P. MICHEL J.P. BARUSSEAU J.F. RICHARD M. SALL

L'APRÈS-BARRAGES DANS LA VALLÉE DU SÉNÉGAL

Modifications hydro-dynamiques et sédimentologiques
Conséquences sur le milieu et les aménagements hydro-agricoles

RÉSULTATS DES TRAVAUX DU PROJET CAMPUS 1989-1992

Collection Etudes

Ministère de la Coopération et du Développement

PRESSES UNIVERSITAIRES DE PERPIGNAN

Photo de couverture :

Le barrage de Diama sur le Sénégal, dans la région du delta.

En amont, le fleuve décrit un méandre avec des levées récentes sur la rive convexe. Il a érodé sur la rive concave des restes de dunes ogoliennes et d'anciens cordons littoraux. A gauche, les hautes eaux inondent une cuvette. Noter la différence de couleur des eaux de part et d'autre du barrage.

Photo P. Michel, prise le 4 février 1988

L'APRÈS-BARRAGES DANS LA VALLÉE DU SÉNÉGAL

Modifications hydrodynamiques et sédimentologiques : conséquences sur le milieu et les aménagements hydro-agricoles

RÉSULTATS DES TRAVAUX DU PROJET C.A.M.P.U.S. 1989-1992

Programme de Coopération avec l'Afrique et Madagascar pour la Promotion Universitaire et Scientifique

Coordinateur :	Pierre MICHEL	Université de Strasbourg (1)
Responsables d'opération :	Jean Paul BARUSSEAU	Université de Perpignan (2)
	Jean-François RICHARD	Centre ORSTOM de Dakar
	Mamadou M. SALL,	Université de DAKAR (3)
Participants:	Mariline BA,	Université de Dakar (4)
	Hervé CHEVILLOTTE	Centre ORSTOM de Dakar
	Cyr DESCAMPS	Université de Perpignan (2)
	Albert DIAGNE	Université de Dakar (3)
	Ndiacé DIOP	Université de Dakar (3)
	E.H. Salif DIOP	Université de Dakar (3)
	Bachir DIOUF	Université de Dakar (4)
	Joël HUMBERT	Université de Strasbourg (1)
	Alioune KANE	Université de Dakar (3)
	Michel MIETTON	Université de Strasbourg (1)
	Jacques MONTEILLET	Université de Yaoundé
	Jean-Luc SADS	Centre ORSTOM de Dakar

(1) U.F.R. de Géographie - C.E.R.E.G.
(2) Laboratoire de Recherches en Sédimentologie Marine
(3) Département de Géographie
(4) Département de Géologie

Presses Universitaires de Perpignan

1993

AVANT - PROPOS

Pierre MICHEL

La grande vallée alluviale du Sénégal s'allonge sur 430 km de Bakel à Richard-Toll ; sa largeur varie de 10 à 25 km ; elle s'élargit ensuite considérablement dans la région du delta (fig. 1). Le fleuve se jette dans l'océan par un estuaire : son embouchure instable se situe à environ 20 km au sud de Saint-Louis.

1. LE MILIEU NATUREL ET SA DÉGRADATION

Des recherches géomorphologiques et sédimentologiques y ont été menées à partir de 1953. Elles ont montré qu'au maximum de la dernière transgression (Nouakchottien), la mer a formé un golfe allongé jusqu'à Bogué, en amont de Podor ; il s'est transformé en une grande lagune lors de sa fermeture progressive par des cordons littoraux. Le Sénégal a édifié un système complexe de levées et construit un long delta (Michel, 1957, 1968, 1973). Ces formations fluvio-deltaïques, très étendues, sont toujours constituées de sable fin-limon jaune. Les dépôts deviennent de plus en plus salés en aval de Richard-Toll (Tricart. 1954, 1961) ; à partir de Saint-Louis, un mince cordon littoral, la "Langue de Barbarie", sépare le fleuve de l'océan (Guilcher et Nicolas, 1954). Les coupes des sondages indiquent une sédimentation complexe surtout dans la région du delta (Monteillet, 1988). Entre les ensembles de bourrelets des systèmes de levées qui se recoupent parfois, s'étendent des cuvettes argileuses, de dimensions très variables, où se décantent les eaux de l'inondation annuelle.

La vallée alluviale se situe dans le domaine sahélien ; mais sa végétation, souvent plus dense, contraste avec la steppe arbustive qui couvre les anciennes dunes rouges de la bordure (fig. 1), appelée *diéri*. Les mesures effectuées par les hydrologues de la Mission d'Aménagement du Sénégal (M.A.S.) ou de l'ORSTOM ont précisé le régime du fleuve dont les eaux proviennent du haut-bassin s'étendant en amont de Bakel (Rochette, 1974). Pendant la période humide de 1951 à 1969, la vallée inondable, ou *walo*, était surtout façonnée par les crues, souvent fortes (Michel, 1969, 1973). L'action éolienne en saison sèche était alors limitée, mise à part la région littorale. La pédogenèse dépend du micro-relief de la vallée, de la nature des dépôts et de la submersion. Ainsi a été établie une carte géomorphologique et pédologique au 1/50 000 (en 35 feuilles) de ce vaste ensemble inondable, de Bakel à l'embouchure, dans le cadre des études pour un aménagement hydro-agricole global (Michel et Durand, 1978). Car l'environnement favorable à la culture de décrue traditionnelle s'est rapidement dégradé à partir de 1970 à cause de la sécheresse prolongée (Toupet et Michel, 1979). Comme ailleurs dans les régions tropicales sèches, les interventions humaines ont souvent accéléré les processus de désertification.

Les premiers aménagements ont été effectués dans la région du delta avec l'implantation de casiers rizicoles, d'abord près de Richard-Toll, puis dans la partie centrale autour de Boundoum (fig. 1). Une digue a été édifiée en 1964 le long de la rive sénégalaise du fleuve pour empêcher l'inondation par les crues des rizières établies dans quelques cuvettes. Ainsi la majeure partie des terrains subit depuis lors des actions éoliennes pendant presque toute l'année.

La sécheresse persistante depuis 1970 les a amplifiées. Des recherches effectuées surtout de 1974 à 1985 montrent les transformations progressives de la morphodynamique. La grande cuvette du Ndiael, sur la marge méridionale du delta (fig. 1), a rapidement évolué en sebkha. Par contre, celle du Djoudj est submergée par les eaux douces du fleuve, grâce à un petit barrage, et aménagée en Parc national aux oiseaux. Des mesures pour connaître l'ablation ou le colmatage dans ces deux secteurs ont été faites pendant sept ans (Sall, 1979, 1982). Dans la partie centrale du delta, les nouveaux périmètres planés pour l'aménagement constituent de belles surfaces de déflation. Les sables fins et les limon sse déposent autour de petits buissons en champs de nebkas ; les accumulations empiètent parfois sur les systèmes de canaux d'irrigation pour former des bouchons (Michel et Sall, 1984).

Dans la vallée en amont de Richard-Toll, les actions éoliennes ont aussi pris de l'ampleur sur les hautes levées, de plus en plus dénudées par la sécheresse et l'abattage d'arbustes ou de grands buissons ; un

saupoudrage de poussières se produit dans les cuvettes argileuses qui ne sont plus inondées à cause de la faiblesse des hautes eaux annuelles et ne peuvent plus être cultivées (Michel, 1985). Les débits du Sénégal sont, en effet, très déficitaires depuis 1970 (Olivry, 1987). C'est pourquoi le biseau salé a nettement progressé dans le lit du fleuve à l'étiage et les eaux marines ont atteint en 1982 l'escale de Podor (fig. 1), à près de 300 km de l'embouchure ! (Gac *et al.*, 1986a et b).

Afin de parvenir à une maîtrise totale de l'eau, l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (O.M.V.S.) a établi un vaste programme de développement des cultures irriguées, surtout de la riziculture, fondé sur la construction de deux barrages (Reichhold, 1978 ; Michel, 1990). Le barrage "anti-sel" de Diama dans le delta, à 27 km en amont de Saint-Louis, a été terminé fin 1985 ; le grand barrage-réservoir de Manantali, dans le haut-bassin en amont de Kayes au Mali, a été achevé en 1989 (fig. 1). Leur mise en service progressive se répercute déjà sur les processus hydro-dynamiques et sédimentologiques et elle modifie encore le façonnement de cette grande vallée alluviale et l'estuaire du fleuve. Les impacts seront plus importants et plus durables. Pour pouvoir les évaluer, il a fallu établir un nouveau programme de recherches.

2. DOMAINES D'ÉTUDE ET ÉQUIPES DE RECHERCHE

Ce projet CAMPUS a associé des chercheurs des Universités de Dakar, Perpignan, Strasbourg I et du Centre ORSTOM de Dakar : la plupart d'entre eux avaient déjà travaillé dans la vallée et le delta ou sur l'estuaire. Le programme d'études de terrain a été mis en route en décembre 1988 et s'est terminé au printemps de 1992. Cette association de spécialistes de diverses disciplines a permis, grâce aux moyens financiers du Projet, de préciser les évolutions et souvent de les quantifier par des mesures à intervalles réguliers.

Nous avons choisi des secteurs d'étude limités, avec des thèmes précis. Les travaux sur le terrain ont été effectués surtout dans la moyenne vallée (région de Podor), dans le delta et autour de l'estuaire. Ce sont les parties de cette grande vallée alluviale où les modifications s'avèrent les plus importantes : les marques de la sécheresse persistante y apparaissent le mieux, les aménagements hydro-agricoles y sont les plus étendus jusqu'à présent et les modifications par le barrage de Diama les plus directes. Mais à cause des tensions existant à l'époque entre les Etats sénégalais et mauritanien, nous n'avons, à notre grand regret, pu effectuer ces recherches que sur le territoire sénégalais ; il englobe cependant la majeure partie des formations alluviales dans les secteurs étudiés, surtout dans la région de delta. En outre, il a été impossible d'établir des profils en travers du lit fluvial pour préciser les changements.

Nous avons organisé les recherches sur trois thèmes en trois opérations, avec trois équipes :

1. Transformation de la morphodynamique en amont du barrage de Diama (lit mineur, vallée alluviale et bordure). Les observations ont porté principalement sur la recrudescence de l'action éolienne et sur les changements dans le bilan érosion-sédimentation, par suite de la modification du régime fluvial. Ces études ont été menées par M. Sall, avec A. Kane et N. Diop qui préparent des thèses d'Etat sous sa direction, et un groupe d'étudiants avancés qui ont soutenu des mémoires de Maîtrise et de D.E.A.

2. Evolution du secteur de l'estuaire, en aval de Diama, et du littoral adjacent. Des mesures hydrodynamiques ont été effectuées à intervalles réguliers et des profils topobathymétriques établis à plusieurs reprises. Les travaux sur le terrain, ainsi que les analyses d'échantillons et d'images-satellites, ont été réalisés par J.P. Barusseau, avec M. Ba, C. Descamps, S. Diop, B. Diouf, A. Kane, J. Monteillet et J.L. Saos.

3. Modification des milieux naturels dans la moyenne vallée (région de Podor). Il s'agit d'une approche quantitative qui consiste en une étude globale des transformation du paysage, basée sur la cartographie des unités morphodynamiques et l'élaboration d'un système d'information géographique (S.I.G.). Elle a été conçue par J.F. Richard qui a travaillé avec des chercheurs de 3ème cycle, surtout A. Diagne, et plusieurs étudiants de Maîtrise de Dakar.

En même temps, M. Mietton et J. Humbert ont élaboré un projet de remise en eau de la grande cuvette du Ndiael. Ils ont étudié les problèmes hydrauliques, établi le bilan hydrologique et examiné les impacts, surtout écologiques et socio-économiques. Je voudrais encore signaler que nous avons travaillé en collaboration avec d'autres chercheurs de l'ORSTOM, surtout ceux du Projet C.E.E. relatif à "L'Environnement et la qualité des eaux du Sénégal", dirigé par J.Y. Gac. Nous avons aussi eu des contacts avec l'Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal.

Le rapport final du Projet CAMPUS, rédigé en fin d'opérations, ne donnait qu'un aperçu des différentes recherches menées de 1989 à 1992. Le présent ouvrage, illustré par de nombreux graphiques, profils, cartes et quelques images satellitaires, expose les principaux résultats des travaux effectués

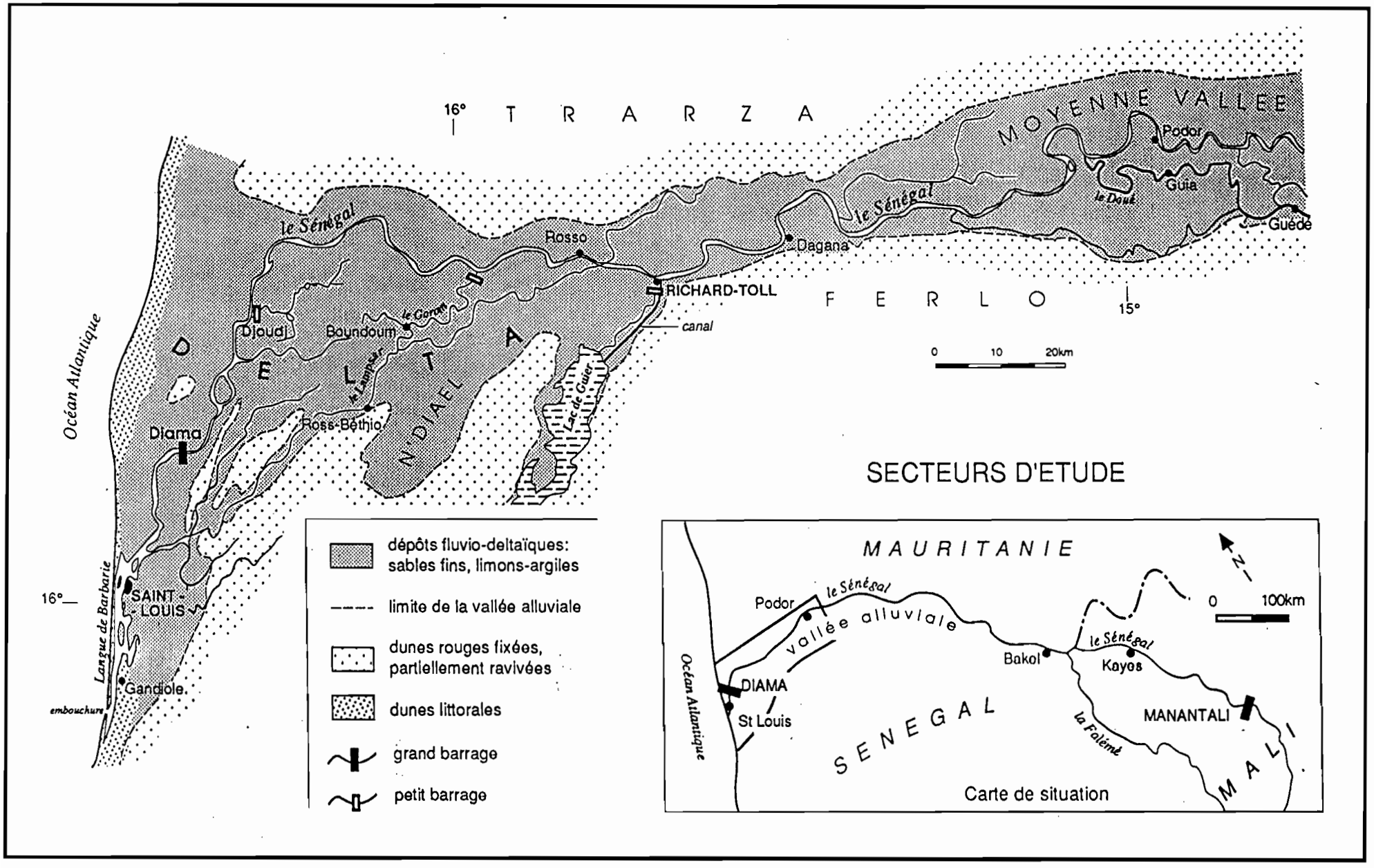


Fig. 1 : Partie inférieure de la vallée alluviale du Sénégal

au cours des campagnes de terrain. Il se subdivise en quatre parties, sur la base de considérations géographiques et thématiques :

- l'amont-barrage ; morphodynamique actuelle dans le delta et la moyenne vallée,
- l'aval-barrage ; caractères hydrologiques, processus hydrosédimentaires et conséquences écologiques,
- l'embouchure et la façade maritime ; évolution morphologique et sédimentaire,
- la dynamique du paysage dans la moyenne vallée.

Chacune des équipes a utilisé sa méthodologie, indiquée au début de la partie ou du chapitre. Pour ne pas alourdir le texte, nous avons placé à la fin de l'ouvrage, en annexe, une disquette contenant les données chiffrées, tableaux et graphiques, qui n'avaient pas trouvé place dans celui-ci ; ce fonds documentaire est susceptible d'être à nouveau enrichi et exploité.

En terminant, je tiens à remercier J.P. Barusseau et C. Descamps d'avoir bien voulu se charger de la mise en forme de cet ouvrage et les Presses Universitaires de Perpignan d'avoir accepté de le publier.

PREMIERE PARTIE

FACTEURS PHYSIQUES DE L'ÉVOLUTION DU DELTA ET DE LA MOYENNE VALLÉE

INTRODUCTION

L'avenir des aménagements hydro-agricoles du delta du Sénégal demeure largement tributaire des tendances de la dynamique postérieurement à la mise en eau des barrages de Diama et de Manantali. Mieux, depuis la construction de la digue périphérique rive gauche, le fonctionnement hydraulique du delta et son régime sédimentaire ont enregistré de profondes modifications. Conséquence des déficits pluviométriques cumulés, ils ont permis la promotion du vent au rang d'agent morphodynamique majeur.

On note ainsi dans la décennie 1980-1990 :

- une croissance des vents efficaces et l'accentuation, dans des proportions comparables, des flux détritiques au sol

- un développement sans précédent d'un modelé d'accumulation de type "champs de nebkas".

- un tronçonnement des canaux d'irrigation et de drainage.

- un dysfonctionnement des principaux axes hydrauliques, en particulier de l'axe Gorom-Lampsar qui assure l'alimentation en eau des cuvettes du Kassak, de Tilel, de Grande Digue, de Ross-Béthio, etc. (fig. 2).

Au total, le maintien de la pérennité de l'aménagement est remis en question par les tendances énoncées ci-dessus. D'où l'intérêt du suivi de l'évolution de la morphodynamique actuelle conduit dans le cadre de l'opération 1.

L'analyse de cette dynamique actuelle du moyen delta se fonde sur :

- le dépouillement des données anémométriques des stations de Richard Toll et Saint-Louis (période 1979-1989).

- le contrôle périodique des postes de mires disposés en transect prenant en écharpe des unités géomorphologiques et pédologiques reconnues.

- la mesure *in situ* des flux détritiques au sol par trappe à sédiments et enregistrement combiné des paramètres anémométriques (vitesse et direction de vent).

- la mesure des flux détritiques par transformation des données anémométriques suivant la méthode de Bagnold.

- le bornage de quelques boucles du fleuve Sénégal et du Doué, pour le suivi des sapements latéraux .

- la mesure des flux détritiques transportés à Diama.

- des enquêtes auprès des populations sur la perception des effets de la dynamique éolienne sur les aménagements.

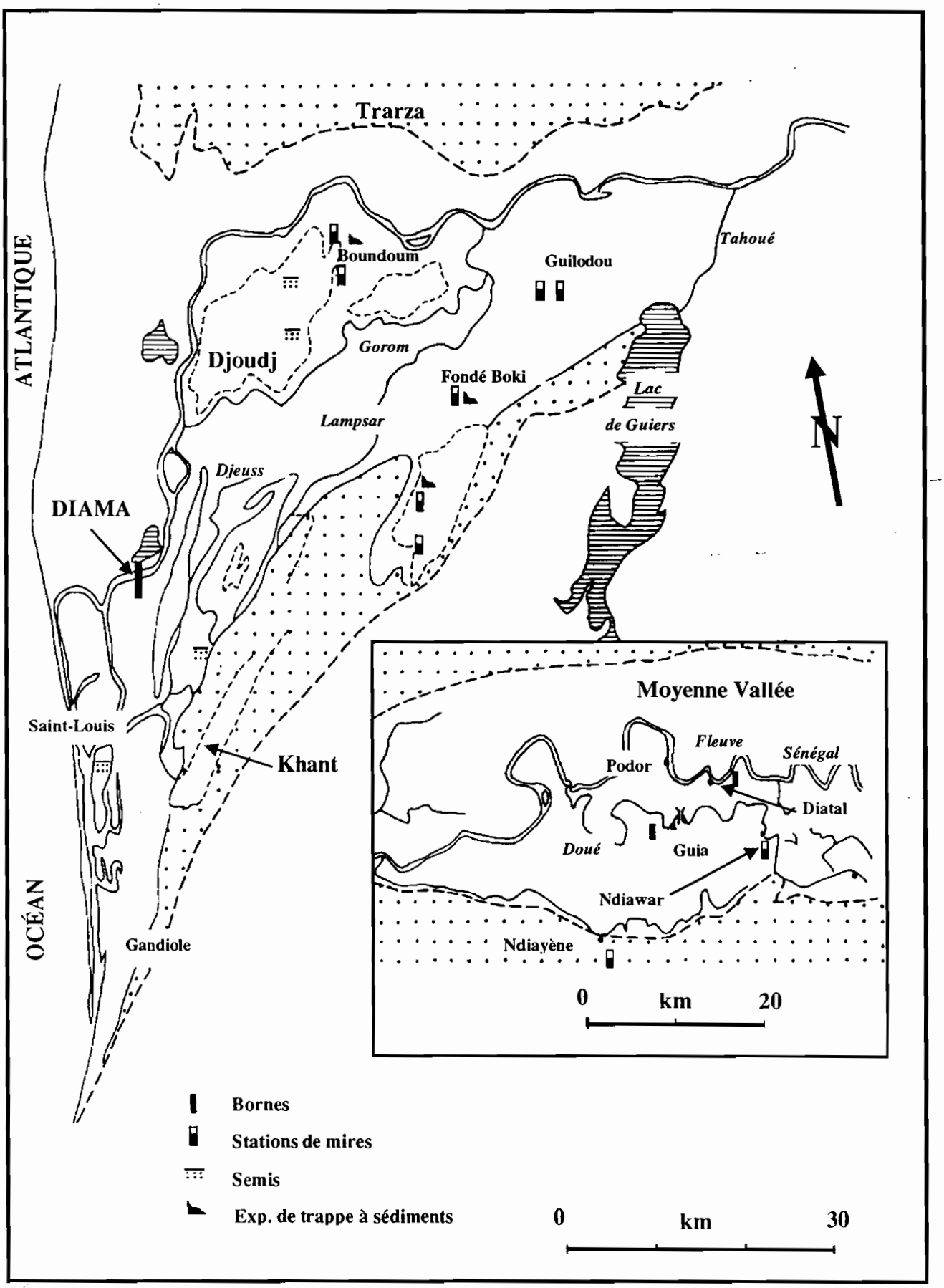


Fig. 2 : Réseau de postes d'observation de la morphodynamique

CHAPITRE I

LA DYNAMIQUE EOLIENNE

Mamadou M. SALL

La relation entre le taux de transport du sable et la force du vent est un fait d'expérience qui peut être approché théoriquement et empiriquement. Dans ce chapitre, on essaiera de mettre en évidence les modifications des conditions du milieu qui justifient les changements observés dans la morphologie de la moyenne vallée et du delta.

1. L'IMPORTANCE DES VENTS

La répartition des caractéristiques des vents est connue dans la région grâce aux observations réalisées à la station météorologique de Saint-Louis. On a considéré dans ce qui suit six classes de vitesse de vent.

1.1. L'INTENSIFICATION DES VENTS DE 1979 À 1989

Le tableau 1 donne pour les classes retenues, le nombre d'observations et la fréquence correspondante, pour les périodes 1980-1984 et 1985-1989.

CLASSE DE VENT en m/s	1980 - 1984		1985 - 1989	
	Nb	%	Nb	%
6 - 8	5,0	8,3	1.0	1,6
9 - 11	19,0	31,6	13.0	21,6
12 - 14	21,0	35,0	23.0	38,6
15 - 17	12,0	20,0	14.0	23,3
18 - 20	3,0	5,0	7.0	11,6
+ de 20	0,0	0,0	2.0	3,3

Tabl. 1 : Classes de vents maximums instantanés à Saint-Louis (toutes saisons)

La comparaison des cinq dernières années de la décennie aux cinq premières fait ressortir une accélération des vents maximaux instantanés. Les vents égaux ou supérieurs à 12 m/s passent de 60 % à 76,5 % (tabl. 1), soit une augmentation de 27,5 %. Elle est de 34,5 % en saison sèche (tabl. 2), passant de 54,2 à 72,9 %.

Seule la période 1985-1989 enregistre des vents > à 20 m/s. Cette tendance reste maintenue même après élimination systématique des vents de saison des pluies.

L'analyse des fréquences directionnelles fait état, pour l'intervalle chronologique considéré, de la prédominance des vents d'Est (34 %) suivis de ceux des secteurs NNW à NE d'une part, d'autre part de la faiblesse des vents de secteur SSE à WSW (tabl. 3).

CLASSE DE VENTS en m/s	1980 - 1984		1985 - 1989	
	Nb	%	Nb	%
6 - 8	5,0	11,3	1,0	2,7
9 - 11	15,0	34,0	11,0	25,0
12 - 14	18,0	40,9	19,0	43,1
15 - 17	6,0	13,8	8,0	18,1
18 - 20	0,0	0,0	4,0	9,0
+ de 20	0,0	0,0	1,0	2,7

Tabl. 2 : Classes de vents maximums instantanés de saison sèche

ANNEES	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
1979	1	3	0	2	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	2
1980	3	0	1	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
1981	1	1	1	0	4	1	0	0	0	1	0	0	1	0	2	0
1982	1	0	2	1	3	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
1983	1	0	0	0	2	2	2	0	0	0	1	0	1	0	2	1
1984	2	0	2	1	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3
1985	2	1	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2
1986	1	0	1	1	4	0	2	0	0	0	1	0	1	0	0	1
1987	2	3	1	1	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1988	2	2	2	0	2	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
1989	2	1	2	0	2	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	18	11	14	7	26	9	9	2	1	1	3	0	9	0	6	16

Tabl. 3 : Fréquence directionnelle des vents efficaces (>5 m/s)

Les fréquences enregistrées expliquent à la fois le sens de migration des flux détritiques, l'orientation des édifices éoliens fonctionnels et la localisation des aires d'accumulation ; confrontées à la direction des lits fossiles, elles expliquent l'inégale vitesse de colmatage de ceux-ci.

1.2. ABLATION, TRANSPORT ET ACCUMULATION

Hors des périmètres irrigués maintenus en exploitation, le moyen delta est une mosaïque d'aires de déflation et de zones d'accumulation de type champs de nebkas.

L'artificialisation du régime du fleuve Sénégal, la suppression de la submersion annuelle par la crue, la contraction de la végétation qui découle de l'assèchement climatique, le rôle floculant du sel dans les formations fluvio-deltaïques et la pression des facteurs anthropiques (création de belles surfaces de déflation par le planage des cuvettes) conjuguent leurs effets pour donner aux vents une efficacité inconnue avant 1964.

Deux démarches ont été adoptées pour parvenir à une évaluation quantitative des flux détritiques au sol : la mesure directe des transports éoliens aux stations de Boundoum et de Fondé Boki par système de trappe à sédiments disposés perpendiculairement aux vents dominants d'une part, la réduction des données anémométriques en débits solides éoliens suivant la méthode de Bagnold d'autre part.

1.2.1. Les flux détritiques au sol mesurés *in situ*

Des expériences de trappe à sable ont été menées à Boundoum et Fondé Boki. La vitesse et la direction des vents ont été enregistrées en continu pendant la durée des expériences au moyen d'une station

climatique automatique. Les résultats (fig. 3 et 4a et b) permettent d'observer :

- la faiblesse du transport dans les premières heures de la matinée, même quand la vitesse critique de mobilisation des sédiments est atteinte.
- son accentuation dans les premières heures de l'après-midi en liaison avec un accroissement à la fois des vitesses et de la turbulence du vent (fréquence des trombes).
- le maintien de débits solides importants, supérieurs à 800 g par mètre de largeur du courant éolien, particulièrement à Boundoum, en dépit du fléchissement des vitesses souvent enregistrées vers 16-18 heures.
- pour toutes les stations, la généralisation des transports sableux principalement pour les secteurs N, NE, et NW, ce qui localise des aires d'accumulation sur les bordures S, SW et SE des aires de déflation.

1.2.2. Les flux détritiques au sol déduits des vents efficaces.

Les données anémométriques 1988-1989 de la station de Saint-Louis ont été réduites en débits solides éoliens suivant la méthode de Bagnold. En dépit du caractère théorique de la démarche et de ses limites (elle suppose en effet une provision illimitée de sédiments mobilisables et une topographie rigoureusement plane), elle rend compte de l'ampleur des migrations potentielles de sédiments dans les différentes directions de la rose des vents.

