHANTRET F. et TRICHET J. (1973) - Caractérisation des formes du soufre dans les sols de mangroves. Mise en évidence d'une fraction liée à la matière organique. *C.R. Ac. Sc.*, Paris, 276, p. 2629-2632.
- VOLKER A. (1966) - Tentative classification and comparison with deltas of other climatic regions. Proceedings of Dacca Symposium. UNESCO, 1966.
- VU VAN CONG M. (1964) - Flore et Végétation de la mangrove de la région de Saïgon - Cap St Jacques. Thèse 3è cycle, Univ. Paris.
- WALSH G.E. (1974) - Mangroves : A review. in : Ecology of Halophytes. Reinhold et Queen (éd.), Academic Press, Inc London, p. 51-174.
- WALTER M. et STEINER M. (1937) - Die Okologie der Ost Afrikanischen Mangroven. *Z. Bot.*, 30, p. 65-193.
- WEISS M. (1973) - Etude phytosociologique des mangroves de la région de Tuléar (Madagascar). *Tethys*, 5 (2-3), p. 467-492.
- WEST R.C. (1956) - Mangrove swamps of the Pacific coast of Columbia. *Ann. Assoc. Amer. Geogr.*, 46 (1), p. 98-121.

- WIJK C.L. van (1951) - Soil survey of the tidal swamps of south Borneo in connection with the agricultural possibilities. Contr. Gen. Agr. Sta., n° 123, Bogor, Indonesia.
- ZOBELL E. (1946) - Oxidation reduction potential of marine sediments. *Bull. Amer. Ass. Petrol. Geol.*, 30, p. 477-513.
- ZUUR A.J. (1936) - The nature of the soil in the Wieringermeer. The Hague.

## LISTE DES FIGURES

	Pages
1 - Répartition des mangroves du monde .....	11
2 - Localisation des mangroves du Sénégal .....	19
3 - Pluviométrie au Sénégal (Zones Estuariennes) .....	21
4 - Pluviométrie 1969-1979 .....	23
5 - Evolution du golfe de Casamance au Quaternaire récent .....	32
6 - Les systèmes de progradations en Casamance .....	33
7 - Delta de la Mahakam .....	33
8 - Croquis géomorphologique et géologique de la région estua- rienne de la Gambie .....	36
9 - Casamance : Localisation des prélèvements d'eaux .....	43
10 - Casamance : Variations mensuelles de la salinité des eaux ...	44
11 - Variation de la composition chimique des eaux du fleuve et de ses affluents .....	47
12 - Iles du Saloum : Localisation des prélèvements d'eaux .....	48
13 - Le fleuve Gambie .....	50
14 - Morphologie des séquences de Oussouye - Tobor - Balingore ...	54
15 - Localisation de la séquence de Gambie .....	56
16 - Morphologie des séquences Gambie - Bassid - N'Dimsiroh .....	58
17 - Séquence de N'Dimsiroh .....	59
18 - Schéma résumant les observations micromorphologiques à Balingore et à Bassid .....	70
19 - Diagrammes texturaux des sols - des séquences .....	74
20 - Profils granulométriques de quelques séquences .....	76
21 - Texture des sédiments du Saloum .....	78
22 - Evolution des paramètres fractilaires .....	79
23 - Evolution granulométrique des sédiments du Saloum .....	81
24 - Evolution de la teneur en eau dans les séquences .....	83
25 - Relation teneur en eau - densité apparente .....	84
26 - Evolution du pH dans les séquences .....	89
27 - Diagrammes Eh-pH de stabilité de l'oxyde ferrique, de la jarosite et de la pyrite à 25° C .....	91
28 - Evolution du Eh dans les séquences .....	93
29 - Diagramme Eh - pH des échantillons des séquences .....	94
30 - Evolution du Soufre total dans les séquences .....	100
31 - Schéma de formation de la pyrite .....	102
32 - Schéma de formation de la pyrite .....	105
33 - Voies d'oxydation de la pyrite .....	112
34 - Relation Soufre total - Sulfates solubles .....	120
35 - Relation pH sec - Soufre total .....	122
36 - Relation pH sec - sulfates solubles .....	123
37 - Relation pH sec - sulfates solubles .....	125
38 - Répartition de la Matière organique dans les forages profonds .....	132
39 - Relation C - N dans les séquences .....	133
40 - 41 - Répartition du Carbone et du taux d'humification dans les séquences .....	136
42 - Relation Carbone - teneur en eau .....	138
43 - Relation Carbone - Densité apparente .....	139
44 - Relation Carbone - Argile .....	140
45 - Relation Carbone - Soufre .....	141
46 - Relation Conductivité - Somme des Anions .....	146
47 - Evolution de la Conductivité des nappes phréatiques dans les séquences .....	149

	Pages
48 - Balingore : Variations saisonnières de la salinité des nappes phréatiques (1974-1978) .....	151
49 - Evolution de la Composition chimique des nappes phréatiques des séquences .....	153
50 - Répartition de la salinité des eaux interstitielles .....	157
51 - Relation Conductivité des nappes - Conductivité des eaux interstitielles .....	158
52 - Evolution de la composition chimique de la solution du sol ..	160
53 - Relation pH et fer libre de l'extrait aqueux .....	163
54 - Evolution de la composition chimique de la nappe CMT 02 et CMV 01 .....	174
55 - Diagramme du gypse. Position des eaux des nappes .....	185
56 - Diagrammes de poudres aux R.X. ....	185
57 - Diagrammes de diffraction aux R.X. - Fraction < 2 $\mu$ .....	189
58 - 59 - Diagrammes de stabilité de diverses smectites à 25° C et 1 atm .....	194
60 - Répartition des éléments chimiques majeurs dosés par attaque triacide .....	198
61 - Relation Perte au feu - Carbone .....	200
62 - Relation Fer - Aluminium .....	200
63 - Répartition du Fer libre dans les profils .....	202
64 - Relation Cr - Argile .....	204
65 - Séquence végétale de la baie de la Dumba .....	210
66 - Séquence Mangrove - Tanne du littoral australien .....	211
67 - Séquence Mangrove - Tanne de Pichavaram .....	212
68 - Variations saisonnières de la salinité des sols et des nappes à Pichavaram .....	214
69 - Les mangroves de la baie de la Mondah .....	216
70 - Séquence Mangrove - Tanne de Moka .....	217
71 - Système d'aménagement Gadja Madah University .....	231
72 - Aménagement des "rizières profondes" de la basse Casamance ..	234
73 - Principe de l'aménagement des vallées affluentes de la Casamance,- Vue en coupe .....	240

## LISTE DES TABLEAUX

	Pages
I - Distribution des plantes de mangroves .....	12
II - Les séquences végétales sur les côtes africaines .....	16
III - Pluviométrie au Sénégal et en Gambie .....	21
IV - Pluviométrie (1968-1977) .....	22
V - Basse Casamance. Moyenne pluviométrique décennale .....	23
VI - Température en degrés C .....	24
VII - Estuaire du Saloum - Evaporation .....	24
VIII - Evaporation sur bac en mm .....	25
IX - E.T.P. calculée en mm .....	25
X - Tableau de correspondance des zones tidales .....	37
XI - Composition chimique moyenne du sédiment .....	38
XII - Composition chimique des mangroves des différentes régions étudiées. Comparaison avec les sédiments marins voisins .....	39
XIII - Salinité des extraits à saturation des échantillons prove- nant des carottages profonds .....	40
XIV - Salinité de la Casamance en mmhos/cm à 25° .....	45
XV - Conductivité en millimhos/cm .....	45
XVI - Salinité des eaux du Saloum .....	47
XVII - Salinité de la Gambie au bac de la Transgambienne .....	49
XVIII - Variations du pH dans la séquence .....	55
XIX - Résumé des Caractères Morphologiques des séquences .....	60
XX - Influence des minéraux verts sur l'évolution des sols à pyri- tes de Thaïlande .....	61
XXI - Nombre d'échantillons .....	75
XXII - Indice n et classes de consistance .....	85
XXIII - Valeurs de n dans les séquences .....	85
XXIV - Séquence de Balingore. Répartition du Soufre total .....	99
XXV - Densités des bactéries sulfo et sulfato-réductrices de 5 séquences .....	104
XXVI - Composition, structure et stabilité des sulfures de fer .....	105
XXVII - Rapport $S_{pyrite}/S_{total}$ .....	107
XXVIII - Répartition du soufre "organique" à Balingore et à Bassid ...	110
XXIX - Séquence de Balingore. Expérience d'assèchement et de réhu- mectation des échantillons - Evolution du pH .....	115
XXX - Valeur moyenne des sulfates solubles en meq/100 g .....	119
XXXI - Corrélacion pH - Soufre total dans les séquences .....	121
XXXII - Relation pH sec - sulfates solubles dans les séquences .....	124
XXXIII - Teneurs moyennes en C et N - en %. du sol séché .....	133
XXXIV - Evolution de la Matière organique en surface dans les séquences en C %. .....	134
XXXV - Relation Carbone - Densité apparente dans les différentes séquences .....	139
XXXVI - Relation C - S dans les différentes séquences .....	141
XXXVII - Composition chimique de l'eau de mer moyenne .....	145
XXXVIII - Relation Conductivité - Somme des Anions de 3 séquences .....	147
XXXIX - Conductivités des nappes phréatiques dans les séquences .....	149
XL - Proportions relatives des anions et cations dans les sé- quences .....	152
XLI - Evolution de la Composition chimique des extraits aqueux à Balingore et à Bassid .....	162
XLII - Coefficients d'activité des espèces dissoutes dans l'eau de mer .....	166

	Pages
XLIII - Distribution des espèces majeures dans l'eau de mer .....	166
XLIV - Résultats du programme de calcul .....	168
XLV - Produits de solubilité de quelques minéraux .....	167
XLVI - Equilibres minéraux - eaux phréatiques de 5 séquences .....	170
XLVII - Equilibres minéraux - extraits aqueux 1/10 pour 4 séquences .	171
XLVIII - Composition chimique de l'eau des nappes de Tobor .....	173
XLIX - Composition chimique de l'eau des nappes de Balingore .....	175
L - Effets de la sécheresse climatique sur l'évolution de la végétation, des sols et des nappes de Balingore .....	179
LI - Etude isotopique des nappes phréatiques de Balingore .....	180
LII - Répartition des principaux minéraux dans les sols des séquences .....	183
LIII - Composition chimique de quelques échantillons de séquences ..	199
LIV - Valeurs moyennes des éléments traces pour 4 séquences .....	204
LV - Répartition des éléments traces dans les profils .....	205
LVI - Composition chimique des sols de mangroves de Pichavaram ....	215
LVII - Composition chimique des sols de la séquence de Moka .....	218
LVIII - Répartition des sols des mangroves et tanne du Sénégal dans les différentes classifications.....	225
LVIX - Besoins en eau pour dessaler les terres .....	242

**ANNEXE 1**

**DESCRIPTION DETAILLEE  
DES PROFILS DE SOLS  
DES SEQUENCES**

## SEQUENCE D'OUSSOUYE

- CMO 1 : A 20 m du bord du marigot, sous *Rhizophora racemosa* et sous 10 cm d'eau.

0-50 cm : horizon formé à 80 % de fibres brun-rouges, à rouges, nombreuses grosses racines fraîches de *Rhizophora*, radicelles, transition nette à 50-75 cm : gris, 10 YR 5/1, sableux, à nombreuses fibres (50 %) et racines. 75-100 cm : 10 YR 5/1-4/1, sable avec nombreuses grosses racines et très peu de fibres.

Profondeur (cm)	10	- 30	- 50	- 60	- 80	- 90
Eh mV	-180	-230	-230	-220	-220	-230
pH	7.3	7.1	7	7	7	7

- CMO 2 : Sous *Rhizophora mangle* - A 40 m du marigot - 10 cm d'eau.

0-80 cm : horizon très fibreux, 10 YR 4/1-3/1, argileux, forte odeur d'H<sub>2</sub>S, nombreuses grosses racines de *Rhizophora*, nombreuses radicelles, transition nette et brutale à

80-120 cm : sable 10 YR 5/1, à nombreuses racines et fibres

Profondeur (cm)	10	- 30	- 50	- 70	- 90
Eh mV	-210	-270	-240	-230	-230
pH	7	6.9	7	7	7

- CMO 3 : Sous *Rhizophora mangle* et *Avicennia* morts (mangrove décadente), mince pellicule d'eau riche en diatomées, très nombreux *Typanotonus*.

0-25 cm : mat de fibres, brun rouge, 80 % de fibres, gorgé d'eau.

25-100 cm : sablo-argileux, N 5/0, consistance 4, très peu de fibres, quelques grosses racines fraîches de *Rhizophora*, ligne d'accumulation fibreuse à 70-75 cm.

Profondeur (cm)	10	- 30	- 50	- 75
Eh mV	-158	-138	-160	-180
pH	6.5	6.4	6.3	6.3

- CMO 4 : Sous *Avicennia* morts, dans une zone déprimée, sous 10 cm d'eau, le profil est recouvert d'une croûte algale poudreuse noirâtre.

0-5 cm : mat de fibres, peu dur, fibres dispersées dans une argile 10 YR 6/4. 5-25 cm : Argilo-sableux, 10 YR 6/1, gris, à taches 10 YR 6/8, quelques revêtements organiques noirs, quelques racines de *Rhizophora*, consistance 2, fibres jusqu'à 20 cm.

25-90 cm : gris foncé 10 YR 4/1, sablo-argileux, nombreuses fibres et racines, consistance 3, sans taches.

90-120 cm : gris 10 YR 5/1, sablo-argileux, pas de fibres, sans taches, consistance 1.

Profondeur (cm)	3	- 10	- 20	- 40	- 60	- 90
Eh mV	-160	+10	-170	-20	-20	-140
pH	7.4	6.8	6.3	6	6	6

- CMO 5 : Au sommet de l'escarpement, sous *Avicennia* épars et quelques *Conocarpus*.

0-25 cm : gris clair, N 7/0 argilo sableux, à très nombreuses taches 10 YR 5/4 et jaunes 10 YR 7/8, consistance développée 5, rares fines racines.

25-55 cm : gris N 6/6 argilo sableux, à marbrures nettes 10 YR 3/1, quelques fibres, quelques racines, consistance 5.

55-100 cm : gris très foncé 10 YR 3/1, argilo sableux, à fibres et racines nombreuses, consistance 5.

Profondeur (cm)	10	-	20	-	40	-	60	-	80
Eh mV	+310		+280		+210		+20		-170
pH	6.6		6.6		6.5		6.4		6.2

- CMO 6 : Sous tanne vif inondé.

0-15 cm : gris 10 YR 6/1, argileux, consistance presque développée, 4, à nombreuses taches brun-jaunes 10 YR 5/6 et jaunes 10 YR 7/8 associées aux racines.

15-60 cm : brun gris 10 YR 5/2, couleur "purée de marron", argileux, à taches nettes, bien différenciées 2,5 YR 8/6 de jarosite liées aux racines. Entre 50 et 50 cm, nombreuses marbrures noires, nombreuses fibres et grosses racines fraîches de Rhizophora, consistance semi développée, 3.

60-110 cm : gris foncé, 10 YR 4/1, argilo sableux, à nombreuses fibres, racines et radicules non décomposées, consistance peu développée 2.

Profondeur (cm)	10	-	30	-	50	-	70	-	90	-	110
Eh mV	380		400		340		180		-40		-40
pH	3.8		3.4		3.6		3.6		3.7		3.8

- CMO 7 : Sous tanne vif, réseau polygonal de surface bien marqué.

3-0 cm : croûte brun-jaune, 10 YR 6/6.

0-30 cm : brun gris 10 YR 5/2, argileux, à taches jaunes de jarosite 2,5 Y 8/6 liées aux racines, consistance de "beurre", fluide, 1.

30-50 cm : brun 10 YR 5/3, argilo sableux, consistance de "beurre", taches jaunes de jarosite.

50-100 cm : gris foncé, 10 YR 4/1, argilo sableux, très fibreux, nombreuses grosses racines.

100 et + : Accumulation tourbeuse, gris foncé.

Profondeur (cm)	10	-	30	-	60	-	80	-	110
Eh mV	380		430		250		230		0
pH	3.6		3.5		3.4		3.4		3.7

- CMO 8 : Sous un ancien tanne herbacé transformé en tanne vif avec des touffes de Sesuvium desséchées.

0-30 cm : brun gris 10 YR 5/2, argilo sableux, à taches jaunes de jarosite, petites, distinctes, liées aux racines fines, consistance de "beurre".

30-62 cm : brun, "purée de marron", 10 YR 5/3, argilo sableux, à taches jaunes de jarosite, obliques, liées aux racines, transition nette.

62-90 cm : gris foncé, 10 YR 3/1, sable grossier, à nombreuses grosses racines.

90-110 cm : niveau de tourbe

Profondeur (cm)	10	-	30	-	50	-	70	-	90
pH	4.1		3.4		3.5		3.5		3.7

## SEQUENCE DE TOBOR

- CMT 1 : Sous Rhizophora mangle, avec 5 cm d'eau en surface, la zone est parsemée de coquilles de Tympanotonus.

0-15 cm : Mat de fibres, brun rouge foncé 10 YR 2/2, argileux, quelques grosses racines, consistance 1.

15-50 cm : 10 YR 3/1, gris très foncé, argileux, très fibreux, 50 % de fibres, nombreuses grosses racines de Rhizophora, forte odeur d'H<sub>2</sub>S, consistance non développée 1.

50-100 cm : gris foncé, 10 YR 4/1, argileux, fibreux, consistance non développée 1.

Profondeur (cm)	5	- 15	- 30	- 50	- 70	- 100
Eh mV	-150	-220	-220	-220	-220	-220
pH	7.2	7.2	7	7	7	6.8

- CMT 2 : A 35 m de CMT 1, sous Avicennia morts, la zone est inondée à marée haute ; entre les 2 profils, de nombreux petits chenaux superficiels recouverts de coquilles de Tympanotonus.

0-17 cm : brun pâle, 10 YR 6/3, argileux, très peu de fibres, très peu de racines, consistance semi-développée 3.

17-100 cm : gris foncé 10 YR 4/1, argileux, très fibreux, nombreuses grosses racines de Rhizophora, consistance non développée 1.

Profondeur (cm)	5	- 10	- 30	- 50	- 80
Eh mV	-90	-170	-170	-200	-200
pH	7	6.7	6.5	6.6	6.6

- CMT 3 : Sous Avicennia morts, à 70 m du premier profil. En surface croûte de 5 mm, alguaire, noirâtre.

0-17 cm : brun pâle, 10 YR 6/3, argileux, peu de fibres, peu de racines, consistance semi développée 3.

17-42 cm : gris foncé, à très foncé, 10 YR 3/1-4/1, argileux, nombreuses fibres, nombreuses grosses racines, consistance semi développée 3.

42-100 cm : gris foncé N 4/0, argileux, peu fibreux, peu de racines, consistance fluide 1.

Profondeur (cm)	5	- 10	- 20	- 40	- 60	- 90
Eh mV	-60	-170	-180	-180	-180	-180
pH	6.9	6.6	6.6	6.6	6.6	7

- CMT 4 : A 130 m, à la limite de la mangrove décadente et du tanne inondé. En surface, croûte brun-noire, alguaire.

1-0 cm : succession de 3 minces couches : verte, brune et noire.

0-22 cm : gris vert clair, 5 BG 7/1, à taches nettes, distinctes, brun-jaunes et brunes liées aux racines, consistance presque développée 4, argileux.

22-55 cm : brun foncé 10 YR 4/3, à marbrures peu nettes "purée de marron", 10 YR 4/2, nombreuses fines racines, pas de grosses racines de Rhizophora, consistance semi-fluide, 2, argileux.

55-100 cm : gris foncé N 4/0, argileux, à nombreuses fines racines, peu de fibres, pas de grosses racines, consistance 2.

Profondeur (cm)	10	- 20	- 30	- 50	- 70	- 90
Eh mV	270	210	100	60	30	30
pH	6.5	6.4	6.3	6.1	6.3	6.2

- CMT 5 : Sous tanne inondé.

0-7 cm : gris bleu 5 BG 6/1, argileux, structure grumeleuse fine, sans taches, consistance presque développée 4.

7-30 cm : gris bleu 5 BG 6/1, argileux, à nombreuses taches jaunes et brunes, légèrement indurées, sous forme de noyaux, consistance 4.

30-52 cm : brun 10 YR 4/2, argileux, quelques fibres, consistance semi-fluide 2.

52-100 cm : gris foncé N 4/0, argileux, nombreuses fines racines, quelques rares fibres, pas de grosses racines de Rhizophora, consistance 3.

Profondeur (cm)	5	-	20	-	40	-	60	-	80	-	100
Eh mV	130		150		130		120		100		100
pH	7.1		6.5		6.2		6.2		6.4		6.4

- CMT 6 : A 172 m débute un petit talus sur lequel il y avait un tanne herbacé. A la limite du tanne inondé et du tanne herbacé, on trouve encore des troncs d'Avicennia, et des coquilles d'huitres indiquant la présence récente de Rhizophora.

0-12 cm : gris brun clair 10 YR 6/2, argileux, structure grumeleuse, collant, très fines taches rouilles liées aux racines.

12-40 cm : gris brun clair 10 YR 6/2, argileux, à nombreuses taches distinctes, brun-jaune 10 YR 6/8 liées aux racines, consistance 4, très collant.

40-68 cm : brun gris foncé 10 YR 4/2, argileux, à marbrures diffuses brun-jaunes, et taches "purée de marron" peu nettes, consistance semi-fluide, 2, peu de fibres, quelques fines racines.

68-100 cm : gris foncé N 4/0, argileux, à fines racines, consistance 3.

Profondeur (cm)	5	-	20	-	50	-	80	-	100
Eh mV	320		330		230		140		100
pH	6.2		5		5.6		5.9		6

## SEQUENCE DE BALINGORE

- CMV 1 : Dans la zone nue, correspondant à l'ancienne frange à Rh. racemosa, à 2 m du marigot, nombreux Tympanotonus, 15 cm d'eau en surface.

0-25 cm : un mat fibreux, formé de 90 % de fibres rouges et brun-rouges, spongieux.

25-100 cm : gris très foncé, 10 YR 3/1, argileux, 50 % de fibres, nombreuses grosses racines fraîches de Rhizophora.

Profondeur (cm)	10	-	30	-	50	-	70	-	100
Eh mV	-160		-220		-180		-180		-200
pH	7		7.1		7		6.6		6.4

- CMV 2 : A 25 m du marigot, dans la zone nue, correspondant à l'ancienne zone à Rh. mangle.

0-80 cm : 80 % de fibres rouges et brunes, argileux entre les fibres, consistance spongieuse.