Deux saisons de déflation alternent à l'échelle de l'année :

- de janvier à juin, les débits solides sont maximaux en raison d'une plus grande fréquence des vitesses supérieures au seuil critique de mobilisation des sédiments. La continuité de la déflation en cette saison est cependant fréquemment rompue par la formation consécutive aux pluies de *heug* d'une pellicule de battance qui fige le modelé pendant plusieurs semaines. Les débits solides les plus importants sont associés aux vents de secteur N, NE et NW.
- de juillet à décembre, la rose des vents est plus dispersée, les vitesses maximales plus faibles, le matériel plus cohérent, la croûte de battance plus étendue. Le matériel accumulé pendant la saison précédente peut être remobilisé par des vents des secteurs S, SE et SW.

1.2.3. La prédominance des surfaces de transit.

Le paysage du moyen delta est une mosaïque d'aires de déflation et de champs de nebkas, en raison de l'extrême platitude des accumulations fluvio-deltaïques, de la contraction de la végétation et de la forte pression des actions anthropiques. Cependant cette spécialisation des surfaces est toute relative. Le suivi des postes de mires des quatre stations met en évidence une réelle prédominance des aires de transit qui recouvre la totalité des transects à l'exception des lits fossiles où, en raison de la topographie et du couvert arboré, la remobilisation des apports argilo-limoneux est difficile, sinon impossible.

a. Station de Ndiael 1

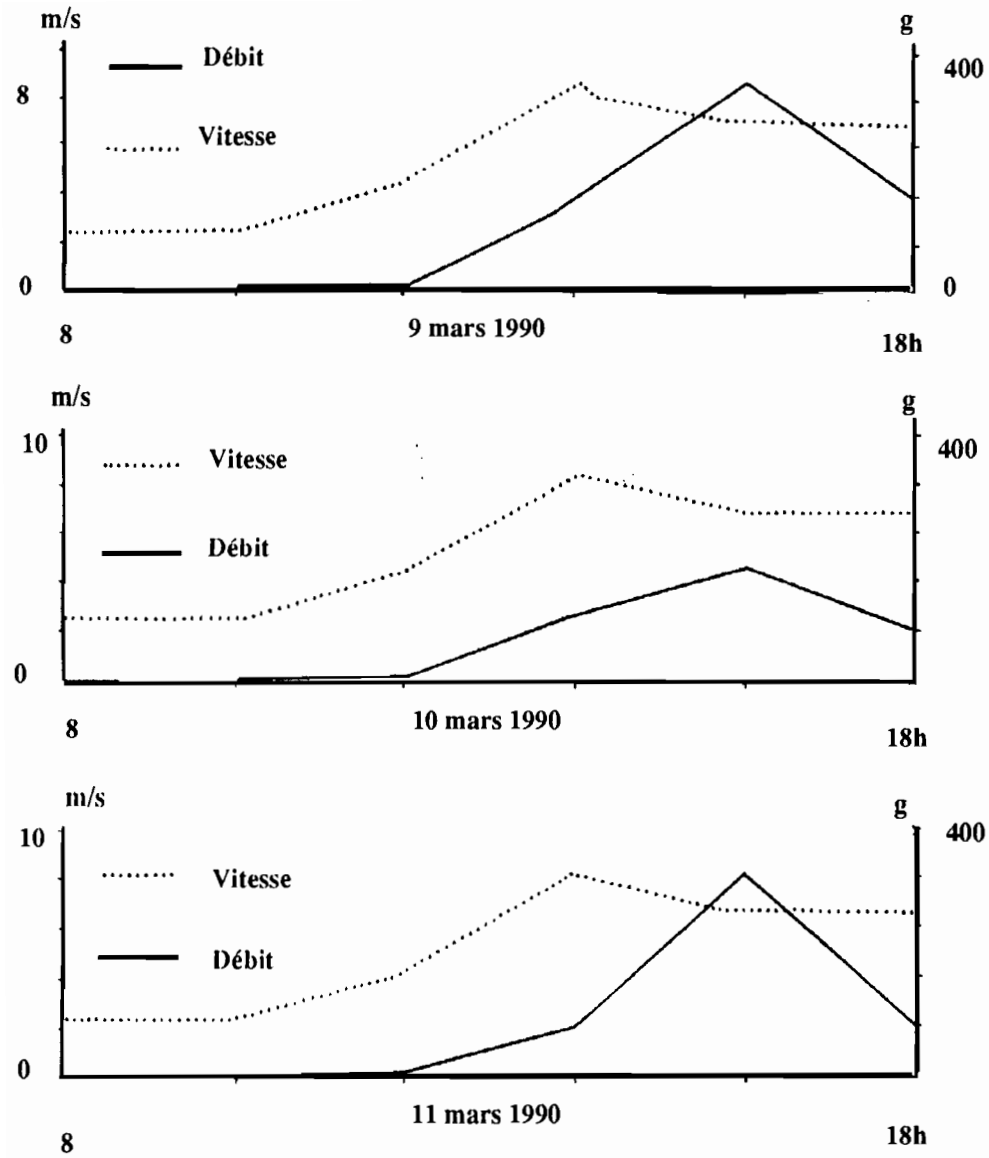
Le transect prend en écharpe la partie occidentale de la cuvette, une terrasse et une zone d'accumulation de plusieurs centaines de mètres de large colonisée par *Salsola baryosma*, espèce stabilisatrice à stolons, *Sporobolus spicatus*, *Tamarix senegalensis* et *Philoxerus vermicularis*.

Ces relevés permettent de déceler, à travers l'alternance d'épisodes d'ablation et d'accumulation, la prédominance du transit sédimentaire sur l'ensemble des unités, même si les bilans pour l'intervalle chronologique considéré désigne trois tendances plus ou moins nettement exprimées: une tendance à l'ablation pour la cuvette, une stabilité compensée pour la terrasse et une légère tendance à l'accumulation pour la pseudo-lunette (tabl.4). La prédominance des surfaces de transit s'explique par la grande variabilité directionnelle des vents efficaces.

Dans le moyen delta en général et au Ndiael en particulier, cette dispersion de la rose des vents, jointe à l'absence de conditions favorables à une fixation durable du matériel, fonde l'hypothèse d'un stock sédimentaire en recyclage permanent, stock qui n'est susceptible de s'amoindrir que de sa fraction fine exportée hors des limites du delta.

b. Station de Ndiael 2

Le transect prend en écharpe la bordure SW du Ndiael et recouvre une partie de la cuvette et son raccordement à un ancien bourrelet de sable fin et de limon de près de 2 m de hauteur. Les contrôles successifs ont donné les résultats indiqués dans le tableau 5.



Fig; 3 : Débits éoliens et vitesses de vents à Fonde Boki

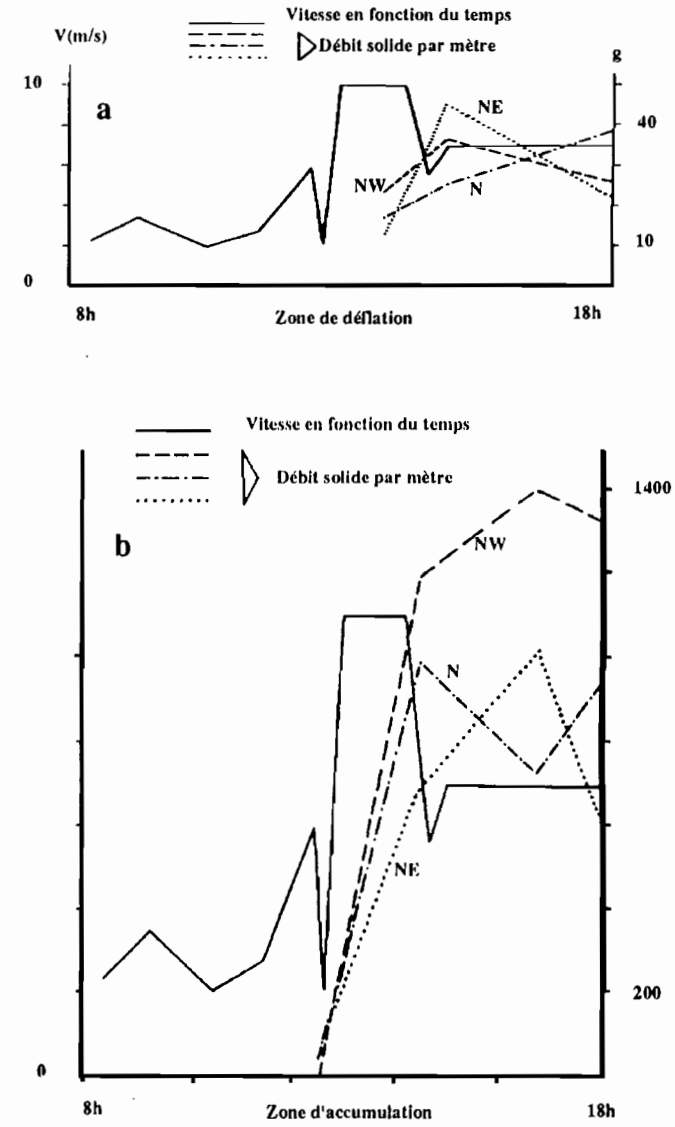


Fig. 4 : Débits solides instantanés et vitesses de vent à Boundoum ouest

		DATES DES CONTROLES									
	REPERES	20-01-90	2-02-90	2-04-90	6-06-90	20-08-90	4-11-90	21-12-90	15-02-91	4-04-91	7-08-91
CUVETTE	R1	20,0	19,6	20,0	20,0	20,0	19,0	20,0	19,7	18,8	20,0
	R2	20,0	19,7	19,7	20,0	20,0	20,0	19,0	19,3	20,0	20,0
	R3	13,5	13,6	13,8	13,7	13,4	13,5	13,5	12,8	NR	NR
	R4	10,5	10,5	10,5	11,2	11,0	11,8	11,7	11,5	10,8	10,6
TERRASSE	R5	18,6	18,5	18,5	18,5	18,6	18,6	18,5	19,2	19,0	18,8
	R6	15,0	15,0	14,7	14,7	14,7	15,5	15,9	15,0	15,2	14,8
	R7	18,0	15,0	15,0	15,2	15,0	16,7	16,5	16,5	16,5	16,4
PSEUDO LUNETTE	R8	23,0	22,2	19,8	19,7	18,3	18,7	18,7	17,2	16,3	17,0
	R9	20,5	19,8	19,8	19,8	20,6	19,0	19,0	16,3	16,7	16,5
	R10	12,5	13,6	9,7	10,0	12,0	12,2	NR	NR	NR	NR

Tabl. 4 : Ablation et accumulation (en cm) à la station de Ndiael 1.
La partie affouillée ou remblayée des mires donne la mesure de l'érosion ou du dépôt.

Par rapport au transect de Ndiael 1, on relève à Ndiael 2 quelle que soit l'unité considérée, une tendance plus nette au transit. Si, de janvier à juin, l'accumulation l'emporte sur l'ablation au niveau de la lunette, la tendance semble s'inverser de juillet à décembre. Ceci est à mettre en relation avec le changement saisonnier de régime de vent et a pour effet une remobilisation partielle du stock sédimentaire de la lunette et sa redistribution dans d'autres unités (cuvette et contact cuvette-bourrelet).

On comprend donc, en dépit de l'ampleur des processus éoliens, que des lunettes actuelles ne puissent s'édifier en bordure de la cuvette.

REPERE	20-01-90	2-02-90	2-04-90	6-07-90	20-08-90	4-11-90	15-02-91	7-08-91
N1	13,8	13,4	13,4	13,0	13,2	13,0	13,6	13,9
N2	12,5	12,5	10,2	9,5	13,4	14,5	14,5	11,7
N3	18,5	17,3	16,0	14,9	16,0	15,2	15,3	14,0
N4	17,0	17,0	15,5	15,6	17,0	17,0	17,2	17,2

Tabl. 5 : Ablation et transport (en cm) à la station de Ndiael 2.

c. Station de Ross-Béthio

Le tableau 6 donne les résultats des différents contrôles.

2. CONSÉQUENCES DES ACTIONS ÉOLIENNES.

Les actions éoliennes se révèlent déterminantes dans la formation et l'extension d'un modelé d'accumulation de type champs de nebkas, dans le colmatage des lits fossiles et dans le dysfonctionnement des axes hydrauliques comme le Gorom Lampsar.

2.1. FORMATION ET EXTENSION DES CHAMPS DE NEBKAS

L'extension du modelé d'accumulation résulte d'une conjonction de facteurs favorables : belles surfaces de déflation sous la forme de périmètres planés et non mis en exploitation, présence d'un matériel facilement floculé par le sel en agrégats mobilisables par le vent, caractère éphémère de la croûte de battance rapidement détruite par piétinement, fréquence des vents efficaces de décembre à juin et hors des périmètres planés,

existence d'un couvert végétal clairsemé favorable à l'édification de dunes d'obstacles.

Il n'est pas sans intérêt d'analyser la typologie et la structure des nebkas dans la mesure où elles peuvent être révélatrices des tendances dynamiques comme des épisodes successifs d'accumulation ou d'ablation.

REPERES	30-03-89	19-01-90	2-02-90	2-04-90	5-06-90	20-08-90	4-11-90	21-12-90	16-02-91	3-04-91	7-08-91
RB1	20,0	18,6	19,5	19,0	20,5	20,7	18,8	18,7	18,0	18,3	17,0
RB2	20,0	19,2	19,5	19,7	19,4	19,6	19,0	19,0	19,2	19,2	19,0
RB3	20,0	19,7	19,7	19,2	19,0	19,3	19,0	19,2	19,5	19,8	20,0
RB4	20,0	20,0	20,0	19,9	19,5	19,8	19,5	19,5	19,5	19,5	20,0
RB5	20,0	17,0	17,0	15,0	14,5	15,2	15,3	15,2	16,0	15,5	14,0
RB6	20,0	NR									
RB7	20,0	NR									
RB8	20,0	20,5	20,5	17,0	17,0	17,0	16,5	16,5	16,5	17,5	
RB9	20,0	21,0	21,0	20,0	19,7	19,8	17,0	17,0	17,2	18,6	
RB10	20,0	20,0	20,5	21,6	21,6	21,5	20,5	20,6	20,5	20,0	19,0
RB11	20,0	16,5	20,0	19,0	19,0	19,4	19,0	20,0	19,6	19,0	

Tabl. 6 : Ablation et apport (en cm) à la station de Ross-Béthio .

2.1.1. Densité et typologie

Lorsque les nebkas correspondent à de véritables dunes d'obstacle, leur densité dépend de celles des obstacles végétaux et de leur position par rapport aux aires d'ablation. C'est ainsi qu'il est possible d'observer des nebkas isolées sur des surfaces de déflation rigoureusement planes, des nebkas surbaissées jointives formant une véritable plaine d'accumulation comme sur la bordure W du Ndiael, des pseudo-bourrelets de limons éoliens comme à Fondé Boki.

Des mesures de morphométrie plane effectuées sur un placer de 80 m^2 à la station de Fondé Boki ont permis de ranger les formes dans quatre types principaux : triangulaire effilé (10 %), triangulaire large (38,9 %), hémisphérique (20 %), circulaire (19,6 %) ; 11,5 % des formes sont atypiques.

Les formes sont étroitement liées au progrès dans l'accumulation, au progrès dans la colonisation végétale et à l'intervention de vents de secteurs différents. Aussi est-il possible d'observer dans le temps le passage progressif d'un type de nebka simple à des types de plus en plus évolués. La nebka embryonnaire est de type triangulaire effilé ; bien nourrie, elle passe au type triangulaire large. Ces deux types correspondent incontestablement aux formes les plus dynamiques, aux accumulations les plus récentes.

Le type triangulaire large passe au type hémisphérique lorsque s'étend la colonisation par la végétation. Une décroissance ou un arrêt de l'accumulation, combiné à un recouvrement de l'ensemble par la végétation, engendre un type circulaire ; remanié par les vents et par les actions hydriques, le type circulaire devient rapidement atypique ; les formes circulaires et atypiques sont un bon indicateur de l'ancienneté de l'accumulation.

2.1.2. Structure des nebkas, croûtes de battance et mise en évidence des épisodes d'engraissement.

L'étude de la structure d'une nebka révèle l'alternance de niveaux de sables fins, de limons et de pellicules de battance. Celles-ci forment des feuillets d'épaisseur variable, compacts et de texture fine. Les niveaux de sable fin et de limon, séparés par les pellicules de battance successives, deviennent lenticulaires à la base de la nebka.

Dans la mesure où les pellicules de battance fossilisent les apports des périodes sans pluie, il est possible, lorsqu'une pellicule est localisée et datée, de mesurer l'ampleur des apports correspondant aux périodes sèches suivantes. Elles marquent une discontinuité dans le processus d'édification de la nebka, en même temps qu'elles constituent un repère pour les épisodes d'engraissement.

2.2. LE COLMATAGE DES LITS FOSSILES.

Le moyen delta est parcouru par un véritable réseau hydrographique fossile. Les artères le composant ont été, à l'Holocène inférieur, tributaires des axes toujours fonctionnels du Gorom et du Lampsar.

Elles enregistrent leurs dernières crues en 1963, à la veille de la construction de la digue périphérique rive gauche. Soumises depuis près de trois décennies aux effets combinés des actions anthropiques de l'assèchement du climat et des processus éoliens, leur modelé s'oblitère et elles se réduisent localement à un chapelet de mares.

DATES DE CONTROLE	BOURRELET DE BORDURE		LIT FOSSILE		BOURRELET	
	R1	R2	R3	R4	R5	R6
16/02/90	8,5	9,0	9,5	8,9	7,5	8,0
03/04/90	9,5	8,3	8,0	6,5	7,0	7,4
04/06/90	9,5	8,3	8,0	6,5	7,0	7,5
29/09/90	9,7	8,3	6,3	4,8	7,0	7,6
22/12/90	9,6	8,2	6,3	4,8	7,0	7,4
16/02/91	8,0	8,8	6,0	3,9	6,9	7,4
03/04/91	7,8	8,8	6,2	3,8	7,0	7,4
06/05/91	6,9	9,0	6,0	3,8	6,5	7,0
07/08/91	6,9	8,5	6,0	3,8	6,5	7,0

Tabl. 7 : Ablation et accumulation (en cm) à la station de Guiladou 1

L'axe hydrographique fossile le plus important est le Diovol, qu'il est possible de suivre de Ross Béthio à Colonat. Deux postes de mires destinés au suivi du colmatage actuel y ont été installés. Le contrôle des postes a donné les résultats exprimés dans les tableaux 7 et 8. Le colmatage du lit fossile est de 3,8 cm à Guiladou 1 et de 2,4 cm à Guiladou 2 pendant l'intervalle chronologique considéré (environ 18 mois).

L'inégalité des vitesses enregistrées est due à plusieurs facteurs :
- la position du lit fossile par rapport aux vents efficaces : les segments les plus colmatés sont ceux disposés perpendiculairement aux vents de secteurs N, NE et NW.
- la position du lit fossile au vent ou sous le vent d'une surface de déflation.
- la continuité ou la discontinuité de la forêt galerie.

Les variations temporelles de colmatage indiquent la prédominance de l'accumulation de décembre à juin, saison de forte énergie éolienne. Le matériel accumulé connait un tassement en saison des pluies et même des remaniements localisés par des écoulements superficiels de type ravinant.

DATES DE CONTROLE	BOURRELET DU LIT		LIT FOSSILE		BOURRELET DU LIT	
	R1	R2	R3	R4	R5	R6
16/02/90	8,7	8,5	9,5	10,4	8,5	8,6
03/04/90	6,8	7,5	7,2	9,9	9,0	11,0
04/06/90	5,0	5,5	7,2	9,5	11,0	6,6
22/12/90	5,3	5,5	7,0	9,5	11,0	6,5
16/02/91	4,9	5,1	6,3	9,5	10,8	6,3
03/04/91	NR	4,5	5,9	9,2	10,8	6,6
06/05/91	NR	4,1	5,9	9,2	11,2	6,7
07/08/91	NR	4,1	5,9	9,9	11,3	NR

Tabl. 8 : Ablation et accumulation (en cm) à la station de Guiladou 2

La végétation ligneuse des lits fossiles, *Acacia nilotica* principalement, est un assez bon indicateur du colmatage, l'ensevelissement des troncs étant à l'origine d'un niveau de ramification particulièrement bas ; on observe ainsi en coupe à Guiladou 1 :

- un niveau inférieur argileux noir, bien structuré avec passées ocre-rouille, particulièrement compact, tout l'appareil racinaire d'*Acacia sp.* est enfoui dans ce niveau.
- un niveau B de 58 cm argilo-limoneux beige, meuble dans sa partie supérieure, associé à divers débris végétaux ; ce niveau recouvre une bonne partie du tronc.

Ces deux niveaux ont été mis en place par des dynamiques différentes: une dynamique de décantation pour le niveau A, une dynamique éolienne pour le niveau B. *Acacia nilotica* a pris pied sur des argiles de décantation déposées avant 1964. Il a été ensuite partiellement enseveli par des apports éoliens dont l'épaisseur donne la mesure du colmatage depuis 28 ans soit 1,9 cm par an. Les résultats de l'analyse granulométrique confirment le passage, à partir de 1964, d'une dynamique de décantation à une dynamique éolienne.

La distribution des paramètres texturaux de Folk et Ward indique en effet, du niveau A au niveau B, une amélioration de l'indice de tri, une diminution du grain moyen ainsi qu'une asymétrie positive.

En définitive, depuis 1964, la dynamique à deux temps des paléolits est révolue. La tendance actuelle est à la dégradation des galeries forestières et à l'oblitération des lits fossiles, déjà localement réduits en saison des pluies à un chapelet de mares.

	DATES DES CONTROLES					AVANCEE
REPERE	19-01-90	3-02-90	20-04-91	10-08-91	10-12-91	TOTALE
ND1	18,25	8,90	11,20	3,90	1,20	43,45
ND2	5,50	9,60	7,42	2,20	0,50	25,22
ND3	9,00	4,90	3,30	0,75	0,00	17,95
ND4	7,44	12,00	5,10	1,91	1,20	27,65
ND6		4,41	1,60	0,60	1,42	8,03
BL1		1,59	0,00	0,00	0,66	2,25
BL12		1,32	4,27	2,18	0,19	7,96
BL2		4,40	6,10	3,84	1,16	15,40
AC1		2,67	NR	NR	NR	NR
BM		2,14	1,91	0,67	0,00	4,72
BL3		1,35	0,69	1,13	0,00	3,17

Tabl. 9 : Migration des dunes (en m) à la station de Ndiayène 1

2.3. REMANIEMENTS SUR LES DUNES DU *DIÉRI*

Les actions éoliennes débordent largement les limites du delta et de la basses vallée. Elles se sont étendues, à la faveur de la péjoration climatique des deux dernières décennies, aux dunes du *diéri* que Lake assimile à une mosaïque d'aires dégradées.

Le remaniement du matériel dunaire et sa remobilisation sous forme de barkhanes revêtent une grande ampleur entre Thilé Boubacar et Tarédji : sous l'effet combiné de la sécheresse et de la pression anthropique, de véritables barkhanes se forment et migrent sous l'influence des vents de secteurs N et E. Leur progression a été suivie à Ndiayène au cours de la période 1989-1992. La station de Ndiayène 1 a été installée le 30 mars 1989 et celle de Ndiayène 2 le 19 janvier 1990 (tabl. 9 et 10).

Les vitesses maximales sont enregistrées en saison sèche de décembre à juin mais la phase de stabilité correspondant à la saison des pluies est toute relative car elle est entrecoupée d'épisodes de remaniement.

L'accélération de la vitesse des vents au cours de la dernière décennie n'explique pas à elle seule le progrès des mécanismes de dénudation des terroirs du *diéri* et la juxtaposition d'aires dégradées et de milieux relativement stables.

La coïncidence des surfaces dunaires remaniées et des terroirs de villages abandonnés au XIIIème siècle attestée par la présence de vestiges d'ancienne métallurgie du fer et de nombreux tessons de poterie, suggère la réactivation d'instabilités antérieures. Ainsi les aires dégradées correspondraient à des secteurs fragilisés dès avant le XIIIème siècle et remis en mouvement sous le double effet de l'assèchement du climat et de la pression anthropique.

REPERES	3-02-90	20-04-90	10-08-91	10-12-91	Avancée totale
ND1	1,64	3,59	4,13	1,05	10,44
ND2	3,93	5,21			NR
ND3	4,74	7,38	3,46	2,25	17,83

Tabl. 10 : Migration des barkhanes (en m) à Ndiayène 2

CHAPITRE II

HYDROLOGIE ET HYDRODYNAMIQUE

Mamadou M. SALL
Alioune KANE

1. EROSION ET SÉDIMENTATION

1.1. LE RAVINEMENT

La baisse généralisée des surfaces inondées s'est accompagnée dans la basse vallée, en particulier dans l'ile à Morphil, d'une intensification du ravinement. Celui-ci affecte les levées, hautes ou basses, et les cuvettes argileuses de décantation, empiétant souvent sur leur fond.

La conjonction de plusieurs facteurs favorables explique la réalisation en moins d'une décennie de véritables réseaux de ravins fonctionnels :

- l'agressivité des pluies : les pluviogrammes de Nianga font état d'intensités comparables à celles des régions méridionales du pays.
- la présence de matériaux argileux profondément burinés de fentes de retrait à la fin de la longue saison sèche,
- l'absence ou la rareté de l'inondation, ce qui renforce les effets du facteur précédent.

Vu en plan, un réseau fonctionnel de ravins comme celui de Ndiawara, sur les bords du Doué, présente la forme d'un amphithéâtre aux contours digités. Il est, dans sa partie amont, élargi en un bassin de réception qui s'étrangle vers l'aval. Il n'y a ni chenal d'écoulement ni même zone d'épandage, les écoulements rejoignant le lit du Doué en empruntant un parcours souterrain de 6,10 m de long.

Ces réseaux de ravins fonctionnels sont des formes de creusement à évolution rapide ainsi que le montrent les modifications morphométriques du ravin de Ndiawara dans l'intervalle chronologique 1988-1992.

	DATES		
	26-01-88	**16-02-90**	**7-04-92**
Plus grande longueur	26,5 m	31,2 m	35,6 m
Plus grande largeur	21,5 m	26,7 m	34,0 m
Plus grande profondeur	1,30 m	1,00 m	0,84 m

Tabl. 11 : Modifications morphométriques du ravin de Ndiawara entre 1988 et 1992

Ces valeurs traduisent deux tendances nettement affirmées : d'une part un accroissement dimensionnel du réseau par progression des ravins ; d'autre part, une réduction des profondeurs, les écoulements étant inaptes à mobiliser tous les épandages.

1.2. LE SAPEMENT DES BERGES

Il est établi qu'avant l'artificialisation du régime hydraulique du Sénégal le recul des berges de l'ordre de 1 m/an apporte une contribution décisive à la formation de débit solide.

Depuis la mise en eau des barrages de Diama et de Manantali, les berges sont contrôlées à la fois par la crue de la Falémé et par l'ampleur et la fréquence des lâchers effectués depuis Manantali. Les contrôles effectués aux six stations de la vallée (tableau ci-dessous) indiquent le maintien des vitesses de recul pour les stations de Diatal et de Mbantou et leur nette réduction à Dagana et Guia.

	30-03-89 16-04-92	16-02-90 16-04-92
DAGANA AMONT	0,72	
DAGANA AVAL	1,69	
DIATAL	2,95	
GUIA 1	0,50	
GUIA 2		0,90
MBANTOU		2,16

Tabl. 12 : Recul moyen des berges (en m) aux stations de la vallée .

Etant donné la brièveté des intervalles chronologiques (2 et 3 ans) et l'absence des données relatives à la fréquence et l'ampleur des crues à Manantali, on en saurait tirer de conclusion définitive. Mais il semble que le passage d'un régime hydrologique naturel à un régime artificiel n'ait pas conduit à une stabilisation des berges du Sénégal. On peut relever, entre autres éléments favorables à cette tendance, la multiplication des crues artificielles et leur canalisation dans le lit mineur, ce qui compense dans des proportions variables, selon les années, la baisse d'énergie consécutive à la fragmentation de la crue annuelle.

1.3 LE DYSFONCTIONNEMENT DE L'AXE GOROM-LAMPSAR

Cet axe, où se localisent de nombreuses cuvettes aménagées (fig. 5), se suit de la diffluence du Gorom à la confluence du Djeuss et du Lampsar. Il est assimilable à une retenue ou plus exactement à une juxtaposition de retenues du fait des nombreux ouvrages qui y sont implantés (barrages de Ronq, de Boundoum, de Gorom amont, de Gorom aval, de Demba Diawar, de Ndiol, de Makhana, de Ndiaoudoun, etc.).