80-120 cm : 40 % de fibres blanches, nombreuses racines et radicelles, consistance spongieuse.

Profondeur (cm)	10	-	30	-	50	-	70	-	100
Eh mV	-130		-170		-170		-160		-200
pH	6.2		6.2		6.2		6.2		6.2

- CMV 3 : A 55 m, sous repousses denses d'Avicennia, sur tapis de Sesuvium.

0-30 cm : horizon de fibres très décomposés, gris brun, 10 YR 4/2, couleur "purée de marron", argileux, consistance de "beurre", 2, nombreuses fibres et racines.

30-120 cm : 10 YR 4/1, gris foncé, argileux, à trainées et marbrures 10 YR 4/2, couleur "purée de marron", due à la décomposition des fibres. Accumulation fibreuse à 40 cm, consistance 2.

Profondeur (cm)	10	-	30	-	50	-	80	-	100
Eh mV	-160		-110		-130		-150		-160
pH	6.2		5.6		5.6		6.		5.9

- CMV 4 : A 80 m, sous tapis dense, homogène, d'Eleocharis, d'environ 1 m de haut.

0-30 cm : gris N 6, argileux, sans tache, quelques fibres dispersées, consistance semi développée 3.

30-48 cm : gris foncé 10 YR 4/1, argileux, à taches noires et "purée de marron" associées à la décomposition des fibres, consistance de "beurre", nombreuses fibres et radicelles.

48-120 cm : gris très foncé, 10 YR 3/1, argileux, à taches brunes diffuses, localisées, nombreuses grosses racines obliques, fibreux en profondeur, consistance 2.

Profondeur (cm)	10	-	40	-	60	-	80	-	100
Eh mV	90		-70		-120		-140		-160
pH	5.8		5.3		5.6		5.8		5.8

- CMV 5 : A 120 m, sous tapis homogène d'Eleocharis, avec quelques troncs d'Avicennia morts, pellicule d'eau en surface, riche en diatomées.

0-5 cm : brun gris 10 YR 4/2, argileux, structure grumeleuse fine.

5-30 cm : gris N 6, argileux, taches diffuses noires, très peu de fibres, quelques fines racines, consistance 4.

30-70 cm : gris foncé N 4, à taches et marbrures nettes "purée de marron" liées aux accumulations de fibres décomposées, quelques racines, consistance de "beurre".

70-120 cm : gris foncé N 4, à taches brunes diffuses localisées à 80 cm, fibreuse, nombreuses racines de Rhizophora, consistance 3.

Profondeur (cm)	10	-	35	-	50	-	70	-	90
Eh mV	180		30		-40		-70		-70
pH	6.2		5.5		5.5		5.5		5.5

- CMV 6 : A 145 m, sous tapis de Sesuvium, avec repousses isolées d'Avicennia, quelques Eleocharis.

0-10 cm : brun gris, argileux, structure grumeleuse fine bien développée, nombreuses fines racines d'herbes, consistance 5.

10-30 cm : gris N 5, argileux, consistance presque développée 4, bonne pénétration racinaire.

30-55 cm : gris foncé N 4, argileux, à taches "purée de marron" bien nettes entre 40 et 50, consistance 3.

55-120 cm : gris foncé N 4, argileux, à taches brunes diffuses, peu nettes, quelques grosses racines de Rhizophora, fibreuse.

Profondeur (cm)	10	-	30	-	50	-	70	-	100
Eh mV	-130		-100		-30		-70		-50
pH	5.6		5		4.2		4.6		5

- CMV 7 : A 158 m, sous Conocarpus, Sporobolus, Bacopa. En surface, pellicule rouge, brillante, surmontant 4 cm environ d'un mat racinaire noir.

4-20 cm : 10 YR 4/2, sec, argileux, structure grumeleuse fine bien développée, taches brunes et rouges indurées et arrondies, consistance 5.

20-45 cm : gris N 6, sans tache, argileux, consistance 4, peu de fibres, peu de racines.

45-70 cm : gris foncé N 4, argileux, à marbrures "purée de marron" bien nettes, fibreuse, consistance typique de "beurre", 2.

70-100 cm : gris foncé N 4, argileux, à trainées noires, nombreuses grosses racines, fibreuse, consistance 2.

Profondeur (cm)	surface	-	10	-	30	-	60	-	90
Eh mV	80		80		200		250		-40
pH	5.5		5.5		5.2		4.5		4.7

- CMV 8 : A 216 m, sous le tanne'vif, croûte poudreuse en surface, la nappe est presque en surface.

0-8 cm : gris N 6, sec, dur, argileux, à taches jaunes et brun-jaunes, consistance 5.

8-40 cm : gris N 5, argileux, consistance 4, à nombreuses taches jaunes 2,5 Y 8/6 liées aux gaines racinaires.

40-68 cm : brun gris foncé 10 YR 4/2, avec encore quelques taches de jarosite, consistance de "beurre", nombreuses fibres décomposées, quelques racines.

68-100 cm : gris foncé N 4, argileux, humide, fibreuse, nombreuses racines de Rhizophora, marbrures "purée de marron" liées aux fibres décomposées.

Profondeur (cm)	3	-	20	-	40	-	60	-	80	-	90
Eh mV	390		400		400		330		180		
pH	3.6		3.5		3.4		3.4		3.4		3.5

- CMV 9 : A 270 m, dans une zone déprimée correspondant à l'ancien tanne herbacé, "moquette" superficielle très collante, inondée par endroits.

0-20 cm : gris N 6, argileux, à nombreuses taches 2,5 Y 8/6 de jarosite, consistance 5.

20-43 cm : 10 YR 4/2, brun gris, "purée de marron", taches jaunes de jarosite, consistance de beurre, 2.

43-80 cm : horizon bariolé, gris, noir, purée de marron, consistance de "beurre" très nette, nombreuses racines en décomposition, nombreuses fibres en décomposition.

80-120 cm : gris N 4, argileux, fibreux.

Profondeur (cm)	10	- 30	- 50	- 70	- 90
Eh mV	380	430	380	290	210
pH	3.5	3.2	3.3	3.6	3.7

- CMV 10 : A 335 m, dans le fond de la dépression, reprise de quelques Eleocharis.

0-20 cm : gris foncé N 4, argileux, à taches jaunes 2,5 Y 8/6 de jarosite, structure grumeleuse sur 8 cm, nombreuses fines racines d'herbes, consistance 5.

20-60 cm : brun gris, purée de marron, 10 YR 4/2, humide, taches de jarosite associées aux gaines racinaires, consistance de "beurre", quelques fibres.

60-80 cm : 10 YR 4/2, sans taches de jarosite, fibreux, nombreuses racines de Rhizophora.

80-120 cm : gris foncé N 4, argileux, nombreuses racines et radicelles, très fibreux.

Profondeur (cm)	3	- 10	- 30	- 50	- 70	- 100
Eh mV	340	410	430	380	330	130
pH	4.4	3.9	3.5	3.5	3.7	4.6

## SEQUENCE DE GAMBIE

Située à l'endroit où la route transgambienne franchit le fleuve Gambie, cette séquence comporte 8 profils.

- CMG 1 : Sur la rive droite du fleuve, sous une mangrove à Rhizophora, cultivée en riz, avec un aménagement très sommaire. Quelques jeunes Rhizophora subsistent encore.

0-15 cm : gris foncé 10 YR 3/1, argileux, très fibreux, consistance non développée 1.

15-35 cm : gris vert foncé, 56 Y 4/1, très fibreux, 50 % de fibres, argileux, consistance 3.

35-95 cm : gris vert foncé 56 Y 4/1, argileux, à très nombreuses grosses racines de Rhizophora, fibreux, consistance 3.

95-115 cm : 56 Y 4/1, argileux, peu fibreux, consistance 3

Profondeur (cm)	10	-	25	-	50	-	70	-	100
Eh mV	160		-80		-190		-190		-120
pH	7.1		6.9		7		7.2		

Tous les autres profils ont été observés sur la rive gauche depuis le bord du fleuve, jusqu'au pied de la terrasse qui borde le Continental Terminal.

Il y avait une frange assez large d'Avicennia de grande taille sur un tapis herbacé dense de Sesuvium. La plupart des Avicennia ont été défrichés récemment pour la riziculture. En fin de saison sèche, au moment de l'observation, le 30 Mai 1978, la couche superficielle à Sesuvium était retournée, à la main, par les populations locales pour la riziculture en saison des pluies.

- CMG 2 : Sous une défriche récente d'Avicennia, inondée à marée haute.

0-3 cm : humide, gris foncé 10 YR 4/1, argileux, à taches brunes, structure finement grumeleuse.

3-18 cm : gris clair N 5/0, argileux, à taches verdâtres nombreuses, légèrement indurées, structure grumaleuse, consistance 4.

18-45 cm : gris clair N 5/0, à marbrures brunes 10 YR 4/2, couleur "purée de marron", nombreuses racines de Rhizophora, argileux, consistance 3.

45-100 cm : gris foncé 10 YR 4/1, argileux, à nombreuses grosses racines de Rhizophora, forte odeur d'H<sub>2</sub>S, consistance 2.

Profondeur (cm)	2	-	15	-	30	-	50	-	70	-	90
Eh mV	+90		-90		-220		-220		-220		-220
pH	6.1		6.9		6.7		6.7		6.7		6.8

- CMG 3 : Le profil est identique à CMG 2, dans une zone où Avicennia a été entièrement défriché et remplacé par Sesuvium.

- CMG 4 : Sous Sesuvium, avec, par places, des touffes de Paspalum, la zone a été rizicultivée.

0-10 cm : gris clair, à nombreuses taches brun-jaune liées aux racines de Sesuvium, argileux, très consistant, 5.

10-30 cm : gris clair N 5, à taches noires entre 20 et 30 cm, argileux, fibreux, consistance 3.

30-50 cm : gris foncé 10 YR 4/1, très fibreux, consistance 2.

50-90 cm : gris foncé 10 YR 4/1, argileux, à nombreuses grosses racines de Rhizophora, très fibreux, consistance non développée 1.

Profondeur (cm)	10	-	20	-	40	-	60	-	80
Eh mV	200		160		-120		-140		-140
pH	5.7		5.9		6.1		6.2		6.3

- CMG 5 - Nombreux Avicennia morts sur tapis de Sesuvium. Quelques touffes de Paspalum.

0-30 cm : gris 5 Y 6/1, argileux, à nombreuses fines taches brunes et jaunes liées aux fines racines et radicelles, structure finement grumeleuse jusqu'à 10 cm, consistance 4.

30-60 cm : transition 5 Y 6/1 devenant 10 YR 4/1, argileux, à nombreuses taches noires, nombreuses racines, fibreux, consistance peu développée 2.

60-110 cm : gris très foncé N 3, relativement sec, argileux, à nombreuses racines de Rhizophora, très fibreux, consistance 3.

Profondeur (cm)	10	-	25	-	40	-	60	-	80	-	100
Eh mV	330		310		280		130		80		-20
pH	5.2		5.3		5.3		5.5		5.7		5.8

- CMG 6 : Sous tapis homogène de Sesuvium.

0-15 cm : gris brun, argileux, à nombreuses taches brunes et jaunes liées aux racines, structure grumeleuse bien développée, consistance 4.

15-35 cm : gris clair 5 Y 6/1, argileux, à taches brunes concrétionnées, nombreuses taches jaunes 10 YR 7/8, nombreuses fines racines, consistance 3.

35-70 cm : gris foncé AO YR 4/1, argileux, à trainées noires, fibreux, nombreuses racines de Rhizophora, consistance 3.

70-100 cm : gris foncé N 3, argileux, à nombreuses racines de Rhizophora, mais sans fibres, consistance 3.

Profondeur (cm)	10	-	25	-	50	-	65	-	90
Eh mV	230		280		10		10		-180
pH	5.6		5.7		6		6		6.2

- CMG 7 : Tapis de Sesuvium vert, en limite avec le tanne vif.

0-20 cm : gris 10 YR 5/1, argileux, à taches très fines jaunes-rouges liées aux racines, consistance développée 5, structure grumeleuse jusqu'à 5 cm.

20-40 cm : gris 10 YR 5/1, argileux, à taches brunes et jaunes, de jarosite, 2,5 Y localisées entre 25 et 35 cm, très nombreuses fines racines consistance semi-développée, 3.

40-110 cm : gris 10 YR 5/1, argileux, à très nombreuses fines racines, quelques débris de racines de Rhizophora, mais pas de fibre, consistance 2.

Profondeur (cm)	10	-	30	-	50	-	60	-	70	-	80	-	100
Eh mV	430		400		300		160		0		-20		-20
pH	3.9		3.6		4.3		4.5		4.5		4.5		4.6

- CMG 8 : Sous tanne vif, la surface du sol est brûlante.

0-10 cm : sec, gris, argileux, à taches rouilles liées aux fines racines consistance 5.

10-20 cm : sec, gris 10 YR 4/1, argileux, à taches fines, brunes, liées aux racines, consistance 5.

20-40 cm : gris 10 YR 5/1, argileux, très nombreuses taches jaunes de jarosite, consistance 4.

40-80 cm : gris 10 YR 5/1, argileux, à taches jaunes de jarosite, liées aux gaines racinaires, consistance 3.

80-110 cm : gris 10 YR 5/1, argileux, à nombreuses racines et radicelles, consistance 3.

Profondeur (cm)	5	-	15	-	35	-	60	-	80	-	100
Eh mV	300		300		400		300		220		100
pH	3.5		3.2		3		3.1		3.1		3.1

## SEQUENCE DE BASSID

- CMB 1 : A 20 m du marigot sous grands *Rhizophora racemosa*.  
*0-7 cm* : horizon exclusivement fibreux, structure spongieuse.  
*7-60 cm* : gris foncé, 10 YR 3/1, argileux, à très nombreux débris de coquilles d'huitres et racines de *Rhizophora* peu décomposées, consistance 2, forte odeur d'H<sub>2</sub>S.  
*60-80 cm* : gris N 5, sec, dur, argilo sableux, quelques taches noires arrondies, quelques fibres.
  
- CMB 2 : Sous *Rhizophora mangle*, 15 cm d'eau en surface, nombreux Tympanotonus.  
*0-20 cm* : horizon fibreux avec de nombreuses grosses racines, structure spongieuse  
*20-60 cm* : gris foncé 10 YR 4/1, argileux, avec nombreuses fibres, 30 % de fibres et débris de coquilles, consistance 2, transition brutale à *60 cm* : gris N 5, sec, dur, argilo sableux, avec quelques racines et fibres verdâtres.
  
- CMB 3 : A 78 m du marigot, sous *Rhizophora mangle* clairsemés.  
*0-2 cm* : horizon fibreux.  
*2-60 cm* : gris 10 YR 4/1, argileux, riche en fibres et racines brun-rouges, lentilles sableuses à 45-47 cm.  
*60-90 cm* : gris, sableux avec débris de coquilles à 80-85 cm, peu de racines, peu de fibres.  
*90-100 cm* : N 5, sec, dur.
  
- CMB 4 : Sous *Rhizophora mangle* + *Avicennia*, à 105 m du marigot, nombreux trous de crabes en surface. Très nombreux Tympanotonus, zone déprimée.  
*0-22 cm* : gris beige 10 YR 4/2, légèrement structuré en surface, structure grumeleuse fine, quelques fibres, débris de racines brunes et blanches.  
*22-64 cm* : gris foncé 10 YR 4/1, argileux à passées sableuses à 57-58 cm, consistance peu développée, 2,5, quelques racines rouges, peu de fibres.  
*64-90 cm* : argileuse à passées sableuses importantes, quelques racines fibreuses, débris de coquilles entre 80-90 cm.  
*90-105 cm* : gris N 5, sec, dur, argilo sableux, quelques racines.
  
- CMB 5 : A 125 m, limite Mangrove-tanne inondé, la surface du sol est bosselée par de nombreux trous de crabes, litière de feuilles non décomposées.  
*0-20 cm* : gris clair 10 YR 4/2, à taches brunes 10 YR 4/6, sablo-argileux, débris de bois à 16 cm, pas de fibres.  
*20-75 cm* : gris foncé, 10 YR 4/1, argileux, très fibreux, consistance semi développée 3, nombreuses racines.  
*75-90 cm* : niveau d'accumulation de débris de coquilles d'huitres.  
*90 cm* : gris, N 5, sec, dur, argilo-sableux.
  
- CMB 6 : A 140 m du marigot, sous tanne inondé, encore de nombreux trous de crabes en surface.  
*0-28 cm* : sable gris beige clair, gorgé d'eau, sans fibres, à taches sous forme de trainées rouilles diffuses, transition oblique à  
*28-100 cm* : gris foncé 10 YR 4/1, argileux, avec lentilles sableuses à 45 cm, 58-61 cm, 72-74 cm, quelques taches brunes jusqu'à 40 cm, consistance 3.

100 cm : débris de coquilles.

- CMB 7 : A 167 m, sous tanne inondé.

0-32 cm : sable gris clair, 2,5 Y 6/2 à trainées fines, peu nettes, jaunes  
10 YR 6/6.

32-50 cm : Mélange de sable et d'argile avec taches nettes, contrastées  
brunes, 2,5 YR et 10 YR 4/2, purée de marron, consistance de "beurre".

50-110 cm : gris foncé 10 YR 4/1, argileux, à fibres et racines nombreuses

- CMB 8 : A 210 m, sous tanne inondé.

0-2 cm : horizon noir de feuilles décomposées.

2-30 cm : sable gris beige clair à taches jaunes très diffuses, humide.

30-45 cm : horizon bariolé, gris beige clair, à taches formant auréoles  
brunes autour des racines, taches noires, quelques racines silicifiées ?

45-75 cm : gris foncé 10 YR 4/1, argileux, très fibreux, quelques taches  
brunes.

75-95 cm : argile sableuse grise à débris de coquilles d'huitres.

95-115 cm : gris N 5, sec, dur, argilo finement sableux.

- CMB 9 : A 251 m, presque à la limite du tanne inondé, dans une zone non  
atteinte par les marées en Janvier-Février.

0-30 cm : sable gris beige clair, à taches très diffuses, brunes et jaunes.

30-45 cm : gris brun 10 YR 4/2, argileux, à taches brun rouge vif, 2,5 YR  
associées aux racines, consistance semi développée 3.

45-72 cm : horizon "purée de marron", 7,5 YR 4/2, argileux, consistance de  
"beurre", nombreuses taches jaunes de jarosite 2,5 Y 6/8 associées aux  
gainés racinaires.

72-95 cm : gris foncé 10 YR 4/1, argile très fibreuse, consistance spon-  
gieuse, racines en voie de silicification.

95-115 cm : sable gris et blanc.

- CMB 10 : A 260 m, limite d'inondation de la marée.

0-25 cm : sable gris beige clair à taches brunes et jaunes.

25-38 cm : horizon de transition, argilo sableux, à taches brunes et jaunes.

38-77 cm : purée de marron, 7,5 YR 4/2, à taches brunes foncées et taches  
jaunes de jarosite, les taches brunes sont associées aux amas fibreux en  
décomposition, quelques passées sableuses, consistance de "beurre" très  
nette.

77-115 cm : gris foncé, 10 YR 4/1, argile très fibreuse, consistance spon-  
gieuse, quelques racines, débris de feuilles

- CMB 11 : sous tanne vif exceptionnellement inondé.

0-4 cm : sable noir de feuilles décomposées, brillant en surface.

4-35 cm : sable gris beige clair, à taches brunes et jaunes avec niveau  
d'accumulation de taches à 33-35 cm, transition abrupte à

35-70 cm : brun foncé, purée de marron 7,5 YR 4/2, argileux, consistance  
de "beurre", fibreux, à nombreuses taches jaunes de jarosite associées aux  
gainés racinaires.

70-100 cm : gris foncé 10 YR 4/1, très fibreux, nombreuses racines, quel-  
ques taches de jarosite localisées à 80-90 cm.

100-120 cm : gris foncé 10 YR 4/1, argileux, très fibreux, structure spon-  
gieuse.

- CMB 12 : A la limite du rideau d'Avicennia sur Sesuvium.

0-2 cm : sable noir de décomposition des feuilles

2-23 cm : sable gris beige clair, 2,5 Y 7/2, à taches brunes jusqu'à 18 cm,  
niveau de taches rouges 2,5 YR 4/8 entre 20 et 23 cm, grosses et nettes.

23-55 cm : brun gris 10 YR 4/2, argileux à nombreuses grosses taches de jarosite, bien nettes, quelques trainées noires 10 YR 3/1, consistance de "beurre".

55-85 cm : 10 YR 5/2, humide, sablo-argileux, à nombreuses taches de jarosite associées aux racines, consistance de "beurre".

85-100 cm : N 5, sec, dur, à trainées noirâtres et nombreuses fines taches de jarosite, auréolées de brun.

- CMB 13 : Sous tanne vif exondé, en surface, croûte blanche de sel avec quelques aiguilles de gypse.

0-25 cm : sable beige clair 10 YR 6/4 à taches brunes 5 YR 4/3, bien distinctes, à patine brillante, transition très ondulée.

25-65 cm : "purée de marron" 7,5 YR 4/2, argilo-sableux, consistance de "beurre", à nombreuses grandes taches bien nettes de jarosite associées aux gaines racinaires, quelques taches brunes 5 YR 4/3 et rouges 10 R 4/8, au séchage, on observera de nombreuses aiguilles de gypse sur les agrégats.

65-100 cm : "purée de marron" 7,5 YR 4/2, argilo-sableux, association de taches de jarosite et de taches noires 10 YR 3/1, ensemble marmorisé, quelques racines non décomposées, consistance 2.

100-120 cm : N 5, sablo-argileux, nombreux débris de racines non décomposées.

- A partir de 366 m, on note l'apparition en surface d'un réseau polygonal formé par la croûte saline qui, par ailleurs, est riche en aiguilles de gypse.

- CMB 15 : A 385 m, réseau polygonal de surface bien net,

0-25 cm : 10 YR 6/2, sableux, à nombreuses taches brunes, arrondies, patinées.

25-45 cm : sableux à nombreuses taches rouges 10 R 4/8.

45-65 cm : "purée de marron" 7,5 YR 4/2, argileux, nombreuses taches rouges, consistance presque développée 4.

65-95 cm : sableux, 10 YR 6/2, à très nombreuses taches jaunes et rouges 10 R 4/8.

95-110 cm : sable fin gris, dur, à taches fines de jarosite.

- CMB 16 : Sous tanne vif à 398 m, la croûte de surface se détache en lamelles.

0-5 cm : sable gris foncé 10 YR 4/1 à fines racines.

5-20 cm : sable gris beige à trainées rouilles associées aux fines racines.

20-70 cm : "purée de marron" 7,5 YR 4/2, argileux, à taches brunes et jaunes de jarosite bien localisées entre 35 et 55 cm, taches diffuses à partir de 55, consistance de "beurre".

70-90 cm : sableux, brun 7,5 YR 4/2, à taches de jarosite fines, associées à de fines racines, consistance de "beurre".

90-110 cm : N 5, sec, dur, sablo-argileux, encore fines taches jaunes.

- CMB 17 : Sous tanne vif, à 426 m.

0-8 cm : sable gris humifère, à taches rouilles fines liées aux racines.

8-45 cm : sable beige clair, à taches diffuses jaunes et rouilles, sec, structure massive.

45-75 cm : "purée de marron" 7,5 YR 4/2, consistance développée 5, argileux, très nombreuses taches de jarosite associées aux racines, quelques taches brunes, fibreux.

75-95 cm : gris foncé 10 YR 4/1, argileux, très fibreux, consistance spongieuse, transition brutale à

95 cm et plus : noir, 10 YR 2/1, quelques fines taches jaunes, organique, fibreux.

- CMB 18 : A 447 m, une croûte saline de 3 mm d'épaisseur.
- 0-25 cm : sable 10 YR 7/2, à taches rouilles et jaunes liées aux racines, structure particulaire.
- 25-50 cm : sable marmorisé, à taches larges jaunes et rouges 10 R bien individualisées, structure particulaire.
- 50-90 cm : "purée de marron" 7,5 YR 4/2, argileux, consistance développée 4, nombreuses taches jaunes de jarosite bien distinctes et taches brunes, quelques débris de racines peu décomposés.
- 90-100 cm : horizon noir N 2, humide, à taches fines de jarosite.
- 100-120 cm : gris foncé 10 YR 3/1, sablo-argileux, à grosses taches de jarosite bien nette associées aux racines, consistance 4.
- 120 cm : N 5, sec, dur.
  
- CMB 19 : A 480 m, sur la terrasse herbacée.
- 0-15 cm : 10 YR 4/1, sable fin, cendreuse, sec, traces de racines fines ferruginisées.
- 15-30 cm : gris à nombreuses taches fines rouilles, diffuses, sableux, structure fondue.
- 30-45 cm : lit de coquilles d'huitres.
- 45-80 cm : gris clair, à très nombreuses taches distinctes jaunes, rouilles et noires, nombreuses taches rouges entre 65 et 80 cm compact, structure massive, transition brutale à
- 80-100 cm : "purée de marron" 7,5 YR 4/2, argileux, consistance presque développée 4, à nombreuses taches jaunes de jarosite associées aux gaines racinaires, nombreuses taches brunes.
- 100-130 cm : purée de marron 7,5 YR 4/2, argileux, consistance de "beurre", taches brunes et noires, transition nette à
- 130-220 cm : gris foncé 10 YR 3/1, argile tourbeuse, très litée, riche en fibres et débris de racines, structure spongieuse, forte odeur d'H<sub>2</sub>S.

## SEQUENCE DE N'DIMSIROH

- CMN 1 : Sous peuplement pur et dense de Rhizophora mangle. A une dizaine de mètres du marigot.

0-30 cm : horizon très fibreux, brun foncé, à nombreuses grosses racines fraîches de Rhizophora, forte odeur d'H<sub>2</sub>S.

30-90 cm : gris très foncé 10 YR 4/1, argileux, très fibreux, consistance 2, nombreuses grosses racines de Rhizophora, forte odeur d'H<sub>2</sub>S.

Profondeur (cm)	10	-	30	-	40	-	60	-	80	-	100
Eh mV	130		-180		-180		-200		-200		-210
pH	5.7				6.1				6.3		

- CMN 2 : A 20 m du marigot, sous grands Rhizophora mangle. 10 cm d'eau en surface. Nombreux Tympanotonus. Quelques dipneustes.

0-25 cm : exclusivement fibreux, brun foncé, consistance spongieuse, forte odeur d'H<sub>2</sub>S.

25-70 cm : gris foncé 10 YR 4/1, argileux, très fibreux, nombreuses racines, consistance 2, nombreux débris d'huitres à 50-60 cm.

70-100 cm : gris foncé, 10 YR 4/1, argileux, nombreux débris d'huitres bien conservés, très fibreux, consistance 2.

Profondeur (cm)	10	-	30	-	50	-	70	-	90
Eh mV	-60		-120		-180		-180		-200
pH	5.7		6.1		6.3		6.3		6.3

- CMN 3 : A 40 m, sous Avicennia rabougris et clairsemés.

0-5 cm : gris 10 YR 5/1, argileux très fibreux, consistance spongieuse.

5-25 cm : gris 10 YR 5/1, limoneux, à taches jaunes diffuses à 15 cm, quelques racines.

25-70 cm : gris foncé, 10 YR 4/1, argilo-sableux, très fibreux, quelques rares grosses racines, consistance 2.

70-100 cm : gris foncé 10 YR 4/1, argilo-sableux, quelques fines racines, nombreuses radicules.

Profondeur (cm)	10	-	20	-	30	-	50	-	60	-	70	-	90
Eh mV	240		130		100		-10		-90		-120		-120
pH	5.7		5.6		5.7		5.7		5.7		5.7		5.9

- CMN 4 : A 50 m. A la limite du tanne inondé, nombreux Avicennia morts, nombreux gros trous de crabes.

0-35 cm : gris 10 YR 5/1, sableux, à taches jaunes, brunes et brun-rouges.

35-100 cm : gris foncé 10 YR 4/1, limono sableux, très fibreux, plastique, consistance fluide en profondeur 1.

Profondeur (cm)	10	-	20	-	30	-	40	-	50	-	70
Eh mV	280		260		280		220		160		100
pH	6		6		5.9		5.9		6		6.1

- CMN 5 : A 65 m, dans le tanne inondé, sous 10 cm d'eau, nombreux gros trous de crabes en surface.

0-15 cm : gris clair, 10 YR 7/1, sableux, à taches jaunes diffuses, 2 racines ferruginisées, indurées (iron-pipes).

15-40 cm : gris, 10 YR 5/1, à taches brunes 10 YR 4/6, jaunes 10 YR 7/8 et noires, liées aux gaines racinaires, argilo-sableux, consistance 4.

40-100 cm : gris foncé 10 YR 4/1, argileux, très fibreux, quelques racines, consistance 1 en profondeur.

Profondeur (cm)	10	-	20	-	30	-	40	-	50	-	60
Eh mV	260		290		320		170		180		170
pH	6.1		5.7		5.6		5.6		5.1		5.8

- CMN 6 : A 90 m, dans le tanne inondé, sous 10 cm d'eau, nombreux trous de crabes, en surface, nombreuses racines ferruginisées ("iron-pipes").

0-25 cm : sable gris clair à gris beige 10 YR 7/1 - 10 YR 6/2, à taches brunes et jaunes.

25-50 cm : "purée de marron" 10 YR 4/2, argilo sableux, à taches jaunes de jarosite 2,5 Y 8/6 et taches jaunes 10 YR 7/8, liées aux gaines racinaires, consistance 3.

50-110 cm : gris foncé 10 YR 4/1, argilo sableux, très fibreux, plastique, consistance spongieuse, nombreuses racines dont certaines sont gainées de brun entre 50 et 70 cm.

Profondeur (cm)	10	-	25	-	35	-	45	-	60	-	80	-	100
Eh mV	340		260		310		330		280		130		130
pH	6		6		5.2		5.2		6		6		6.6

- CMN 7 : Dans le tanne inondé, les déblais des trous de crabes sont recouverts de taches jaunes et rouilles.

0-3 cm : sable gris bleu.

3-20 cm : sable brun, à taches brunes et rouilles peu nettes

20-38 cm : "purée de marron", 10 YR 4/2, limono sableux, à taches de jarosite liées aux gaines racinaires, dont certaines sont indurées en iron-pipes, consistance de "beurre".

38-70 cm : gris foncé 10 YR 4/1, argileux, plastique, à taches brunes et jaunes liées aux racines, fibreux, consistance 2.

70-100 cm : gris foncé AO YR 4/1, argileux, sans taches, fibreux, consistance 1.

- CMN 8 : A 125 m, très nombreux "iron-pipes", en position verticale sur les trous de crabes.

0-3 cm : sable gris bleu.

3-25 cm : gris 10 YR 5/1, argileux, à taches de jarosite liées aux racines, consistance de "beurre"

25-80 cm : horizon coquillier, amas de débris de coquilles d'huitres bien conservées.

- CMN 9 : A 145 m, toujours de nombreux trous de crabes et des "iron-pipes" en surface.

0-20 cm : sable brun beige 10 YR 5/4, à taches brunes et rouilles diffuses.

20-40 cm : "purée de marron", 10 YR 4/2, argileux à taches de jarosite, liées aux gaines racinaires, taches légèrement indurées, consistance de "beurre".

40-65 cm : gris foncé AO YR 4/1, argileux à taches brunes et jaunes de jarosite, consistance 3.

65-100 cm : gris foncé 10 YR 4/1, argileux, à passées sableuses, fibreux, peu de racines.

- CMN 10 : Dans la frange étroite de tanne vif séparant le tanne inondé de la terrasse.

0-3 cm : sable argileux, gris bleu N 5, recouvert d'une mince pellicule rouge

3-15 cm : sable brun, à taches diffuses brunes et rouilles.

15-42 cm : "purée de marron" 10 YR 4/2, argileux, à nombreuses taches de jarosite liées aux gaines racinaires, auréolées de brun, parfois indurées, consistance de "beurre", très nette.

42-60 cm : Marmorisé, gris 10 YR 4/1 et purée de marron 10 YR 4/2, encore quelques taches plus ou moins indurées jaunes et brunes, consistance 2.

60-220 cm : gris foncé, 10 YR 4/1, argilo-sableux, très fibreux, consistance spongieuse, quelques passées sableuses, à partir de 140 cm.

- CMN 11 : Sur la terrasse à Adansonia (Baobab), Acacia seyal, Andropogon.

0-15 cm : sable gris foncé, particulaire, cendreux, sec.

15-70 cm : accumulation de grosses coquilles d'huitres.

70-120 cm : gris N 5, argileux, à nombreuses taches et concrétions brunes et rouillés ainsi que quelques gros "iron-pipes", à 110 cm, accumulation de taches vertes, consistance 5.

120-200 cm : gris foncé 10 YR 4/1, argileux, très fibreux, débris de coquilles à 190 cm, consistance 3.



**ANNEXE 2**

**TABLEAUX DE  
RESULTATS ANALYTIQUES**

Séquence Profil	O U S S O U Y E															
	CNO 1			CNO 2			CNO 3			CNO 4			CNO 5			
Echantillon	11	12	13	21	22	23	31	32	33	41	42	43	51	52	53	
Profondeur cm	0-30	50-70	80-100	0-30	50-80	90-100	0-20	40-60	80-100	5-25	50-75	90-110	0-20	30-50	80-100	
Teneur en eau %	404	97	32	265	171	45	453	42		57	53	43	33	40	43	
Densité apparente	0.19	0.7	1.13	0.27	0.45	0.9	0.18	1		0.92	0.91	0.94	1.2	1.1	0.92	
Argile %	26.9	6.6	3.2	65.1	32.7	3.5	25.1	33.8	27.7	21.2	32.1	25.3	28.4	39.4	31.5	
Limon fin %	7.3	0.8	0.1	11.3	6.4	1.2	10	9.9	8.4	10.5	9.8	7	18.6	14.9	10.5	
Limon grossier %	2.6	0.3	0.1	3.9	3.6	0.1	7.1	10.4	7.4	15.8	12.9	10.2	14.8	12.7	11.4	
Sable fin %	55.4	74.3	60.1	14.3	38.3	26.9	40.6	38	44.4	38.8	37.3	49.9	28.3	26	37.2	
Sable grossier %	7.8	18	36.5	5.4	19	68.3	17.2	7.9	12.1	13.7	7.9	7.6	9.7	7	9.4	
Eh mV	-180	-230	-220	-210	-240	-250	-160	-170	-180	10	-20	-140	310	210	-170	
pH "in situ"	7	7	7	7	7	7	6.5	6.4	6.3	6.8	6	6	6.6	6.5	6.2	
pH sec	3.2	2.7	2.8	3.8	2.5	2.7	3.4	2.5	2.5	3.7	2.5	2.4	6.6	3.4	2.5	
n	3.9	3.2		1.5	1.9	2.9	4.3	0.7		1.5	0.9	0.8	0.6	0.3	0.6	
C %	107	10.2	4.5	155	77	8.4	113	15	16.7	10.7	17.9	17.5	2.8	10	15.4	
N %	4.2	0.38	0.18	6.5	2.5	0.33	4.8	0.62	0.58	0.6	0.6	0.6	0.2	0.46	0.5	
Acides fulviques %	5.44	2.04	2.6		3.04	0.98	1.56	1.84	1.8	2.32	1.6	1.75				
Acides humiques %	1.92	0.84	0.96		0.56	0.22	0.44	0.4	0.52	0.64	0.46	1.44				
S total %	27	10.3	5.6	40	47.5	11.7	30.5	35	26.5	10.8	31	26.5	4.6	15.2	31	
S pyrite %	10.8	5.3	2.9	2.5	11.7	4.4		17.6	13.2	3.2	14.9	16	2.4	10.8	18.3	
Sulfates insolubles %	12.7	4.16	2.5	9.7		3.9	9.6	10.2	9.5	3	8.7	7.7	0.7	2.5	5	
Fer libre %	1	0.3	0.2	1.2	1.16	0.36	1.5	0.52	0.8	0.28	0.58	0.52	0.92	0.42	0.74	
Fer total %																
Extraits saturés																
C.E. mmhos/cm		80	55					200	170				45	105	175	
pH		2.5	2.9					2.3	2.2				5.5	2.9	2.5	
Cl <sup>-</sup> meq/l		560	384					1560	1280				368	760	1280	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "		240	147					506	446				60	283	454	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "																
Ca <sup>++</sup> " "		46	38					50	70				34	50	54	
Mg <sup>++</sup> " "		158	106					420	378				82	220	321	
K <sup>+</sup> " "		0.35	0.43					0.51	0.58				5.9	2.2	0.5	
Na <sup>+</sup> " "		540	370					1400	1200				320	700	1140	
SiO <sub>2</sub> mg/l		19	11.6					68	64				26.8	66.8	74	
C.E. mmhos/cm	21	3.4	2.1		18	3	24	14.5	12	5	14	11.5	2.4	4.7	12	
pH	3.1	3.2	3.4		2.7	3.2	3.2	2.7	2.8	3.3	2.7	2.8	6.9	3.2	2.8	
Cl <sup>-</sup> meq/l	128	24	15.6		112	20.4	160	84	66	40.6	78	64	19.4	36.6	60	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "	60	11.1	7.3		48	10.7	51.4	37.7	30.9	13.7	34.3	30	4.3	15.4	31.7	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "																
Ca <sup>++</sup> " "	15	1.7	1.12		8	1.4	19.3	3.4	8.4	2.5	3.2	2.9	0.36	1.76	3.1	
Mg <sup>++</sup> " "	45.6	7	4.4		32.4	5	49.2	21.4	20.4	10.4	18.8	17.2	3.28	8.4	15.8	
K <sup>+</sup> " "	0.5	0.1	0.02		0.4	0.03	2.09	0.04	0.04	0.2	0.07	0.06	0.57	0.23	0.23	
Na <sup>+</sup> " "	129	21.9	15.4		114	19.4	143	84	63	36	68	59	19	30	62	
SiO <sub>2</sub> mg/l	15.4	6.4	5.6		12.2	6	11.8	12.2	10	8.8	11.8	9.2	6.4	10	10.8	
C.E. mmhos/cm	60			45	83		70	150	150	100	155	160	70	95	135	
pH	6.9			7.1	6.7		5.4	4.6	6.8	6.2	5	4.2	7.6	6.4	6.6	
Cl <sup>-</sup> meq/l	504			396	790		650	1800	1760	1000	1760	1800	680	990	1450	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "	68.6			60	68.6		68.6	154	127	111	146	146	60	103	137	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "				4.7	2.2		3	0.2	2.9	2.5	0.4		4.2	1.2	1.4	
Ca <sup>++</sup> " "	17.9			14.6	25		22.4	33	38	27	42	53	19	28	47	
Mg <sup>++</sup> " "	113			84	168		150	420	410	224	380	420	113	175	280	
K <sup>+</sup> " "	10.2			8.6	16.5		12.4	27	24	17.8	30	30	12	19.5	25	
Na <sup>+</sup> " "	475			330	650		525	1310	1290	830	1380	1470	550	810	1155	
SiO <sub>2</sub> mg/l																
C.E. mmhos/cm		40.4			43.1			62.9			51.4			62.9		
pH		7.9			3.1			7.6			7.7			7.6		
Cl <sup>-</sup> meq/l		398			466			580			444			572		
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "		34.3			51.4			68.6			51.4			51.4		
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "		1.46						2.08						1.8		
Ca <sup>++</sup> " "		13.8			16			16			26.5			17.5		
Mg <sup>++</sup> " "		62			70.5			125			82			105		
K <sup>+</sup> " "		7.5			8.75			10.3			9.3			11.8		
Na <sup>+</sup> " "		350			385			520			420			510		
SiO <sub>2</sub> mg/l		9.2			10			11.6			8.4			15.2		
Nappes phréatiques																

Séquence	O U S S O U Y E									
	Profil	CMO 6			CMO 7			CMO 8		
Echantillon	61	62	63	64	71	72	73	81	82	83
Profondeur cm	0-15	20-40	40-60	80-100	0-20	20-40	90-110	0-20	40-60	80-100
Teneur en eau %	15	15		16		49	50	39	50	64
Densité apparente	1.2	1		0.97		0.9	0.92	1.06	0.96	0.75
Argile %	42.3	40.6	29.8	27	38.3	28.8	25.4	34.7	24	11.9
Limon fin %	18	17.6	10.2	7.7	15.6	14.1	9.3	16.4	5.6	5.4
Limon grossier %	12.5	13.1	9.3	9.2	10	11.4	8.3	15.5	8.8	4.5
Sable fin %	21.4	22.4	39.6	44.6	28.2	34.8	26.6	25.7	48.5	43.8
Sable grossier %	5.8	6.3	11.1	11.5	7.9	10.9	20.4	7.7	13	34.4
Eh mV	380	400	340	-40	380	430	10			
pH "in situ"	3.8	3.4	3.6	3.7	3.6	3.4	3.7	4.1	3.4	3.7
pH sec	4.2	3.7	2.8	2.4	3.6	3.5	1.9	3.4	3.3	1.9
n	0.1			0.1		1.1	0.7	0.7	1.2	1.5
C %	2.72	4.5	8.9	14.4	3.72	4.7	41.8	3.7	6.9	24
N %	0.26	0.28	0.4	0.45	0.26	0.23	0.77	0.24	0.31	0.46
Acides fulviques %	0.4	0.75	1.3	0.9	0.54	0.92	2.65			
Acides humiques %	0.2	0.2	1.6	1.4	0.3	0.54	2.4			
S total %	10.7	12.5	33	31.5	11.2	15.7	40	14.8	12.5	56
S pyrique %	4	3.3	6.8	13.2	0.9	0.9	18	0.8	0.9	30.4
Sulfates insolubles %	2.7	3	6.6	7.1	5.1	6	10.8	7	3	12.5
Fer libre %	1.84	0.74	1.12	0.52	1.26	1.64	0.74	1.12	0.56	0.8
Fer total %										
Eaux saturées										
C.E. umhos/cm					110	150	220			
pH					3.3	3.2	2.1			
Cl <sup>-</sup> meq/l					920	1320	1600			
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "					171	180	600			
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "										
Ca <sup>++</sup> " "					50	54	50			
Mg <sup>++</sup> " "					266	318	405			
K <sup>+</sup> " "					10	17	1.2			
Na <sup>+</sup> " "					720	1010	1290			
SiO <sub>2</sub> mg/l					33	35.6	82			
C.E. umhos/cm	5.4	7	7	8	5.5	6.5	13.5	6.5	6	7.1
pH	3.9	4.1	3.2	2.8	4.2	3.9	2.6	3.9	3.6	2.4
Cl <sup>-</sup> meq/l	50.8	64	62	62	49	60	84	56	54	51.4
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "	9	9	12	26.6	9	9	48	10.7	10.4	36
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "										
Ca <sup>++</sup> " "	0.9	1.2	1.6	1.4	0.9	1	2.3	1	1.2	1.3
Mg <sup>++</sup> " "	11.6	13.6	13.6	14.8	12.4	12	20.8	14.8	12	10.4
K <sup>+</sup> " "	0.9	1.1	0.5	0.03	0.7	0.3	0.39	0.1	0.9	0.02
Na <sup>+</sup> " "	44	57	62	62	41.2	55	98	55	46	44
SiO <sub>2</sub> mg/l	4.8	4.6	8	10	4.6	4.2	14.6	5	4	25.8
C.E. umhos/cm	175	170	160	155	150	155	135	170	155	150
pH		4.6	4.4	4.6	3.9	3.8	4.1	3.9	4	4.1
Cl <sup>-</sup> meq/l	1920	1900	1800	1720	1530	1620	1440	1800	1680	1540
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "	223	180	180	146	197	171	163	231	154	180
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "		0.7	0.3	0.4						
Ca <sup>++</sup> " "	28	32	29.5	27	31	62	14.2	38	34.5	31
Mg <sup>++</sup> " "	500	480	420	380	500	440	144	540	440	410
K <sup>+</sup> " "	26	28	27	25	21.6	22.6	10.4	21	25	20
Na <sup>+</sup> " "	1500	1520	1355	1265	1140	1220	1405	1310	1240	1200
SiO <sub>2</sub> mg/l										
C.E. umhos/cm			183.7			195.2		188.7		
pH			2.5			2.6		2.8		
Cl <sup>-</sup> meq/l			1710			1580		1560		
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "			146			180		163		
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "										
Ca <sup>++</sup> " "			36.3			39.5		34.5		
Mg <sup>++</sup> " "			280			325		305		
K <sup>+</sup> " "			27.8			24		24		
Na <sup>+</sup> " "			1575			1450		1375		
SiO <sub>2</sub> mg/l			36			92		64		
Eaux phréatiques										