Le colmatage de l'axe pose de redoutables problèmes de gestion des eaux nécessaires à l'irrigation de 7 500 ha de périmètre aménagé pour la riziculture. Le Gorom-Lampsar est, en effet, le réceptacle de trois catégories d'apports :

- apports par décantation de la charge solide du fleuve qui assure la totalité de son alimentation.
- apports d'une déflation éolienne particulièrement active dans le moyen delta.
- apports latéraux des unités géomorphologiques bordières de l'axe, en particulier des ensembles dunaires de la partie méridionale.

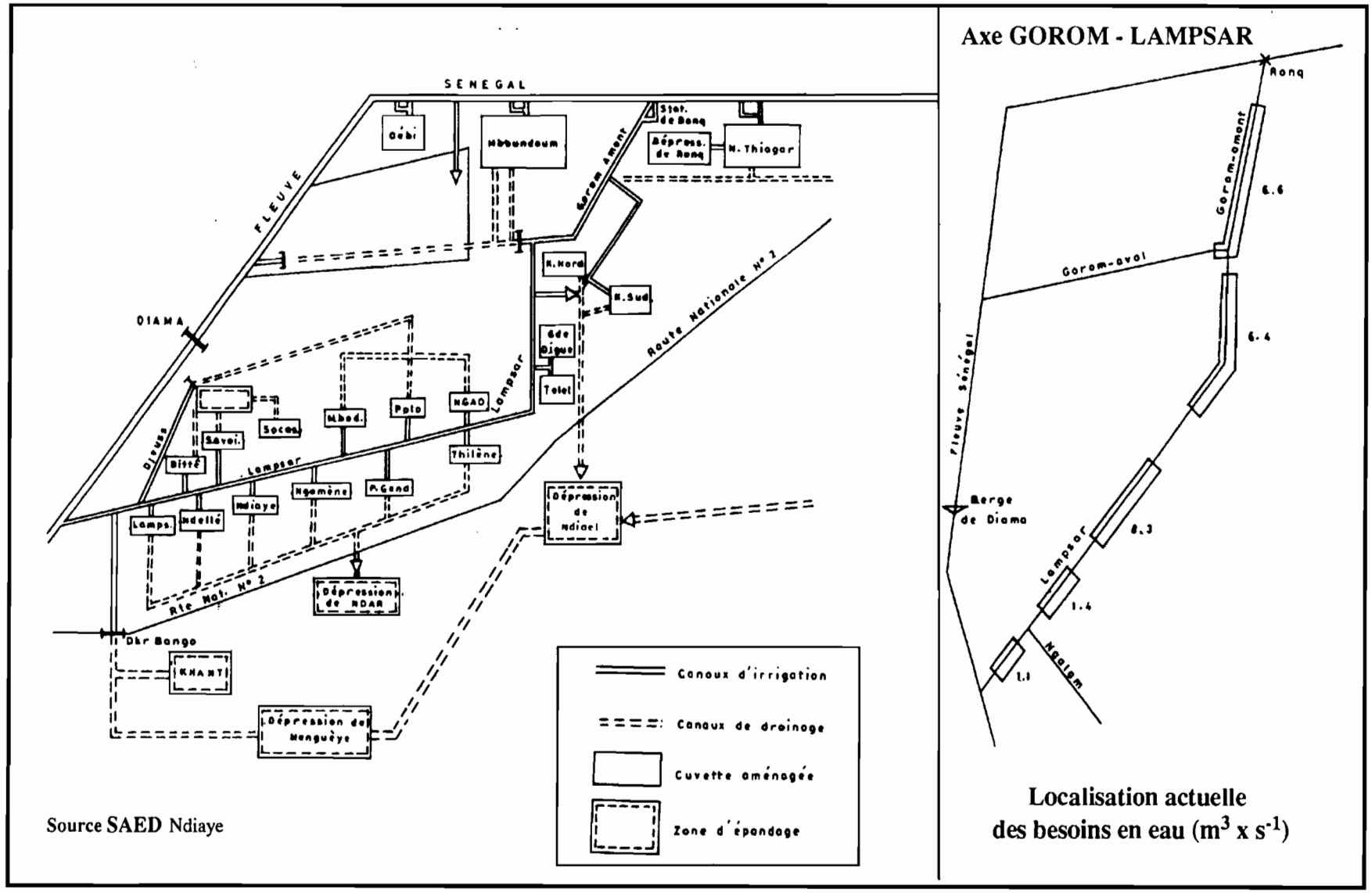
La comparaison des levés du SCET (1969) et de Bouette (1988) permet de noter un exhaussement du lit du haut et moyen Lampsar voisin de 0,60 m, soit une vitesse moyenne de colmatage de l'ordre de 3,15 cm/an.

Près du double est signalé pour le bas Lampsar. Il en résulte pour l'ensemble de l'axe une baisse généralisée des profondeurs d'eau, un étranglement des chenaux par des bancs progradants sur lesquels prend pied une végétation flottante particulièrement favorable au piégeage sédimentaire et un fonctionnement hydraulique perturbé lors d'opérations aussi essentielles que le remplissage et le lessivage, respectivement au début et à la fin de la crue. Ainsi l'écoulement dégradé entraîne une perte de profondeur de 80 cm, soit 1 m à Ronq et 0,20 m à Ross Béthio. Le taux de sédimentation est évalué à 0,4 g/l pendant la crue, soit 41 500 tonnes déposées dans l'axe par an et en partie déversés dans les casiers irrigués de la S.A.E.D (Société d'Aménagement et d'Exploitation des terres du Delta)

2. L'IMPACT DU BARRAGE DE DIAMA

2.1. HYDROLOGIE DANS LA BASSE VALLÉE ET LE DELTA

Novembre 1985 correspond à l'achèvement des travaux du barrage de Diama, édifié à 50 km en amont de l'embouchure. Cette date correspond de façon irréversible à l'artificialisation du fleuve Sénégal, le régime hydrologique naturel appartenant désormais au passé.



Source SAED Ndiaye

Fig. 5 : Cuvettes aménagées en tertiaire par la SAED dans le delta du fleuve Sénégal

Le barrage de Diama a été conçu pour :

- arrêter la remontée des eaux marines dans le lit du fleuve pendant la saison des basses eaux (de janvier à juillet).
- créer un réservoir d'eau douce à l'amont.
- améliorer les conditions de remplissage des réservoirs d'eau secondaires (lac de Guiers, axe Gorom-Lampsar, lac Rkiz, etc.).

Néanmoins l'alternance naturelle des eaux douces de la crue et des eaux marines dans l'estuaire est annuellement respectée, mais le phénomène hydrologique du fleuve Sénégal, dans la basse vallée et l'estuaire, est désormais intimement lié aux perturbations induites par le mouvement des vannes du barrage de Diama ; le temps de présence de l'eau douce dans le bas estuaire en dépend également. La retenue en eau douce en amont de Diama varie en fonction de la hauteur des digues sur les rives mauritanienne, achevée en avril 1992, et sénégalaise où des travaux de rehaussement et de réfection sont en cours:

- à la côte de +1,50 m IGN, le volume d'eau stocké est de 250 millions de m^3;
- à la côte de 2,50 m IGN, le volume est alors de 460 millions de m^3;
- la côte maximale de la retenue peut atteindre +3,20 m IGN.

2.1.1 L'abondance fluviale

Depuis 1985, les relevés du plan d'eau fluvial effectués au niveau du barrage de Diama nous permettent de déterminer les écoulements mensuels et annuels de la saison des hautes eaux.

Pietkutowski (1990) a calculé les déversements au niveau du barrage de Diama entre 1986 et 1989. Les écoulements sont déterminés pendant la saison des haute eaux par l' équation :

$$Q = CA\,(2g\,AH)^{1/2}$$

où Q = débit ($m^3 . s^{-1}$), C = coefficient de l'orifice (sans dimension), A = superficie de l'orifice (m^2), g = accélération de la gravité (9,8 m . s^{-1}), H = charge hydraulique = niveau d'eau amont - niveau d'eau aval (m).

Selon cette formule, l'auteur "considère généralement que le débit d'une vanne de réglage noyée est assimilable au débit d'un orifice noyé". Cette équation, qui s'applique à un écoulement imparfait (turbulent), pose cependant problème lorsque les déversements sont importants et que s'établit un régime pour lequel le niveau en aval se relève (Pietkutowski, 1990).

On dispose ainsi d'une série de valeurs complètes depuis 1986, date de la mise en eau du barrage de Diama.

	1986		1987		1988		1989		1990	
	Volume	%	Volume	%	Volume	%	Volume	%	Volume	%
JUIL	103	1,26	0	?	6	0,04	576	6,58	833	14,92
AOUT	1200	14,67	390	7,36	1930	14,40	1110	12,69	1170	21,92
SEPT	2750	33,62	1820	34,30	5050	37,69	3200	36,57	1370	24,58
OCT	3070	37,53	2000	37,70	5850	43,66	2820	32,23	1570	28,14
NOV	1040	12,71	1030	19,40	502	3,75	850	9,71	574	10,30
DEC	25	0,30	61	1,15	82	0,62	203	2,32	55	0,99
TOTAL	8188		5301		13420		8759		5572	

Tabl. 13 : Volumes moyens annuels (en millions de m3) écoulés au barrage de Diama.

L'écoulement annuel a été maximal en 1988, sensiblement égal en 1986 et 1989, et minimal en 1987 et 1990. Au cours de cette courte période, l'écoulement moyen est d'environ 8,24 milliards de m^3/an.

Gac *et al* .(1991) ont souligné les importants déficits du fleuve Sénégal au cours des dernières années; le caractère exceptionnel de la sécheresse actuelle, qui dure depuis 1968 à l'exception de quelque trois années humides, transparaît dans les écoulements.

Ainsi depuis le début du siècle (1903-04 à 1990-91), le module moyen à Bakel contrôlant toutes les entrées dans la vallée est de 700 m^3/s représentant un écoulement moyen annuel de 22 milliards de m^3. Au cours des dernières années, toujours selon ces auteurs, il faut noter la particularité des étiages soutenus des crues artificielles engendrées par le barrage de Manantali. Compte tenu de ces remarques, les débits moyens mensuels du Sénégal s'établissent comme suit :

- de 1903 à 1991: ensemble des observations (module interannuel Q mi= 700 m^3/s).
- de 1979 à 1991: 12 derniers cycles hydrologiques (Q mi= 320 m^3/s: déficit moyen de 54 %).
- de 1988 à 1991: trois années de crues artificielles (Q mi= 350 m^3/s: déficit moyen de 50 %).

2.1.2 Les fluctuations du plan d'eau de Diama

En fonction des ouvertures des vannes, Pietkutowski (1990) a dressé les hauteurs maximales, moyennes et minimales du plan en amont de Diama (tabl. 14).

1987	Min	-0,22	0,25	6,0	0,357
	Moy	0,36	1,19	6,5	1,712
	Max	0,85			
1988	Min	-0,17	0,39	6,0	0,357
	Moy	0,68	0,99	6,8	5,184
	Max	1,21	1,44	7,0	10,467
1989	Min	0,00	0,37	6,0	0,357
	Moy	0,54	0,85	7,0	3,276
	Max	1,10	1,24	7,0	6,704
1990	Min	-0,35	0,55	1,0	0,360
	Moy	0,35	1,26	6,6	0,974
	Max	0,69	1,42	7,0	2,210

Tabl. 14 : Hauteur d'eau à la station de Diama

Il faut souligner que depuis la mise en eau du barrage, les travaux de construction de la digue rive droite du fleuve Sénégal ont imposé à l'O.M.V.S. de maintenir la retenue de Diama à une cote ne dépassant pas - 0,50 m, entre le début novembre et le 15 mars, et - 0,30 m, entre le 15 mars et le 15 juillet

Pendant la saison des hautes eaux, le niveau de l'eau varie selon les ouvertures de vannes, variable en fonction des besoins pour les usages agricoles, le remplissage des lacs et affluents tributaires du Sénégal.

Une gestion intégrée des eaux dans le delta du fleuve Sénégal a été mise en place : lâchers de soutien d'étiage faits à Manantali, transferts d'eau à partir du lac de Guiers quand les cotes faibles sont atteintes, ouvertures opérées à Diama pour rejeter vers la mer le trop-plein sous l'effet des marées et des vents permettant de régulariser les niveaux de plan d'eau du lac de retenue. Si pendant la saison de hautes eaux le niveau a atteint à Diama en 1988 la cote de 1,44 m, "les prélèvements d'eau dans la retenue de Diama et dans le fleuve peuvent provoquer une importante baisse du plan d'eau, en dessous de la cote de 20 cm, retenue comme seuil minimal" (O.M.V.S. , 1989).

2.1.3 L'évolution des débits journaliers, mensuels et annuels

Ces débits (tabl. 15) sont étroitement liés aux ouvertures des vannes du barrages de Diama. Les débits maximals enregistrés au cours de ces années ont été de 1 537 $m^3.s^{-1}$ le 25 sept. 1986, 1 446 $m^3.s^{-1}$ le 14 sept. 1987, 2 600 $m^3.s^{-1}$ du 8 au 11 octobre 1988 soit le débit le plus élevé au cours de cette période d'enregistrement, 1 377 $m^3.s^{-1}$ le 27 sept. 1989, enfin 1 060 $m^3.s^{-1}$ le 28 juillet 1990. Ces maximums sont relevés le plus souvent pendant la période des écoulements de la saison de hautes eaux (seconde quinzaine du mois de septembre et première quinzaine du mois d'octobre).

Au cours des cinq dernières années d'observations, le module interannuel du Sénégal à son estuaire a été de 261,33 $m^3./s$, soit un écoulement moyen interannuel de 8,24.10 $m^3./s$.

MOIS / ANNEE	JUILL.	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.	MOD. AN
1986	39,80	448,16	1060,40	1145,40	399,60	8,79	260,00
1987	-	147,05	701,51	745,25	398,48	22,90	168,10
1988	2,18	724,09	1946,90	2148,08	190,50	30,80	425,40
1989	216,00	421,80	1239,50	1040,80	326,20	74,60	277,46
1990	311,08	439,21	529,29	586,46	221,79	20,68	177,08

Tabl. 15 : Evolution des débits moyens mensuels (m3/s) à Diama depuis 1986.

2.2. LES APPORTS FLUVIAUX DE MATIÈRES EN SUSPENSION

2.2.1 Le protocole des prélèvements de matières en suspension.

L'élaboration de la méthodologie déterminant le mode, la densité et la fréquence des prélèvements est due à Berthelot (1956), Colombani (1967), Billon (1967) et Nouvelot (1969), et nous l'avons mise en oeuvre à l'instar de Gac (1979).

Le contrôle des flux détritiques d'origine continentale transitant vers l'embouchure du Sénégal a été effectué au cours des années hydrologiques 1989-1990, 1990-1991 et 1991-1992.

Des prélèvements d'un volume suffisant (64 litres) ont été réalisés en sept points du profil transversal du fleuve, c'est à dire au niveau des sept vannes du barrage de Diama. L'objectif étant de ramener à un litre le volume à acheminer vers le laboratoire, nous avons provoqué une décantation accéléré (floculation par addition de 5 cm^3 d'HCl et siphonnage du surnageant au bout de 24 heures). En fin d'opération, le matériel est lavé par centrifugation à l'eau distillée (quatre lavage successifs sur les résidus obtenus) puis séché à l'étuve à 80 °C et pesé.

Ainsi 80 échantillons de matières en suspension ont été recueillis (25 en 1989-1990 et 55 en 1990-1991) pour évaluer les flux particulaires annuels et les principales caractéristiques du transport solide en suspension.

2.2.2 Evolution saisonnière de la turbidité au cours des cycles hydrologiques 1989-90 et 1990-91

Les variations de la turbidité saisonnière des eaux du Sénégal sont très visibles et il est aisé d'en esquisser le schéma général (Kane, 1985).

Pendant la saison des hautes eaux, les eaux du Sénégal sont extrêmement turbides en raison de leur importante charge en limons, leur couleur est alors jaune sale.

Le transport solide est élevé, ce qui se traduit par une diminution importante de la profondeur de disparition du disque de Secchi (entre 13 et 15 cm) et des conductivités faibles. Au cours de cette période, la basse vallée et le delta du Sénégal sont uniformément soumis aux flots de la crue annuelle, l'ensemble de la zone est homogène. Dès lors, s'amorce la décrue, avec la fermeture des vannes du barrage de Diama ; l'éclaircissement des eaux fluviales s'opère, mais dans deux domaines distincts :

- dans l'estuaire du fleuve Sénégal, dont la limite amont est imposée par le barrage anti-sel de Diama, dès la fermeture des vannes de celui-ci, l'intrusion des eaux marines reprend sous l'effet de l'onde de marée. Les eaux douces estuariennes sont progressivement diluées et intégrées aux eaux océaniques et deviennent très rapidement bleu-sombre.
- dans la zone de retenue du barrage de Diama (zone de stockage de l'eau et de la matière), s'opère une lente décantation. C'est le site privilégié de l'empilement des alluvions fluviatiles ; cela s'accompagne d'un éclaircissement progressif des eaux, leur couleur est alors bleu-clair.

Nous avons reporté dans le tableau 16 l'ensemble des mesures sur la charge solide du fleuve Sénégal à la station de Diama-amont.

DATE	C (mg/l)	DATE	C (mg/l)	DATE	C (mg/l)	DATE	C (mg/l)	DATE	C (mg/l)
19 89		19 89		19 90		19 90		19 90	
03/03	13,8	25/09	199,6	19/02	35,9	26/08	249,1	16/11	24,0
03/08	12,3	27/09	163,2	03/03	40,9	28/08	281,7	19/11	20,0
06/08	11,5	29/09	167,3	10/03	32,9	30/08	378,9	30/11	42,9
09/08	22,1	01/10	127,7	07/04	25,7	01/09	244,2		
12/08	6,7	16/10	52,0	13/04	30,5	03/09	251,0		
15/08	8,9	14/11	4,0	21/04	39,6	05/09	360,8		
18/08	5,9	27/11	10,8	08/05	12,7	07/09	306,2		
21/08	543,4	29/11	5,9	15/05	29,3	09/09	289,5		
23/08	488,1	05/12	7,2	18/05	17,7	12/09	271,5		
27/08	568,1	20/12	8,8	30/07	10,2	14/09	124,3		
01/09	740,6	27/12	12,3	01/08	5,7	17/09	91,9		
03/09	738,8			05/08	6,9	21/09	137,3		
06/09	521,4	19 90		09/08	19,3	23/09	162,6		
07/09	434,3	03/01	36,8	12/08	366,7	25/09	79,2		
09/09	413,9	10/01	17,7	14/08	331,5	26/09	111,2		
11/09	347,9	18/01	34,4	16/08	332,4	02/10	76,7		
13/09	323,8	26/01	13,5	18/08	245,6	04/10	75,7		
15/09	263,2	02/02	39,5	20/08	175,3	17/10	18,1		
20/09	257,0	07/02	34,3	22/08	245,0	23/10	36,8		
23/09	212,8	14/02	40,9	24/08	282,5	06/11	19,7		

Tabl. 16 : Concentration des flux de matières en suspension à la station de Diama-amont.

Les plus fortes concentrations journalières observées au cours des deux cycles successifs de la crue artificielle ont été de 740,6 mg/l (01-09-89) et de 378,9 mg/l (30-08-90). Ces valeurs sont élevées et comparables à celles enregistrées à Saint-Louis: 686,4 mg/l (15-08-81) et 415,8 mg/l 20-08-82). Les turbidités maximales précèdent toujours la pointe de crue (fig. 6).

Il s'avère également qu'un écoulement fluvial d'estuaire contrôlé entraîne des débordements moins importants et provoque de ce fait des sapements latéraux internes dans le chenal ; l'incidence majeur dans le cas du fleuve Sénégal est un décalage des dates d'occurrence des plus fortes concentrations qui s'établissent en fin août-début septembre.

D'une manière générale, l'évolution générale connue antérieurement est respectée : (fig. 6).

- les variations journalières des concentrations des matières en suspension sont très importantes pendant la saison des hautes eaux et extrêmement faibles pendant la saison sèche;
- l'évolution saisonnière montre une augmentation rapide des matières en suspension avec l'arrivée des eaux de la crue annuelle ; selon Gac (1990) " les variations de la charge solide sont importantes et rapides : elles dépendent de la force érosive des averses, de la reprise des laisses de crue, et donc de l'état du bassin à la suite de la saison des pluies précédente";

- les concentrations restent relativement élevées (près de 200 mg/l) jusqu'en fin septembre-début octobre;

- dès le mois d'octobre, les charges solides diminuent très rapidement (c'est l'amorce de la décrue). Avec l'achèvement de la saison des pluies, le développement de la végétation et la dégradation des sols sont moindres et les eaux n'assurent plus que l'évacuation des fines particules déjà libérées. Les eaux deviennent limpides; même avec la restitution progressive au fleuve des eaux d'inondation du lit majeur, des eaux d'infiltration et de la vidange des nappes, les concentrations de matières en suspension diminuent fréquemment en dessous de 20 mg/l. Des lâchers d'eau depuis Manantali peuvent néanmoins augmenter les concentrations pendant la saison sèche.

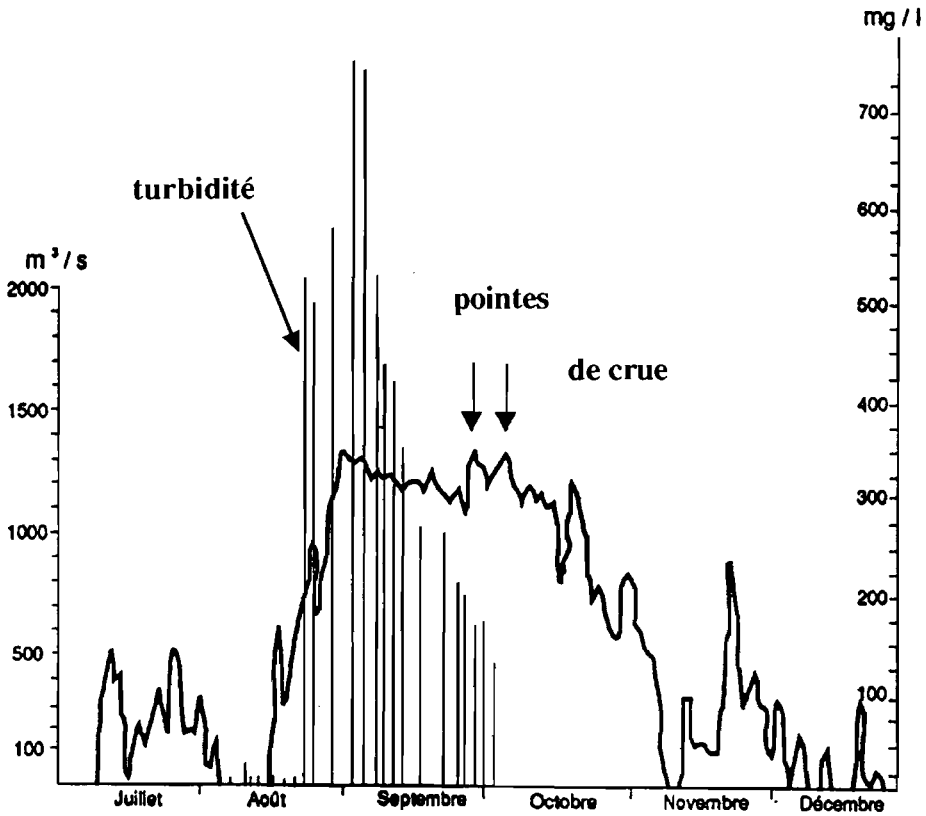


Fig. 6 : Variations des concentrations moyennes journalières des matières en suspension avec les débits à Diama en 1989

Ainsi on a tendance de distinguer trois phases (Michel, 1973, Gac et Kane, 1986a et b) dans l'acquisition de la charge solide :

- une période d'érosion précoce se traduisant par une augmentation rapide de la turbidité et du débit;

- une phase d'érosion tardive, de moindre ampleur, ou la charge en suspension diminue dans le cours d'eau alors que les débits s'accroissent. C'est la fin de l'érosion des versants, surtout du sapement latéral des berges et du creusement du lit mineur de la rivière. La charge solide initiale est fortement diluée par une importante augmentation de la lame d'eau écoulée;

- enfin une période d'alluvionnement, qui se traduit par une diminution simultanée de la turbidité et des écoulements, c'est la phase de sédimentation des alluvions dans le lit mineur.

2.2.3 Les flux mensuels et annuels de matières en suspension

Les flux détritiques particulaires d'origine continentale à la station de Diama ont été calculés à partir des bilans journaliers lorsque les mesures de turbidité se faisaient quotidiennement (en général pendant les mois d'août et de septembre, correspondant au maximum de concentration) ou des bilans bi-hebdomadaires ou hebdomadaires lorsque les contrôles de la charge solide étaient réalisés à intervalles plus espacés (en général dès l'amorce de la décrue). La masse de sédiment est obtenue de manière classique par la formule :

$$M = Cs \times V \times 86400$$

avec Cs = charge solide en mg. l^{-1} ou g. m^{-3} et V = volume moyen journalier en m^3 par seconde.

Les particules solides du Sénégal restent en suspension sous l'influence de la turbulence et se déplacent à une vitesse sensiblement égale à celle de l'eau qui le transporte. Mandin (1957) avait déjà souligné lors des mesures effectuées à Bakel et Dagana, que la turbidité ne présentait aucune tendance systématique d'augmentation ou de diminution en fonction de la profondeur, phénomène caractéristique d'un transport de particules fines.

Les tableaux 17 et 18 indiquent l'importance mensuelle et annuelle des flux de matières en suspension transitant par les vannes du barrages de Diama au cours des cycles hydrologiques 1989-1990 et 1990-1991.

MOIS	CONCENTRATION mg/l	VOLUME ECOULE en millions de m3	MASSE en tonnes
Juillet		570,9	
Août	505,6	1129,7	571190
Septembre	349,7	3207,7	1122000
Octobre	72,9	2787,6	203480
Novembre	12,4	846,9	10566
Décembre	7,4	199,8	148054
Cycle hydrologique	moyenne = 189,6	Total = 8742,9	Total = 2 055 290

Tabl. 17 : Bilan des flux de matières en suspension à la station de Diama 1989-1990.

MOIS	CONCENTRATION mg/l	VOLUME ECOULE en millions de m3	MASSE en tonnes
Juillet	10,1	833,1	8 418
Août	219,4	1176,4	258 130
Septembre	234,8	1371,9	322 100
Octobre	44,1	1570,7	69 337
Novembre	24,0	574,8	13 780
Décembre	42,9	55,3	2 376
Cycle hydrologique	moyenne = 95,9	Total = 5582,6	S = 674 142

Tabl. 18 : Bilan des flux de matières en suspension à la station de Diama 1990-1991.

Les deux cycles hydrologiques donnent des résultats tout à fait différents avec des apports respectifs dans l'estuaire de 1 900 000 t en 1989-1990 et de 675 000 t en 1990-1991. L'afflux de matières en suspension a été trois fois plus important en 1989-1990 qu'en 1990-1991, alors que les volumes écoulés ne varient guère dans cette proportion ($8,7.10^9$ m^3 en 1989-1990 pour $5,6.10^9$ m^3 en 1990-1991). Ces chiffres sont à rapprocher de ceux obtenus à la station de Saint-Louis en régime naturel avec des apports respectifs à l'océan de 2 850 000 t en 1981-1982 et de seulement 1 185 000 t en 1982-1983 ce qui fait ressortir la faiblesse du transit sédimentaire à Diama en 1990-1991. Cependant, toute tentative de comparaison de résultats en régime naturel et en situation de crue artificielle s'avère difficile et paraît prématurée. Quel est le rôle du réservoir de Manantali dans le piégeage des sédiments ? Le système hydraulique mis en place en remplacement du fonctionnement hydrologique naturel a-t-il des répercussions sur l'érosion latérale et l'érosion des berges ? Les matières en suspension du fleuve Sénégal proviendraient-elles uniquement de l'affluent non barré qu'est la Falémé ? Autant de questions qui n'ont pas encore de réponses précises.

D'une manière générale, les deux cycles hydrologiques montrent qu'à l'échelle mensuelle, les mois d'août, de septembre et d'octobre rassemblent la quasi-totalité (95 %) de la charge solide . Il faut souligner la diminution drastique du tonnage à partir du mois de novembre (environ 2 % et même moins) et les pourcentages insignifiants du mois de décembre (moins de 1 %). Près de la moitié des flux détritiques annuels sont exportés au cours du mois de septembre (58,77 % en 1989-1990 et 47,78% en 1990-1991). En définitive, le transport solide du fleuve Sénégal, en dépit de sa variabilité interannuelle, reste relativement faible au cours de ces deux cycles hydrologiques.

CHAPITRE III

CONSEQUENCES SUR LA MISE EN VALEUR

Ndiacé DIOP
Michel MIETTON
Joël HUMBERT

1. RÉPERCUSSIONS SUR LES AMÉNAGEMENTS HYDRAULIQUES DU DELTA

Le delta du fleuve Sénégal n'est pas une région d'irrigation naturelle mais, depuis 1966, la riziculture irriguée y est entrée dans une phase active. C'ette entreprise marque aujourd'hui une phase d'essoufflement, même si l'édification récente des barrages (Diama et Manantali) s'inscrit dans une perspective d'accroissement des superficies agricoles.