Séquence	T O B O R																
	Profil	CMT 1			CMT 2			CMT 3			CMT 4			CMT 5			
Echantillon	11	12	13	21	22	23	31	32	33	34	41	42	43	51	52	53	54
Profondeur cm	0-15	30-50	80-100	0-20	40-60	80-100	0-20	20-40	60-80	80-100	0-20	40-60	80-100	0-10	10-30	30-50	90-100
Teneur en eau %	275	196	227				130	123			82	77		55		59	
Densité apparente	0.3	0.4	0.35				0.56	0.56			0.78	0.76		0.53		0.82	
Argile %	70.6	84.5	82.2	30	82	78.4	70	66.8	70	72	69.7	71.5	74.1	58.4	69	71	75
Limon fin %	16.6	14.5	16.3	16.6	16.3	18.3	19.2	22.2	19.4	19.4	18.2	18.5	18.5	23.7	19	18	18
Limon grossier %	6.3	0.6	1.1	1.9	1.5	2.5	8	6.9	8.7	6.2	8.7	8.4	6.4	14.3	9.9	9.2	6.5
Sable fin %	3.6	0.3	0.3	1.2	0.2	0.7	2.3	2.9	1.8	1.9	3.2	1.3	0.7	3.3	1.9	1.7	0.4
Sable grossier %	0.9	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.5	1.2	0.5	0.5	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1
Eh mV	-220	-220	-220	-170	-200	-200	-170	-180	-180	-180	270	60	30	130	150	130	100
pH "in situ"	7.2	7	7	6.7	6.6	6.6	6.9	6.6	6.6	6.6	6.5	6.3	6.2	7.3	6.5	6.4	6.4
pH sec	3.8	2.9	3.8	3.5	3	3.6	3.4	2.5	2.3	2.6	6.5	4.9	3	7.1	6.5	4.2	3.4
n	2		1.7	1.7			1.2		1.4		1	0.9		0.8		0.6	
C %	96	77.8	48.2	76	65	69	47.8	47	25.4	22.6	7.8	18.2	17.4	15.8	7.8	17.4	17.4
N %	4.9	2.5	1.9	3.2	1.9	1.9	2	1.5	1	1	0.7	0.7	0.95	1.4	0.5	0.8	0.9
Acides fulviques %																	
Acides humiques %																	
S total %	34.5	62.5	77	53.5	77	96	30.5	87.5	62	65.5	14	55.5	60	13.5	30	46	88
S pyrite %	6.4	19	23	7	24	34	4.8		20	20		14	18			18.5	28.7
Sulfates insolubles	9.9	12.4	11.2	7	11	12	6.1	13.4	12.3	11.2	2.3	7	11	1.2	3.9	8.7	11
Fer libre %	1.4	1.4	1.2	1.1	1	1.04	0.46	1.44	1.12	1	1.28	0.65	0.96	1.28	2.04	0.84	1.04
Fer total %																	
C.E. cmhos/cm								260	325								
pH								2.6	2.4								
Extraites saturés																	
Cl <sup>-</sup> meq/l								2200	2880								
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "								677	634								
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "																	
Ca <sup>++</sup> " "								38	42								
Mg <sup>++</sup> " "								620	730								
K <sup>+</sup> " "								0.9	0.95								
Na <sup>+</sup> " "								2150	2680								
SiO <sub>2</sub> mg/l								104	60.6								
C.E. cmhos/cm	26	33	24	22	33.5	33	15	24	29	26	8.5	31	32	4.5	19	32	33
pH	2.6	2.7	2.9	3.1	3	2.8	3.6	2.8	2.8	3	6.8	3.5	3.1	7.1	6.2	3.4	3.2
Extraites au 1/10																	
Cl <sup>-</sup> meq/l	116	180	136	120	250	236	94	156	200	183	80	246	242	39.4	144	248	254
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "	87.4	63.4	53.1	48	51.9	55.7	28	54	54	46	13	39	46.7	6	22.6	39.4	49.3
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "																	
Ca <sup>++</sup> " "	14	8.6	7.4	6.6	13.3	13.3	6.2	9.6	8.7	8.3	2	8.3	8	0.7	2.5	4.9	7.5
Mg <sup>++</sup> " "	42.6	32.8	41.4	37.2	54.4	53.4	23.5	40	47.4	46.8	15.5	51.4	55.5	5.6	33.2	35.5	65
K <sup>+</sup> " "	0.47	1.4	1.65	1.7	2.8	2	2.7	0.2	0.5	0.35	2.2	5.8	1.6	2.13	4.3	3.6	2.4
Na <sup>+</sup> " "	124	170	137	120	246	224	94	136	173	149	71	210	204	37.6	126	210	224
SiO <sub>2</sub> mg/l	8	6.9	6.2	5.6	20	17.6	13.4	20	16.8	17.6	9.6	10	16.8	7.6	10	13	14.2
C.E. cmhos/cm	71	120	125	90	175	170		100		190	140	235	225		210	260	250
pH	7.2	7.3	6.6	6.6	5.9	6.7		6.7		5.8	6.9	6.2	5.8		6.2	6	6.1
Extraites																	
Cl <sup>-</sup> meq/l	660	1100	1200	720	1500	1500		840		1600	1080	2060	2400		1780	2490	2200
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "	77.1	103	103	85.7	171	263		190		197	154	249	223		249	274	249
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "																	
Ca <sup>++</sup> " "	23.2	36.3	38.4	23.5	42.6	42.2		26.6		48.1	33.4	48	48		35.7	40	43.6
Mg <sup>++</sup> " "	125	190	200	140	275	290		165		320	250	410	405		420	460	460
K <sup>+</sup> " "	11	18.4	17.9	13.6	28	27		16.4		33	19	39.5	39.5		27	37	42
Na <sup>+</sup> " "	565	952	1120	650	1400	1400		825		1475	1000	1600	2150		1475	2150	1875
SiO <sub>2</sub> mg/l																	
C.E. cmhos/cm					63			60				63					60
pH					7.8			7.8				7.8					7.8
Extraites																	
Cl <sup>-</sup> meq/l					572			544				552					544
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "					60			60				60					60
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "																	
Ca <sup>++</sup> " "					22.5			19.3				18.5					21.8
Mg <sup>++</sup> " "					112			105				109					104
K <sup>+</sup> " "					11.1			10.5				10.8					11.1
Na <sup>+</sup> " "					520			510				520					510
SiO <sub>2</sub> mg/l					8.4			7.2				2					5

Séquence	T O B O R			
Profil	CMT 6			
Echantillon	51	62	63	64
Profondeur cm	0-10	10-30	30-50	80-100
Teneur en eau %	28			48
Densité apparente	1.28			0.9
Argile %	63.2	71.1	71	75.9
Limon fin %	25.4	21.1	19.5	18
Limon grossier %	10.1	6.3	8.3	5.7
Sable fin %	1.2	1.3	1.1	0.4
Sable grossier %	0.1	0.2	0.1	0.1
Eh mV	320	330	230	100
pH "in situ"	6.2	5	5.6	6
pH sec	6.2	5	5	3.5
n				
C %	6.6	5.8	7.8	15.8
N %	0.3	0.3	0.6	0.9
Acides fulviques %				
Acides humiques %				
S total %	23	41.5	29	72.5
S pyrite %				
Sulfates insolubles %				
Fer libre %	0.84	2.4	0.56	0.68
Fer total %				
C.E. cmhos/cm	75	90	190	450
pH	5.2	4.5	4.3	2.7
Cl <sup>-</sup> meq/l	540	830	1800	4460
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "	77.1	94.3	180	557
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "				
Ca <sup>++</sup> " "	34	26	42	38
Mg <sup>++</sup> " "	170	200	410	1110
K <sup>+</sup> " "	14	14	17	23
Na <sup>+</sup> " "	570	820	1450	4000
SiO <sub>2</sub> mg/l				
C.E. cmhos/cm	7.2	15	23	39
pH	7.1	6.2	5.7	3.2
Cl <sup>-</sup> meq/l	64	108	192	308
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "	6	12	20.1	42.4
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "				
Ca <sup>++</sup> " "	0.95	1.3	2.2	4.2
Mg <sup>++</sup> " "	13	21.1	41	76
K <sup>+</sup> " "	1.8	2.75	2.85	2.9
Na <sup>+</sup> " "	56	90	160	238
SiO <sub>2</sub> mg/l				
C.E. cmhos/cm	295		320	
pH	6.2		4.6	
Cl <sup>-</sup> meq/l	2550		2880	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "	249		283	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "				
Ca <sup>++</sup> " "	36		36.6	
Mg <sup>++</sup> " "	460		570	
K <sup>+</sup> " "	43		39.5	
Na <sup>+</sup> " "	2725		2650	
SiO <sub>2</sub> mg/l				
C.E. cmhos/cm		301		
pH		4.5		
Cl <sup>-</sup> meq/l		2760		
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "		235		
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "				
Ca <sup>++</sup> " "		41		
Mg <sup>++</sup> " "		540		
K <sup>+</sup> " "		39		
Na <sup>+</sup> " "		2575		
SiO <sub>2</sub> mg/l		34.7		

Séquence Profil	BALINGORE															
	CIV 1			CIV 2			CIV 3			CIV 4			CIV 5			
Echantillon	11	12	13	21	22	23	31	32	33	41	42	43	44	51	52	53
Profondeur cm	0-20	50-70	100-120	0-30	50-70	90-110	0-20	50-70	100-120	0-20	30-50	50-80	100-120	0-20	40-60	30-100
Teneur en eau %	285	155	139	189	130	181	155	122	123	86	110	128		72	121	131
Densité apparence	0.28	0.43	0.5	0.35	0.5	0.42	0.49	0.46	0.46	0.7	0.5	0.5		0.8	0.5	0.5
Argile %				69.3	66.6	64.6				66	71	65.3	67.2			
Limon fin %				15.4	15.9	15.3				16.8	14.7	14.7	11.7			
Limon grossier %				0.5	0.6	0.6				1.7	0.6	0.8	1.2			
Sable fin %				0.6	0.7	0.8				1.6	0.8	0.6	0.8			
Sable grossier %				0.4	0.4	0.3				0.8	0.2	0.3	0.6			
Sh mV	-160	-180	-200	-130	-170	-200	-160	-130	-160	90	-70	-140	-160	+180	-40	-70
pH "in situ"	7	7	6.6	6.2	6.2	6.2	6.2	5.6	5.9	5.8	5.3	5.6	5.8	5.5	5.3	5.5
pH sec	3	2.7	2.7	2.4	2.3	2.4	5	2.1	2.3	5	3.1	2.5	2.5	5.9	3	2.6
n																
C %	151	57	97	53	71	67	78.6	61	47	49.4	64.6	45	35	38.2	35.8	33.4
N %	4.6	1.7	2.2	1.6	1.7	1.7	2.6	1.7	1.5	2.6	2.7	1.5	1.3	1.9	1.3	1.16
Acides fulviques %																
Acides humiques %																
S total %	45.5	60.5	45.5	43.5	55	48	10	84.5	52	8	41.5	72.5	74.5	10	38	53
S pyrite %	26.4	33.5	22.4	33.5	23	17.5										
Sulfates insolubles	18.6	29.3	24.7													
Fer libre %	6.9	0.76	1.5	4.9	1.2	0.2	3.7	1.8	0.3	0.72	1.56	1.36	0.56			
Fer total %																
<b>Extraits saturés</b>																
C.E. mmhos/cm		155	160				40	195	160	32		185		45	105	175
pH		2.4	2.2				4.4	2.5	2.6	5		2		5.5	2.9	2.5
Cl <sup>-</sup> meq/l		840	1060				284	1440	1140	236		1400		368	760	1280
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "		600	634				103	677	531	68.6		560		60	283	454
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "																
Ca <sup>2+</sup> " "		50	54				46	50	50	30		62		34	50	54
Mg <sup>2+</sup> " "		266	391				102	424	370	78		282		80	220	321
K <sup>+</sup> " "		6.3	0.5				13	0.47	0.53	5.3		0.6		5.9	2.2	0.51
Na <sup>+</sup> " "		600	1200				254	1410	1090	220		1400		320	700	1140
SiO <sub>2</sub> mg/l		130	102				29.4	96	80	26		46		26.8	66.8	74
<b>Extraits au 1/10</b>																
C.E. mmhos/cm	13	18	16	13	19	16	4.1	23	18	3.3	18	21	18	3.8	19	20
pH	2.8	2.5	2.6	2.6	2.6	2.7	6.8	2.5	2.6	6.2	3.2	2.7	2.9	7.1	2.9	2.6
Cl <sup>-</sup> meq/l	62.6	78	80	56.6	96	88	31.6	114	94	24.4	118	118	100	29.6	122	116
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "	32	52	62.6	44	60	44.6	12	66	54	8.6	49.1	59.1	43.1	8.6	36.9	52.3
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "																
Ca <sup>2+</sup> " "	11.2	3.8	4	4.8	5.2	4.6	1	5.5	5	0.84	6	6.2	11.4	1.2	6.2	3.2
Mg <sup>2+</sup> " "	32.4	22.4	25.6	22.4	28.8	26	6.8	31.6	30	4.4	30	30.8	30.8	4.4	31.2	30.8
K <sup>+</sup> " "	0.17	0.01	0.05	0.04	0.05	0.08	1.07	0.09	0.1	1	0.66	0.04	0.1	1.1	0.46	0.28
Na <sup>+</sup> " "	40	68	80	49	93	82	34	105	94	23.2	107	105	94	27.4	110	107
SiO <sub>2</sub> mg/l.	17.6	30.4	18	16.2	16.8	16.8	7.4	16.2	17.6	7.4	15.8	15	15.4	8.8	16.2	16.8
C.E. mmhos/cm	22	48	70	32	82.5	83	23	105	95	26	94	105	89	42.5	115	110
pH	4.4	4.9	6.3	4.1	5.2	6.6	7.7	5.5	6.4	6.9	6.1	6.3	6.5	5.2	5.2	5.4
Cl <sup>-</sup> meq/l	170	408	780	284	780	780	200	380	940	240	360	1080	320	360	1200	1080
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "	51.4	51.4	68.6	43	77.1	85.7	25.7	111	94.3	25.7	103	94.3	85.7	34.3	120	103
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "		1	1.5		0.3	1.6				2.9	0.7	0.9	1.2	1.08	0.5	0.3
Ca <sup>2+</sup> " "	8.6	16.2	59	8.9	20	21	4.4	43	27	7.6	33	42	31	11.9	38	37
Mg <sup>2+</sup> " "	42.4	80	276	59.4	158	160	35	172	164	41.4	175	184	158	64	238	216
K <sup>+</sup> " "	4	10.2	23	6.5	16.5	15.3	4	29.1	18.9	4.9	17.3	20.4	17	6.6	20.7	20.1
Na <sup>+</sup> " "	145	355	460	240	620	635	170	830	800	210	800	865	670	300	885	850
SiO <sub>2</sub> mg/l																
C.E. mmhos/cm		21.5			21.3			23.7				21.5			25	
pH		6.7			4.6			3.7				6.9			4.7	
Cl <sup>-</sup> meq/l		200			234			254				234			230	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "		25.7			25.7			25.7				25.7			25.7	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "		0.2										0.2			0.07	
Ca <sup>2+</sup> " "		4.8			8.75			8.75				6.5			9.5	
Mg <sup>2+</sup> " "		30.5			31.5			33				33			40	
K <sup>+</sup> " "		3.75			3.75			4.5				4.25			5	
Na <sup>+</sup> " "		190			205			215				210			235	
SiO <sub>2</sub> mg/l.		4.6			3.6			9.9				2			4.8	
<b>Mappeu phréatiques</b>																

Séquence Profil	BALINGORE																	
	CIV 6			CIV 7				CIV 8			CIV 9				CIV 10			
Echantillon	61	62	63	71	72	73	74	81	82	83	91	92	93	94	101	102	103	
Profondeur cm	0-20	35-35	80-100	0-20	20-40	45-55	80-100	0-30	40-60	80-100	0-20	20-40	50-70	90-110	0-20	30-50	90-110	
Teneur en eau %	86	103	118		60	81	81	37	122	89	67	42	129					
Densité apparente	0.6	0.6	0.6		0.96	0.67	0.67				0.86	0.91	0.56					
Argile %				65	63	67	66				72.4	67.8	65.3	62.6				
Limon fin %				18.9	18	13.2	11.7				15.3	13.5	13.5	13.3				
Limon grossier %				2.4	1.7	1.9	1.9				0.8	0.8	1.3	1.7				
Sable fin %				1.4	0.8	0.6	0.6				0.5	0.5	0.6	0.4				
Sable grossier %				0.5	0.4	0.2	0.2				0.1	0.1	0.3	0.3				
Eh mV	-130	-30	-40	80	200	250	-40	400	330	180	380	430	290	210	410	380	330	
pH "in situ"	5.6	4.2	4.6	3.5	5.2	4.5	4.7	3.5	3.4	3.5	3.5	3.2	3.6	3.7	4.4	3.5	3.7	
pH sec	5.1	3.3	2.6	5.4	5.3	2.9	2.6	3.5	3.3	2.3	3.6	3.4	2.6	2.8	4	3.1	2.4	
n																		
C %	33.4	29.4	45.4	23	13.4	30.2	37.4	10.2	19.4	32.2	9.8	13	30.2	22.2	17.4	26.2	36.2	
S %	1.4	1.2	1.3	1.3	0.76	1.1	1.25	0.5	0.8	1	0.52	0.65	1	0.86	0.76	0.86	1	
Acides fulviques %																		
Acides humiques %																		
S total %	4.1	28	60.5	4.3	5.7	31.5	45	27	41	57	25.5	38	38.5	48.5	29.5	45.5	54.5	
S pyrite %	1.2	2.8	27.2	1.2	1.5	12.3	23.7											
Sulfates insolubles %																		
Fer libre %								2.4	1.36	1.02	4	1.4	1.36	1.12	3.7	3.1	1.24	
Fer total %																		
C.E. mmhos/cm				27	35	180	225				100	135	260	245				
pH				5.6	5.4	3.1	2.6				3.9	3.4	2.7	3				
Cl <sup>-</sup> meq/l				218	288	1600	2000				900	1720	2320	2180				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "				25.7	34.3	326	497				204	231	514	643				
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "																		
Ca <sup>2+</sup> " "				26	30	62	54				38	70	46	62				
Mg <sup>2+</sup> " "				40	61	414	507				257	430	670	630				
K <sup>+</sup> " "				4	5.3	13	1.4				17	23	10	0.7				
Na <sup>+</sup> " "				180	220	1280	1600				790	1520	2050	2060				
SiO <sub>2</sub> mg/l				30.4	28.8	74.2	56				34	41	66.5	67.8				
C.E. mmhos/cm	2.85	15	23	2.6	3.7	17	20	11	17.5	20	7.3	17	22	21	5.2	15	21	
pH	6.9	3.3	2.6	6.6	6.8	3	2.8	4.2	3.5	2.6	4.3	4.1	2.9	3.1	4.8	3.5	2.7	
Cl <sup>-</sup> meq/l	21.6	104	148	21	31.2	112	124	76	132	128	64	128	150	124	45.2	102	116	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "	7.3	24	52.3	4.3	6.4	30	42	71.1	20.1	49.7	13.7	18	37.3	44.6	10.3	21.4	62.1	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "				0.3	0.2													
Ca <sup>2+</sup> " "	0.5	3.2	6	0.3	0.5	3.8	7.5	1.5	4.4	4.6	1.7	3	4.3	4.3	1.3	3.2	7.5	
Mg <sup>2+</sup> " "	3.2	21.2	38	1.9	3.8	29.6	31.5	14	27.9	31.8	16.6	25.3	38	33.6	10.6	28.4	38	
K <sup>+</sup> " "	0.8	1.7	0.14	0.7	1	1.1	0.3	1.5	2.8	0.3	1.25	2	0.7	0.2	1.1	1.5	0.1	
Na <sup>+</sup> " "	25	87	130	20.4	28.6	110	118	72	109	122	60	110	129	124	40.6	87	116	
SiO <sub>2</sub> mg/l.	7.4	13.4	16.8	12.2	9.6	16.8	16.8	7.6	10	15.8	6.6		13.8	16.2	5.4	8.4	21.2	
C.E. mmhos/cm	42.5	128	120	61.8	62	135	140	155	140	145	155	165	165	140	110	145	130	
pH	5.8	4.4	4.1		4.8	4.2	4.4		3.9	4	3.6	3.7	3.7	4.2	4.2	3.9	5.6	
Cl <sup>-</sup> meq/l	372	1260	1220	580	580	1320	1560	1540	1480	1440	1480	1520	1440	1240	920	1200	1220	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "	25.7	120	111	51.4	60	146	163	154	171	189	257	197	180	146	197	197	189	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "																		
Ca <sup>2+</sup> " "	12.6	48	44.5	16	20	44.4	48	41.2	43.6	41.2	33.2	35.7	34.2	42.9	31.4	36.9	36	
Mg <sup>2+</sup> " "	68	256	254	86	100	244	264	272	270	270	350	315	280	250	230	300	280	
K <sup>+</sup> " "	6.8	22	22.6	5.7	8.7	21	23.6	21.2	21.5	21.9	14.6	18.4	18.2	16.9	10.3	14.4	14	
Na <sup>+</sup> " "	300	960	940	520	495	1240	1390	1450	1075	1075	1300	1350	1250	1030	790	1030	1035	
SiO <sub>2</sub> mg/l																		
C.E. mmhos/cm	39.1				41.7			143.5					148.5				115.3	
pH	5.8				3.5			2.7					2.7				2.9	
Cl <sup>-</sup> meq/l	36.9				410			1320					1300				1000	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "	34.3				42.9			137					162				171	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "	0.14																	
Ca <sup>2+</sup> " "	12				13.8			49					37				37	
Mg <sup>2+</sup> " "	62				64.5			270					300				270	
K <sup>+</sup> " "	6				6.5			23.3					18.5				15	
Na <sup>+</sup> " "	333				350			1105					1035				855	
SiO <sub>2</sub> mg/l.	27.2				39.8			80					95				80	

Séquence	G A M B I E															
	CMG 1				CMG 2				CMG 3				CMG 4			
Profil	11	12	13	21	22	23	24	31	32	33	34	41	42	43	44	
Echantillon	11	12	13	21	22	23	24	31	32	33	34	41	42	43	44	
Profondeur cm	0-20	30-70	80-100	0-20	20-40	40-60	90-110	0-20	20-40	40-50	90-100	0-20	20-40	40-60	90-110	
Teneur en eau %	320	138	150	80	140		168	103	147		197	85	170	173	180	
Densité apparente	0.21	0.43	0.38	0.53	0.41		0.37	0.54	0.31		0.35	0.6	0.4	0.35	0.38	
Argile %	54.8	58.6	62.2	57.7	66.6	58.5	62.8	54.5	64.1	66.3	72.3	64.6	66.8	66.5	66.8	
Limon fin %	31.6	28.4	26.1	26.4	30	30	27.4	26.9	32.9	31.4	26.2	28.8	30.3	29.7	29.6	
Limon grossier %	9.2	8.8	6.6	2.7	1.7	0.6	1.3	1.2	1.5	1	0.7	2.4	1.6	2	2.9	
Sable fin %	2.2	3.6	4.4	5.1	1.3	0.7	1.7	2.3	0.6	0.5	0.3	1.6	0.8	0.8	0.6	
Sable grossier %	2.2	0.6	0.7	8.1	0.4	0.2	6.8	15.1	0.9	0.8	0.5	2.6	0.5	1	0.1	
Eh mV	-170	-190	-120	-90	-220	-220	-220	90	-170	-180	-180	200	160	-120	-160	
pH "in situ"	7.1	7	7.2	6.9	5.7	6.7	7	6	6.3	6.6	6.5	5.7	6.1	6.2	6.3	
pH sec	2.1	2.4	3.2	5.1	4.2	2.8	3.3	4.5	2.9	2.7	2.8	4.6	2.5	2.2	2.7	
n	2.8	1.5	1.8	0.9	1.4		1.9	1.2	1.2		1.9	0.8	1.4	1.3	1.9	
C %	86	44.4	28	39.2	44.4	70.4	72	32.8	73	101	48	46.4	78	96	37	
N %	2.7	1.6	1.2	2	2	2.6	2.6	1.5	2.6	3	1.9	2	2.8	2.6	1.7	
Acides fulviques %				1.9	1.8	3.7	4.5	1.8	3.9	3.7	4.7	2	4	4.1	3.6	
Acides humiques %				1.12	1.62	1.71	0.8	0.8	2.3	1.4	0.9	1.07	1.7	1.4	0.9	
S total %	56.4	58.8	41.2	8.8	18.4	35.2	27.2	16.4	34.8	47.2	32.8	6	27.6	60	31.2	
S pyrite %	13	24	30.5	0.8	4.6	12.4	10.2	4	8	20.4	12	1.4	12.4	21.6	15.4	
Sulfates insolubles %				3	4.9	10.4	10	4.4	9.6	10.8	11.3	2.8	10	13.1	10.4	
Fer libre %				3.2	0.8	1.6	1.4	6.4	1.3	1.4	2	2	1.7	2.1	2	
Fer total %				5.8	3.65	3.5	3.7	8.5	3.8	3.6	4	4.3	3	4.7	4.3	
C.E. mmhos/cm		84.400	60.900	45	72											
pH			2.6	5.4	3.6											
Cl <sup>-</sup> meq/l		640	400	332	560											
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "		326	360	120	231											
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "				0.9												
Ca <sup>++</sup> " "		32.2	32.2	32.9	45.4											
Mg <sup>++</sup> " "		512	252	104	228											
K <sup>+</sup> " "		0.4	0.7	7.8	9.2											
Na <sup>+</sup> " "		580	360	270	460											
SiO <sub>2</sub> mg/l			104	28												
C.E. mmhos/cm	9.500	6.690	5.050	4.27	6.1	9.5		5.8	11.3	12.3	13	6.4	11.3	12.3	11.8	
pH	2.5	2.7	3.1	7.1	3.8	2.8		6.6	2.9	2.8	3	6.7	2.7	2.5	2.9	
Cl <sup>-</sup> meq/l	42	32	25.2	31.2	42.4	64		42	84	88	100	49	76	80	92	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "	77.1	49.3	32.1	14.6	24	42		15.9	51.4	51.4	43.3	13.7	60	68.6	40	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "				0.3								0.2				
Ca <sup>++</sup> " "	10.4	4.8	5.8	2.4	6.2	8.8		2.8	10.2	9.6	10.4	2.7	22	10.2	8.4	
Mg <sup>++</sup> " "	28.8	22.4	17.6	6	13.8	29		3.4	29.4	34.4	37	9.2	25.2	31.2	32.8	
K <sup>+</sup> " "	0.06	0.45	0.45	1.7	1.2	0.45		1.13	0.7	0.7	0.3	1.4	0.7	0.4	0.3	
Na <sup>+</sup> " "	36	26	16	34.5	43	58		43	75	81	98	48	68.5	76	90	
SiO <sub>2</sub> mg/l	28	35.2	46.8	9.2	11	14.6		12.6	12.6	15.2	13.8	8.4	13	14.6	13.8	
C.E. mmhos/cm	28.400	25.100	19.610	43.8	39.2	46	57.5	63	60	63	71.6	55.1	51.5	51.5	68	
pH				8.3	8.5	8.5	8.3	7.6	8.3	8	7.5	6.8	7.5			
Cl <sup>-</sup> meq/l	264	224	176	394	328	396	512	592	560	580	640	512	488	478	560	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "	34.3	34.3	42.9	51.4	42.9	51.4	68.6	86.7	94.3	85.7	94.3	94.3	68.6	77.1	85.7	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "				4.8	11.5	13.2	19.2	2.1	9	7.8	10.2	1.2	1.2	1.4		
Ca <sup>++</sup> " "	13.5	8.6	6.4	27	25	31	38	36.5	35	36.5	34	29	29	27	40.5	
Mg <sup>++</sup> " "	62	46	34	100	91	128	184	166	164	166	197	122	116	122	192	
K <sup>+</sup> " "	4.3	3.7	3.2	6.4	4.6	5.5	6.8	10	8.2	8.5	9	9.3	8.4	7.4	7.6	
Na <sup>+</sup> " "	250	200	180	326	288	330	416	555	470	500	550	470	430	430	515	
SiO <sub>2</sub> mg/l																
C.E. mmhos/cm		46				54					54					
pH		7.6				7.6					7.6					
Cl <sup>-</sup> meq/l		350				460					460					
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "		51.4				42.9					42.9					
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "						1.2					1.2					
Ca <sup>++</sup> " "		12.4				15.6					15.6					
Mg <sup>++</sup> " "		74.4				84.8					84.8					
K <sup>+</sup> " "		7.7				9					9					
Na <sup>+</sup> " "		330				460					460					
SiO <sub>2</sub> mg/l		11.2				4.4					6.8					

Séquence	G A M B I E															
	CMG 5				CMG 6				CMG 7				CMG 8			
Profil	51	52	53	61	62	63	64	71	72	73	74	81	82	83	84	
Echantillon	51	52	53	61	62	63	64	71	72	73	74	81	82	83	84	
Profondeur cm	0-20	40-60	80-100	0-15	15-35	40-60	80-100	0-15	15-35	40-60	50-100	0-15	20-40	50-70	80-100	
Teneur en eau Z	83	107	144	92	95	146	148	60	75		127	36	71	128	137	
Densité apparente	0.65	0.58	0.44	0.62	0.63	0.45	0.44	0.73	0.73		0.45	0.89	0.65	0.47	0.45	
Argile %	69	67.4	62.8	54.6	61.8	67.4	52.3	77.4	70.9	75.4		77.4	77.6	72.7	72	
Limon fin %	27.6	29.4	30.3	24.4	25.1	28.9	33.8	20.4	19.4	22.4		19.2	17.8	23.7	23.5	
Limon grossier %	2	1.9	4.6	3.3	0.8	1.8	10.3	0.7	1.3	1.3		1.2	0.5	2	3.4	
Sable fin %	0.6	0.6	1.7	2.6	1.5	1.2	1.9	1	2.4	0.8		1.4	3.4	1.3	0.9	
Sable grossier %	0.9	0.7	0.6	15.1	10.8	0.7	1.7	0.5	6	0.1		0.8	0.6	0.3	0.2	
Eh mV	220	10	-180	220	280	10	-180	430	400	300	-20	480	580	480	280	
pH "in situ"	5.6	6	6.2	5.6	5.7	6	6.2	4.1	3.9	4.4	4.3	4.7	3.7	3.6	3.9	
pH sec	5.1	3.4	2.4	5.4	5.3	2.3	2.1	3.9	3.6	4.3	4.3	3.5	3	3.1	3.1	
n	0.9	1.2	1.6	1.1	1.1	1.2	1.5	0.6	0.9			0.4	0.8	1.5	1.6	
C %	28	38	36	34.8	30	70	58	25.6	13.6	18	22.4	16	8.4	10	13.6	
N %	1.5	1.4	1.4	1.7	1.1	2.3	1.8	1.5	0.6	0.67	1.03	0.9	0.5	0.4	0.7	
Acides fulviques %	2.8	4.3	4.9	1.67	1.75	4	3.95									
Acides humiques %	0.54	1.15	0.9	0.53	0.33	1.27	0.9									
S total %	5.6	23.6	42.8	3	5	45.6	61.2	2	5.8	5.4	8.1	5.2	20.4	11.2	7.1	
S pyrite %	0.6	2.5	14.4		3.6	15	27		0.4	1.4	0.5					
Sulfates insolubles %	2.5	7.6	12.1	1.7	2.1	12.4	14.4									
Fer libre %	0.6	0.6	2	1.5	2.5	1.8	2.7					1.45	10	2.3	0.16	
Fer total %	2.8	3.1	4	6.75	4.25	4	4.6					4.2	14.5	4.7	1.7	
C.E. umhos/cm	84.4	247										82.1	80			
pH	5.3	2.5										4.6	3.4			
Cl <sup>-</sup> meq/l	700	2200										760	720			
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "	120	343										103	77.1			
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "	0.6															
Ca <sup>++</sup> " "	37.8	44.8										34.2	25.5			
Mg <sup>++</sup> " "	168	560										168	152			
K <sup>+</sup> " "	11	20.7										11	10			
Na <sup>+</sup> " "	680	1860										640	640			
SiO <sub>2</sub> mg/l		51.8										31.2	56.6			
C.E. umhos/cm	9.8	28.8	26.1	5.5	7	14.2	16.3	6.7	8.4	12	14.2	8.4	6.7	13.2		
pH	6.5	3.2	2.9	7.1	6.5	2.7	2.6	4.2	4	4.5	4.2	4.6	3.8	3.9		
Cl <sup>-</sup> meq/l	37.2	240	196	46	75	128	116	72	88	124	144	88	64	128		
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "	15	34.7	47.1	9	13.3	36	66.4	10.7	11	16.7	22.3	12.4	6.6	15		
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "	0.15			0.5	0.4											
Ca <sup>++</sup> " "	3.6	6.2	7.5	1.3	2.5	9.8	11.2	1.8	2.6	4.3	5.4	2.6	1.3	4.1		
Mg <sup>++</sup> " "	17.2	42	47.2	6.4	11.2	36	42.8	9.2	13.2	24.8	28.6	14.8	9.2	23.8		
K <sup>+</sup> " "	1.8	2.4	0.9	1.2	1.5	0.5	0.1	1.5	1.7	2.4	2.7	1.7	1.3	2.2		
Na <sup>+</sup> " "	84	157	154	46	70	108	114	58	77	112	130	72	58	116		
SiO <sub>2</sub> mg/l	20	22	29.2	24	20.8	27.6	25.2	15.6	19.4	19.8	20.8	13.8	21.4	19.4		
C.E. umhos/cm	124	139	124		75.5	75.5	75.5		12.4	12.4	11.7		111	103	90.2	
pH																
Cl <sup>-</sup> meq/l	1240	1280	1120		700	680	680		1140	1120	1080		1040	960	820	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "	180	189	180		103	103	137		154	171	154		137	120	120	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "																
Ca <sup>++</sup> " "	54.5	54.5	58		40.5	39	40		63.5	63.5	54.5		43	45.5	38	
Mg <sup>++</sup> " "	188	320	292		190	184	208		280	278	266		260	236	220	
K <sup>+</sup> " "	19.7	20	18.7		10.7	11.3	10.5		18.9	17.1	19.2		14	14.6	13.3	
Na <sup>+</sup> " "	1000	1090	990		600	560	590		940	940	880		865	840	780	
SiO <sub>2</sub> mg/l																
C.E. umhos/cm		165				80					150			130		
pH		4.7				5.3					3.2			2.7		
Cl <sup>-</sup> meq/l		1380				712					1240			976		
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "		189				85.7					180			129		
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "		0.1														
Ca <sup>++</sup> " "		57.2				35.2					63.4			46		
Mg <sup>++</sup> " "		348				136					312			232		
K <sup>+</sup> " "		22.6				12					21.4			168		
Na <sup>+</sup> " "		1155				650					1075			380		
SiO <sub>2</sub> mg/l		35.6				31.2					64			80		

Séquence	B A S S I D																	
	CMB 1			CMB 2			CMB 3			CMB 4			CMB 5					
Profil	11	12	13	21	22	23	31	32	33	41	42	43	44	51	52	53		
Echantillon	0-10	40-60	70-90	0-20	40-60	70-90	0-20	40-60	70-90	0-20	30-50	70-90	90-110	0-20	40-60	90-110		
Teneur en eau %	173	103	82	127	108	25	136	153	30	77	123	77	22	114	135	22		
Densité apparente	0.38	0.63	0.75	0.6	0.7	1.5	0.55	0.46	1.3	0.8	0.61	0.8	1.5	1.13	0.56	1.52		
Argile %	19.2	37	26.8	29.7	27.3	34	31.1	26.4	13.7	18.6	48	30.7	38.6	19.8	6.8	11		
Limon fin %	8.7	7.4	11.6	7	8.4	14	9.9	6.3	4.5	10.4	10.8	6.8	12.2	10.8	11.7	13.5		
Limon grossier %	14.8	9.9	9.5	4.8	10.2	12.7	18.2	8.9	3.8	22.3	12.8	12.1	8.3	25.2	7	11.5		
Sable fin %	45.7	24.9	35.1	42.2	19.8	29.1	36.5	52.7	51.9	45.5	27.9	30.7	28.5	41.4	33.9	28.1		
Sable grossier %	11.6	20.8	17	16.3	34.3	10.2	4.3	5.7	26.1	3.5	0.5	19.7	12.4	2.8	1.4	13.4		
Eh mV				-260	-360	-400	-250	-340	-400	-100	-300	-370	-380	+10	-300	-300		
pH "in situ"	5.9	6.1	6.4	6.2	6.4	6.9	6.4	6.3	6.4	6.2	6.2	6.4	6.9	6.5	6.4	6.7		
pH sec	2.9	2.4	6.9	2.9	6.3	7.3	3.5	2.7	6.5	4.2	2.4	4	4.9	4.1	2.5	6.9		
n	1.9	1.3	1.9	1.6	2	0.3	1.8	3	0.6	1.7	1.7	1.2	0.2	3.2	1.3	0.3		
C %	96	46	12.6	62.5	29.4	5.6	53.4	29.6	11.7	25	29.4	33.5	3.8	16.4	78.5	2		
N %	2.7	1.2	0.3	1.9	0.8	0.25	1.5	0.8	0.37	1.28	1.13	0.9	0.2	0.77	1.7	0.16		
Acides fulviques %	5.8	3.6	1.08	5.4	1.8	0.77	2.66	2.45	1.75	1.74	2.98	2.3	0.8	1.47	3.83	0.57		
Acides humiques %	2.2	1.6	0.3	1.7	1.4	0.13	1.19	1.07	0.6	0.9	1.4	1.11	0.25	1.04	2.24	0.13		
S total %	21	18.6					20.1	13.2	7.2	5.1	11.7	11.8	12.7	11.1	34.2	10.1		
S pyrite %	15.4	10.6					6	5	1.9	1.5	10.8	9.3	10.2	4.3	10.9	9.8		
Sulfates insolubles	7	9					5.7	6.3	5.8	3.1								
Fer libre %	0.74	1.24	0.53	0.74	0.9	0.4	0.5	0.9	0.6	0.2	1	1.2	0.85	0.37	1.34	0.44		
Fer total %	2	2.8	2	2.15	2.14	2.11	1.95	1.95	1.67	1.04	3	2.6	2.3	1.2	3.3	2.45		
Eaux saturées																		
C.E. mmhos/cm				169	107.7	41												
pH				2.6	7.7	7.1												
Cl <sup>-</sup> meq/l				1480	920	320												
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "				291.4	162.8	125												
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "					7.8	0.7												
Ca <sup>++</sup> " "				44	72	48												
Mg <sup>++</sup> " "				400	244	74												
K <sup>+</sup> " "				11.8	15.4	6												
Na <sup>+</sup> " "				1200	750	320												
SiO <sub>2</sub> mg/l																		
C.E. mmhos/cm	15	9.5	3.46	13.8	7	3	10.5	8.1	4.9	8.1	11.7	8.4	4.1	7.02	19.32	3.7		
pH	3.4	2.9	7.6	3.4	7.9	7.5	5	3.2	7.7	5.9	3	5	6.9	5.4	2.9	7.5		
Cl <sup>-</sup> meq/l	160	80	20	118	48	16.8	84	56	32.8	72	88	60	25	52	136	22		
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "	33.4	30.9	16.3	43.7	17.15	14.6	25.7	21	24	12.8	47.1	33.4	22.7	13.3	50.5	18		
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "			1.05		2.25	0.85				1.35	0.15		0.1	0.35				
Ca <sup>++</sup> " "	7.95	5.6	7.25	6.5	2.15	5.55	6	4.2	1.7	3.15	4.5	18.5	10	2.95	9	8		
Mg <sup>++</sup> " "	31.5	21	5.05	27.5	13.5	4.2	21.5	16	8.6	14.5	22.5	19	7.2	13.5	39	4.6		
K <sup>+</sup> " "	2.9	0.47	1.28	1.95	1.95	1.2	3.2	0.6	0.9	2	1.4	0.7	0.9	2	1	1.53		
Na <sup>+</sup> " "	112	66	24	100	50	21	84	59	31	66	86	67	39	61	139	29.5		
SiO <sub>2</sub> mg/l	3	6.9						2.2			4.2							
C.E. mmhos/cm	85	85	102	95.7	87.9	110.6	100.7	102	122.3	117	110.6	102	117					
pH	7.4	7.7	1.7	7.5	8	1.5	7.6	2.5	1.9	7.5	7.8	7.9	6.5					
Cl <sup>-</sup> meq/l	756	720	880	832	768	900	980	940	1060	1060	1000	1040	1060					
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "	85.7	77.1	137.1	102.8	77.1	162.8	102.8	111.4	137.1	111.4	111.4	111.4	128.5					
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "	2.8	4.6		1.5	5.9		3.5			4.2	5.2	5.7	1					
Ca <sup>++</sup> " "	31.4	31.8	42	37.6	31.8	44	35.2	36.8	49.2	46.8	36.8	44.8	45.8					
Mg <sup>++</sup> " "	186	180	186	200	180	204	216	224	242	248	242	256	242					
K <sup>+</sup> " "	25.5	22.7	28	27.7	24.2	27.2	28.7	28	59.2	32.7	27.7	31.5	28.7					
Na <sup>+</sup> " "	600	660	625	650	625	675	700	675	1050	825	762.5	762.5	825					
SiO <sub>2</sub> mg/l																		
C.E. mmhos/cm				88.1						97				127.1				
pH				8						8				8				
Cl <sup>-</sup> meq/l				800						800				1160				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "				80.6						82.3				128.6				
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "				2.6						2.6				3.7				
Ca <sup>++</sup> " "				25.2						29.6				39.8				
Mg <sup>++</sup> " "				176						184				272				
K <sup>+</sup> " "				14.2						15.4				21				
Na <sup>+</sup> " "				665						665				1000				
SiO <sub>2</sub> mg/l				2										25.2				
Eaux Interstitielles																		
C.E. mmhos/cm																		
pH																		
Cl <sup>-</sup> meq/l																		
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "																		
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "																		
Ca <sup>++</sup> " "																		
Mg <sup>++</sup> " "																		
K <sup>+</sup> " "																		
Na <sup>+</sup> " "																		
SiO <sub>2</sub> mg/l																		
C.E. mmhos/cm																		
pH																		
Cl <sup>-</sup> meq/l																		
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "																		
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "																		
Ca <sup>++</sup> " "																		
Mg <sup>++</sup> " "																		
K <sup>+</sup> " "																		
Na <sup>+</sup> " "																		
SiO <sub>2</sub> mg/l																		
Nappes phréatiques																		
C.E. mmhos/cm																		
pH																		
Cl <sup>-</sup> meq/l																		
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "																		
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "																		
Ca <sup>++</sup> " "																		
Mg <sup>++</sup> " "																		
K <sup>+</sup> " "																		
Na <sup>+</sup> " "																		
SiO <sub>2</sub> mg/l																		