La morphodynamique et l'évolution concomitante des sols compromettent gravement la rentabilité des arrosages et conditionnent quelque peu le bilan économique de l'irrigation. La dynamique des milieux physiques davantage artificialisés se traduit dans les aménagements hydro-agricoles par une intense activité éolienne, une sédimentation accrue et une salinisation croissante dans le delta en aval de Diama.

Des vents violents transforment souvent le delta en une vaste aire de déflation qui ressemble par endroit (secteurs dénudés) à des paysages sahariens couverts d'épais nuages de poussière. L'effet est renforcé par l'absence de brise-vents et l'existence dans le secteur de Ross-Béthio de semblants de couloirs de circulation : cela accroît la force de mobilisation du vent. Dans ces couloirs, la vitesse du vent dépasse fréquemment 4 m/s.

Dans les périmètres irrigués, la conséquence de la déflation éolienne s'exerce dans le sens d'un ensevelissement des canaux d'irrigation et de drainage comme nous l'avons remarqué à Déli et Boundoum. Dans l'exploitation de tomates à Savoigne (SOCAS), nous avons rencontré un canal de 6 m en gueule et 3 m à la base couvert chaque année et nécessitant un curage, surtout après les périodes d'ensablement maximal de février-mars. Le matériel éolien mobilisé se dépose dans les chenaux des marigots et dans les parcelles en instance d'exploitation dans les cuvettes endiguées dénudées des P.I.V. (périmètre irrigués villageois) où le sel flocule les dépôts argileux.

La salinisation est aussi une autre manifestation de la morphodynamique et ses conséquences semblent encore plus néfastes pour la riziculture. Il faut rappeler que le sel est presque partout présent dans le delta en rapport avec la remontée du biseau salé de l'embouchure vers l'amont lors des étiages du fleuve Sénégal. Le sel, progressivement déposé, se présente sous forme de concentrations souterraines qui remontent en surface à l'occasion, la nappe phréatique étant dans le delta à environ 1 m de profondeur. On rencontre parfois des concentrations superficielles compactes qui, vues de loin, ressemblent à des miroirs; ces concentrations se trouvent dans les déversoirs ou exutoires naturels des eaux de drainage des casiers irrigués. La salinisation est entretenue par le développement anarchique des P.I.V., ceux-ci se déplacent au bout de quatre ans maximum lorsque la sursalinisation atteint le seuil critique : perte de 50 % des récoltes de riz.

Progressivement, dans les cuvettes du Boundoum, les pertes annuelles en superficie dues en partie au développement des P.I.V. représentent un tiers du total irrigable ; en effet les petits périmètres irrigués villageois n'ont pas de station d'exhaure pour rabattre les eaux usées dans les dépressions naturelles. La mise en valeur de l'axe Gorom-Lampsar est davantage fragilisée par l'irrigation intermittente des P.I.V. qui favorise la concentration des sels en surface. Sur les parcelles et surtout dans les canaux s'opère une sédimentation, certes lente, due à l'utilisation d'eau d'irrigation des marigots chargée de matière en suspension.

L'effet combiné des trois phénomènes ci-dessus évoqués nécessite des solutions urgentes qui relèvent à la fois de la responsabilité de la S.A.E.D. et des irrigants. Ainsi il a été préconisé de reboiser pour réduire les surfaces d'emprise et protéger les casiers de l'action éolienne ; mais cette solution selon les irrigants présente l'inconvénient d'attirer les oiseaux autour des périmètres irrigués. Il a été finalement conseillé dans l'immédiat d'agrandir les canaux d'irrigation et de drainage et d'effectuer un curage régulier en attendant l'installation de brise-vents.

Quant à la salure, il faut procéder à un lessivage qui refoule en profondeur les sels grâce au planage et au maintien constant d'une lame d'eau en surface. La C.S.S. (Compagnie Sucrière Sénégalaise) utilise aussi ce procédé de dessalement en maintenant pendant deux ans une importante lame d'eau sur les parcelles. Les mesures faites sur les eaux de drainage des périmètres de Boundoum attestent une forte conductivité, preuve de l'efficacité du lessivage.

Il nous semble toutefois que la bataille contre le sel ne sera gagnée que lorsque l'installation anarchique des P.I.V. sera maîtrisée et le drainage de tous les aménagements assuré. C'est pourquoi, dans les Plans Directeurs de la Rive Gauche (P.D.R.G.), il est envisagé la création d'un grand émissaire du delta. Celui-ci reprendra le Djeuss amont et rejettera les eaux du delta en aval du barrage de Diama. Pourtant cette perspective de drainage par le Khant et le Ndiael fait l'objet de réserves de la part de la Direction des Eaux et Forêts de Saint-Louis qui estime que les eaux surchargées de sel et de pesticides déversées dans le Djoudj et le Ndiael détruisent la faune du parc; elle invite de ce fait les aménageurs à penser à un développement intégré.

Toute ces mesures, auxquelles s'ajoutent celles relatives à la maintenance de l'axe Gorom-Lampsar, s'inscrivent dans une perspective de maîtrise durable de la morphodynamique à l'heure où se pose le problème de la nécessaire réhabilitation et du transfert des périmètres aux paysans. La réhabilitation peut être qualifiée d'opération de récupération de superficies abandonnées à la suite d'un défaut de maintenance ou de conception : déflation éolienne, salinisation, sédimentation, ensablement, enherbement en sont les principales causes. L'opération consiste en un replanage total, une refonte du système de drainage, un nouveau découpage parcellaire et éventuellement une extension.

Les coûts en sont évidemment très élevés, surtout quand il s'agit d'une réhabilitation lourde. Ceux-ci vont, selon la S.A.E.D., de 50 % à 100 % du coût initial de l'aménagement. Pour 1990-1993, la S.A.E.D. a établi le programme présenté dans le tableau 19.

Réhabilitation effective 1990	Horizon 90-93		coût du programme
THIAGAR : 1250 ha	DAGANA A et B	1775 ha	
	BOUNDOUM	1600 ha	12.525 milliards de F CFA
	LAMPSAR	1800 ha	
	GDE DIGUE	800 ha	soit
	TELEL	600 ha	
KASSACK/KASSACK sud : 400 ha	DEBI	750 ha	250.5 millions de FF
TOTAUX		7325 ha	

Tabl. 19 : Programme de réhabilitation des périmètres.

A terme, le programme de réhabilitation dont l'achèvement est prévu pour l'an 2000 consacrera le désengagement total de la S.A.E.D., car la réhabilitation s'accompagne d'un transfert aux paysans. Déjà, en septembre 1991, les périmètres suivants ont été réhabilités et transférés : Boundoum 870 ha, Kassack sud 240 ha, Pont-gendarme 200 ha, Thilène 117 ha.

En définitive, il est à craindre qu'une fois le processus du transfert achevé, la morphodynamique soit plus nocive face à des irrigants mal armés.

La maîtrise des effets négatifs de la morphodynamique sur les aménagements hydro-agricoles est d'autant plus nécessaire que les futurs coûts de réhabilitation, dont les associations paysannes auront la charge, seront de portée élevée : les 1600 ha de Boundoum ont coûté la somme de 2 982 974 540 F CFA, il en coûtera pour 1775 ha à Dagana : 3 107 663 918 F CFA (soit respectivement 59 659 490 FF et 62 153 278 FF).

2. PROJET DE REMISE EN EAU DU NDIAEL ET SES IMPACTS POSSIBLES

2.1. PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE

La construction des deux barrages de Diama et de Manantali a ouvert la voie à une mise en valeur, sous une forme nouvelle, de la basse vallée du Sénégal. Le projet de remise en eau de la grande cuvette du Ndiael, à proximité de Ross-Béthio (fig. 7), constitue un maillon dans une chaîne d'opérations rendues possibles par ces ouvrages, permettant une régularisation du débit du fleuve à un niveau jamais inférieur à 150 m^3./s.

Situé entre 16°10' et 16°18' de latitude nord, 16° et 16°07' de longitude ouest, le Ndiael fait partie des marges du delta du fleuve Sénégal, c'est-à-dire des régions autrefois envahies par les eaux de crue mais en dehors de la zone de modelé proprement deltaïque. Il s'agit d'une ample cuvette, d'orientation nord-est - sud-ouest, située entre la bordure des terrains du Quaternaire ancien et moyen au sud-est et un massif de dunes rouges ogoliennes au nord-ouest (Ross-Béthio).

Le Ndiael est ainsi une unité géomorphologique nettement inscrite dans le paysage, de dimensions pluri-kilométriques : 15 kilomètres au moins dans le grand axe, 9 kilomètres environ sur la largeur, et particulièrement perceptible au nord-ouest, où le contraste est net au contact des dunes du *diéri*. D'un point de vue morphogénique, il s'agit d'une cuvette complexe dont le creusement jusqu'à une cote très basse (-1,15 m d'altitude absolue) est lié à une dynamique d'écoulement mais aussi de déflation éolienne et dont les caractéristiques, notamment pédologiques, en font un domaine pouvant être défini comme une sebkha et (ou) une cuvette de décantation.

Une autre particularité de cette dépression, d'ordre hydrologique, correspond à l'existence d'un écoulement alterné, enregistré jusqu'aux premiers aménagements hydrauliques, durant les années 50. En effet, jusqu'à cette date, le Ndiael se remplissait saisonnièrement par l'amont, principalement par le chenal du Nieti Yone déversant à partir du lac de Guiers ; l'eau était alors évacuée par les Trois Marigots au sud-ouest. Mais le remplissage pouvait aussi se faire par l'aval et le marigot de Menguèye, suivant les modalités de la crue.

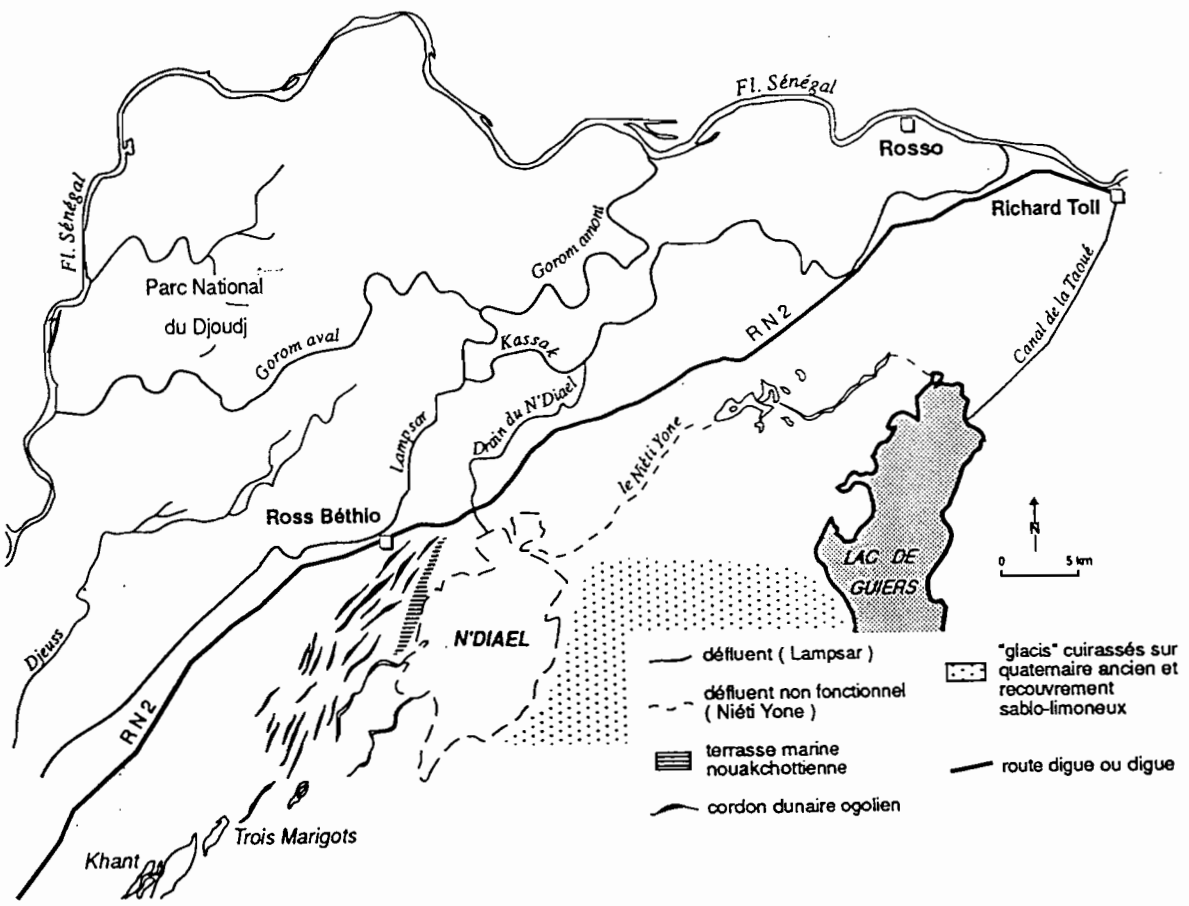


Fig. 7 : Le Ndiael et son environnement hydro-morphologique

On peut ainsi constater que la situation d'ennoiement, au moins saisonnier, du Ndiael a déjà été connue et cela permet de penser a priori que les modalités hydrauliques d'une amenée d'eau ne devraient pas être d'une difficulté extrême. Différences notables toutefois aujourd'hui : le remplissage pourrait être permanent et serait assuré par une eau qui est *douce* depuis la construction du barrage anti-sel de Diama. Surtout, cette remise en eau s'opérerait dans un contexte socio-économique très différent de celui connu il y a une quarantaine d'années.

Les principales questions abordées tout au long d'une étude d'impact précédente (Mietton et Humbert , 1991) sont de deux ordres.

Les différents scénarios d'amenée, de stockage et de gestion de l'eau recouvrent un domaine essentiellement - mais pas exclusivement - technique. Leur examen a nécessité l'établissement d'une carte topographique détaillée (échelle au 1/20 000, courbes isohypses de 50 cm, altitudes absolues), préalable à tous les calculs de bilan hydrologique.

L'analyse prédictive des impacts socio-économiques mais aussi écologiques et sanitaires - analyse réalisée en donnant la parole aux différents partenaires du projet, y compris les populations locales - a permis d'aborder la question de fond qui est celle des objectifs visés à travers une telle réalisation, avec leurs intérêts et leurs limites, en fonction de l'échelle à laquelle on se place : nationale, voire internationale, régionale ou locale.

Pareil aménagement pourrait, en effet, avoir des conséquences en chaîne et toutes les interrelations entre des paramètres a priori indépendants doivent être envisagées dans l'instant mais aussi dans leur devenir. Ces interrelations étroites et complexes sont soulignées ci-dessous en associant aussi souvent qu'il est nécessaire les différentes données techniques et socio-économiques de l'aménagement plutôt que de les présenter séparément.

2.2. PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS

Premier constat majeur : la remise en eau du Ndiael est réalisable techniquement. Du moins est-elle envisageable dans un scénario d'ennoiement limité à la sebkha proprement dite, s'étendant sur une centaine de km^2 (96 km^2 pour une cote du plan d'eau à +1 m). Cela nécessite d'importer un volume certes variable, suivant les scénarios de gestion et la cote maximale retenue, mais compris entre 100 et 200 millions de m^3. environ. A titre d'exemple, dans le cas d'une mise en eau permanente, l'apport global est de 202 milions de m^3. (extrême de juillet : 40,8 millions de m^3. pour une cote maximale de + 0,92 m ; fig. 7). L'échelonnement des apports est calculé aussi en prenant en compte une gratuité de l'eau limitée à la seule période de mi-août à mi-octobre.

La création de ce plan d'eau suppose d'autre part que la cuvette du Ndiael soit "fermée": principalement au sud pour éviter les fuites vers les Trois Marigots mais aussi au nord pour la couper du drain du Ndiael, qui sert de débouché aux eaux usées des périmètres de Kassak et de Grande Digue. En fait, un ouvrage hydraulique au sud-ouest est nécessaire pour assurer une vidange occasionnelle, en cas de salinisation. La revanche entre la crête des digues et les plus hautes eaux doit être d'au moins un mètre, compte-tenu du batillage. Il faut envisager de véritables digues à matériaux compactés, qui tiendront lieu en même temps de pistes, contournant au plus près le plan d'eau. Ainsi d'une réalisation purement technique fera-t-on un atout en terme socio-économique. L'obstacle physique que représente le lac dans le réseau des voies de communications habituelles sera immédiatement levé.

L'eau disponible est celle retenue par le barrage de Diama, qui fonctionne dès maintenant à la cote +1,50 m, déversée dans le lac de Guiers puis pour partie vers le Ndiael, par le chenal naturel du Nieti Yone. Toutefois, la dynamique d'écoulement de cet ancien défluent ne s'apparentera pas à celle des crues d'autrefois, ni par les volumes mis en jeu, ni par leurs vitesses d'écoulement, en particulier à cause de l'endiguement du lac de Guiers. Le fonctionnement hydraulique de ce canal nécessitera d'importants travaux d'aménagement limitant les pertes au maximum sur les 30 kilomètres de son parcours. Par ailleurs, le canal doit être désobstrué des différents bouchons sableux poussés par le vent lors de la période de sécheresse récente. Ce constat a, en l'occurrence, valeur d'avertissement : au budget d'aménagement initial couvrant les frais de terrassement et de génie civil, il est impératif d'associer un budget d'entretien permettant d'assurer un nettoyage régulier du canal lui-même et aussi le boisement de ses rives (en particulier la rive nord !). Aux avantages hydraulique et financier liés à un meilleur écoulement s'ajoute d'ailleurs un intérêt sanitaire au moins aussi important. Les bénéficiaires les plus immédiats seront les cultivateurs de la Communauté Rurale de Rosso, qui ne manqueront pas de prélever de l'eau dans le tronçon le plus à l'est du Nieti Yone.

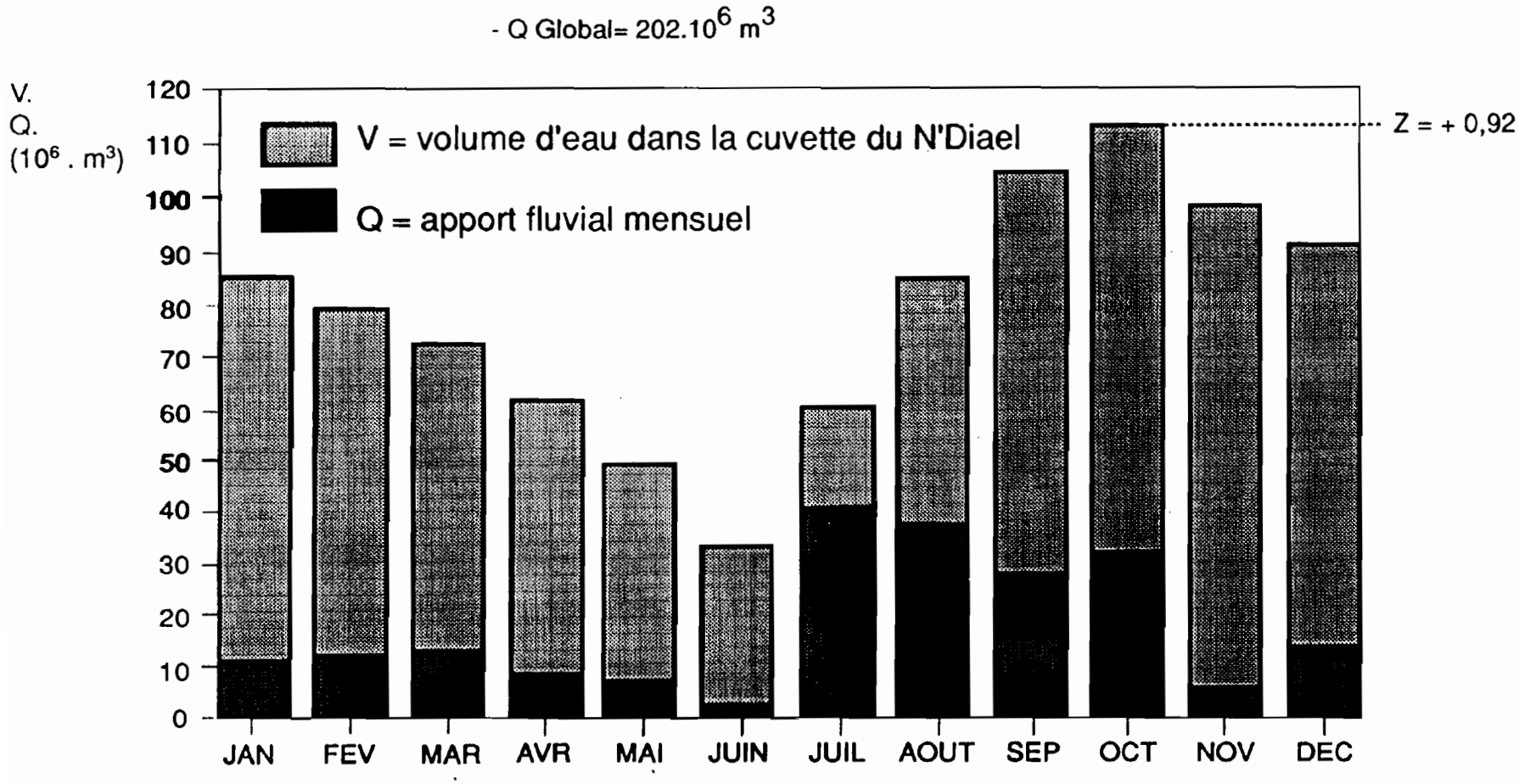


Fig. 8 : Variations mensuelles du volume d'eau dans la cuvette (V) et de l'apport fluvial (Q) dans le cas d'un ennoiement permanent (scénario hydrologique n°2) et pour une cote maximale en octobre de +0,92 m

Le coût de cette opération sera élevé. Inscrite dans la programmation des aménagements dits structurants du Plan Directeur de la Rive Gauche (P.R.D.G.) pour la phase 1994 - 2000, elle est évaluée à 1 100 millions de F. CFA (22 millions de Francs). Ce montant représente plus de 55 % des dépenses programmées dans le département de Dagana, plus de 35 % des dépenses sur l'ensemble de la rive gauche sénégalaise pour cette période, ou encore 7 % du coût total des aménagements pour l'ensemble de la planification (1990-2015)... Reprenant notre étude mais la complétant en termes financiers, la Direction du Génie Rural et de l'Hydraulique à Dakar a établi en 1992 un devis estimatif du coût des travaux. Ce dernier s'élève encore, suivant les options, à un montant compris entre 740 et 875 millions de F. CFA (D.G.R.H.-S., 1992).

En raison de ces coûts et aussi pour assurer une cohérence du projet dans le long terme, cette remise en eau du Ndiael ne peut pas s'inscrire en dehors d'un schéma de gestion hydraulique régional, à l'échelle du delta, et même national. L'eau est certes disponible aujourd'hui mais les besoins iront croissants (alimentation de la ville de Dakar, irrigation). L'assurance d'une alimentation durable doit être acquise auprès de l'O.M.V.S., matérialisée par la signature de contrats entre l'office et un Conseil de gestion et de suivi du Ndiael, dont la création rapide est une nécessité.

D'autre part, le choix du tracé d'adduction doit prendre en compte non seulement les solutions techniques actuelles mais aussi celles qui pourraient naître d'autres travaux programmés dans le P.D.R.G. En clair, l'amenée par le Nieti Yone, qui est la seule possible en l'état, ne se justifie que si la remise en eau doit être réalisée très rapidement. Si l'on accepte les délais qui sont d'ailleurs ceux affichés dans le P.D.R.G., l'amélioration de l'alimentation sur l'axe Gorom aval-Lampsar (prévue pour la phase 1990-1993), voire sur le Gorom-amont (phase 1994-2000), devrait permettre de reconsidérer l'hypothèse d'une amenée par les chenaux beaucoup plus courts du nord (Bombol ou Ndiael). Cette solution serait moins coûteuse et les bénéfices consécutifs pourraient être avantageusement utilisés ailleurs, comme nous le verrons.

Autre constat essentiel : cette remise en eau du Ndiael est vivement souhaitée par la population environnante. Mais la difficulté réside dans la définition des objectifs attachés à cet aménagement. Les bénéfices attendus par les différents partenaires ne sont pas identiques. Ils n'ont pas forcément le même caractère d'urgence et surtout ne s'inscrivent pas dans une même perspective territoriale. Il peut y avoir des oppositions :

- dans la population locale elle-même, entre groupes socio-professionnels en concurrence pour une utilisation directe de l'eau (pasteurs, agriculteurs, pêcheurs);
- entre la population et les administrations nationales des Parcs et des Eaux et Forêts (auxquelles on associe les chasseurs et les touristes), qui tirent un profit indirect du plan d'eau, y compris à grande distance ;
- entre ces défenseurs de la nature et des aménageurs pour qui le Ndiael n'est qu'un élément parmi d'autres dans un schéma d'aménagement régional.

La problématique n'est pas nouvelle.

Dans le cas présent, nous avons acquis la conviction qu'on ne doit renoncer à aucun des deux objectifs de préservation de la nature et de développement économique et qu'en conséquence un compromis est nécessaire, sous la forme d'un partage de l'espace. C'est au demeurant cette perspective qui est avancée par des membres du Conseil Rural, en janvier 1991. Deux d'entre eux précisent que "la mise en eau de cuvettes adjacentes au nord-est du Ndiael peut se faire sans problème" et qu'"il y a des cultures (maraîchères) qui ne sont pas exposées aux dégâts des oiseaux".

Ce partage de l'espace, qui suppose une redéfinition du foncier et de la réserve du Ndiael, ne doit pas être entendu comme un cloisonnement. Des zones-tampons pourraient se placer entre chaque secteur à vocation spécifique ainsi qu'à leur périphérie. Cette division ne serait pas non plus fixée de manière définitive dans le temps mais serait susceptible d'être révisée par le Conseil de gestion et de suivi, en fonction des enseignements des premières années. Ce "temps d'apprentissage" correspondrait à une gestion hydrologique transitoire, suivant le scénario n°1 avec asséchement temporaire. Ce choix permettrait d'appréhender de manière plus progressive les risques sanitaires et éviterait aussi un afflux de population trop brutal. Il pourrait être également revu à la lumière d'un ennoiement des trois Marigots, dont une variante du P.D.R.G. prévoit l'alimentation par le canal du Bas-Lampsar (phase 1994-2000 ; coût : 900 millions de F. CFA).

En arrière d'un plan d'eau dont le périmètre aura une longueur maximale d'une trentaine de kilomètres, l'aménagement -aussi intégré que possible- pourrait s'articuler ainsi :

- l'extrême nord du Ndiael, formant une sorte d'appendice éloigné de la sebkha mais à proximité immédiate de la route RN 2, serait attribué aux agriculteurs. Il s'agit là de terres irrigables, particulièrement bien placées aussi par rapport à un canal d'amenée par le nord ou même par rapport à une courte dérivation du Nieti Yone, facile à envisager. Mille à trois mille hectares seraient consacrés à la riziculture, au maïs ou aux cultures maraîchères. Cette zone tournerait d'autant plus le dos au Ndiael proprement dit qu'elle en serait coupée par un rideau forestier faisant écran face aux vents dominants de nord-est.

- le secteur nord-est situé au sud du Nieti Yone serait réservé aux pasteurs, qui auraient accès au plan d'eau sur un "front" de 5 kilomètres au moins. L'intérêt serait d'être ici en contact avec les terres de l'intérieur, en direction du lac de Guiers, dans une zone où des éleveurs sont déjà présents. Mais ce secteur serait aussi facilement accessible pour les pasteurs sédentarisés plus proches de Ross Béthio, à condition que la "piste-digue" soit réalisée, de même que le pont à l'extrémité du Nieti Yone. Ces Peuls habitant sur les terres peu productives du cordon dunaire pourraient être ici les initiateurs des cultures fourragères, avec l'aide d'un conseiller pour l'élevage et l'environnement.
- l'essentiel de la rive est, sur 10 kilomètres de longueur, constituerait le coeur de la réserve, dans une zone éloignée de tout habitat (hormis le village de Diorno) et sur des sols peu ou pas cultivables du fait de l'existence d'une cuirasse ferrugineuse sub-affleurante. Tout au plus, une activité de sylviculture pourrait-elle être envisagée dans une zone-tampon périphérique ; mais cette rive du lac, où la végétation s'est le mieux maintenue aujourd'hui, serait une aire de repos pour les oiseaux. Ce domaine se prolongerait en rive sud, dans un secteur davantage fréquenté toutefois le long de la "piste-digue" contournant le lac par le sud.
- enfin, la rive ouest au pied des dunes pourrait être vouée elle aussi à des cultures maraîchères et fruitières, profitant de la proximité de Ross Béthio, ou encore à des cultures vivrières, tel le niébé riche en protéines. La dune elle-même ferait l'objet d'un boisement plus dense, n'empiétant pas sur l'espace cultivable, jouant un rôle de brise-vents par rapport aux directions de nord-ouest et fixant un sol par endroits dangereusement raviné.