Séquence	B A S S I D																
	CMB 10				CMB 11				CMB 13				CMB 15				
Profil	101	102	103	104	111	112	113	114	131	132	133	134	151	152	153	154	
Echantillon	20-40	40-60	60-80	100-120	15-30	45-65	65-85	100-120	0-20	40-60	80-100	110-120	0-20	50-70	70-90	90-110	
Profondeur cm		25	66	75		57	60	56		51	93	26		56	25	21	
Teneur en eau %		1.44	0.94	0.8		0.99	0.92	0.95		0.97	0.7	1.28		1.02	1.37	1.53	
Densité apparente		11.6	28.1	32	43.4	9.1	30.4	31.5	59.6	8.9	32.5	43.4	26.3	6.8	49.4	26.5	35
Argile %		8.5	12	11.8	9.7	4.6	11.4	12.4	17.3	5.5	9.8	13.2	8.2	4.5	12.8	8	11.7
Limon fin %		10.6	9.7	9.7	6.6	12.2	8.7	7.1	6.6	19.8	13.9	11.7	7.7	20.5	10.9	3.6	10.8
Limon grossier %		66.9	46.9	44.8	35.4	68.1	47.2	47.9	15.5	62.9	42.7	26.2	32.8	63.3	24.7	46.2	30.6
Sable fin %		2.4	3.3	1.6	4.9	6	2.3	1.1	1	2.9	1.1	3.5	25	4.9	2.2	15.7	11.9
Sable grossier %			180	120													
Eh mV			4.4	4.3	5.2		4.5	4.2	4.5								
pH "in situ"		5	3.7	2.7	2.4	6.7	4.4	4.1	2.4	4	3.7	2.1	2.3	6.5	6.1	6.4	7.4
pH sec			0.3	1.3	1.1		1.2	1.2	0.7		1	1.3	0.4		0.9	0.4	0.2
n		1.64	8.6	14.4	19.8	3.32	7.6	12.5	19	1.72	7.9	26.5	3.1	1.76	6.4	1.7	2.4
C %		0.12	0.32	0.43	0.63	0.12	0.3	0.47	0.84	0.1	0.27	0.64	0.25				
N %						1.51	2.78	3.68	4.93		4.58	4.6	1.44		2.7	1.22	0.74
Acides fulviques %						0.07	1.17	2.71	1.59		0.38	1.83	0.33		0.33	0.2	0.15
Acides humiques %				18	19.2		8.5	33.9	24.3		39.3	44.4	24		12.6	4.5	4.3
S total %				5	11.4		0.7	0.3	9.8		0.4	7.7	11.5		0.6	0.6	1.6
S pyrite %																	
Sulfates insolubles %																	
Fer libre %	0.46	0.63	0.38	0.30	0.87	1.5	1.5	0.96	0.44	2.32	0.74	0.95	0.38	1.8	1	1.2	
Fer total %	0.7	2.08	0.66	0.76	1.34	2.5	2.6	3	1.06	3.9	2.42	2.32	0.9	4	2.4	3	
C.E. mmhos/cm	150.35	218.7	274.1	320.75					299	281	365	275					
pH	5.8	3.6	2.2						3.5	3.1	1.5	1.7					
Cl <sup>-</sup> meq/l	1380	2200	2560	2800					2800	4400	4000	2200					
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "	137.1	197.1	299.9	454.2					214.2	325.7	454.2	454					
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "																	
Ca <sup>++</sup> " "	35.2	54	48	36					44	28.8	27.6	47.6					
Mg <sup>++</sup> " "	268	420	496	704					556	1000	860	520					
Fe <sup>++</sup> " "	19.8	30	17	6					72	48	44	6					
Na <sup>+</sup> " "	1250	1950	2300	2550					2500	3800	3900	1900					
SiO <sub>2</sub> mg/l																	
C.E. mmhos/cm	5.8	9.52	12.28	18	5.45	10.97	12.28						8.18	9.61	4.43	4.27	
pH	4.8	4.1	3	2.9	6.9	4.5	4.2	2.9					6.7	6.6	6.6	7.2	
Cl <sup>-</sup> meq/l	53.6	84	108	148	51.6	104	152	150					72	86	41.2	48	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "	5.57	9	14.5	25.7	5.4	10.3	11.1	30					6.86	8.14	3.36		
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "					0.2								0.2	0.2	0.2	0.5	
Ca <sup>++</sup> " "	1.2	1.85	2.35	3.45	0.75	1.75	1.95	3.35					0.84	1.8	0.6	7.2	
Mg <sup>++</sup> " "	9	14.5	18	28.5	9	18	20	32.5					16.4	11.5	2.8	4.4	
K <sup>+</sup> " "	1.5	2.3	1.7	1.1	1.38	2.35	2.73	1.2					1.9	2.3	1	1.24	
Na <sup>+</sup> " "	47.5	80	95	130	47.5	97	105	145					57.5	75	36	32.5	
SiO <sub>2</sub> mg/l																	
C.E. mmhos/cm			250.4	244.7		244.2	240	231.5		500	336.1	361.4		282.3	218.2	209.8	
pH			2	2.5						2.6	2.7	1.7		6.1	5.7		
Cl <sup>-</sup> meq/l			2000	1980		2060	2080	2040		4720	3120	3627		3640	2720	2320	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "			180	171.4		162.8	180	180		334.2	231.4	240		180	137.1	222.8	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "														0.4	0.5		
Ca <sup>++</sup> " "			40	41.2		39.4	40	38.4		33.6	32	42		52	68	64	
Mg <sup>++</sup> " "			420	420		462	462	468		920	680	760		500	452	460	
K <sup>+</sup> " "			55.2	56.5		53.5	54.5	55		104	72	75		50	38	34	
Na <sup>+</sup> " "			1487.5	1450		1500	1475	1487.5		3700	2550	2600		2000	1550	1500	
SiO <sub>2</sub> mg/l																	
C.E. mmhos/cm			207.1			212.3					283						
pH			7.2			4.3					3.5						
Cl <sup>-</sup> meq/l			172			1860					2600						
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "			154.2			162.8					214						
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "																	
Ca <sup>++</sup> " "			37.2			37.6					41.2						
Mg <sup>++</sup> " "			382			428					536						
K <sup>+</sup> " "			341			38					52						
Na <sup>+</sup> " "			1500			1600					2300						
SiO <sub>2</sub> mg/l			26.2			42.4					65.2						



Séquence Profil	N° D'ÉCHANTILLON																		
	CMN 1				CMN 2				CMN 3				CMN 4				CMN 5		
Echantillon	11	12	13	21	22	23	31	32	33	41	42	43	44	51	52	53	54		
Profondeur cm	0-25	40-70	80-100	0-25	40-70	80-110	0-20	40-70	80-110	0-20	20-40	50-70	90-110	0-15	20-40	50-70	80-100		
Teneur en eau %	137	163	151	101.4	178	172	63	78	80		46		71	29.4	63	77			
Densité apparente	0.5	0.42	0.43	0.6	0.4	0.4	0.85	0.69	0.7					1.19	0.68	0.61			
Argile %	27.3	63.6	61.2	30.4	69	63.3	18.4	30.1	32	13.1	23.3	32.7	29.3	8.9	25.7	34.7	35.1		
Limon fin %	11.2	17.5	16.6	11	16.4	16.4	7.9	7.5	8.7	6.6	7.4	9	8.7	6.3	8.3	9.1	9.8		
Limon grossier %	31	13	14.4	23	9.7	12.6	23	22.5	27.4	27.1	28.9	22.6	29.5	31.1	25	25.1	27.6		
Sable fin %	29.9	5.8	7.3	35	4.2	6.9	40	39.3	31.5	32.4	39.4	34.5	31.4	32.1	38.3	28.8	26.3		
Sable grossier %	0.5	0.1	0.5	0.6	0.7	0.8	0.7	0.6	0.4	0.8	1	1.2	1.1	1.6	1.7	2.3	1.2		
Eh mV	130	-180	-180	-60	-180	-200	240	-10	-140	280	280	160	100	260	320	180			
pH "in situ"	5.7	6.1	6.3	5.7	6.3	6.3	5.7	5.5	5.7	6	6	5.9	6	6.1	6.1	5.6	6.1		
pH sec	2.7	2.7	3.2	2.5	5.5	3.6	4	2.5	2	6.1	3.4	2.2	2.3	6.5	6.3	2.4	2.3		
n	1.7	1.5	1.5	1.6	1.7	1.5	0.4	1.3	1.4		1		1.3	1.1	1.7	1.2			
C %	64	61.5	48	39	51	59	15.6	30.5	22.5	1.92	12.1	23	22	2.2	4	28.5	24.5		
N %	2.18	1.88	1.74	1.35	1.85	1.9	1.3	0.62	0.62	0.12	0.36	0.58	0.53	0.22	0.22	0.6	0.6		
Acides fulviques %	5.47	5.27	5.11	4.01	5.1	5.2	2.37	3.35	3.3	0.56	2.08	3.22	2.65		1.76	2.06	3.05		
Acides humiques %	1.13	1.66	1.63	1	1.24	1.16	0.5	1.05	0.7	0.36	0.5	0.86	0.97		0.3	1.03	1.08		
S total %	39.2	48.8	36	23.2	32.8	63.2	12.8	31.2	48.8	5.6	12.8	23.2	21.6		11	34.4	26.4		
S pyrite %	7.9	8.6	7	8.8	9.5	9.5	3.6	14.1	14.8	0.64	9.4	16	15.2		0.7	14	15.8		
Sulfures insolubles %	9.5	11.7	12.5	7.9	15.4	16.7	2.7	9.1	7.1		0.9	3.6	8.1		1.5	7.8	8.4		
Fer libre %				0.78	2.04	1.64	0.3	1.6	1.3	0.78	1.7	1.3	1.16						
Fer total %				3.25	2.78	3	1	2.3	2.6	1.2	2.5	2.3	2						
C.E. ombos/cm				347.2	304.9	337.8													
pH				2	6.8	2.7													
Cl <sup>-</sup> meq/l				2200	2200	2500													
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "				411	249	360													
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "																			
Ca <sup>2+</sup> " "				40.2	65	40.2													
Mg <sup>2+</sup> " "				510	480	710													
K <sup>+</sup> " "				15.6	13.8	7.1													
Na <sup>+</sup> " "				2000	1870	2140													
SiO <sub>2</sub> mg/l				42.2		44													
C.E. ombos/cm		17.7		15.4	18.6	18	8.8	14	12.3	4.6	8.2	11.3	11.3	5	7.2	12.3	12.3		
pH		3		2.9	7.4	3.6	4	2.6	2.7	5.6	3.3	3	2.8	6.4	6.6	2.9	2.9		
Cl <sup>-</sup> meq/l		120		112	132	120	79.6	88	88	39.6	65.6	76	76	43	63.2	88	92		
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "		39.4		31.3	57.8	51	13.5	42	34.3	5.8	14.7	32.6	31.7	5.8	8.2	34.7	35.1		
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "					2.1									0.35	0.2				
Ca <sup>2+</sup> " "		8.3		6.5	40.5	25.5	2.95	5	4.6	1.3	3	4.5	4.7	2	2.2	4	3.2		
Mg <sup>2+</sup> " "		28		23.5	32	32.5	13	20.5	20.5	5.5	12	17.5	16.5	10.2	8.5	18.3	19		
K <sup>+</sup> " "		1.7		1.4	1.5	0.85	1.7	0.2	0.9	1	0.8	0.2	0.3	1.1	1.5	0.5	0.5		
Na <sup>+</sup> " "		125		115	130	130	70	90	100	35	60	80	75	35	55	90	85		
SiO <sub>2</sub> mg/l		14.4		8	4	12	2.4	8.6	7.6	2	7.6	5.6	5.6	1.6	4.4	7.6	7.2		
C.E. ombos/cm	107	100	95.4	107	100	103	150	140	150	173	139	159	129		159	150	150		
pH	7.8	7.8	7.9	7.4	7.9	7.9	7.9	7.6	7.5	7.2	7.3	7.3	7.2		7.4	7.1	6.2		
Cl <sup>-</sup> meq/l	1060	980	940	1060	1060	1000	1420	1380	1420	1620	1400	1470	1300		1540	1400	1440		
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "	111	94.3	85.7	111	94.3	94.3	129	129	137	137	146	137	163		163	146	146		
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "	8.5	6.4	11.6	5	9.4	9.6	7.4	1.2	1.8	3.5	1.2	1.8	1.4		2	0.5	0.4		
Ca <sup>2+</sup> " "	36.6	35.2	28.3	36.2	37.8	35.9	42.2	41.5	43	48.8	45.4	45.8	42.6		62	45.8	45.8		
Mg <sup>2+</sup> " "	200	200	180	200	210	200	260	260	260	290	260	280	250		310	260	280		
K <sup>+</sup> " "	22.5	20.7	20	23	24	21	32	30.5	29.5	32.5	29	31	27		30.5	27	25		
Na <sup>+</sup> " "	960	390	780	815	780	780	1060	1080	1150	1220	1060	1170	1020		1200	1080	1080		
SiO <sub>2</sub> mg/l																			
C.E. ombos/cm		105			111			137				148		148					
pH		8			7.4			7.5				7.6		7.7					
Cl <sup>-</sup> meq/l		960			1080			1320				1360		1580					
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "		90.8			92.6			121.7				93.4		92.6					
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "		3.1						1.4				1.5		2.8					
Ca <sup>2+</sup> " "		41.2			43.2			52				50		56					
Mg <sup>2+</sup> " "		184			200			244				252		304					
K <sup>+</sup> " "		21.4			23.6			34				34		40					
Na <sup>+</sup> " "		850			950			1150				1200		1350					
SiO <sub>2</sub> mg/l		21			13.6			10				11		13					

Séquence Profil	N° D'ÉCHANTILLON																	
	CMN 7				CMN 8				CMN 9				CMN 10					
Echantillon	71	72	73	74	81	82	83	91	92	93	94	101	102	103	104	105	106	
Profondeur cm	0-20	20-40	50-70	90-115	0-25	30-50	85-110	0-15	20-40	50-70	80-110	0-15	20-40	40-60	80-100	150-170	200-220	
Teneur en eau %		40	74	75					47	83	103		54	77	87			
Densité apparente		0.9	0.74	0.7					0.91	0.56	0.54		0.59	0.67	0.58			
Argile %	3.1	22.8	38.2	36.6	31.1	47.8	33.3	7.1	35.7	45	44.2	3.4	30.1	30.4	39.5	26.5	24.6	
Limou fin %	4.8	8.3	12	11.7	9.4	14.3	11.3	3.2	11.2	13.9	12.6	5.7	11.4	9.8	12.3	7.7	7.3	
Limou grossier %	31.3	27.4	24	22.4	26.5	14.7	24.8	31.1	21.1	20.9	24.3	33.3	24	26.5	25	23.1	31	
Sable fin %	56.4	39.6	24.4	27.8	30.5	15.6	30.1	56.6	29.7	19.3	18.2	50.6	30.3	31.6	21	40.2	34.4	
Sable grossier %	2.4	1.9	1.4	1.5	2.5	7.6	0.5	2	2.3	0.9	0.7	1.8	4.2	1.7	2.3	2.5	2.7	
Eh mV																		
pH "in situ"		5.6	6.1	5.6					5.8	5	7		4.8	5.7	7.7	8.1	7.7	
pH sec	8.1	6.1	2.1	2	7.7	7.8	6.8	7.8	5.5	2	2.3	7.4	3.8	2.3	2.4	2.4	2.1	
n		0.9	1	1.2					0.8	1.1	1.5		1.1	1.4	1.2			
C %	0.92	5.3	30.5	23.5	3.4		22.7	1.72	7.6	32	28	1.32	7.8	24	32	17.5	21	
N %	0.12	0.27	0.60	0.37	0.2		0.6	0.12	0.33	0.64	0.75	0.12	0.3	0.5	0.7	0.5	0.46	
Acides fulviques %	1.68	2.1	4.3	4.5					2.93	5.32	3.37		3.5	3.2	3.7	2.9	3.3	
Acides humiques %	0.05	0.54	1.03	1.16					0.51	1.11	0.92		0.8	2.34	0.78	1.2	1.5	
S total %		5.1	24.5	44	10.4		27.2		13.6	56.8	40.8		16.3	36.8	38.4	31.2	22.4	
S pyrite %		2.4	14	14.5			9.8			10.8	13.2		0.96	19.2	11.3	11.1	13.8	
Sulfates insolubles		4.5	8.3	8.9			3.5		9.5	11.1	10		8.5	5.6	7.4	6.7	8.3	
Fer libre %	0.82	2.12	1.64	1.32	2.16		0.5	1.04	3.72		1.5	1.36	3.36	1.28	0.98	0.7	1.35	
Fer total %	1	2.65	2.53	2.7	3.23		1.78	1.68	4.6		3.03	1.35	4.2	2.8	2.5	2.3	2.25	
C.E. cmhos/cm					140	209	231.7						271	287	347.2			
pH					6.9	6.5	7.2						3.2	2.2	1.5			
Cl <sup>-</sup> meq/l					1280	1680	1880						2280	2340	2580			
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "					129	154	240						206	317	480			
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "					2.2	1.8	4.6											
Ca <sup>++</sup> " "					58	94	70						58	65	73.1			
Mg <sup>++</sup> " "					195	230	340						340	390	500			
K <sup>+</sup> " "					19.9	36	45						44	7.5	28			
Na <sup>+</sup> " "					1100	1480	1620						1920	2000	2340			
SiO <sub>2</sub> mg/l													23.8	45.2	59.2			
C.E. cmhos/cm	6.1	7.2	14.9	14				7.2	10.2	17.3	19.6	8.2	11.3	14	17.7	11.3	11.7	
pH	7.7	6.5	2.7	2.6				7.4	6	2.8	2.8	7.5	4.7	2.9	2.8	3.1	2.8	
Cl <sup>-</sup> meq/l	52.3	64.8	108	104				64.8	102	128	144	76.8	100	116	126	80	86	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "	7.4	8.2	36.4	34.7				8	10.5	31.7	35.5	8.4	9	18.4	34.3	22.3	30.8	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "	0.8	0.15						0.55	0.15									
Ca <sup>++</sup> " "	4.75	2.3	3	4.5				4.2	2.9	4	6.5	4	2.6	3.5	5.25	4.5	3.5	
Mg <sup>++</sup> " "	6.5	9.5	21.5	20.5				8.5	13.15	20.5	23	10	14	17.5	24	16	18.5	
K <sup>+</sup> " "	1.4	1.7	0.3	0.4				1.57	1.92	0.5	1	1.7	2.3	0.8	1.56	0.9	0.3	
Na <sup>+</sup> " "	50	65	110	110				60	98	130	145	65	100	115	130	85	90	
SiO <sub>2</sub> mg/l.		9.4	8.2	6.8					6.8		7.6	2.4	1	4.4	8.6	6.4	5.6	
C.E. cmhos/cm	1.78	178	179			159			200	194	200		206	198	173	159	150	
pH		7.4	4.8	4.2			7.6		7.2	4.1	4.7		3.7	3.9	7.3	7.2	8	
Cl <sup>-</sup> meq/l	1700	1670	1700			1600			1880	1810	1880		1940	1880	1670	1560	1520	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "		146	163	171			146		154	154	146		146	146	129	129	120	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "							2.4											
Ca <sup>++</sup> " "		58	47	47.6			44.2		45.8	43.4	44.2		47.6	47	45.8	44.2	43.4	
Mg <sup>++</sup> " "		290	310	310			270		310	290	320		290	290	260	250	250	
K <sup>+</sup> " "		32	34	34			32		36	34	37.5		38.8	36.5	33	34.5	30	
Na <sup>+</sup> " "		1475	1530	1600			1450		1690	1600	1500		1500	1370	1170	1080	1040	
SiO <sub>2</sub> mg/l																		
C.E. cmhos/cm			202.5			169.5				195.7					176			
pH			7.6			7.7				7.2					7.9			
Cl <sup>-</sup> meq/l			1600			1600				1680					1460			
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> " "			93.4			94.3				91.7					91.7			
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> " "			1.7			2.3				0.7					4.5			
Ca <sup>++</sup> " "			52			44				58					50			
Mg <sup>++</sup> " "			338			300				300					268			
K <sup>+</sup> " "			40			37				38					36			
Na <sup>+</sup> " "			1525			1300				1400					1250			
SiO <sub>2</sub> mg/l.			16.4			9				18.3					48.4			

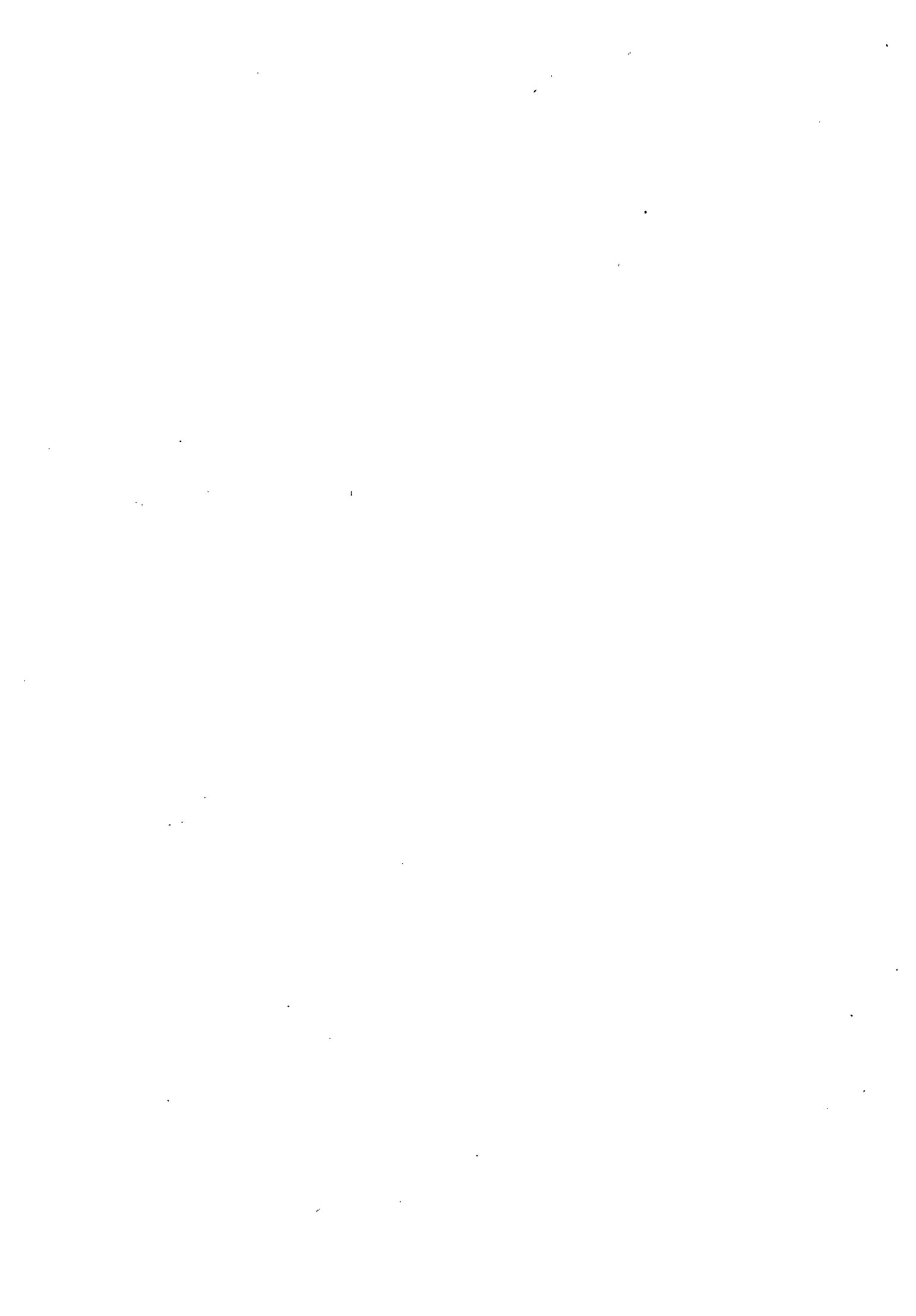


## TABLE DES MATIERES

	Pages
AVANT PROPOS .....	1
INTRODUCTION .....	5
Chapitre I - ECOLOGIE DES MANGROVES DU MONDE .....	9
1. Définition .....	9
2. Répartition géographique .....	10
3. Végétation .....	12
4. Zonation et Séquence .....	13
5. Faune .....	15
6. Mangrove d'hier et d'aujourd'hui .....	17
Chapitre II - ECOLOGIE DES MANGROVES DU SENEGAL .....	19
1. Cadre géographique .....	19
2. Le Climat .....	20
3. Flore .....	26
4. Faune .....	28
5. Géologie .....	30
6. Hydrologie .....	39
Chapitre III - LA MORPHOLOGIE DES SOLS DE MANGROVES .....	51
I - MACROMORPHOLOGIE .....	51
1. Méthodes d'études .....	51
2. Séquence de OUSSOUYE .....	51
3. Séquence de TOBOR .....	52
4. Séquence de BALINGORE .....	53
5. Séquence de GAMBIE .....	55
6. Séquence de BASSID .....	56
7. Séquence de N'DIMSIROH .....	59
8. Conclusion .....	60
II - MICROMORPHOLOGIE .....	62
1. Séquence de BALINGORE .....	62
2. GAMBIE .....	65
3. Séquence de BASSID .....	66
4. Conclusion .....	71
5. Conclusion générale .....	71
Chapitre IV - LES CARACTERES PHYSIQUES DES SOLS DE MANGROVES .....	73
1. La texture .....	73
2. Etude granulométrique des sédiments de l'Estuaire du Saloum .....	77
3. Maturation des sols et propriétés physiques .....	82
4. Conclusion .....	86
Chapitre V - LE pH ET L'ACIDITE POTENTIELLE DES SOLS DE MANGROVES .....	87
1. Généralités - Méthodologie .....	87
2. Evolution du pH des sols dans les séquences .....	88
3. Evolution du Eh des sols dans les séquences .....	91
4. Conclusion .....	93

	Pages
Chapitre VI - LE SOUFRE ET SES COMPOSES DANS LES SOLS DE MANGROVES .....	97
1. Introduction - Méthodologie .....	97
2. Répartition du Soufre dans les séquences .....	99
3. Genèse et Accumulation de la pyrite .....	101
4. Soufre lié à la Matière organique .....	109
5. L'oxydation de la pyrite .....	110
6. Les Sulfates solubles .....	119
7. Soufre et Acidité potentielle .....	120
8. Conclusion .....	124
Chapitre VII - LA MATIERE ORGANIQUE DES SOLS DE MANGROVES .....	129
1. Introduction - Méthodes d'Analyses .....	129
2. Rappel de quelques définitions .....	130
3. Répartition de la matière organique .....	130
4. Conclusion .....	142
Chapitre VIII - LA SALINITE DES SOLS ET DES EAUX DANS LES MANGROVES .....	143
1. Introduction .....	143
2. Rappel de quelques définitions .....	144
3. Caractères morphologiques de la salinité .....	147
4. Les Eaux libres .....	147
5. Les Nappes phréatiques .....	148
6. Les Sols .....	155
7. Equilibres Minéraux-Solutions .....	164
8. Effets de la sécheresse sur la salinité des nappes et des sols .....	176
9. Etudes isotopiques des nappes phréatiques .....	180
10. Conclusion .....	181
Chapitre IX - LA MINERALOGIE DES SOLS DE MANGROVES .....	183
1. Les Minéraux des sols .....	183
2. La fraction argileuse .....	187
3. Conclusion .....	195
Chapitre X - LA GEOCHIMIE DES SOLS DE MANGROVES .....	197
1. Les Méthodes .....	197
2. Répartition des éléments majeurs .....	197
3. Répartition des éléments traces .....	203
Chapitre XI - LA SEQUENCE MANGROVE-TANNE CARACTERISTIQUE DE MILIEUX LITTORAUX TROPICAUX VARIES .....	207
1. Définition .....	207
2. La séquence mangrove-tanne caractéristique de milieux littoraux tropicaux variés .....	208
A. MADAGASCAR .....	208
B. NOUVELLE CALEDONIE .....	209
C. AUSTRALIE .....	209
D. INDE .....	212
E. GABON .....	215
3. Conclusion .....	216

	Pages
Chapitre XII - CLASSIFICATION DES SOLS DE MANGROVES .....	219
1. Introduction .....	219
2. Classification des sols de mangroves du Sénégal et de la Gambie .....	219
Chapitre XIII - MISE EN VALEUR ET AMENAGEMENT DES SOLS DE MANGROVES .....	227
1. Introduction .....	227
2. Mise en valeur et aménagement des mangroves dans le monde	227
3. Utilisations actuelles des mangroves du Sénégal et de la Gambie .....	233
4. Aménagement des mangroves de la Casamance .....	239
5. Conclusions .....	246
Chapitre XIV - CONCLUSIONS GENERALES .....	247
BIBLIOGRAPHIE .....	253
LISTE DES FIGURES .....	269
LISTE DES TABLEAUX .....	271
ANNEXE 1 - Description des profils .....	273
ANNEXE 2 - Résultats analytiques .....	291
TABLE DES MATIERES .....	307
PLANCHES	



**PLANCHES**



PLANCHE I

VUES AERIENNES DES MANGROVES DU SENEGAL

1. Mangroves et tannes de l'Estuaire du Saloum  
Cliché I.G.N. - ND 28.VIII-X 1969

2. Mangroves et tannes de l'Estuaire de la Casamance  
Cliché I.G.N. - ND 28.VIII - 1969

Légende :

M : Mangrove  
ti : tanne inondé  
tv : tanne vif  
th : tanne herbacé  
T : terrasse  
Rz : rizière

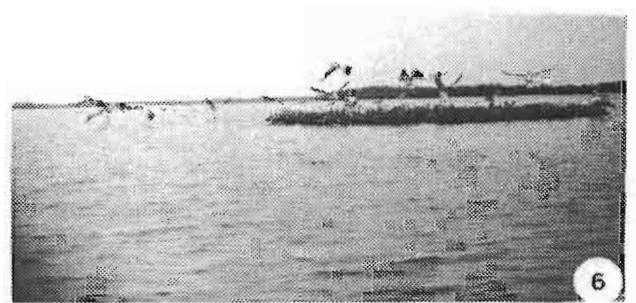
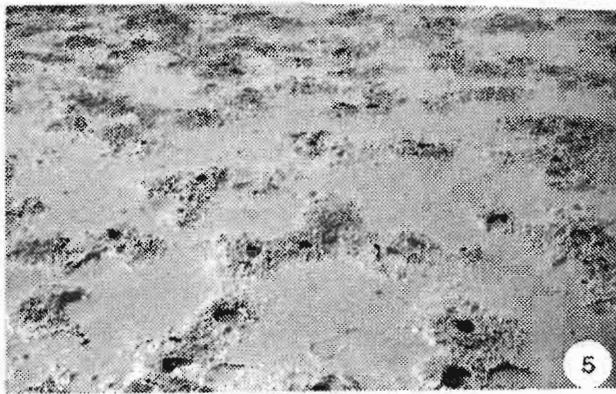
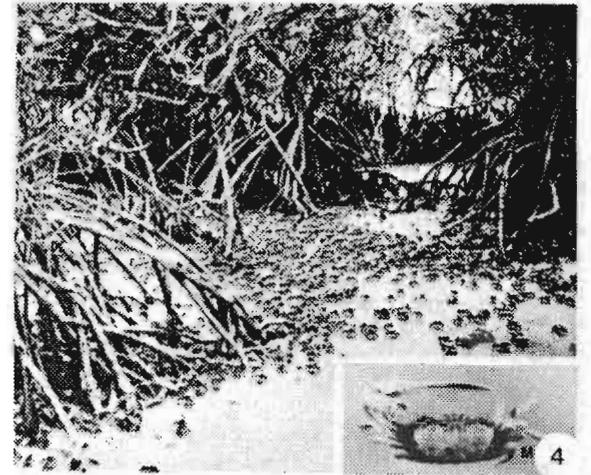
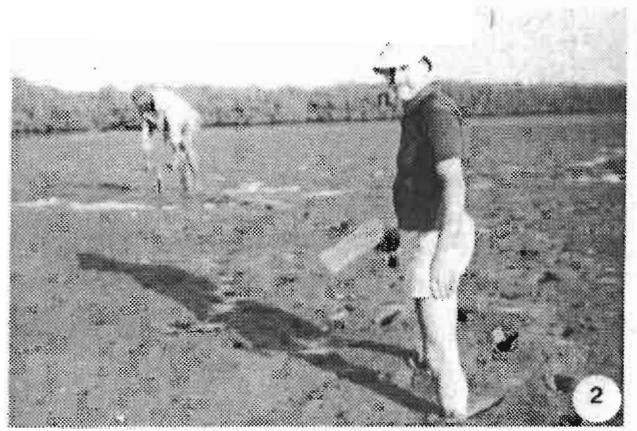
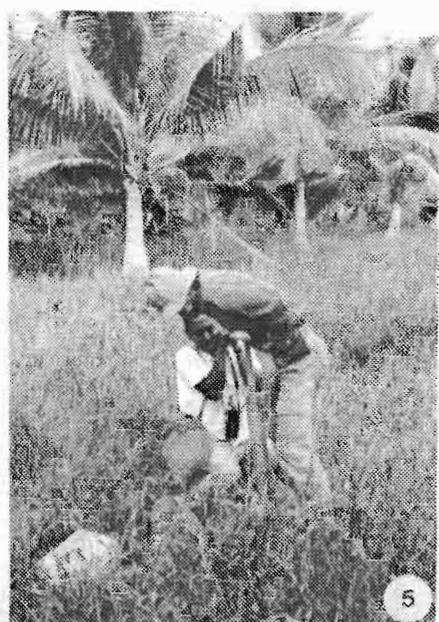
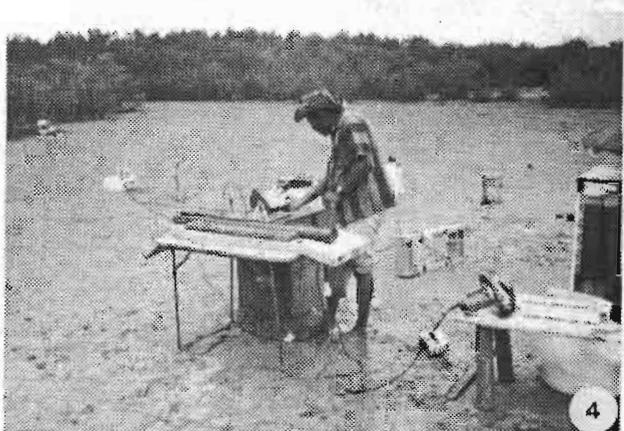
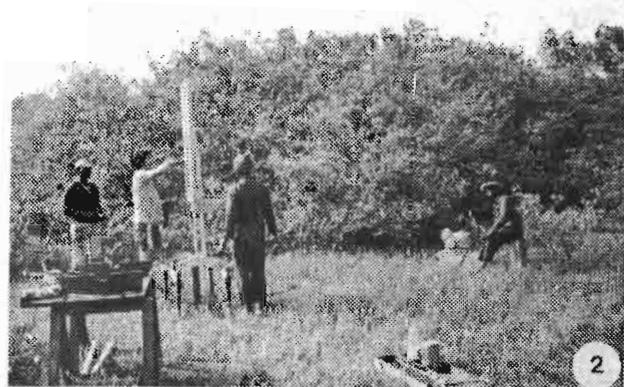


PLANCHE II

1. Slikke sur vase argileuse (Casamance), à marée basse.
2. Slikke sur vase sableuse (Saloum) à marée basse.  
Noter l'extension beaucoup plus importante de la slikke.
3. SALOUM - Rhizophora racemosa avec de nombreuses huitres (Bassid)
4. SALOUM - Vase sableuse découvrant à marée basse.  
Peuplement de crabes (Bassid)
5. SALOUM - tanne inondé avec nombreux trous de crabes (N'dimsiroh).
6. SALOUM : Bolon Sokone - Grande slikke sableuse recouverte à marée basse haute et découvrant de jeunes Rhizophoras avec des pélicans.



## PLANCHE III

### METHODES D'ETUDES SUR LE TERRAIN

1. Préparation du carottier à piston stationnaire
2. Le carottier en action
3. Découpage de la carotte
4. Mesures sur le terrain (Noter la présence d'un congélateur)
5. Enfouissement de la pelle à vase
6. Détermination du pH et du Eh "in situ"

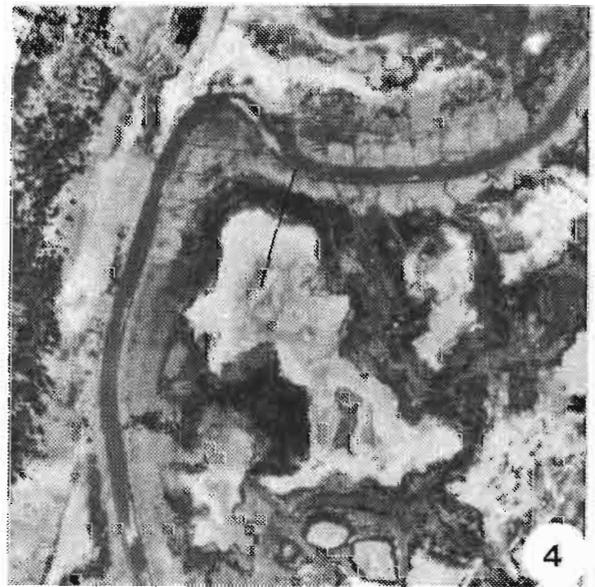
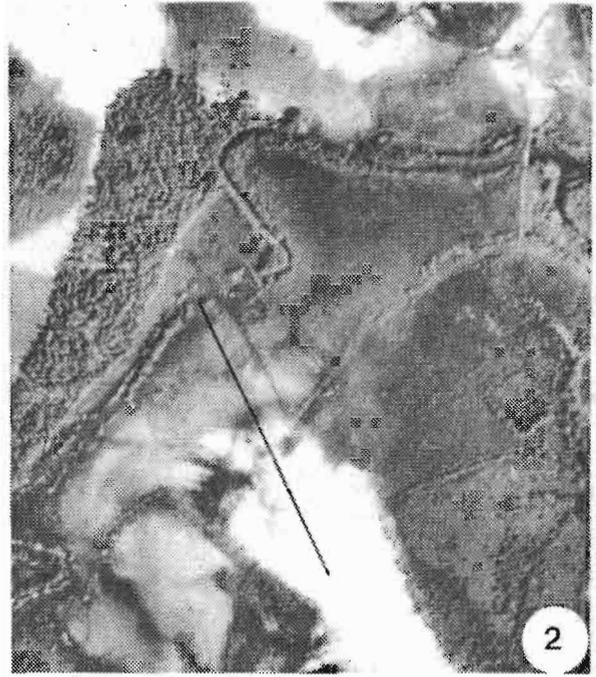
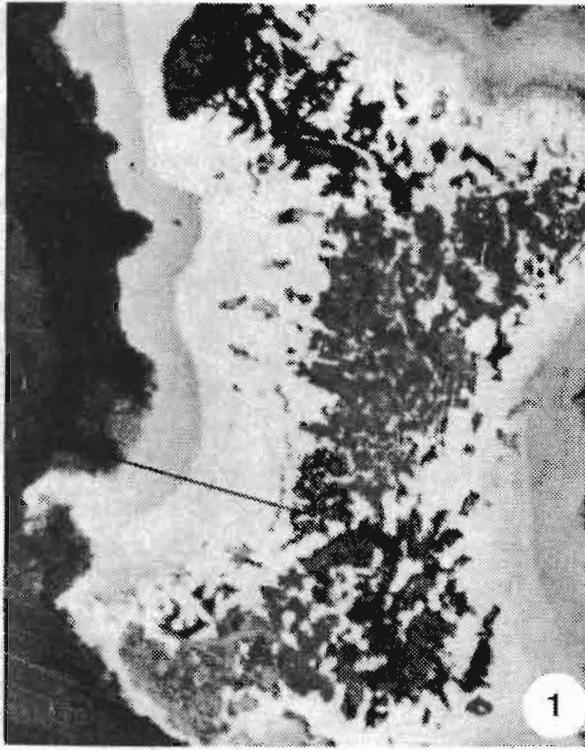


PLANCHE IV

VUES AERIENNES DE QUELQUES SEQUENCES ETUDIEES

1. Séquence de Bassid - Cliché I.G.N - 1969
2. Séquence d'Oussouye " " 1969
3. Séquence de Tobor " " 1969
4. Séquence de Balingore " " 1978

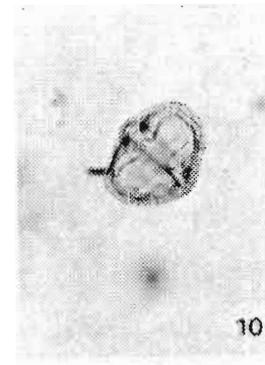
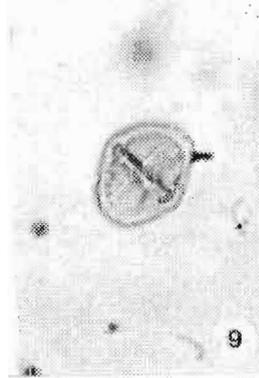
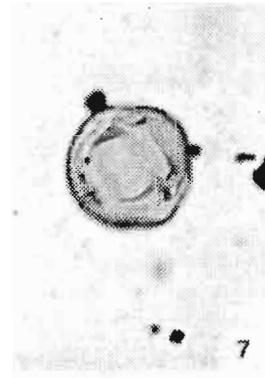
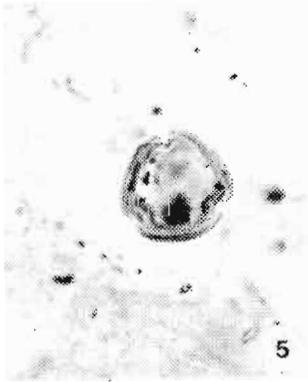
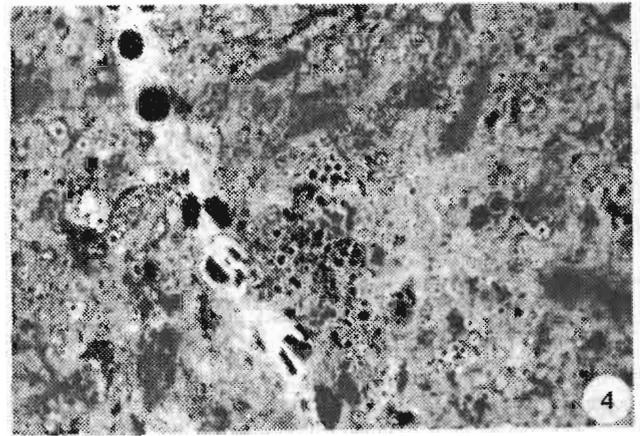
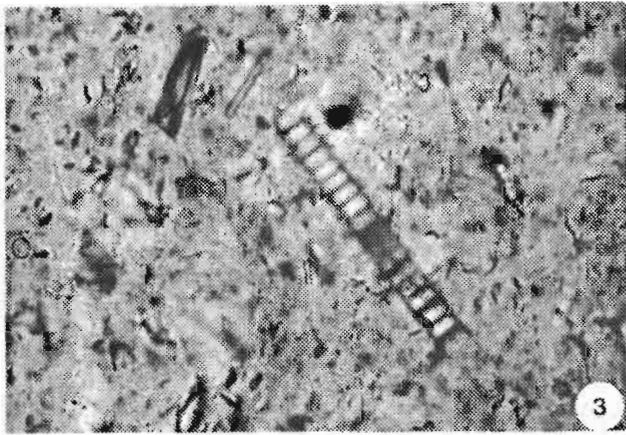
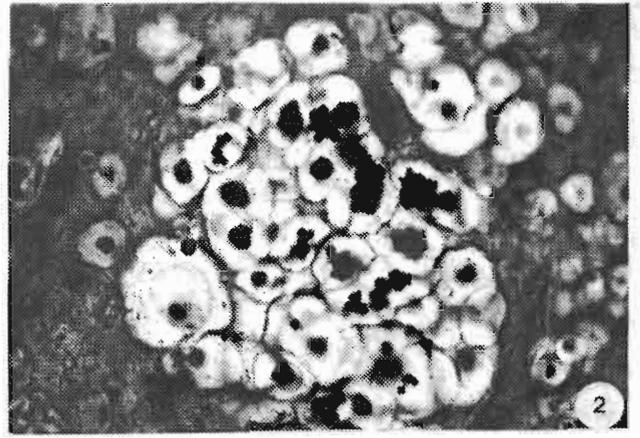
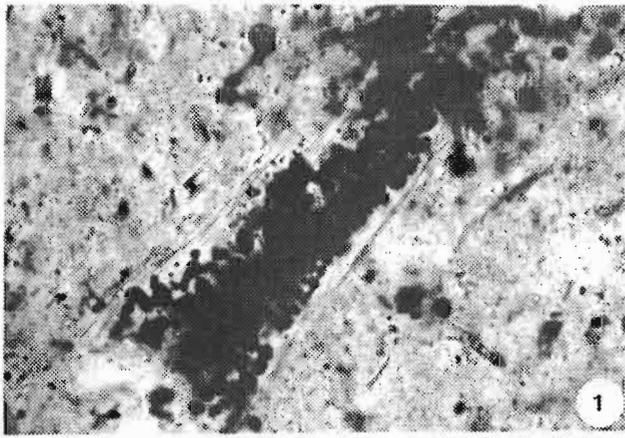
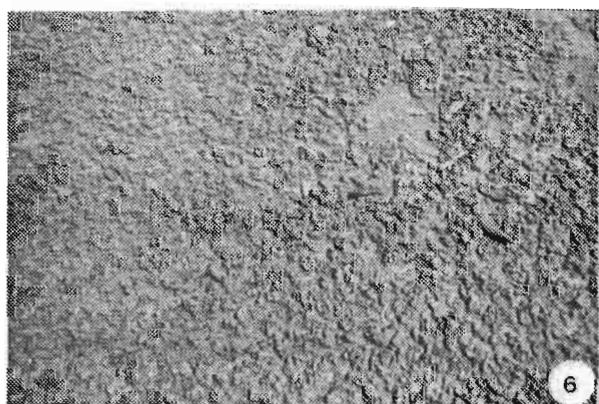