Les avantages de ce plan, tracé ici dans ses grandes lignes mais qu'il est évidemment possible de préciser en accord avec tous les partenaires, tiennent au fait qu'il tire parti des oppositions ou des nuances révélées à l'examen du cadre géographique, aussi bien dans ses caractéristiques morphopédologiques qu'humaines.

Ce plan n'exclut personne. Dans le même temps, il sépare au maximum les activités les plus difficilement conciliables. Ainsi, le domaine cultural et la réserve sont-ils diamétralement opposés dans la cuvette; le premier étant tout proche des voies de communication tandis que la seconde est beaucoup plus difficilement accessible. Une large place est faite aux pasteurs, qui peuvent accéder au plan d'eau sans avoir à traverser un seul champ du *walo* . Les pêcheurs développeront leur activité à partir du moment où l'ennoiement sera permanent. La réussite de ce projet tiendra beaucoup aux mesures d'accompagnement. Celles-ci paraissent secondaires ou sont parfois oubliées à la fin de grands aménagements. Elles sont en fait déterminantes dans la vie quotidienne et entraînent l'approbation ou non des populations. On a déjà cité la construction des pistes sur les digues. Le forage de quelques puits dans les villages du sud de la cuvette (Tiddem, Diorno) et aussi dans le*diéri* , plus proche de Ross-Béthio, permettra de limiter les prélèvements dans la cuvette ainsi que les risques sanitaires liés à la consommation d'une eau beaucoup trop tentante pour des populations qui en sont cruellement privées.

Le suivi de la qualité des eaux du lac doit être une des préoccupations du Conseil du Ndiael. Si, comme on l'a préconisé, la cuvette est coupée du débouché du drain du Ndiael au nord et si, d'autre part, les cultures faisant appel aux pesticides, herbicides et engrais sont limitées aux cuvettes proches de la RN 2, les risques sont minimes. Malheureusement, les perspectives du P.D.R.G. sont pour l'heure très différentes et préoccupantes. En effet, le Ndiael est non seulement inscrit dans un schéma d'adduction (par le Nieti Yone, on l'a vu) mais aussi dans le plan de drainage du delta. Ainsi, cette cuvette est-elle tout à la fois considérée comme un exutoire des eaux de drainage et comme une réserve, où l'eau douce importée aurait un total pouvoir de dilution ! Ainsi peut-on lire (G.E.R.S.A.R. *et al*, 1990) : "Les décharges vers les dépressions restent admissibles s'il se confirme que la qualité des rejets le permet. Cela concerne essentiellement les trois dépressions de Krankaye, de Noar et de Pardiagne ; l'intégration du projet du Nieti Yone devant permettre de régler le problème de la dépression du Ndiael.". Cette solution, dont on mesure le caractère incertain, n'est évidemment pas satisfaisante. Nous ne pouvons y souscrire même si l'on comprend les contraintes hydrauliques et financières liées à l'aménagement d'un canal-émissaire se confondant avec le Djeuss.

C'est ici l'occasion de reconsidérer une dernière fois les différents scénarios d'amenée. En effet, s'il s'avérait possible hydrauliquement d'abandonner le projet du Nieti Yone au profit d'un des chenaux du nord, de substantielles économies seraient probablement faites, qui pourraient être reportées dans le financement du dimensionnement du Djeuss.

La gestion multiforme du Ndiael et la confrontation entre différentes priorités exigera, par delà l'examen de nos propositions, une grande volonté de dialogue entre les différentes parties prenantes. Un Conseil de gestion et de suivi du Ndiael, regroupant un (ou deux) représentants des Parcs nationaux, des Eaux et Forêts, des chasseurs, des éleveurs, des agriculteurs, du Conseil Rural, plus éventuellement le Sous-Préfet, devrait être au centre de ces débats.

Sa création est d'autant plus nécessaire qu'il sera en charge de plusieurs missions :

- examen critique des projets P.D.R.G. d'adduction et de drainage dans le Ndiael
- négociation des contrats avec l'O.M.V.S.
- définition détaillée de l'aménagement intégré
- choix des scénarios hydrologiques.

Le Ndiael doit pouvoir redevenir une aire de repos pour les oiseaux, complémentaire de celle du Djoudj. Son utilisation dans le même temps par toutes les catégories sociales, avec une priorité donnée aux pasteurs, paraît être une des clés du développement local. Grâce à un heureux partage de l'espace, la protection de la nature et le développement économique sont ici compatibles. Il ne faut pas que les projets d'exhaure, élaborés apparemment loin des préoccupations socio-économiques des riverains du Ndiael et en tenant peu compte de ses potentialités, interdisent à jamais ces perspectives favorables.

DEUXIEME PARTIE

EVOLUTION HYDROLOGIQUE, MORPHO-SÉDIMENTAIRE ET ÉCOLOGIQUE DU BIEF ESTUARIEN EN AVAL DE DIAMA

INTRODUCTION

L'objectif de la deuxième partie de cet ouvrage est une étude des changements observés dans le bief estuarien en aval du barrage de Diama.

La mise en activité de cet ouvrage et, plus tardivement, de la retenue de Manantali, a déterminé un nouvel équilibre des caractères hydrodynamiques, hydrologiques, morphologiques et sédimentologiques du bief aval. Cette description, réalisée en différentes stations au cours de la période 1988-91, a fait l'objet d'une attention plus spécifique en 1991 avec la mesure des courants et des paramètres physico-chimiques des masses d'eau.

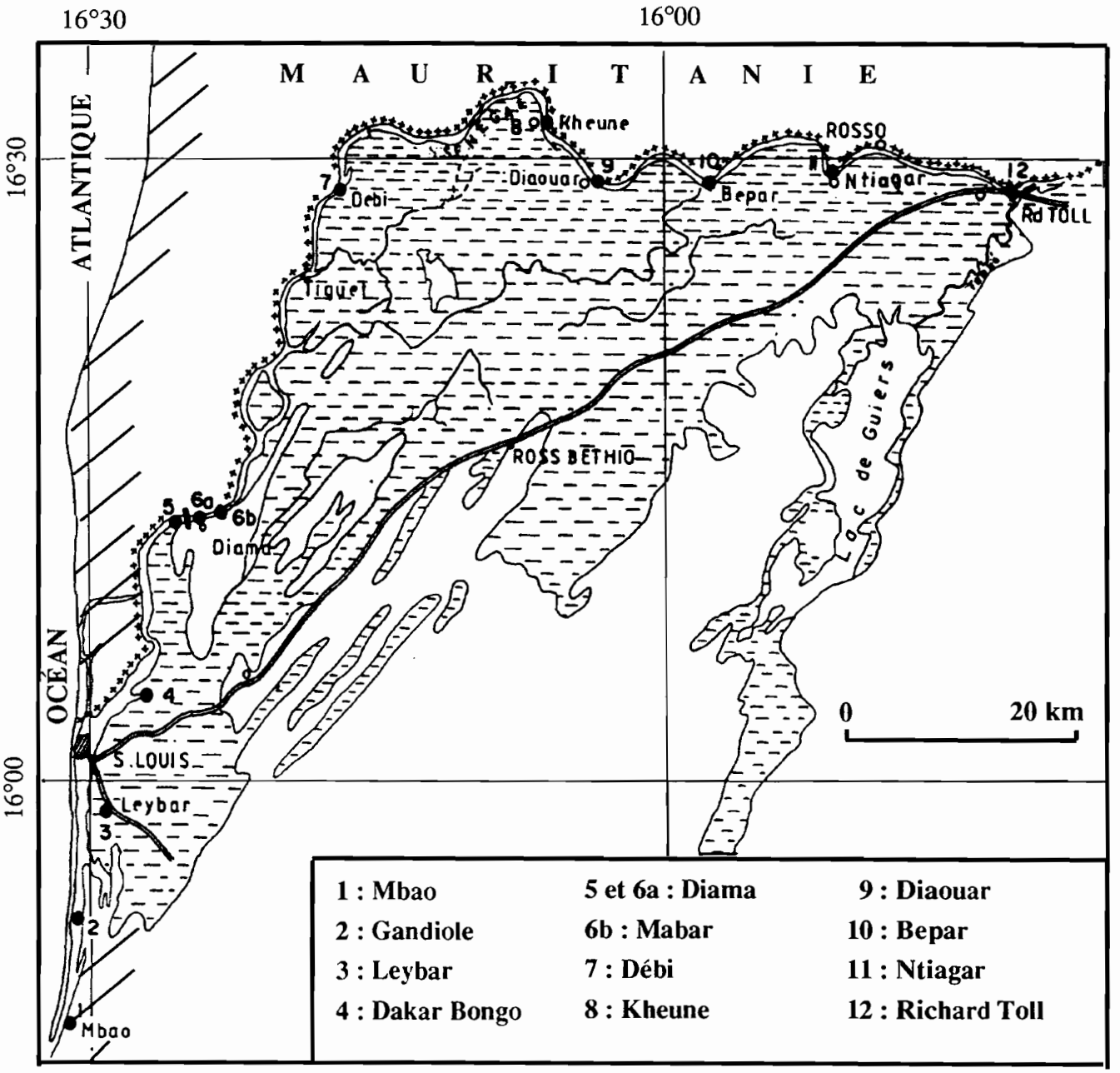


Fig. 9 : Localisation des stations

La modification des facteurs caractérisant leur dynamique entraîne une évolution morphologique et sédimentologique du lit et des rives ainsi qu'un changement des conditions écologiques. Cette étude a nécessité l'exploration d'une vaste étendue du cours inférieur (fig. 9) ainsi que la mise en oeuvre d'un protocole de mesure approprié comportant, en face du village de Gandiole, l'installation d'une base matérialisée qui permet le renouvellement des observations (fig. 10). Cette base a également servi pour les opérations réalisées sur la façade maritime (chap. VIII). Elle est constituée de bornes-repères qui, couplées à un système de positionnement de précision (Geodimeter 140), assurent la comparabilité des sections levées. Ainsi, l'étude des sections-repères du chenal, entre 1989 et 1991, ainsi que l'analyse du matériel en suspension récolté au cours des saisons hydrologiques 1989-90 et 1990-91, conduisent à mettre en évidence les changements observables sur la forme de la vallée et les caractères des dépôts. Le bilan des incidences écologiques de ces transformations peut être évalué grâce à la confrontation des associations macro- et microfaunistiques benthiques entre deux périodes successives de l'après-barrage (mars 1989 et novembre 1991), mais aussi entre cet état et la situation de l'avant-barrage, définie par des études antérieures.

CHAPITRE IV

LES MASSES D'EAU DE LA PARTIE ESTUARIENNE

Mariline BA

Le nord du Sénégal est soumis à un régime sahélien à faible pluviosité (100 à 400 mm/an). Depuis le début de la sécheresse, la diminution de la pluviosité, à parfois moins de 100 mm/an, s'accompagne d'un raccourcissement de la saison des pluies dont la durée est passée de 4 mois à 2 ou 3 mois suivant les années. L'évaporation très forte pendant toute la saison sèche, d'octobre à juin, crée un fort déficit hydrique dans la vallée du fleuve Sénégal.

Le régime du fleuve Sénégal dépend des pluies dans le haut-bassin et des ouvertures des barrages de Diama et Manantali., avec une alternance de hautes eaux (août à novembre) et de basses eaux régulées par les barrages :

- le barrage anti-sel de Diama est fermé pendant la saison sèche de novembre à juin et ouvert progressivement lorsque l'onde de crue arrive, vers la fin du mois de juillet. L'objectif est de garder un niveau d'eau constant nécessaire pour les cultures de décrue et l'irrigation, sans entraîner d'inondation dans la vallée du fleuve. Ce barrage fonctionne depuis 1985,

- le barrage de Manantali est un barrage réservoir d'eau. Des lâchers d'eau sont faits pendant la crue en fonction des besoins agricoles et de la recharge du Lac de Guiers dont l'eau est acheminée jusqu'à Dakar pour la consommation d'eau potable ; ce barrage fonctionne depuis la fin 1988.

Dorénavant l'estuaire du Sénégal est donc scindé artificiellement en deux parties distinctes pendant environ huit mois de l'année : l'aval envahi par la mer, l'amont où est installée l'eau douce. Toutefois, des lâchers plus ou moins importants ont lieu sous diverses contraintes, pendant l'étiage, permettant un mélange des eaux.

Au cours de l'année 1991, des mesures de courant ont été faites à différentes saisons (mars, juin, juillet, septembre, novembre) et à différentes profondeurs (surface, mi-fond, fond) associées à des mesures de hauteur d'eau, de température, de salinité et des prélèvements d'eau pour évaluer les quantités de matières en suspension dans l'eau, en surface et au fond

Ces prélèvements et mesures ont été faits à Gandiole, à 8 km de l'embouchure (fig.10), en station fixe au milieu du chenal, pendant un cycle de marée à partir d'une embarcation.

Des mesures de température et de salinité ainsi que des prélèvements d'eau pour les matières en suspension ont été effectués au cours des mêmes missions à St-Louis, au barrage de Diama, côté aval et côté amont lorsque les vannes étaient fermées et uniquement côté amont lorsque les vannes étaient ouvertes (en période de crue) et à Richard-Toll.

Les résultats bruts ont été consignés dans les tableaux I à VII qui figurent en annexe.

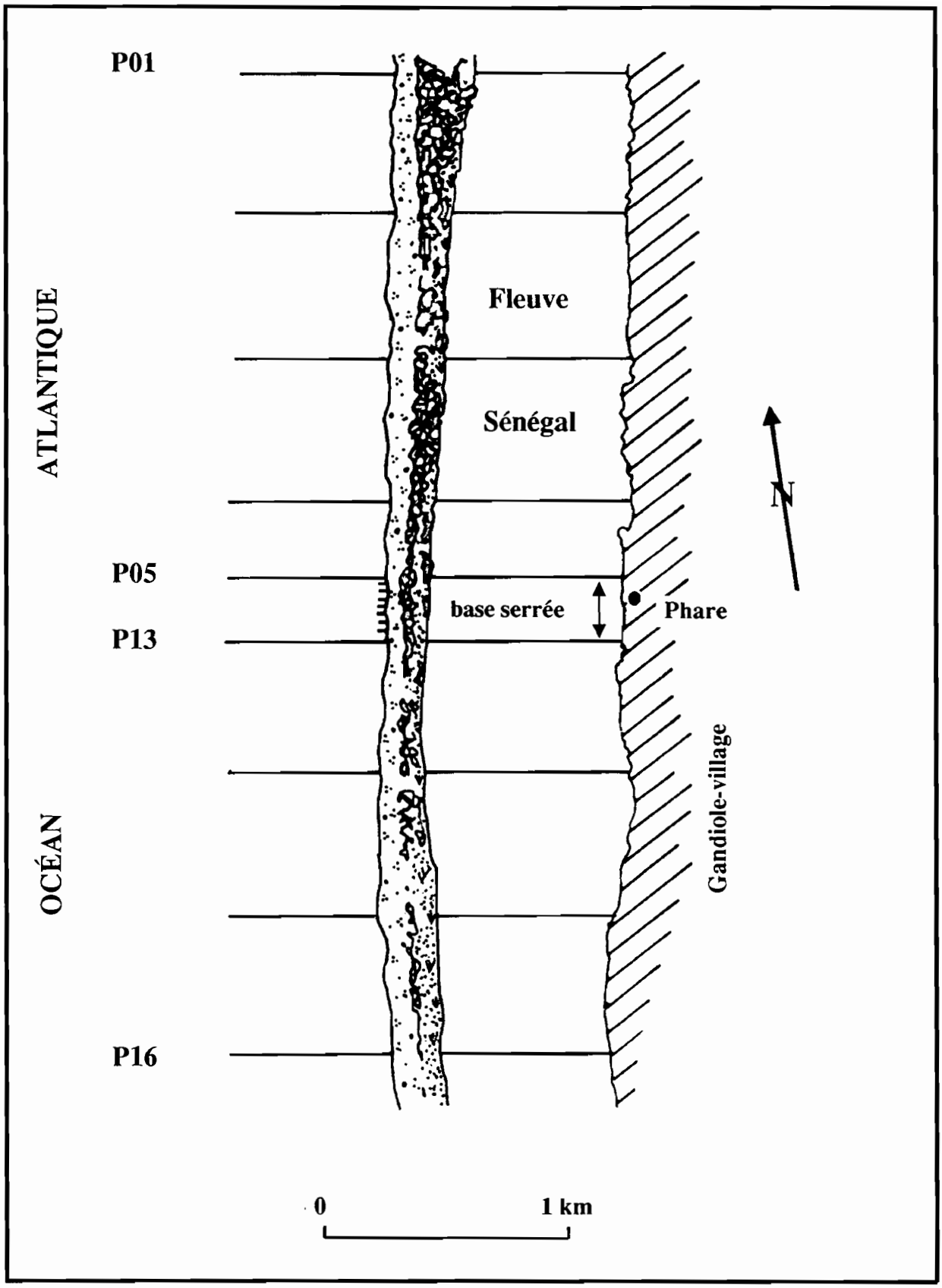


Fig. 10 : Localisation et disposition de la base d'observations fluvio-marines de Gandiole

1. CARACTÈRES HYDRODYNAMIQUES DU RÉGIME APRÈS-BARRAGE

L'hydrodynamique de l'estuaire dépend d'une part de la marée qui varie suivant les coefficients de marée et, d'autre part, des ouvertures et des fermetures des vannes du barrage de Diama et des lâchers d'eau de Manantali qui se font, normalement, en fonction du débit du fleuve.

L'amplitude de marée n'a pas dépassé 0,50 m lors de nos mesures, ce qui s'explique par un marnage assez faible sur la côte sénégalaise, variant entre 0,50 m et 1,40 m.

Les observations du 19 mars 1991 ont eu lieu lors d'une marée de vive-eau. Elles correspondent à une période marquée par une très nette dissymétrie entre le flot et le jusant (fig.11a) :

- le flot est beaucoup plus court que le jusant (surface : 3 h 45, mi-fond : 4 h 15, fond : 5 h),
- les vitesses de courant du flot sont très inférieures aux vitesses de courant du jusant (annexe : tabl. I).

Cette répartition n'est pas tout à fait naturelle, un lâcher d'eau du barrage de Diama a eu lieu le 18 mars à 8 h 30 et s'est prolongé pendant la journée, un autre, le 19 mars à 11 h également pendant la journée. La circulation vers l'aval de ces masses d'eau douce a freiné le flot et accentué le jusant. On note, en conséquence, une accélération brutale de la vitesse du jusant, à 17 h 15 le 19 mars, qui correspond vraisemblablement à l'ouverture des vannes le même jour. Pour un débit d'environ 120 m^3/s, l'onde créée par l'ouverture du barrage met environ six heures à atteindre Gandiole. Les vitesses de courant sont sensiblement égales sur toute la hauteur d'eau mais la durée du flot décroît de la surface vers le fond. Ainsi la renverse de B. M. se fait en surface environ une heure après celle du fond tandis que la renverse de P.M. a lieu en surface 1/4 d'heure avant celle du fond.

Les observations du 24 juillet ont eu lieu en fin d'étiage. La courbe de marée est alors symétrique dans le temps à mi-profondeur et au fond (durée du flot : 6 h 15). En surface, la durée du flot, moins longue que celle du jusant, se limite à 5 h (fig.11b). Les courbes de vitesse sont moins contrastées. Au fond, les vitesses de flot sont très supérieures aux vitesses de jusant. En jusant, les vitesses de courant au fond sont très inférieures aux vitesses de courant en surface (annexe : tableau III). Il semble que la marée pénètre d'une façon homogène sur toute la hauteur d'eau mais se retire plus rapidement dans la couche supérieure, peut-être sous l'action du faible marnage.

La mission du 10 septembre se situe dans la période du maximum de crue (barrage ouvert, débit de 1250 $m^3 \cdot s^{-1}$). On n'observe plus de flot (fig.11c), mais, pendant environ une heure, les valeurs de courant sont très faibles et s'annulent à 11 h 30 tandis qu'un gonflement d'eau est perceptible (annexe : tableau IV). L'accélération des vitesses de courant, entre 17 h 30 et 17 h 45, correspond probablement à une augmentation de l'ouverture des vannes dans la matinée mais ceci n'est pas indiqué sur les feuilles de contrôle du barrage de Diama. Les vitesses de courant au fond sont généralement inférieures à celles de surface.

La mission du 7 novembre s'est déroulée pendant la décrue (débit d'environ 1050 $m^3 \cdot s^{-1}$) avec une ouverture du barrage inférieure à celle du 10 septembre . Les courants de flot s'observent de nouveau mais la courbe de marée est toutefois dissymétrique avec un flot plus court (surface : 3 h 15, mi-fond et fond : 2 h 45) et des vitesses de jusant plus fortes, inférieures au fond par rapport aux vitesses de surface (fig.11d, annexe : tableau V).

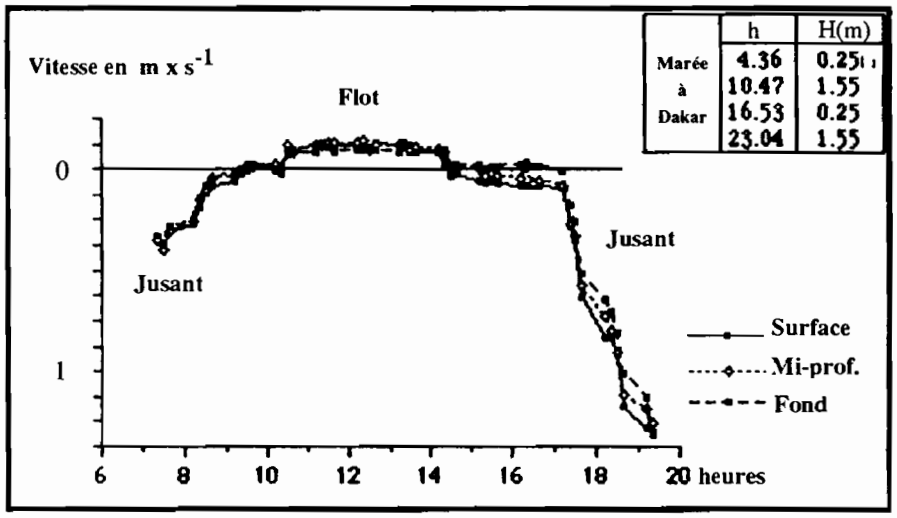
Au cours des différentes missions, le niveau d'eau a été mesuré et un décalage dans le temps entre la marée dynamique et les hauteurs d'eau se traduit à basse-mer par une étale de niveau précédant l'étale de courant d'environ une heure, tandis qu'à pleine mer l'étale de niveau suit l'étale de courant d'environ une heure. Ce phénomène est commun à tous les estuaires. Toutefois, l'interprétation ne peut être plus approfondie étant donné les conditions dans lesquelles les mesures de hauteurs d'eau ont été faites (clapots, position de la sonde sur le fond).

2. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES MASSES D'EAU

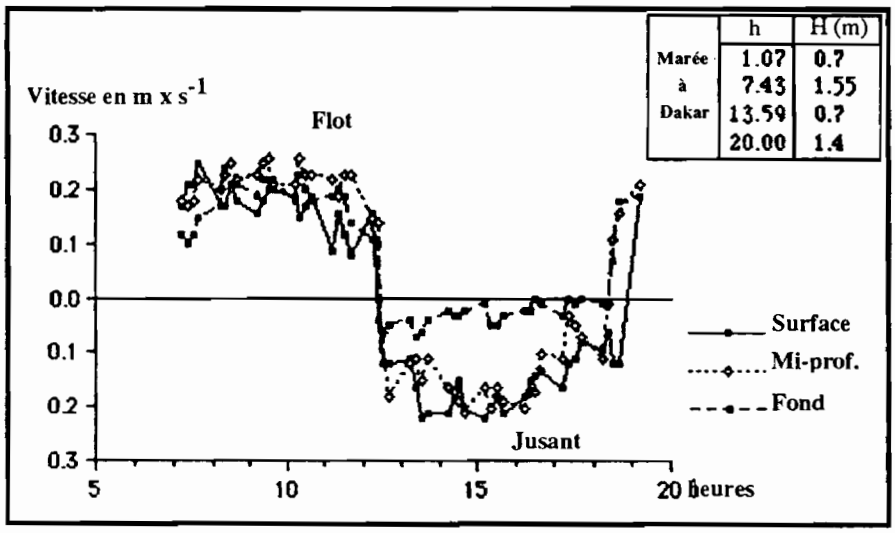
2.1. TEMPÉRATURES

Les mesures faites à Gandiole (fig.12 ; tabl. VI en annexe) montrent que ce paramètre n'apporte pas d'indication significative sur l'évolution considérée ici. Il n'y a pas de corrélation entre la température de l'air et celle de l'eau de surface comme le montrent les tableaux 20 et 21.

La distribution le long de l'estuaire est homogène. La variation saisonnière est certes marquée mais sans rapport évident avec l'évolution du régime hydrologique créé par le barrage.

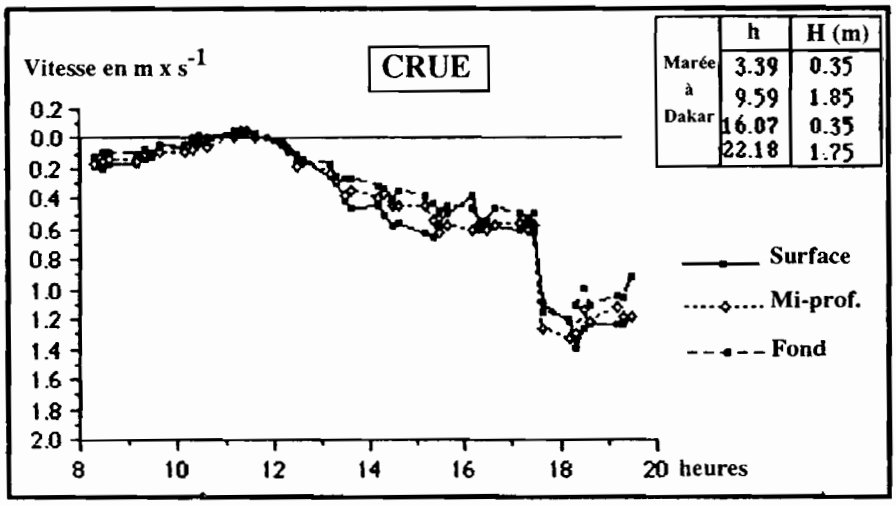


a : 19 mars 1991

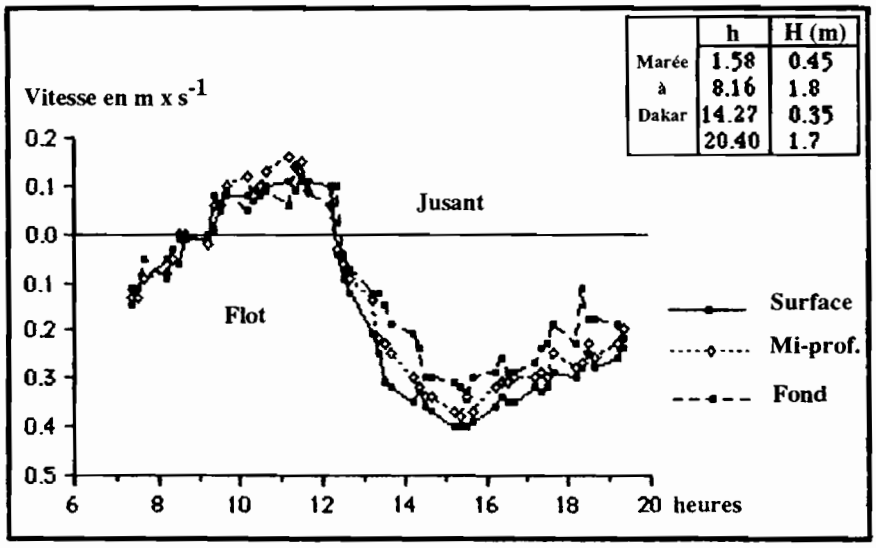


b : 24 juillet 1991

Fig. 11 : Vitesses de courant à Gandiole



c : 10 septembre 1991



d : 7 novembre 1991

Fig. 11 (suite) : Vitesses de courant à Gandiole

	19-03-91	27-06-91	24-07-91	10-09-91	7-11-91
minimum	20,9	23,0	27,3	29,0	25,2
maximum	34,6	26,8	31,1	33,7	36,0
amplitude	13,7	3,8	3,8	4,7	10,8

Tabl. 20 : Amplitude thermique journalière de l'air.

	19-03-91	27-06-91	24-07-91	10-09-91	7-11-91
minimum	20,5	25,2	28,4	29,6	25,9
maximum	21,6	26,3	29,2	30,5	26,5
amplitude	1,1	1,1	1,2	0,9	0,6

Tabl. 21 : Amplitude thermique journalière de l'eau de surface.