PLANCHE V

MICROMORPHOLOGIE ET PALYNOLOGIE

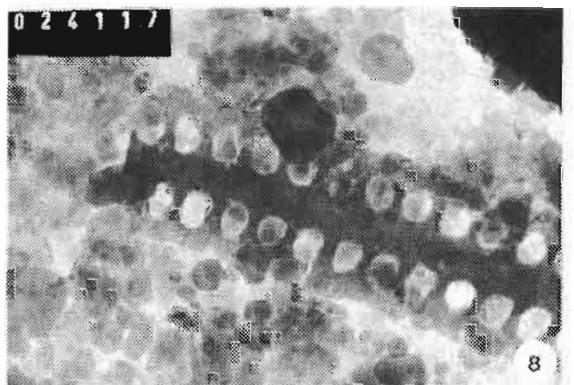
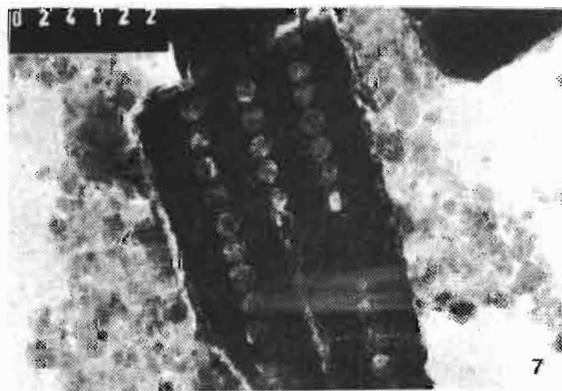
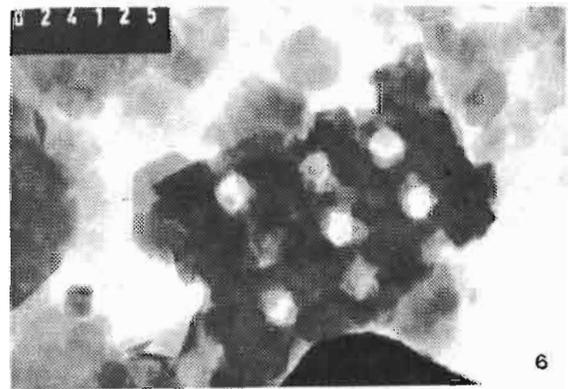
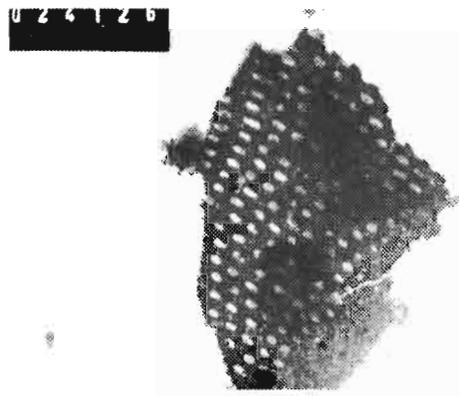
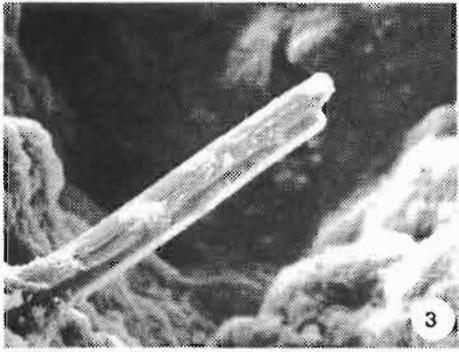
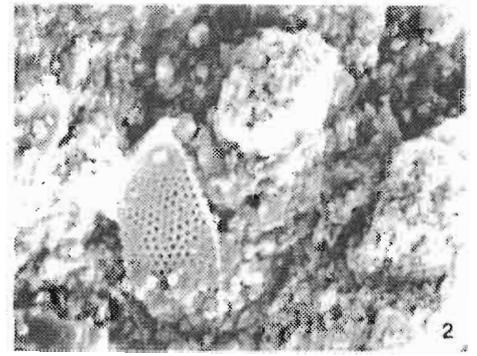
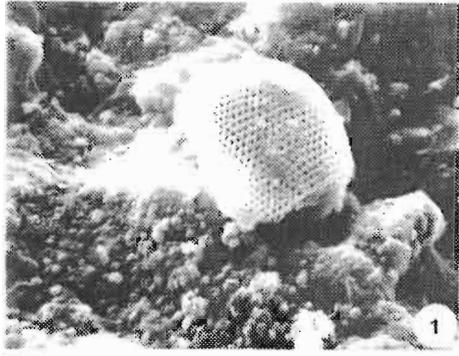
1. Pyrite framboïdale dans débris racinaire
2. Grains de pyrite dans cellules des racines
3. Frustules de diatomées
4. Grains de pyrite
- 5 à 10. Pollens de Rhizophora



## PLANCHE VI

### SEQUENCES ET FORMES DE SURFACE

1. Vue au sol de la séquence d'Oussouye en Novembre 1978
2. Vue au sol de la même séquence en Décembre 1983  
Noter les effets spectaculaires de la sécheresse
3. Séquence de BASSID - au premier plan, noter le réseau hexagonal en surface
4. Séquence de PICHAVARAM (Inde du Sud) - Août 1982  
Noter la ressemblance avec la séquence d'Oussouye
5. Surface d'un tanne vif argileux en saison sèche (1979), cristallisation de sels d'aluminium en surface
6. Tapis algair
7. SALOUM - Baobabs sur Kjekkenmodding
8. CASAMANCE - microlunette éolienne en formation, dans ce qui fut un tanne herbacé (BALINGORE). Cliché de Décembre 1983.



## PLANCHE VII

### A - OBSERVATIONS AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE

1. Echantillon CMV 94 - séquence de Balingore - Tanne vif -  
à 1 m 20 de profondeur : diatomée bien conservée. (x 1500)
2. Echantillon CMV 104 - Séquence de Balingore - Ancien tanne herbacé -  
à 1 m 20 de profondeur - diatomée (x 1300)
3. 4 échantillons CMV 44 - Séquence de Balingore - Mangrove décadente -  
Aiguille de gypse (x 1300)
4. Séquence de Bassid - croûte de surface (cf. pl. VI, cliché 3) -  
cristal de gypse (x 1500).

### B. OBSERVATIONS AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A TRANSMISSION

1. BASSID - échantillon 112 - fraction  $< 2 \mu$  dans horizon à jarosite -  
néoformation de smectite (x 10.000)
2. le même x 40.000
3. BALINGORE - CMV 41 - fraction  $< 2 \mu$  - kaolinite bien cristallisée dans  
frustule de diatomée (x 10.000)
4. BALINGORE - CMV 91 - fraction  $< 2 \mu$  - kaolinite

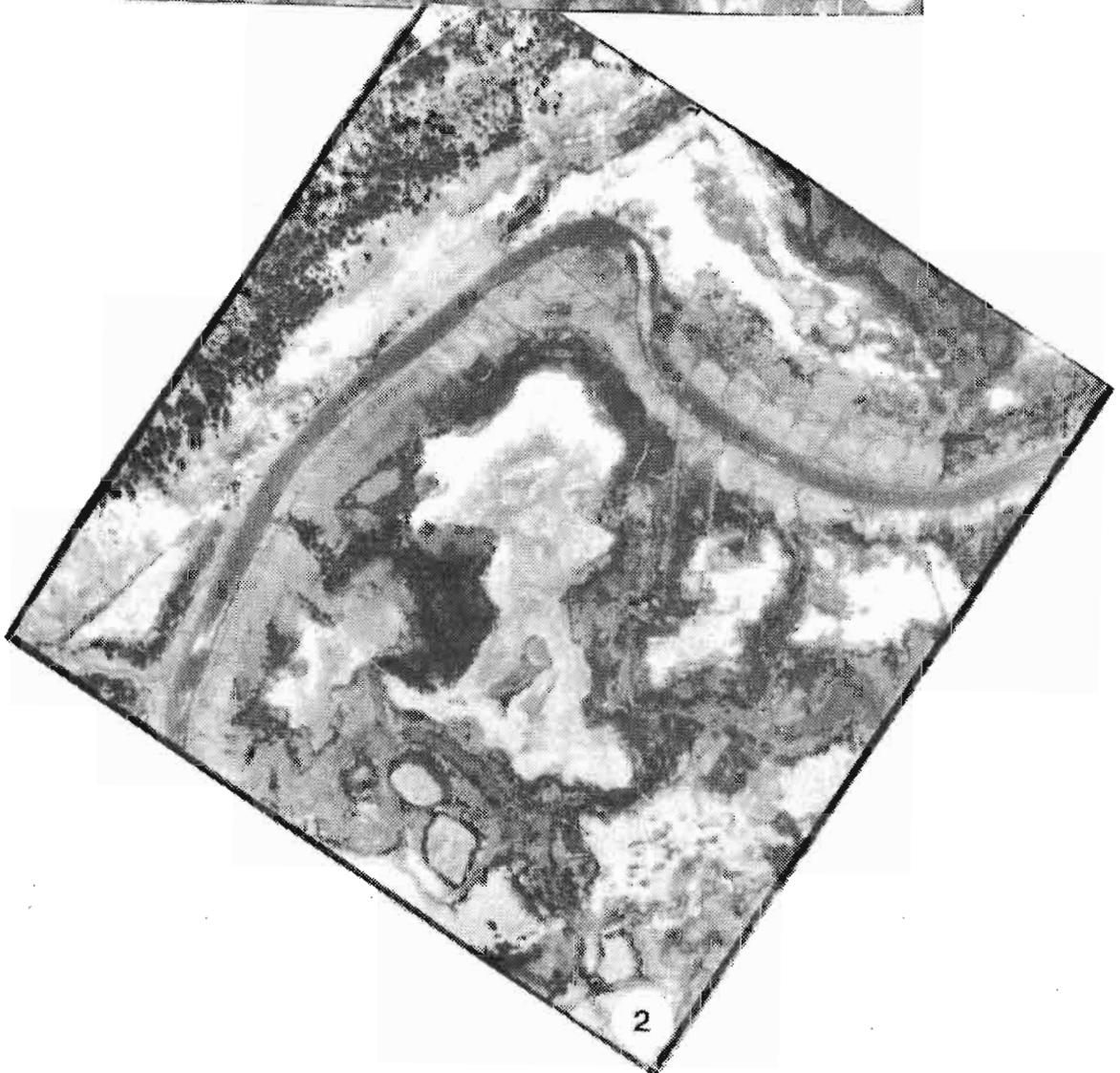
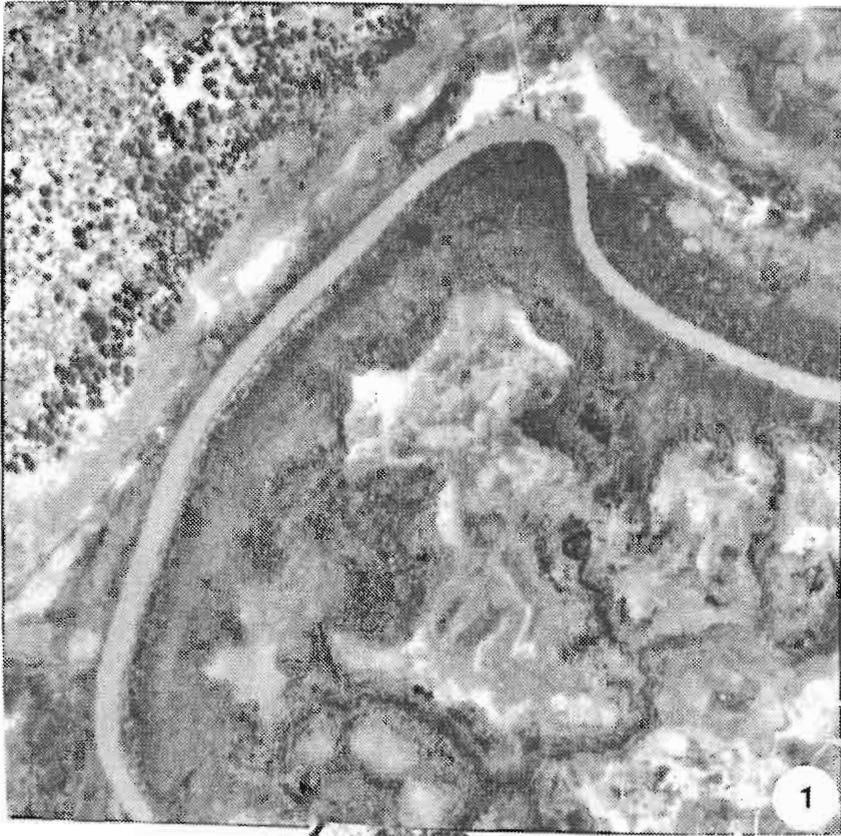


PLANCHE VIII

EFFETS DE LA SECHERESSE SUR LA SEQUENCE DE BALINGORE

1. Cliché I.G.N. - 1969

2. Cliché I.G.N. - 1978

Noter l'extension importante des tannes vifs et la disparition de la mangrove à Rhizophoras

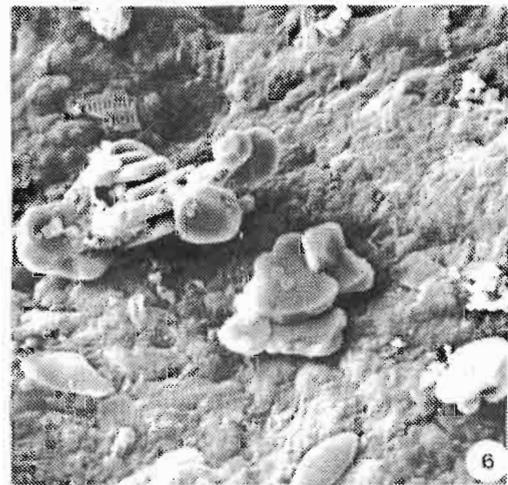
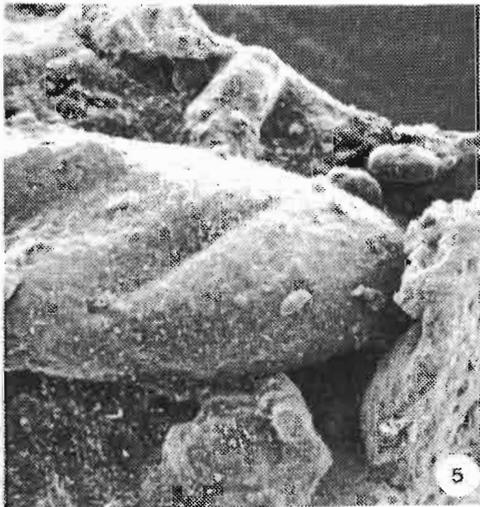
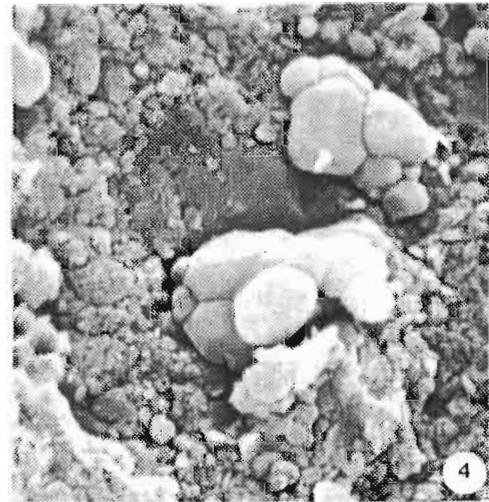
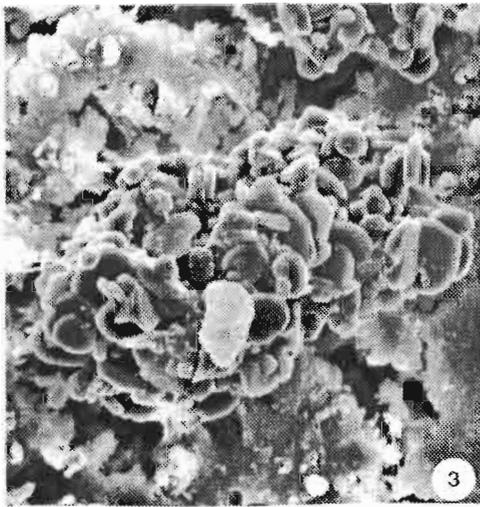
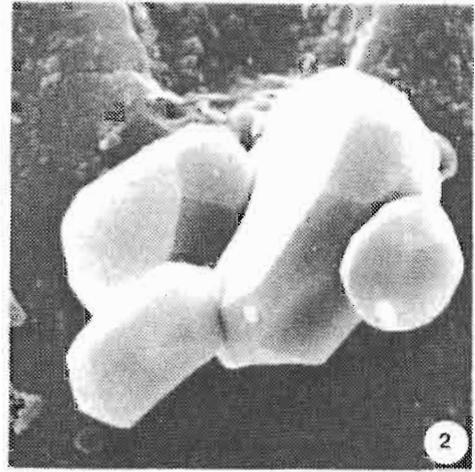
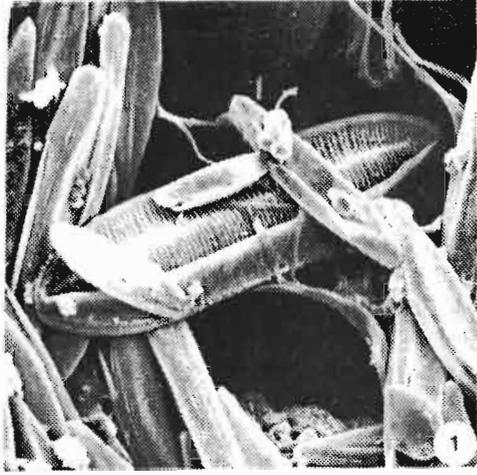


PLANCHE IX

DIATOMEES ET HYDROXYDES D'ALUMINIUM

Clichés D. GOULEAU

OBSERVATIONS AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE

1. Casamance - bordure des marigots - (x 1000) - cristaux d'aluminium à l'état isolé dispersés sur les diatomées
2. Saloum - slikke - (x 15.000) - flocon de cristaux d'aluminium montrant des tronçatures sur les faces
3. Saloum - slikke - (x 2000) - flocon de plusieurs centaines d'individus à la surface du sédiment
4. Saloum - slikke - (x 15.000) - petits cristaux d'aluminium fixés sur un grain de sable, à 1 cm sous l'interface.
5. Casamance - zone à Rhizophora - (x50) - fraction de coprolithe
6. Casamance - zone à Rhizophora - (x 3000) - Cristaux d'Aluminium groupés en petits flocons disposés à la surface du coprolithe de la photo 5.

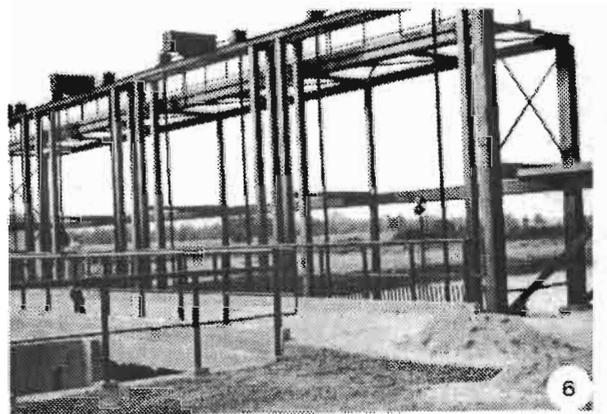
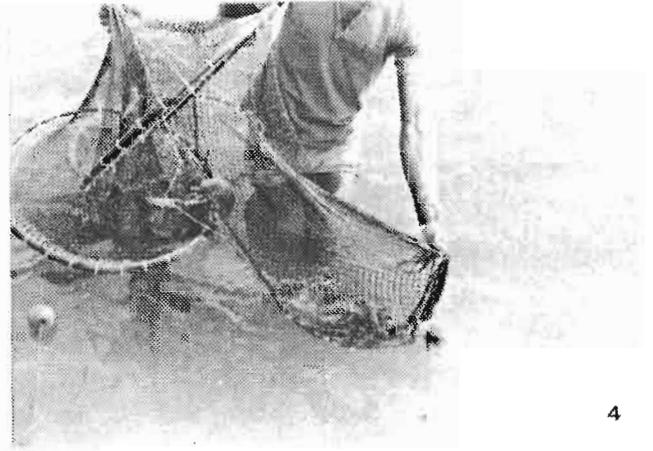
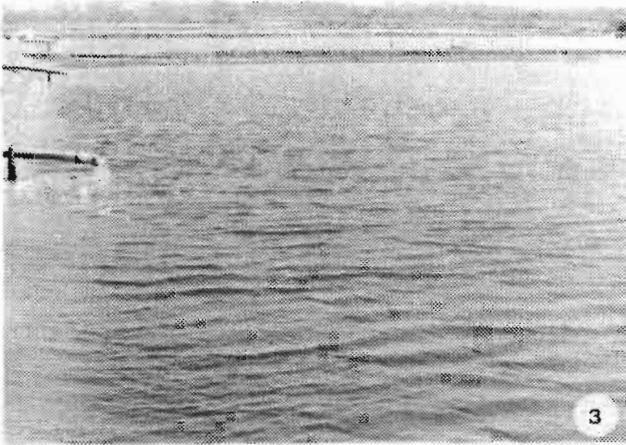


PLANCHE X

MISE EN VALEUR ET AMENAGEMENT

1. Bassin à poissons dans un aménagement traditionnel
2. Aménagement traditionnel - Confection des billons à l'aide de kayendo
3. Bassins d'aquiculture aménagés sur un tanne par FRANCE-AQUACULTURE,  
en Casamance - Aménagement récent - Décembre 1983
4. Elevage de crevettes dans les bassins
5. Rizière sur mangrove en Gambie - Noter la présence d'un Rhizophora au  
milieu du champ de riz
6. Barrage de Guidel (Avril 1983).

## RESUME

Cette étude est consacrée aux mangroves du Sénégal et de la Gambie qui sont des mangroves d'estuaires, situées dans une région à climats très contrastés et caractérisées par la présence, en arrière des palétuviers de zones nues, sursalées, les tannes. Après avoir étudié l'écologie de ce milieu, notamment le climat, la végétation et sa zonation, l'hydrologie, l'hydrochimie, la géomorphologie et la faune, on aborde l'étude des caractères morphologiques, physiques et chimiques des sols en ayant choisi six chronoséquences, comme exemples. L'accent est mis sur les principaux facteurs de la pédogenèse de ces sols, à savoir le soufre qui est responsable de l'acidité et les sels solubles responsables de la salinité. On montre que le fonctionnement des tannes est, en grande partie, indépendant de celui des mangroves dont ils sont issus. L'étude minéralogique et géochimique des sols permet de mettre en évidence la néogenèse de certains minéraux (gypse) et la transformation des argiles dans la séquence mangrove-tanne. Une attention particulière a été accordée aux effets de la sécheresse climatique de ces dernières années sur l'évolution des sols et des paysages et notamment sur les différences entre l'Estuaire du Saloum et celui de la Casamance. Par des exemples choisis dans différentes parties du monde, on montre que la séquence mangrove-tanne caractérise des milieux littoraux tropicaux à climats aussi variés que le Gabon, Madagascar, l'Inde, l'Australie...

Dans le dernier chapitre consacré à la mise en valeur et l'aménagement des mangroves, on passe en revue les principales contraintes des sols liées à l'hydrologie, à l'acidité et à la salinité, on étudie les modes d'aménagements de ces sols dans différentes parties du monde et on propose, pour les mangroves de Casamance, utilisées en grande partie pour la riziculture, de nouveaux schémas d'aménagements.

A l'encontre de la plupart des mangroves de zones tropicales humides, celles du Sénégal, présentent un équilibre très fragile. L'étude de leur évolution permet de saisir les transformations géochimiques rapides et brutales de cet écosystème qui est sans aucun doute l'un des plus riches des régions tropicales.

Mots clés : Mangrove - Sénégal - Gambie - Ecologie - Soufre - Salinité - Classification - Mise en valeur - Aménagement.