2.2. SALINITÉ

La salinité est un facteur extrêmement important dans les estuaires du Sénégal où un fonctionnement de type "estuaire inverse" envisagé par Pritchard (1967) a été décrit dans le Saloum (Barusseau *et al.*, 1985, Saos, 1985) puis en Casamance (Pagès, 1986). La salinité y augmente vers l'amont.

Le régime de salinité dans l'estuaire du Sénégal est encore plus complexe et obéit à différents facteurs : conditions de marée, débit du fleuve et localisation bidimensionnelle des points d'observation. Les variations tidales à Gandiole sont assez peu marquées, excepté en mars et en juin où on observe une légère augmentation de la salinité avec le flot (fig. 13, annexe : tableau VII). Les variations en fonction de la profondeur sont nettes en mars et en juin avec des salinités plus élevées au fond (5 à 6 ‰ en mars et 2 à 3 ‰ en juin).

En juillet en fin d'étiage, la masse d'eau est homogène à Gandiole avec une salinité d'environ 35 ‰ sur toute la colonne d'eau, l'écart entre les eaux de surface et de fond n'excédant pas 1 ‰ (fig.13, et annexe : tableau VII).

L'étude de l'évolution saisonnière montre une augmentation de la salinité amorcée en fin de crue, accélérée après la fermeture du barrage et qui ne cesse de croître jusqu'à l'étiage (Corbin et Cecchi, 1991). Cependant, des lâchers d'eau douce effectués pour des raisons techniques au barrage de Diama en saison sèche, entraînent une dilution des eaux marines comme c'est le cas le 19 mars 1991. Aussi, n'avons-nous pas mis en évidence de phénomènes de concentration par évaporation dans l'estuaire du Sénégal, même en fin d'étiage. Les variations longitudinales de la salinité montrent presque toujours une diminution vers l'amont pendant la période d'étiage, si l'on excepte toutefois une salinité élevée des eaux de fond, en mars et en juin, juste en aval du barrage qui pourrait traduire l'existence de sursalures locales, dans des secteurs latéraux peu profonds, produisant une eau plus dense.

En amont du barrage, également dans les eaux du fond, s'observe une salinité non négligeable qui provient vraisemblablement d'une mauvaise étanchéité des vannes. Nous n'avons pas pu déterminer l'étendue de cette infiltration, les abords du fleuve étant en zone d'insécurité à cette époque.

L'ouverture du barrage a lieu après l'arrivée de la crue à Diama de façon à maintenir le plan d'eau en amont du barrage à la cote d'environ + 1,50 m. A ce moment, l'eau douce descend vers le littoral, diluant les eaux marines. Lors des observations effectuées le 10 septembre et le 7 novembre 1991, l'estuaire est donc en eau douce.

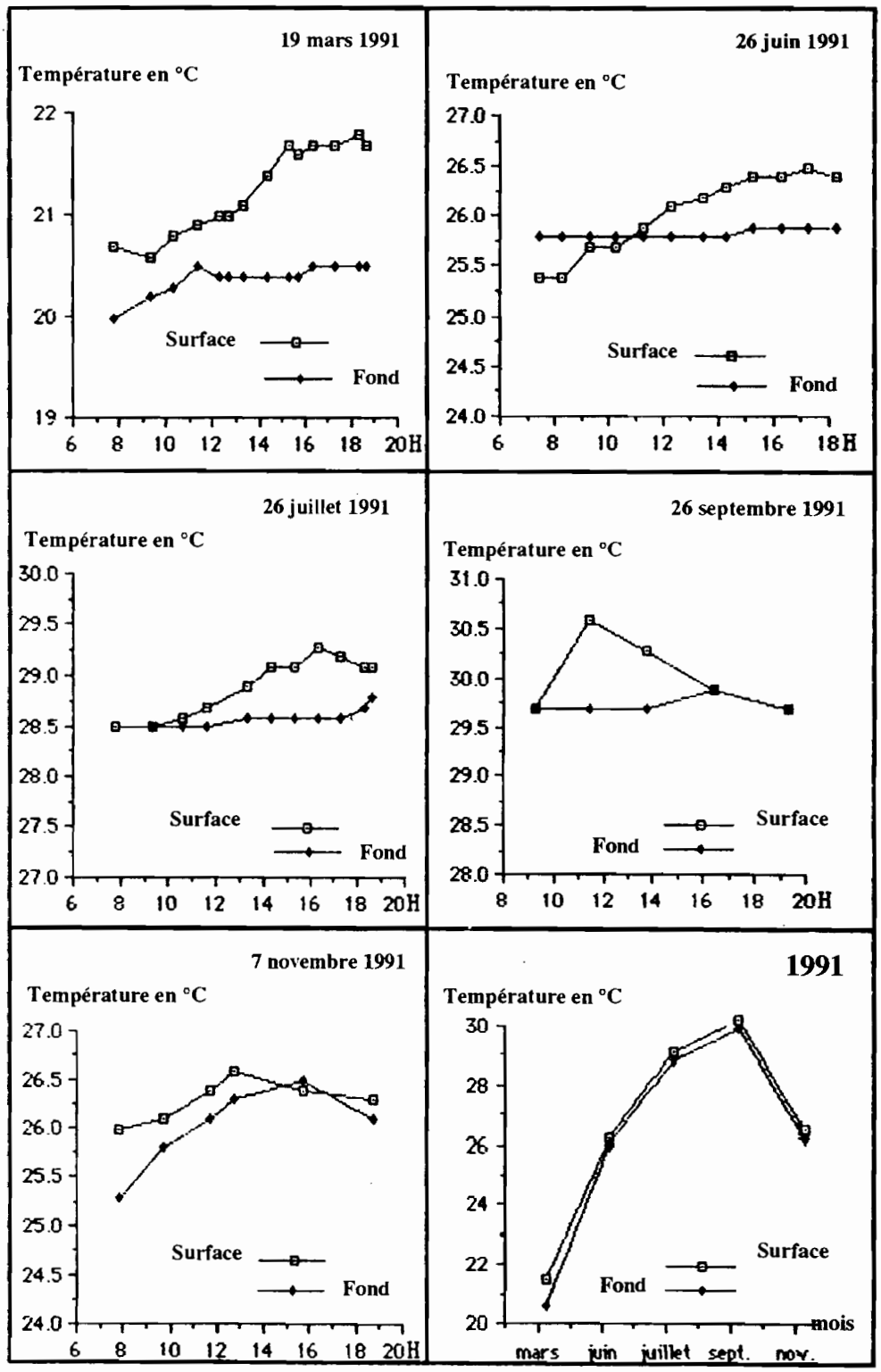


Fig. 12 : Variations de température à Gandiole

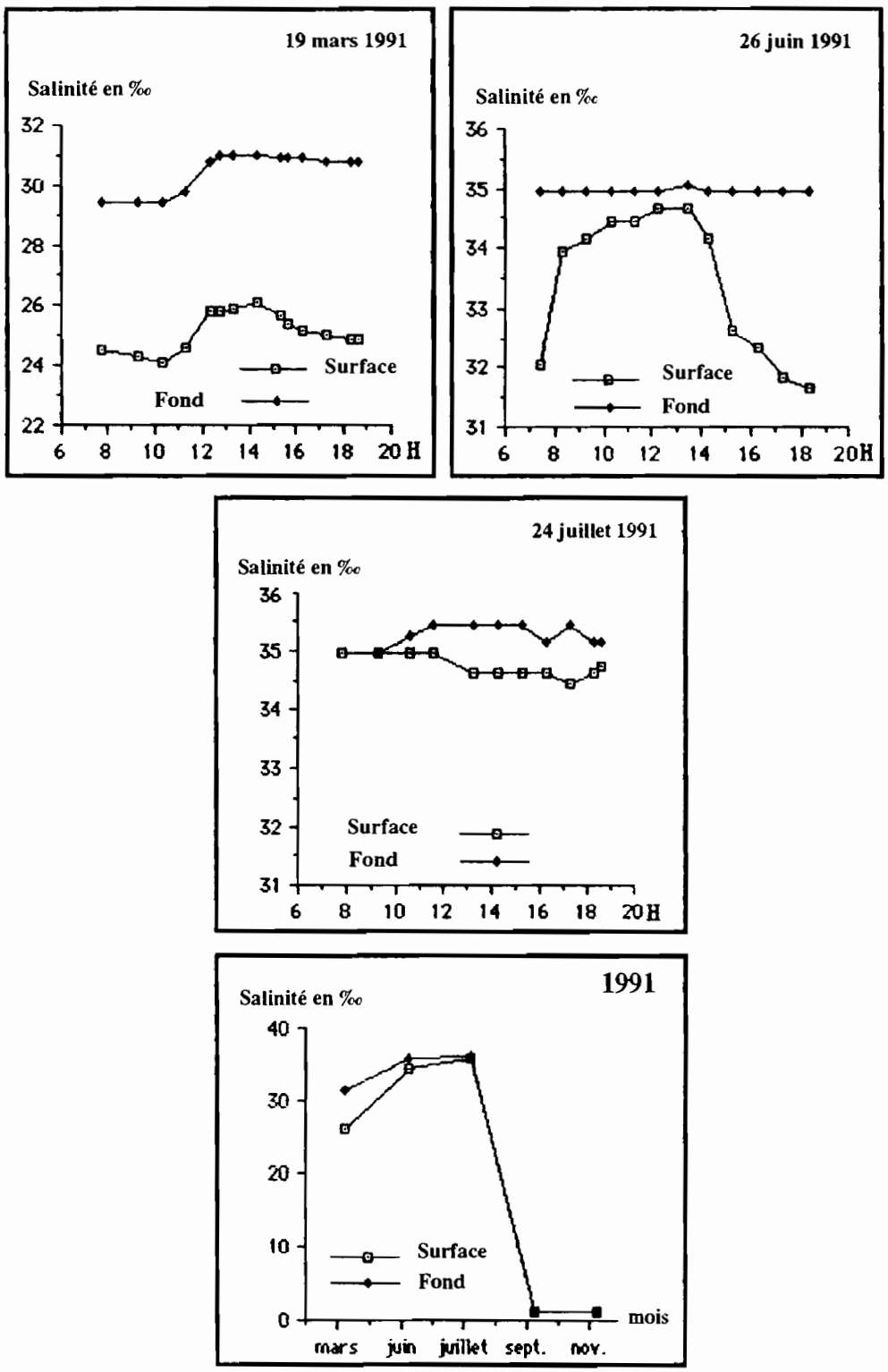


Fig. 13 : Variation de salinité à Gandiole

3. LES MATIÈRES EN SUSPENSION

On présente ici les résultats des mesures globales de teneur. Les résultats granulométriques seront exposés dans le chapitre suivant.

Les M.E.S. (matières en suspension) varient au cours d'un cycle tidal suivant les vitesses de courant. Lorsque les vitesses de courant ont tendance à s'annuler, les M.E.S. décantent ; par contre lorsque les vitesses de courant augmentent, il y a une remise en suspension des particules (fig.14, annexe : tableau VI).

Ainsi le 19 mars, on remarque une diminution des teneurs en M.E.S. au moment des renverses de courant, tandis qu'en jusant, on a une concentration en M.E.S. élevée pour la saison (90,5 mg/l) associée à des vitesses de courant anormalement fortes (environ 1,25 m/s), dues à l'ouverture du barrage.

En juillet les M.E.S. restent faibles au fond pendant tout le jusant, les vitesses ne dépassant pas 7 cm/s.

En septembre, en période de crue, bien que le cycle tidal soit très perturbé, les M.E.S. décantent en surface lorsque les vitesses de courant de crue ralentissent jusqu'à s'annuler, sous l'influence du flot.

Les matières en suspension varient d'environ 20 mg/l en période d'étiage à environ 400 mg/l au maximum de la crue. Le 7 novembre, situé en décrue, la concentration en M.E.S. n'est plus que de l'ordre de 65 mg/l montrant que l'essentiel des débits solides a lieu pendant la crue. En fait, il est vraisemblable que les concentrations les plus importantes se rencontrent en début de crue grâce à l'apport des matières en suspension par les eaux superficielles dues aux premières averses ainsi que la remise en suspension des sédiments déposés sur les parties basses des berges par le clapotis lors de la dernière crue (Gac, 1979). En décrue, les débits solides sont rapidement dégressifs et ont atteint, en étiage, une concentration relativement stable d'environ 20 mg/l.

De manière générale, en période d'étiage, les teneurs en M.E.S. sont sensiblement plus élevées en amont du barrage de Diama que dans l'estuaire. Ceci, grâce à une accumulation de débris et de limons stoppés par le barrage. En septembre, les valeurs augmentent de Diama vers Gandiole (annexe : tableau VI). En crue, les eaux douces de l'estuaire sont plus chargées que celles de la partie amont, sous l'action de l'érosion des berges et probablement des zones basses dénudées qui longent les bras du fleuve en aval du barrage.

4. SYNTHÈSE DES OBSERVATIONS

L'étude a porté sur des périodes différentes les unes des autres et qui reflètent assez bien l'ensemble de l'hydrodynamisme estuarien soumis au fonctionnement des barrages.

En étiage, on distingue deux zones de part et d'autre du barrage de Diama. Une zone en eau douce dont la turbidité est légèrement supérieure à celles des eaux de l'estuaire et une zone en eau marine avec des salinités n'excédant pas celle de l'eau de mer (environ 35 ‰) grâce à une dilution lors des lâchers d'eau du barrage.

En effet, lors des périodes d'ouverture du barrage (par exemple le 19 mars 1991), une masse d'eau circule vers l'aval et dilue fortement les eaux marines. On a une hétérogénéité saline. La stratification des eaux est accentuée par des vitesses de courant de jusant particulièrement élevées qui remettent en suspension les sédiments fins dans la couche d'eau profonde. Ce fonctionnement stratifié, de type estuarien en période d'étiage, correspond à des moments particuliers du régime de l'estuaire désormais sous l'influence du barrage de Diama.

Le régime général en fin d'étiage (par exemple le 24 juillet 1991) est celui d'un système homogène avec un type de fonctionnement lagunaire déjà décrit par Millet (1991) et assez semblable au régime hydrologique que l'on observait avant la mise en eau du barrage de Diama en 1985.

Entre la fin juillet et le début septembre, le régime estuarien est complètement inversé : l'eau de mer peu chargée en matières en suspension est expulsée et l'estuaire est totalement envahi par de l'eau douce très turbide. Les eaux sont alors plus chargées en M.E.S. que dans la partie amont, sous l'action de l'érosion des berges et des zones basses longeant les bras du fleuve, dépourvues de végétation à ce moment.

La décrue s'amorce très lentement : le 7 novembre, bien que l'on observe l'effet de la marée dynamique (le flot étant toutefois beaucoup plus court que le jusant), les eaux sont encore douces. Or, des travaux antérieurs (Ba et Sy, 1987 ; Ba, 1988) avaient montré une intrusion saline dès le début d'octobre en 1987. Le débit observé au barrage de Diama est en effet élevé (1050 $m^3.s^{-1}$), des lâchers d'eau encore importants à Manantali ayant eu lieu en raison d'une crue tardive.

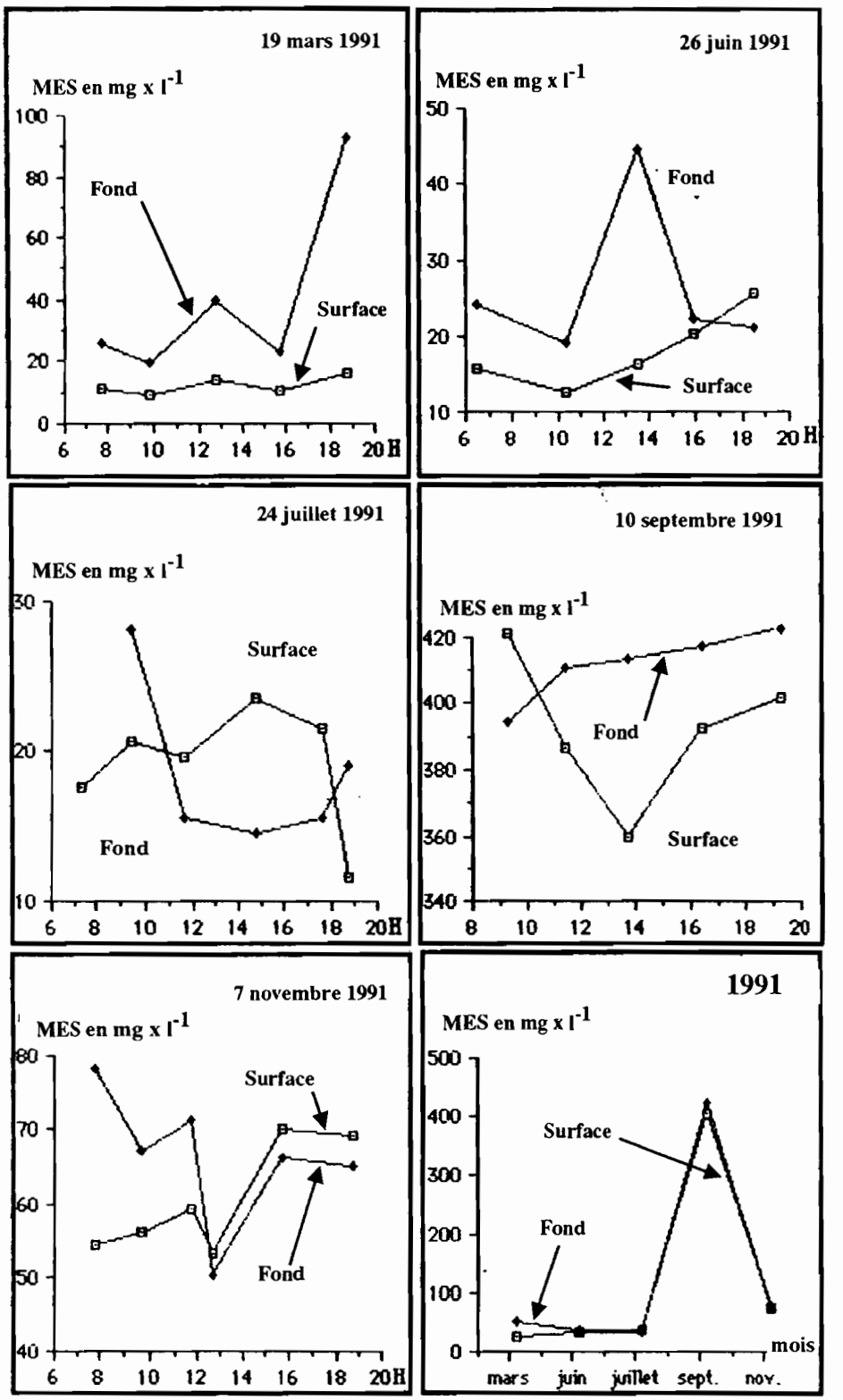


Fig. 14 : Variation des matières en suspension (MES) à Gandiole

5. CONCLUSIONS

Il est encore difficile à l'heure actuelle de déterminer un modèle de fonctionnement de l'estuaire soumis aux barrages de Diama et de Manantali. En effet, l'année d'observation (1991) correspond à une période de transition puisque la digue mauritanienne n'était pas achevée. Il en résultait l'obligation de lâchers d'eau de façon à maintenir le niveau assez bas, en amont du barrage de Diama, pour éviter les inondations. La digue mauritanienne a été inaugurée en janvier 1992. Nous pouvons penser que nous entrons dans une phase nouvelle.

Les observations faites pendant la période de transition ne permettent donc que d'esquisser un modèle de l'influence des barrages et de leur régime de fonctionnement sur les eaux estuariennes.

En période d'étiage, la remontée saline qui atteignait Podor, à 300 km de l'embouchure, est stoppée par le barrage de Diama prévu à cet effet. La distribution des salinités dans le bief inférieur est également modifiée. Auparavant, des taux supérieurs à celui de l'eau de mer (40 ‰) étaient observés jusqu'au km 70 (par exemple en juillet 1982, d'après Gac *et al.*, 1986a et b). Au cours de la phase de transition, on a observé la pénétration des eaux marines dans l'estuaire pendant toute la période d'étiage. La salinité augmente globalement depuis la fermeture des vannes jusqu'à l'ouverture lors de la crue suivante mais elle reste toujours plus faible qu'auparavant. Un phénomène de dilution est provoqué par des lâchers d'eau douce au barrage.

En crue, le passage d'un milieu marin homogène à un milieu sous dominance fluviale se fait beaucoup plus rapidement qu'avant la construction du barrage. A Diama, il ne s'est écoulé qu'un mois et demi entre un débit nul (barrage fermé jusqu'au 7 août) et le maximum de la crue situé vers le 23 septembre 1991. Avant la construction du barrage, à Dagana, situé à environ 120 km en amont de Diama, le passage d'un débit nul au débit maximum s'établissait en plus de deux mois en 1981 (Kane, 1985).

La durée de la période de transition, pendant laquelle le débit augmentait progressivement, permettant le mélange eau douce - eau salée, est dorénavant réduite par suite de l'artificialisation du régime du fleuve.

Au voisinage du maximum de la crue, même très bas dans l'estuaire (Pk 8 à Gandiole), on ne perçoit l'influence marine que par l'action du flot qui ralentit et annule pendant un court temps les vitesses de courant des eaux de crue douces et très turbides.

Malgré les modifications observées sur l'hydrodynamique et l'intrusion saline, les quantités de matières en suspension dans l'estuaire sont comparables à celles observées avant la mise en eau du barrage de Diama ; à Saint-Louis les concentrations relevées en 1991 sont semblables à celles fournies par Kane (1985) en 1981 et 1982.

CHAPITRE V

CARACTERES HYDROLOGIQUES, SEDIMENTOLOGIQUES ET MORPHOLOGIQUES DU BAS ESTUAIRE

Alioune KANE
J. Paul BARUSSEAU

Le barrage de Diama est conçu essentiellement pour arrêter la remontée de la langue salée. Il introduit une discontinuité hydrologique et hydrodynamique majeure (Chap. IV) dans un système récemment encore gouverné par la présence de zones de dilution migrantes. Dans ce milieu estuarien artificialisé, les évolutions sédimentologiques et morphologiques peuvent accuser cette transformation. Les résultats présentés dans cette partie de l'étude se rapportent à des mesures effectuées entre 1988 et 1991.

1. LES EAUX ESTUARIENNES

L'évènement cardinal qui rythme l'évolution des caractères de la masse d'eau du bas estuaire reste la crue annuelle qui s'inscrit dans les caractères hydrologiques et hydrodynamiques et dans le volume des matières en suspension. Deux situations peuvent donc être décrites : la période des hautes eaux, le retour des eaux marines.

1.1. CARACTÈRES HYDROLOGIQUES

On résumera ici des observations complémentaires confirmant les résultats présentés dans le chapitre précédent

1.1.1 En période de hautes eaux fluviales

Les eaux sont douces dans l'estuaire en août, septembre, octobre et même novembre. Dès l'installation des eaux de la crue, les mesures montrent de faibles conductivités (0,07 à 2,31 mS. cm^{-1} en 1990 et 1991), des températures voisines de 30 °C, un pH devenant alcalin (jusqu'à 9,7 en 1990).

1.1.2. En période de basses eaux

Dès la fermeture des vannes du barrage de Diama, les eaux marines remontent dans le bief aval. L'augmentation de la salinité rétablit le taux marin dès le mois de janvier à Saint-Louis.

L'évolution de la salinité est déterminée par les facteurs suivants : le rythme de la marée, les effets de l'évapotranspiration dans les zones marginales du bras estuarien, les lâchers d'eau douce occasionnels opérées à Diama. Le résultat est une variation, dans le temps et l'espace, qui entraîne, autour de la valeur moyenne de 35 ‰, des fluctuations pouvant atteindre +5 à -11 ‰.

1.2. CARACTÈRES HYDRODYNAMIQUES

Dans le bief aval du fleuve, la répartition des courants est déterminée surtout par la marée. Les valeurs s'atténuent entre Saint-Louis et Diama lors de la saison sèche. La durée de la composante de jusant est légèrement plus grande que celle correspondant au flot. Le phénomène est plus net au fond qu'en surface. Cette organisation générale est toutefois modifiée par la position du point d'observation dans le bief et par la situation en saison sèche ou humide.

Près de l'embouchure, la répartition observée est proche de la description. Dans la zone du barrage, par contre, les courants sont atténués en saison sèche et leurs variations réduites en saison humide en raison de l'écoulement de la crue.

Les renverses de courant sont également différentes au cours des deux régimes de l'année. Elles sont abruptes en saison sèche où l'augmentation des vitesses en jusant est rapide alors qu'au cours de la crue elles sont quasi-inexistantes, l'effet de la marée s'exprimant seulement par un ralentissement du courant fluvial en flot.

Le régime d'écoulement est très différent dans les bolons. Les vitesses mesurées sont faibles, surtout soumises aux entraînements dus au vent et fortement influencées par les prélèvements d'eau pour l'irrigation. Le réseau des distributaires n'évolue plus en fonction d'une logique fluviale.

1.3. LE MATÉRIEL EN SUSPENSION

Les matières en suspension (M.E.S.) sont particulièrement abondantes en période de hautes eaux. Le test du disque de Secchi en témoigne, qui disparait vers 15 cm sous la surface en période de crue. L'éclaircissement qui suit le pic de crue est progressif (40 cm par exemple le 10 octobre 1990) mais jamais total, aussi bien en amont du barrage (110 cm en juin), qu'en aval (150 cm).

Bien que les débits enregistrés depuis la mise en fonctionnement du barrage soient notablement plus faibles que ceux mesurés auparavant (1986 : 1537 $m^3 s^{-1}$; 1987 : 1446 $m^3 s^{-1}$; 1988 : 2600 $m^3 s^{-1}$; 1989 : 1377 $m^3 s^{-1}$; 1990 : 1060 $m^3 s^{-1}$; 1991 : 801 $m^3 s^{-1}$, contre 5000 à 6000 antérieurement), le bief aval expulse les eaux marines et l'embouchure rejette en mer un panache turbide qui évolue selon le mécanisme déjà décrit par Rebert (1977), d'abord vers le nord (régime de mousson dominant) puis vers le sud (à partir du mois de septembre).

Le matériel en suspension de la station Diama a fait l'objet d'une étude granulométrique au cours des saisons hydrologiques 1989 et 1990, sur une durée de 15 mois. On ne détaille pas ici le protocole opératoire qui ne se démarque pas des méthodes employées pour l'usage du Sedigraph 5100.

Les particules en suspension se répartissent en trois fractions : < 2 µm. 2 à 20 µm et 20 à 50 µm. Il n'existe pratiquement pas d'élément de taille supérieure à 50 µm. Les aspects caractéristiques des courbes granulométriques obtenues sont indiqués dans la figure 15.

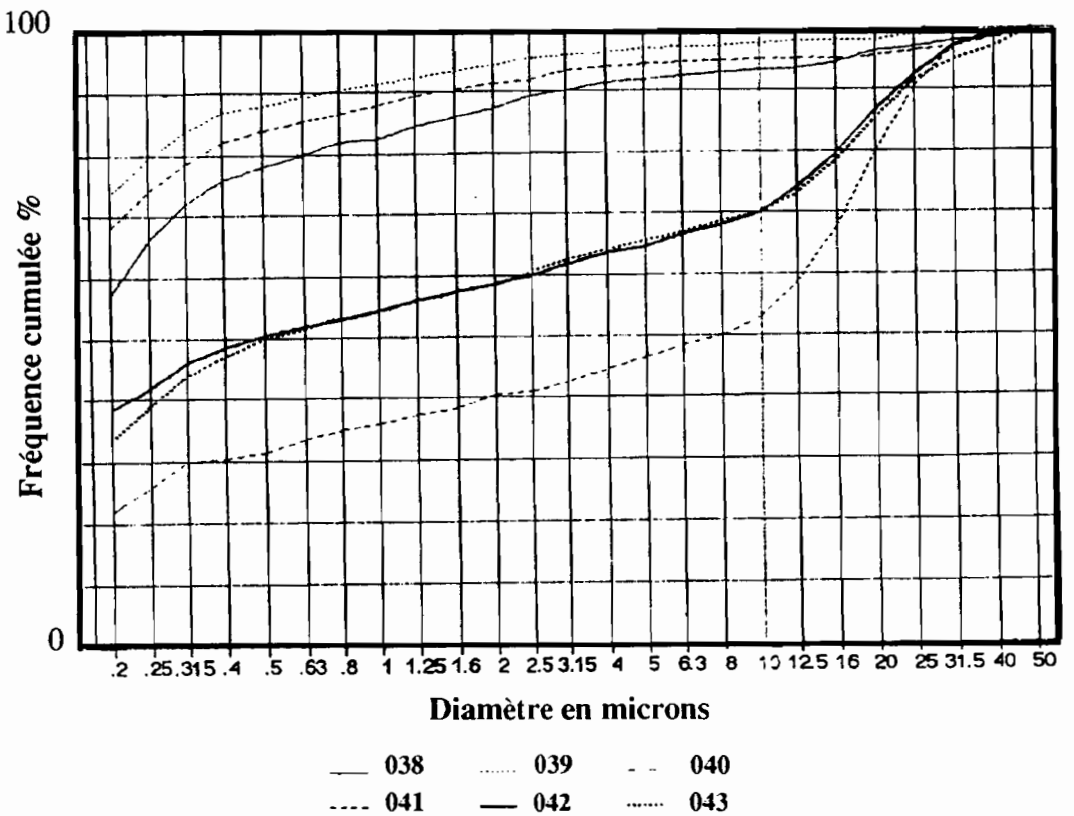


Fig. 15 : Distributions granulométriques caractéristiques du matériel en suspension

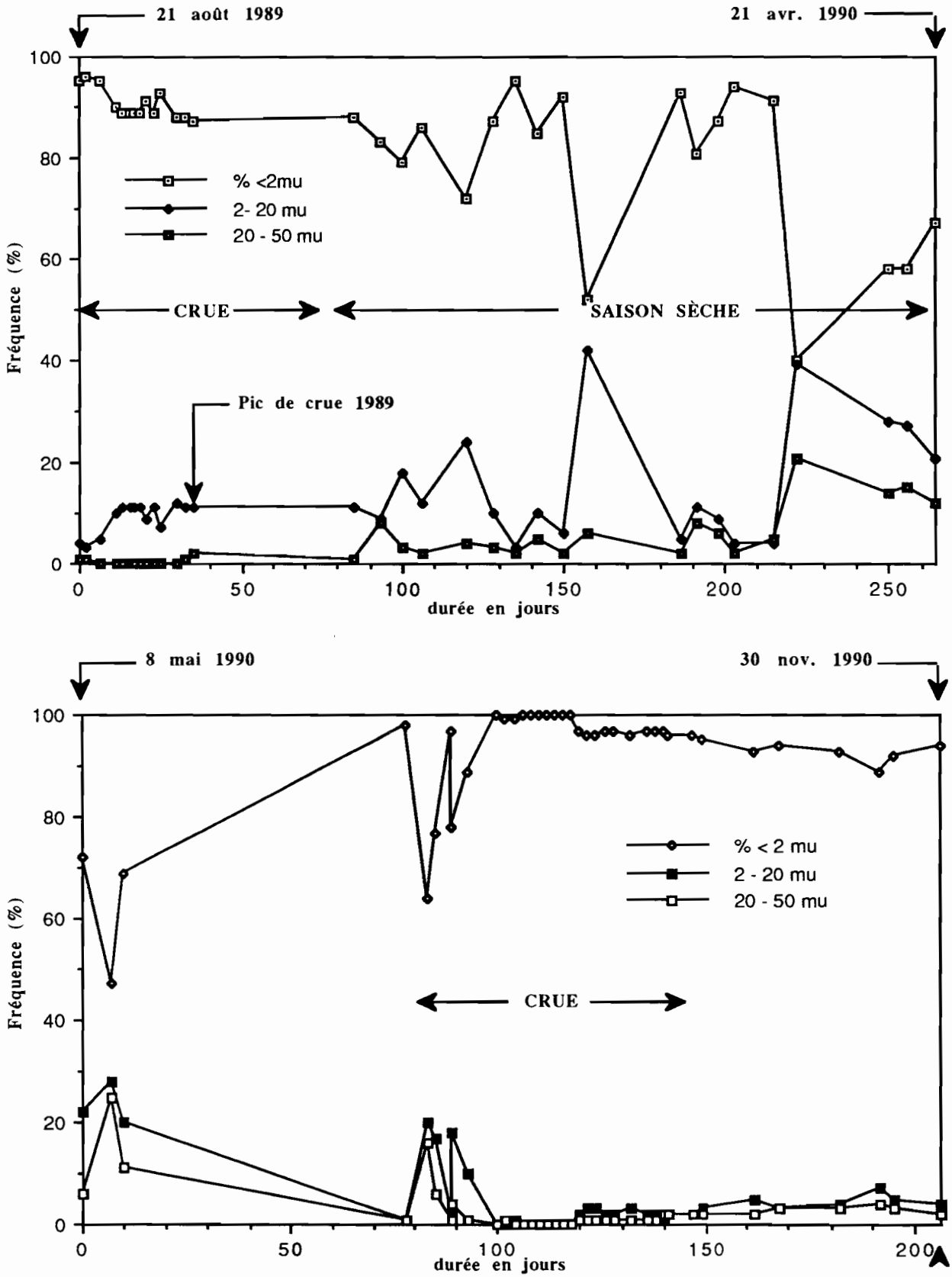


Fig. 16 : Variation au cours du temps de la fréquence des fractions granulométriques caractéristiques du matériel en suspension

On observe trois types de distributions. Un premier groupe (038 - 039 - 040) est constitué pour l'essentiel de matériaux de taille inférieure à 2 µm, un second (042 - 043) contient une notable fraction 2 - 20 µm enfin, un troisième (041), outre cette fraction, renferme du matériel de diamètre compris entre 20 et 50 µm.

Le report systématique de ces fréquences pour les deux périodes encadrant les hivernages 1989 et 1990 montre, avec plus de détail, cette évolution (fig. 16).

En période de crue, la M.E.S. est riche en matériel de la classe des argiles (< 2 µm). Cependant on peut noter aussi un certain enrichissement (jusqu'à 10 %) en fraction silteuse fine (2 à 20 µm) comme en 1989 par exemple, ou en début de l'hivernage 1990.

La resuspension et le transit aquatique de silts lithométéoriques conduisent, à l'opposé, à appauvrir relativement la fraction fine de la M.E.S. pendant la saison sèche. Le phénomène est, semble t-il, cyclique et se traduit, après la décantation des fines de hautes eaux, à une recharge en matériel silteux (fin mais aussi grossier) tous les 45 jours environ. A ce stade de l'étude, seul un cadre général d'explication peut être dessiné, en fonction des lâchers à Manantali et des rythmes de brumes sèches. Un travail spécifique devrait être conduit sur ce point.

2. LE MATÉRIEL DU FOND DU CHENAL

Un échantillonnage systématique du fond du chenal a été réalisé en différentes stations du bief estuarien depuis l'embouchure jusqu'à l'amont du barrage de Diama. En outre, au niveau de la base de Gandiole, les prélèvements ont été exécutés à plusieurs reprises soit à la benne soit par carottage.

Le tableau VIII, en annexe, indique les positions des échantillons récoltés au cours d'une opération en février 1989. Des opérations similaires ont été faites en septembre 1989, novembre 1989, mai 1990 et novembre 1991.

Les résultats s'appuient sur l'analyse de 54 échantillons des cinq stations. L'analyse sédimentologique donne, dans un premier temps, des indications sur la composition générale du sédiment. La figure 17 résume les

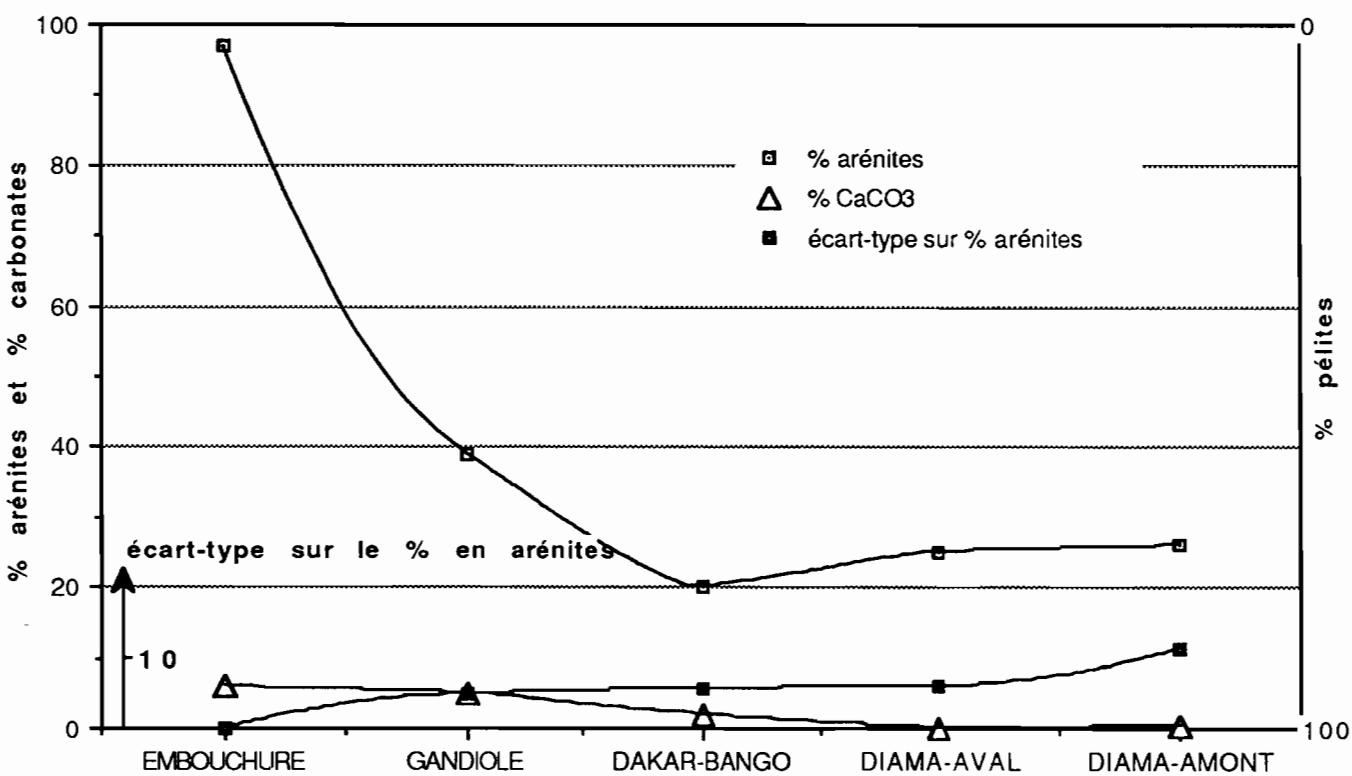


Fig. 17 : Composition des sédiments

observations faites. Le matériel est globalement peu carbonaté. Ce sont alors des fragments coquilliers. Ils sont plus abondants à l'embouchure bien que faiblement représentés. Une teneur exceptionnelle de 100 % se rencontre dans un gisement fossile d'*Anomia ephippium* observé dans le chenal du fleuve sur un profil (P8) de la base de mesures de Gandiole ; ce point n'a pas été pris en considération dans les relevés rapportés ici.

Il existe une décroissance très rapide de la teneur en arénites (fraction > 50 µm). Seule l'extrémité aval du bief estuarien est sableuse. Dès Gandiole, le sédiment est dominé par la présence de limons et d'argiles. La partie située immédiatement en aval du barrage (Diama-aval et Dakar-Bango) fournit les valeurs les plus élevées pour cette fraction < 50 µm. C'est la partie la plus éloignée de l'embouchure donc la plus soustraite à l'influence de la marée. Même si la crue a pour résultat un vannage des sédiments fins antérieurs, c'est cependant là que la sédimentation argilo-silteuse trouve les conditions les plus calmes pendant la longue période qui sépare deux hivernages consécutifs. Alors que la teneur moyenne en arénites décroît de l'embouchure vers l'amont, l'écart-type sur la moyenne augmente (% arénites = 97 ± 0 à l'embouchure ; % arénites = 26,4 ± 11,4 à Diama-amont). Il existe donc une assez grande disparité entre les mesures qui s'explique à la fois par un facteur géographique et un facteur saisonnier.

D'une manière générale, la granulométrie est plus grossière dans l'axe du chenal et dans la partie terminale du bief. Sur la rive droite, dans le secteur où elle est constituée par la Langue de Barbarie, le sédiment se charge également en sables. Plus en amont par contre, il y a peu de sables dans le chenal (de part et d'autre du barrage) mais des teneurs plus fortes près des rives. On observe que le matériel est mieux trié et unimodal près de l'embouchure ; plus varié, parfois plurimodal et souvent chargé en une abondante fraction sablonneuse (mode granulométrique vers 70 µm) dès que l'on remonte un peu le bief estuarien (fig. 18).

A cette logique géographique, les changements saisonniers ajoutent un nouvel élément de variabilité. Ainsi, à Gandiole, où l'on détient la base de données la plus étendue, on observe en période d'hivernage une augmentation sensible de la teneur en sables, plus au détriment des limons (2 à 50 µm) que de la fraction argileuse (< 2 µm) toujours élevée. En saison sèche, les fractions fines sont prédominantes avec une élévation de la teneur en limons. Il semble que les niveaux superficiels du sédiment du fond du chenal répercutent les changements déjà notés au sujet des particules en suspension avec un accroissement de l'empreinte lithométéorique sur le matériel sédimentaire. Sans doute aussi, l'influence hydrodynamique dominante dans le bief inférieur est-elle devenue celle de la crue, puisque la fraction silteuse lithométéorique parait en grande partie évacuée de l'enregistrement sédimentaire à ce moment.

3. LA MORPHOLOGIE DU CHENAL

Les transformations morphologiques du chenal n'ont été étudiées que dans le secteur de référence de la base de Gandiole où des profils topobathymétriques ont été levés à six reprises entre 1989 et 1991 dans les conditions de pré- et de post-hivernage, avant et après la crue.

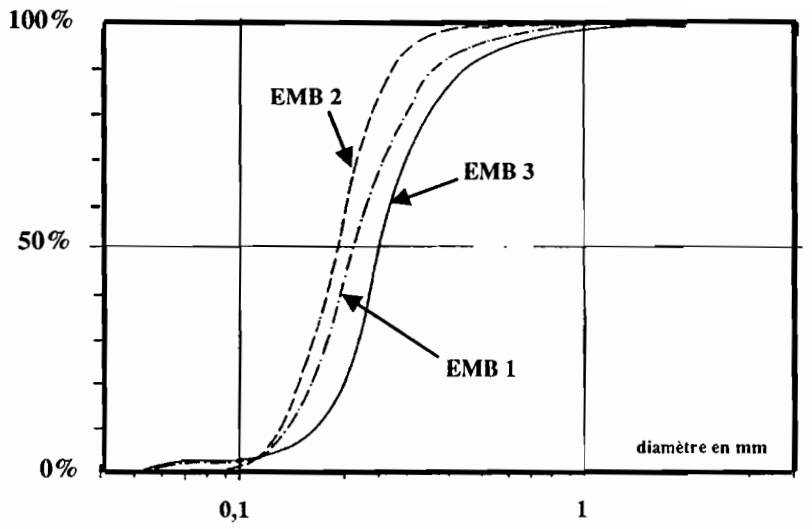
Les profils de la base serrée, situés à 50 m de distance les uns des autres, permettent de constituer des ensembles de cartes et de blocs-diagrammes dont on ne présente ici que deux exemples (fig. 19 et 20). Sur les figures, la langue de Barbarie est à gauche du diagramme (distance 0).

Le chenal présente une forme en V aux pentes généralement irrégulières et dissymétriques. Le fond est étroit entre 6 et 8 m de profondeur. Localement des bancs coquilliers fossiles (*Anomia ephippium* , voir ci-dessus) altèrent la régularité de l'axe.

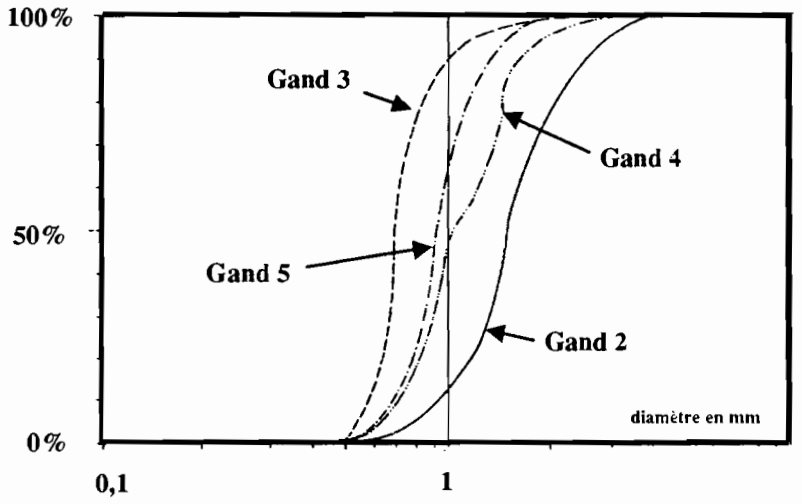
La comparaison de la morphologie pré- et post-hivernage montre une régularisation par la crue du fleuve qui se reproduit d'une année sur l'autre (oct. 90 - nov. 91). Cette modification se surimpose à un processus général d'érosion que l'on perçoit bien quand on observe les cartes-différences, c'est-à-dire les documents (fig. 21) qui expriment les variations de la profondeur d'une période à l'autre. La grande majorité des différences positives (approfondissement entre la date antérieure et la date postérieure) traduit la dominance d'un régime actuel d'érosion dans le chenal.

Sur la base serrée (profils P5 à P13) les variations surfaciques du maître-couple sédimentaire par profil et par intervalle de temps sont indiquées dans le tableau suivant (tabl. 22). Sur l'ensemble des 29 mois considérés (de juin 1989 à novembre 1991), la variation moyenne en volume se traduit par un déficit de l'ordre de 400 m^3 par mètre linéaire de rive, soit un approfondissement moyen d'une trentaine de centimètres.

En réalité, cet approfondissement n'est pas régulier dans l'espace. Il est presque systématiquement en rive gauche. En effet, quand l'accumulation domine, elle a lieu plutôt en rive droite (langue de Barbarie). Les rares fois où des dépôts s'observent sur la rive gauche, ils ont lieu plutôt en bas de versant du chenal qu'en haut.



a : embouchure



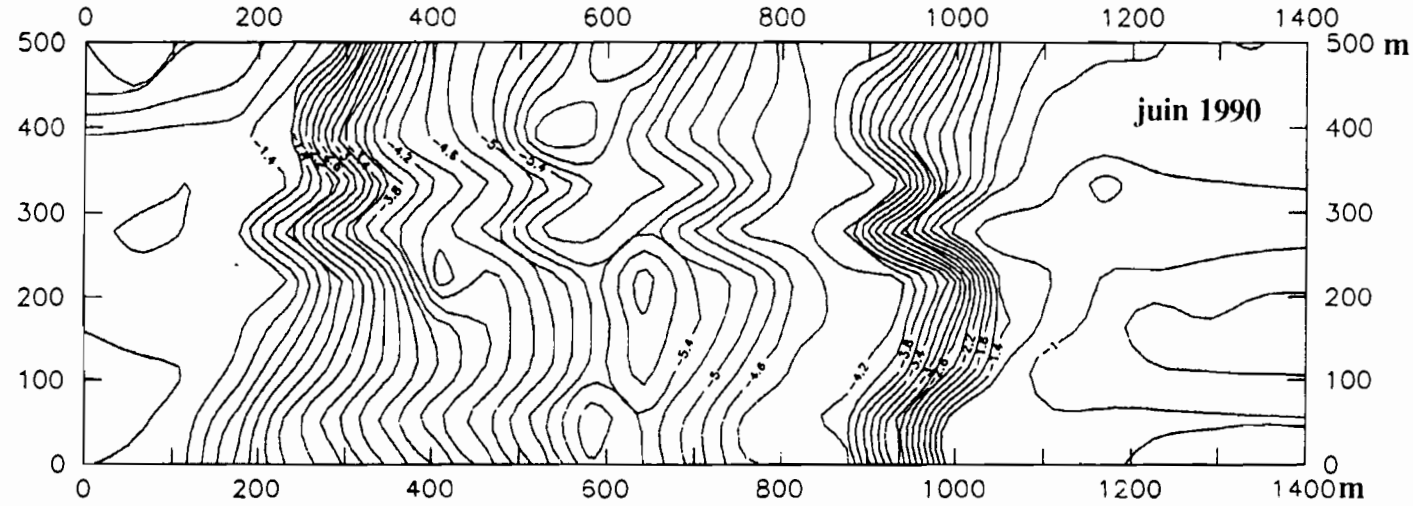
b : Gandiole

Fig. 18 : Granulométries caractéristiques des sédiments du fond du chenal

	juin 89/oct.89	oct. 89/oct.90	oct. 90/juin 91	juin 91/nov.91
P5	102	-275	258	-333
P6	118	-223	69	-121
P7	131	-618	382	-152
P8	192	-215	-51	-150
P9	187	-343	-59	-320
P10	208	-305	-67	-490
P11	-143	-642	-69	-317
P12	56	-1125	279	-131

Tabl. 22 : Variation surfacique (en m2) du maître-couple sédimentaire sur les profils de la base de Gandiole.

Fig. 19 : Variations morphologiques dans la vallée estuarienne à Gandiole en 1990



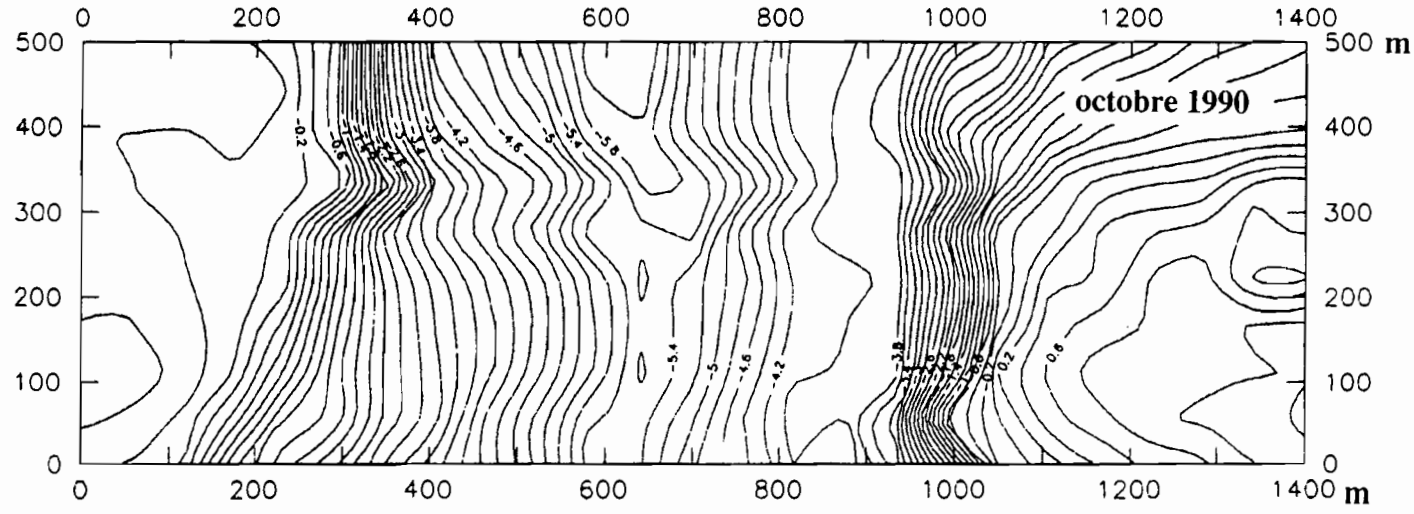


Fig. 20 : Représentation tridimensionnelle des variations morphologiques de la vallée estuarienne à Gandiole en 1991

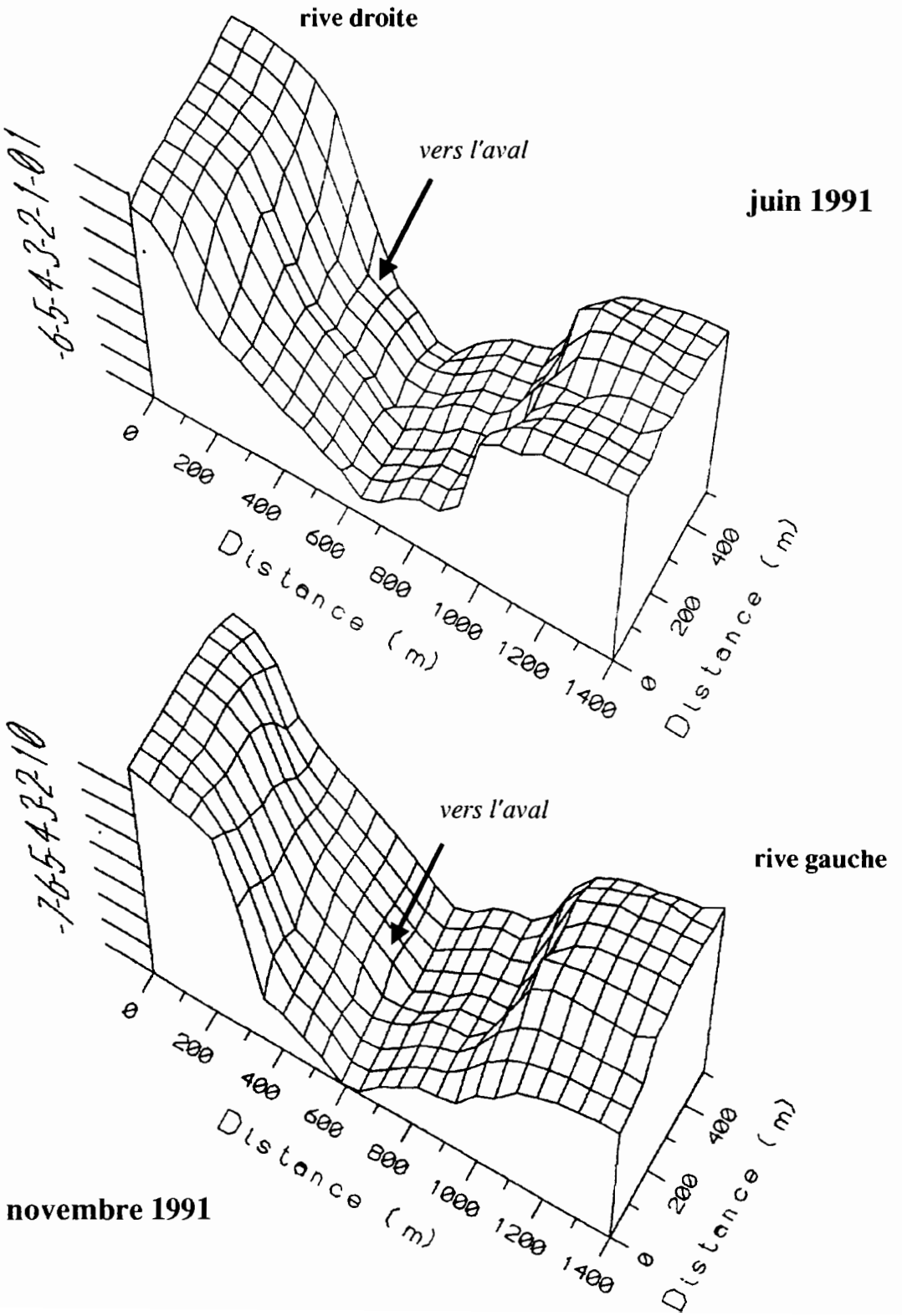
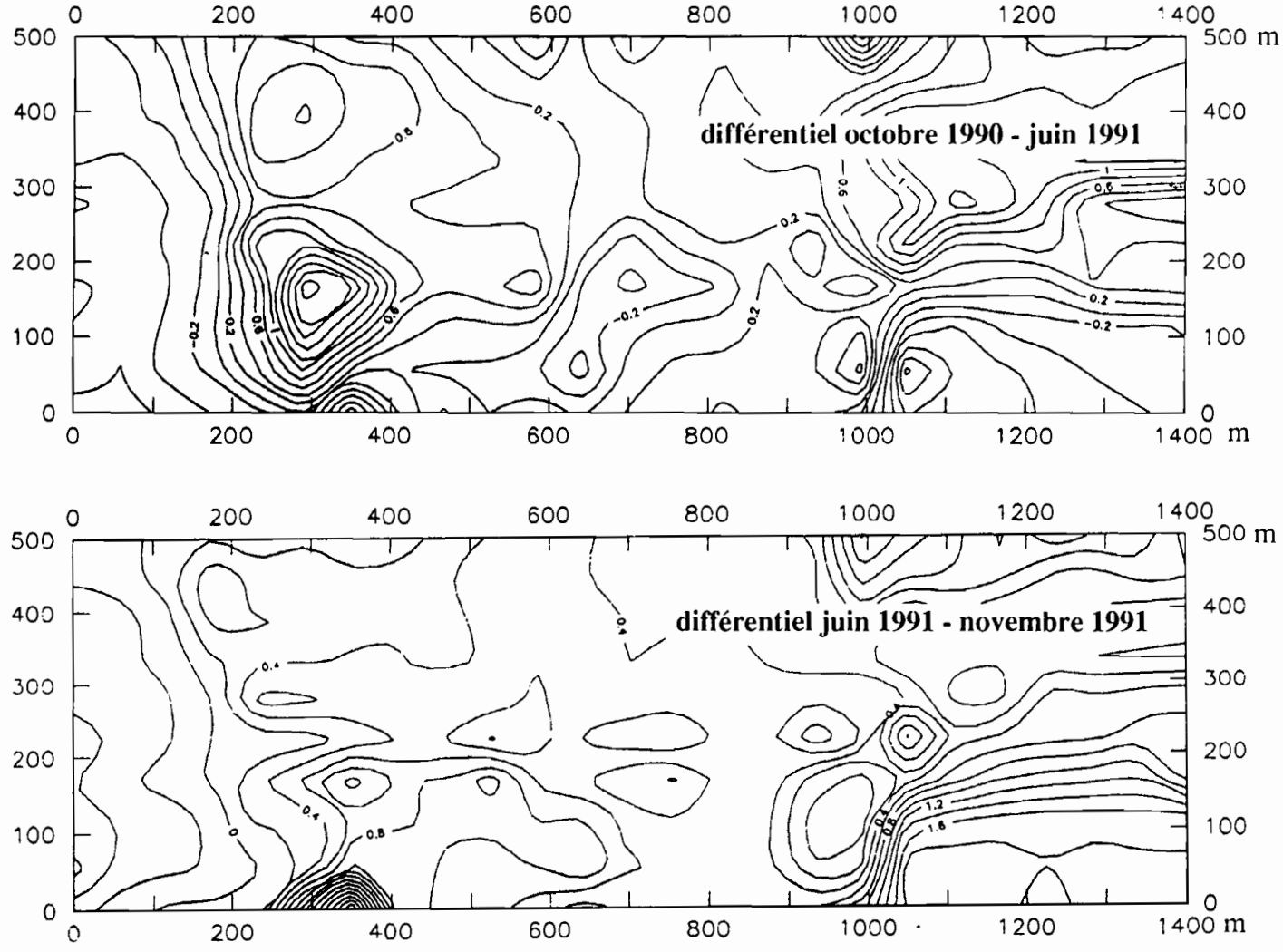


Fig. 21 : Isovaleurs d'érosion et de sédimentation dans la vallée estuarienne à Gandiole



Il n'est pas non plus uniforme dans le temps et ne caractérise pas systématiquement l'un des deux régimes saisonniers plutôt que l'autre. Ainsi une majorité de dépôt est observé en hivernage 1989 (+ 100 m^3 par mètre de rive) mais aussi en saison sèche 1990-1991 (+ 50 m^3 m^{-1}). Pendant l'hivernage 1991, l'érosion domine (- 200 m^3 m^{-1}). De même, à l'issue d'un cycle annuel complet (octobre 1989-octobre 1990) le déficit atteint 350 m^3 par mètre linéaire de rive sur l'ensemble de la base.

4. CONCLUSIONS

L'étude hydrologique et hydrodynamique du bief estuarien permet de mettre en évidence le rôle d'un facteur sédimentaire jusque là peu apparent, en raison de la dominance des transports induits par les courants de marée : la composante lithométéorique.

L'existence de cette composante dans les alluvions récentes du bief estuarien montre qu'il fonctionne comme un "puits" (au sens qu'on attribue actuellement à ce terme pour désigner une zone de stockage d'un élément donné) et matérialise, à l'aval, la dynamique éolienne suractivée évoquée en amont (Chap. I). Le phénomène, particulièrement notable en saison sèche, devrait faire l'objet d'une étude spécifique dans la suite.

La fraction d'origine éolienne ne semble toutefois pas se fixer de façon permanente dans les sédiments du fond de l'estuaire puisqu'elle n'est pas retouvée de manière significative après l'hivernage. Le résultat de la modification de la nature des apports dans la partie terminale de l'estuaire est donc finalement un déficit qui se traduit, dans la zone expérimentale de la base de Gandiole, par un approfondissement moyen de l'ordre de 30 cm.

CHAPITRE VI

CARACTÉRISATION DES CHANGEMENTS ÉCOLOGIQUES DU BAS-SÉNÉGAL

Jacques MONTEILLET
Mariline BA

Les changements introduits par les ouvrages de Diama et de Manantali dans l'écoulement du fleuve sont importants (Ba et Sy, 1987). C'est pour mieux les apprécier que des prélèvements de sédiments du fleuve ont été réalisés en mars 1989 et en novembre 1991. On se propose de faire ici un bilan des modifications enregistrées par les sédiments et la faune benthique testacée, dans la zone estuarienne du Sénégal et sur les rives du Sénégal, en amont de Diama jusqu'à Richard Toll. On évoquera les principales modifications de l'environnement sédimentaire fluvial en comparant la situation actuelle à celle correspondant aux observations réalisées avant la mise en place des barrages (Monteillet et Rosso, 1977 ; Monteillet *et al.*, 1982, Ausseil-Badie et Monteillet, 1985 ; Pinson-Mouillot, 1980). On tentera autant que possible de discerner l'évolution récente de l'environnement aquatique dans la basse vallée et le delta du Sénégal depuis la mise en service des barrages en comparant les résultats de la mission de novembre 1991 avec ceux de la mission précédente de mars 1989 (Monteillet *et al.*, 1990). La méthode de travail est décrite en annexe.

1. DISTRIBUTION NATURELLE DES ASSEMBLAGES FAUNISTIQUES TESTACÉS

En remontant vers l'amont à partir de l'embouchure, différents auteurs ont noté une modification de la composition des faunes testacées fluvio-marines en fonction des changements hydrologiques. C'est ainsi que l'on a pu distinguer parmi les Mollusques des estuaires de Sénégambie :

- à proximité de l'embouchure un assemblage sténohalobe dominé par *Donax rugosus* L.
- un assemblage polyhalobe, situé en amont, constitué de Bivalves comme *Tagelus angulatus* (Sowerby), *Tellina nymphalis* Lmk. *Anomia ephippium* L. et de Gastéropodes comme *Tympanotonus fuscatus* (L.)
- un assemblage mésohalobe dominé par *Corbula trigona* Hinds
- un assemblage oligohalobe formé de Gastéropodes : *Melanoides tuberculata* (Müller), *Bellamya unicolor* (Olivier) et/ou de Bivalves : *Corbicula africana* (Krauss), *Coelathura sp.* Dans le fleuve Sénégal, ces ensembles s'échelonnaient, avant la mise en service des barrages, depuis l'embouchure jusqu'à Richard-Toll (Monteillet et Rosso, 1977)

Chez les Foraminifères, Ausseil-Badie (1983) puis Debenay (1990) distinguent d'aval vers l'amont trois ensembles faunistiques :

- l'assemblage 1 ou A sous influence marine avec : *Pararotalia sp.*, *Rosalina sp.*, *Bolivina striatula* Cushman, *Elphidium fichtelianum* (d'Orbigny).
- l'assemblage 2 ou B correspondant à un environnement "à stress modéré" constitué par : *Ammonia parkinsonia* (d'Orbigny), *Ammonia tepida* (Cushman), *Elphidium gunteri* (Cole), *Elphidium limosum* (Cushman et Bronnimann), *Bolivina variabilis* (Williamson).
- l'assemblage 3 ou C "à stress environnemental élevé" composé de *Miliammina fusca* (Brady), *Arenoparella mexicana* (Kornfeld), *Ammotium salsum* (Cushman et Bronnimann), *Trochammina inflata* (Montagu), *Haplophragmoides wilberti* Andersen, *Ammobaculites exiguus* (Cushman et Bronnimann).

Les pourcentages relatifs de ces trois assemblages sont utilisés pour calculer un indice de confinement Ic calculé de la façon suivante : $Ic = (C/(B+C) - A/(A+B) + 1) / 2$. Sa valeur varie de 0 en environnement marin à 1 en milieu confiné.

Pour les Ostracodes, Carbonnel (1986) distingue :

- une association dites "marine" parmi lesquels sont cités *Neomonoceratina ikkoroduensis* Omatsola, *Falunia sp.*
- une association 2 qui comprend : *Cyprideis nigeriensis* Omatsola, *Eocytheron ebuttaemetaense* Omatsola, *Miocyprideis leybarensis* Carbonnel, *Neomonoceratina iddoensis* Omatsola, *Phlyctocythere hartmanni* Omatsola.
- une association 3 qui apparait dès que la salinité dépasse 50 ‰ pendant une période suffisamment longue et qui regroupe notamment *Aglaiella sp.*, *Cyprideis mandviensis* Jain.

Ces zonations biologiques naturelles d'organismes testacés, étroitement dépendantes de la qualité des eaux, ont été plus ou moins affectées par la mise en service des barrages comme on le verra plus loin.

2. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Les résultats analytiques sont présentés en annexe (tabl. IX à XIII). On les décrit ici en remontant vers l'amont à partir du site de l'embouchure de 1989.

2.1. LE SITE DE MBAO

Au site de Mbao (tabl. IX en annexe), le profil transversal du Sénégal réalisé à l'échosondeur apparaît dissymétrique. Près de la rive gauche, la profondeur est maximale (-5 m) car le lit est creusé par un chenal de largeur équivalent au tiers de la largeur totale du fleuve. En direction de la rive droite, le profil bathymétrique au-delà du chenal prend l'allure d'un plateau à -3 m qui se raccorde à la rive droite par une faible pente.

Les prélèvements ont été réalisés sur la rive droite à -2 m (Mbao 1) dans la partie profonde du chenal où deux faciès ont été distingués. Le plus fréquent est un faciès sableux (Mbao 2A), recouvert par place de plaques de vase (Mbao 2B). Un prélèvement a concerné le plateau à -3 m (Mbao 3) et la rive gauche à -2 m (Mbao 4) à environ 80 m du bord. Les résultats des tamisages montrent que les sables situés au fond du chenal sont les plus fins sur la rive droite ; les sables sont moins fins et deviennent de plus en plus grossiers en allant du plateau à la rive gauche .

Dans la fraction grossière (supérieure à 0,5 mm) la proportion de lithoclastes croît en fonction du grain moyen du sable. Les grains de grès coquilliers sont d'autant mieux représentés dans les sables de l'ancienne embouchure que la fraction grossière est abondante. Les tests identifiables ont une fréquence plus élevée sur la rive droite comme s'ils étaient équivalents à la fraction grossière des coquilles. L'espèce sténohaline *Donax rugosus* est partout dominante. Présentant encore un ligament reliant les valves, ce Lamellibranche peut être considéré comme en place. Significatif d'un environnement aquatique littoral de haute énergie, il est associé à un assemblage malacologique aux affinités écologiques diverses. Un talus de berge métrique marque l'érosion du cordon littoral de la rive gauche. Ce phénomène explique la présence, dans la thanatocénose de cette rive, de tests de Mollusques quaternaires (*Anadara senilis, Donax oweni, Triphora perversa*)

La fraction fine (entre 0,1 et 0,5 mm) comprend moins de débris coquilliers qu'en mars 1989 mais davantage de grains de beach-rock. Ce qui pourrait encore une fois indiquer une augmentation de l'énergie sur le site de dépôt. Les Foraminifères présentent une fréquence faible en nette diminution associée à une dominance des *Ammonia sp.* Le nombre d'espèces présentes est en diminution par rapport à nos dernières observations (Monteillet *et al.*, 1990). L'assemblage le plus varié de tests de Foraminifères benthiques demeure toujours dans la partie la plus profonde correspondant au chenal de la rive droite où le niveau d'énergie est moindre. Cette relative variété des tests benthiques correspondant à l'occurrence de formes planctoniques (Globigérinidés) suggére une prédominance localisée des écoulements de flot. Cependant l'indice Ic, calculé pour les différents prélèvements du site, en 1989 et en 1992, donne toujours les mêmes valeurs comprises entre 0.4 et 0,5.

2.2. LE SITE DE GANDIOLE

Les prélèvements (tabl.X, en annexe) correspondent au transect réalisé en mars 1989 au droit du phare de Gandiole. Le profil bathymétrique à l'échosondeur ne semble pas avoir varié depuis 1989. Comme celui de Mbao, il est asymétrique mais le chenal profond est ici moins nettement excentré, cette fois du côté de la rive gauche. Celle-ci présente une pente assez accusée de 0 à -3m puis un plateau vers -4,5m qui rejoint le chenal dans l'axe duquel une thanatocénose à *Anomia ephippium* (Chap. V, p. 57) forme un bombement. La rive droite présente tout de même un replat en pente douce correspondant au plateau de la rive opposé. L'échantillonnage a été réalisé sur la rive gauche (-3 m), sur le plateau (-4,5 m) et sur le replat de rive droite (-4,5 m). Les sédiments prélevés sont tous constitués de vase gris-noir anoxique et putride.

Dans la fraction grossière (> 0,5mm), les lithoclastes ont une fréquence maximale sur le plateau de la rive gauche. Ils paraissent issus de l'érosion du cordon littoral quaternaire formant le substratum. Les tests et débris coquilliers dont la fréquence est maximale sur la rive gauche sont essentiellement fins avec peu de tests identifiables. En revanche, sur le plateau, la fraction coquillière est plus grossière, ce que traduit la fréquence élevée des tests identifiables. Cette augmentation, associée à une concentration des grains de beach-rock, traduirait l'existence d'un gradient hydrodynamique croissant de la rive gauche vers le plateau. Les assemblages de tests de la rive gauche sont hétérogènes car constitués de formes aux affinités écologiques diverses, caractéristiques d'une thanatocénose. Celle-ci comprend un mélange de formes polyhalines actuelles ayant sans doute subi un faible transport comme *Tellina nymphalis* ou *Anomia ephippium*, de formes sténohalines héritées du cordon littoral subactuel (*Donax rugosus*, Bryozoaires). On trouve aussi des formes mésohalines comme *Corbula trigona* ici éloignée de son aire de distribution normale, située plus en amont, et provenant sans doute d'un stock de coquilles fossiles mobilisées par l'érosion du substratum. L'assemblage de la rive droite est plus homogène avec essentiellement un mélange de formes polyhalines actuelles et de formes sténohalines issues du cordon littoral subactuel.

Dans la fraction fine (entre 0,1 et 0,5 mm), on note une opposition, qui existait déjà en 1989, entre une rive gauche relativement riche en Foraminifères et une rive droite plus pauvre. Cependant le caractère marin de la faune de Foraminifères paraît s'être accentué récemment ; l'indice Ic qui variait autour de 0,4 pour les échantillons de 1989, se trouve voisin de 0,3 pour les échantillons de 1992.

Parmi les Ostracodes, on note la persistance de la dominance de l'espèce euryhaline *Neomonoceratina iddoensis* toujours associée à des espèces indiquant une influence marine.

2.3. LES STATIONS DE LEYBAR, BANGO ET DIAMA AVAL.

2.3.1. Leybar

Le prélèvement a été réalisé sur la rive gauche du fleuve, à environ 300 m de l'embranchement de la route Saint-Louis - Gandiole en venant de Saint-Louis (tabl. XI, en annexe). A partir de la route, on traverse d'abord une mangrove résiduelle avec quelques chenaux vaseux bordés de palétuviers. La berge du fleuve est marquée par un talus d'ordre métrique précédé d'un estran sableux. La vase sableuse a été prélevée à une trentaine de mètres de la rive vers un mètre de profondeur.

Dans la fraction sableuse, on note la présence de fragments de grès coquilliers hérités du remaniement du cordon sableux quaternaire sous-jacent. Les tests identifiables encore recouverts de cuticules appartiennent à l'assemblage polyhalin habituel à cette distance de l'embouchure.

Cependant au pont de Leybar, soit à une centaine de mètres en amont du site échantillonné, la fréquence des *Tympanotonus fuscatus* qui était de l'ordre de 200 individus par m^2 en 1978-1980 se trouve aujourd'hui réduite à 50. Ce phénomène doit être attribué selon nous au déplacement de l'abattoir qui rejetait dans le fleuve des carcasses de bovidés alimentant les eaux en matières organiques. La disparition de cette source de matière organique s'est répercuté sur l'effectif de ce gastéropode détritivore.

Dans la fraction fine, on note que les Foraminifères présents appartiennent exclusivement à l'assemblage "d'environnement à stress élevé" (Debenay, 1990). Cette faune est tout à fait comparable à celle observée en juillet 1981 (Ausseil-Badie, inédit). Il n'existe donc pas de changement hydrologique majeur perceptible grâce aux assemblages benthiques testacés.

2.3.2. Dakar Bango

Le prélèvement de vase a été réalisé à 1 m de profondeur sur la rive droite du Djeuss à près de 800 m de son confluent avec le Sénégal (tabl.XI, en annexe) . Il est situé à une centaine de mètres en aval du barrage isolant les eaux de la retenue d'eau douce alimentant notamment Saint-Louis. La fréquence du *Tympanotonus fuscatus*, en majorité vivant, atteste la vitalité de ce peuplement benthique. La densité élevée de cette espèce est semblable à celle notée en 1978-80. Le caractère polyhalin de la faune est confirmé par la présence du Cirripède euryhalin *Balanus pallidus*. La proximité des eaux douces liées au barrage immédiatement en amont explique la présence de restes corrodés de coquilles de quelques formes juvéniles (*Cleopatra sp.*)

Dans la fraction fine, les Foraminifères correspondent à l'assemblage "d'environnement à stress élevé" dont la présence est habituelle à cette distance de l'embouchure. Une microfaune de ce type avait été répertoriée en 1981 dans le même site (Ausseil-Badie, inédit). On peut donc également conclure à l'absence de changement hydrologique majeur.

2.3.3. Diama-aval

Le site de prélèvement (tabl. XI, en annexe) est une mangrove résiduelle qui semble avoir régressé récemment. Les palétuviers de la rive gauche du Sénégal se sont raréfiés, remplacés par de jeunes tamaris. La vase sableuse observée en 1989 a fait place à un sable vaseux jaunâtre recouvert en surface d'un tapis d'algues vertes. Les tests identifiables présentent des restes de cuticules mais on n'observe pas de faune malacologique vivante. Les *Tympanotonus fuscatus*, fréquents sur l'estran de ce site en mars 1989, semblent tous morts, ce qui explique la prolifération d'algues vertes sur le substratum. La disparition de cette espèce polyhaline immédiatement en aval du barrage de Diama pourrait avoir :

- une cause locale anthropique liée aux travaux sur la rive et le déboisement de la mangrove,
- une cause plus générale liée aux brusques variations hydrologiques en aval du barrage.

La microfaune comprend, outre les formes d'environnement à stress élevé, des Thécamoebiens et un Ostracode euryhalin.

Cette station, immédiatement en aval du barrage, est exposée à de brusques variations de salinité consécutives à l'ouverture et à la fermeture des vannes du barrage de Diama, ce qui aboutit à une sélection d'espèces à large valence écologique. On peut penser que de telles conditions extrêmes sont fragilisantes et qu'elles sont susceptibles de provoquer de brusques disparitions comme celle de *Tympanotonus fuscatus*.

2.4. LES STATIONS DE DIAMA-AMONT, MAKA, TIGUET

2.4.1. Diama-amont

Cette station correspond à la rive gauche de la retenue, à 600 m en amont du barrage. Le plan d'eau se trouve actuellement à environ 2 m en contrebas du sommet de la digue bordant la berge. Le pied de la digue est entaillé par un microtalus argileux d'érosion, d'environ 0,25 m de haut. En avant de cette microfalaise, l'estran est constitué par une vase sableuse avec des galets mous. Un prélèvement de vase fluide jaunâtre réalisé à 30 m de la rive, en pente douce, à une profondeur de 1,50m (tabl. XII, en annexe) a montré la présence de nombreux exemplaires vivants du mollusque mésohalin *Corbula trigona*. Ce bivalve, présent dans le site en 1989, a persisté du fait d'une salinité saisonnière liée à l'évaporation ainsi qu'à l'ouverture périodique des vannes faisant pénétrer dans la retenue les eaux salées de l'aval .

2.4.2. Maka

Cette station, face au village de Maka, se trouve à environ un kilomètre en amont de la précédente. Le prélèvement a été réalisé sur les rives sableuses à végétation de Typhacées (massettes) à environ 30 m du bord et 1,50 m de profondeur. Il est également constitué de vase jaunâtre un peu sableuse ne contenant qu'une seule valve de *Corbula trigona* (tabl. XII, en annexe). Dans le transect réalisé en 1989 au droit de ce site, on avait pourtant noté une fréquence trés élevée de ce Bivalve. Ainsi la limite amont de ce peuplement mésohalobe subit peut-être des variations saisonnières en fonction des variations d'extension de la langue salée, à partir de la retenue.

2.4.3. Tiguet (ou Débi)

Ce site se trouve à environ 1 km en amont de la station de Débi à proximité d'un canal alimenté par une motopompe. La rive gauche du fleuve se trouve à environ 150 m de la digue. Les bords du plan d'eau sont colonisés par des Cypéracées (joncs) avec un rideau de jeunes tamaris, une vingtaine de mètres plus loin. Le prélèvement a été réalisé à une cinquantaine de mètres du bord, au-delà de la ligne des tamaris, à une profondeur de l'ordre de 1,50 m (tabl. XII, en annexe).

Dans les vases jaunâtres liquides supérieures d'épaisseur centimétrique, on n'observe pas de particules supérieures à 0,1 mm. Dans les vases grises inférieures, on trouve les témoins des variations hydrologiques ayant précédé la mise en service des barrages. Les restes de gaines racinaires traduisent ainsi l'érosion des berges par les vagues des crues annuelles. Une thanatocénose montre l'alternance ancienne dans ce même site d'environnements polyhalins et mésohalins. Les premiers sont caractérisés par l'existence de quelques tests de *Tympanotonus fuscatus*, encore recouverts par la cuticule, tandis que les seconds (mésohalobes) sont démontrés par la présence de *Corbula trigona* corrodée par un séjour en eau douce, en apparence antérieure.

Ainsi dans ce secteur, la régularisation du cours par les barrages a eu pour effet principal de limiter le sapement des berges.

2.5. LES STATIONS DE KHEUNE À RICHARD TOLL

2.5.1. Kheune

Le site se trouve à quelque 500 m en amont de l'ancien barrage provisoire. La rive est marquée par un talus métrique qui montre en coupe un bourrelet sédimentaire de limon stratifié (levée et/ou nebka) surmontant un sol à *gley*. En avant du talus d'érosion se trouve une plage sableuse en pente douce. L'échantillonnage a été réalisé à une dizaine de mètres de la rive à une profondeur de 0,8m (tabl.XIII, en annexe). Dans le prélèvement superficiel, on a noté que la vase jaunâtre d'épaisseur centimétrique contenait une valve encore couverte de cuticule de *Corbicula africana* (bivalve d'eau douce) ; la partie inférieure constituée de vase plastique grise renfermait un reste de test de *Tympanotonus fuscatus* attestant des conditions polyhalines antérieures.

Le changement de faune testacée enregistré par les sédiments est donc le reflet de la modification récente des conditions hydrologiques. La diminution de la fréquence des gaines racinaires dans l'échantillon superficiel illustre également le ralentissement récent du sapement des berges.

2.5.2. Diaouar

Le site se trouve en amont de la station de pompage. Les berges du fleuve sont jalonnées par un microtalus décimétrique situé d'aprés la carte pédologique (O.M.V.S., 1973) au pied d'une haute levée. Des tamaris poussent sur cette levée et, au-delà de l'estran sablo-vaseux, la rive est colonisée par une végétation aquatique herbacée. Le prélèvement de vase jaunâtre a été réalisé au-delà du rideau de végétation, soit à 30 m de la rive et 1,5 m de profondeur (tabl.XIII, en annexe). Le gastéropode d'eau douce *Melanoides tuberculata* trouvé vivant, est représenté ici par des coquilles centimétriques avec quelques formes juvéniles millimétriques. Adapté aux nouvelles conditions hydrologiques, ce nouveau peuplement benthique paraît relativement dense et en extension.

2.5.3. Bépar

Le site se trouve 1 km en amont de la station de pompage de Ronkh. Il correspond, d'aprés la carte pédologique, à une haute levée (O.M.V.S., 1973). Les berges du fleuve sont marquées par un microtalus d'érosion argilo-limoneux décimétrique. Un premier rideau de végétation aquatique est représenté par des espèces herbacées avec au-delà un rideau externe de jeunes tamaris, correspondant au niveau moyen des eaux. Le prélèvement de vase jaunâtre, réalisé à une cinquantaine de mètres de la rive en pente douce, à quelques mètres au-delà des tamaris, n'a livré aucun élément supérieur à 100 µm (tabl.XIII, en annexe).

2.5.4. Ntiagar

Le site se trouve à proximité du village près d'une digue bordant un canal amenant l'eau à une station de pompage. La berge assez abrupte correspond, d'après la carte pédologique, à une haute levée. Elle est bordée par une végétation herbacée. Le prélèvement de vase jaunâtre, réalisé à quelques mètres du bord et à une profondeur de 1,5 m, a montré la présence d'un exemplaire juvénile du gastéropode benthique *Melanoides tuberculata* (tabl.XIII, en annexe). Dans la fraction fine, on a noté la présence de Thécamoebiens et d'un Ostracode oligohalobe (*Cypris sp.*).

Les nouvelles conditions hydrologiques permettent ainsi l'apparition progressive d'une faune testacée oligohalobe plus diversifiée, que l'on a vu jusqu'ici limitée à quelques espèces de Mollusques. Ce processus de colonisation du domaine oligohalin du bief amont du barrage de Diama par la faune benthique testacé paraît relativement lent.

2.5.5. Richard-Toll

Le site se trouve en amont du dernier bâtiment de l'hôpital de la ville. La rive, défrichée pour les cultures, est envahie sur une quarantaine de mètres par une végétation herbacée aquatique flottante constituée de laitues d'eau. Le prélèvement, situé seulement à quelques mètres du bord, a été réalisé au milieu d'une végétation aquatique servant de support à des bullins infestés par la bilharzie (tabl.XIII, en annexe). La vase jaunâtre prélevée a montré la présence du Gastéropode benthique *Melanoides tuberculata* vivant et d'une coquille corrodée plus ancienne du Gastéropode d'eau douce *Bellamya unicolor*.

Jusqu'ici les espèces oligohalobes étaient le plus souvent représentées par des Bivalves résistant à l'anhydrobiose, appartenant notamment à des genres tels qu'*Aspatharia* ou *Spathopsis*, en rapport avec les variations interannuelles importantes des crues fluviales. Depuis le Quaternaire récent, *Melanoides tuberculata*

était cantonné dans les lacs de Guiers et du Rkiz (Monteillet, 1988) et plus récemment dans les axes d'irrigation (Monteillet et Rosso, 1977) en raison de conditions hydrologiques plus stables. L'apparition sur les rives du Sénégal de peuplements benthiques permanents à *Melanoides tuberculata* est un fait nouveau, même dans cette partie amont de l'estuaire, significatif de la stabilisation des conditions hydrologiques après la mise en service des barrages.

3. CONCLUSION

Bien que l'embouchure soit maintenant éloignée de plusieurs kilomètres à la suite de l'allongement du cordon littoral, le site de l'embouchure de 1989 demeure largement sous influence marine. Actuellement les courants de marée semblent avoir plutôt tendance à s'intensifier, empêchant l'envasement qu'on note plus au nord. Cependant les changements hydrologiques demeurent mineurs ainsi que le montre la distribution des foraminifères. Au site de Gandiole, toutefois la microfaune de Foraminifères a tendance à prendre un caractère marin plus affirmé.

Dans la partie interne du bief aval-barrage (de Leybar à Diama-aval) la faune testacée ne semble pas avoir enregistré de changements hydrologiques majeurs. Toutefois il faut signaler dans certains sites (Leybar, Diama aval), une raréfaction voire une disparition du Gastéropode polyhalin *Tympanotonus fuscatus* qu'il semble toutefois possible d'attribuer à des causes locales. Il convient cependant d'être attentif à ce phénomène. En amont notamment, cette espèce pourrait avoir été fragilisée par de brusques changements de salinité à des périodes critiques.

Dans la retenue du barrage (Diama-amont), on note, comme en 1989, la permanence d'une malacofaune mésohalobe sans doute liée à l'ouverture périodique des vannes et à la concentration des eaux par évaporation. Il est maintenant nécessaire de reconnaître l'extension vers l'amont de cette zone mésohaline qui pourrait s'être dernièrement réduite. Les changement hydrologiques ont été importants dans ce secteur où l'on est passé d'un environnement aquatique polyhalin à un milieu méso- à oligohalin. La régularisation récente du cours du Sénégal par les barrages a également atténué les effets de la première onde de crue, limitant l'érosion des berges.

Dans la partie amont du cours du Sénégal, l'évolution hydrologique se manifeste par le remplacement progressif de la macrofaune testacée polyhalobe ou mésohalobe par des formes oligohalobes. La régularisation du cours du Sénégal se traduit par une moindre érosion des berges et par la prolifération du Gastéropode benthique oligohalobe *Melanoides tuberculata*.

TROISIEME PARTIE

L'EMBOUCHURE ET LA FACADE MARITIME: EVOLUTION MORPHOLOGIQUE ET SÉDIMENTAIRE

INTRODUCTION

La contribution de fleuves comme le Sénégal, fleuve tropical de savane, à l'apport en mer des matériaux issus de l'érosion mécanique des continents. est identifiée par la charge en suspension, principalement véhiculée au moment des crues (Probst, 1990 ; Mahé, 1993). Les apports plus grossiers, de nature sableuse, dont la première destinée est la sédimentation littorale, sont moins bien étudiés car les transits par charriage sur le fond sont difficiles à quantifier. Il était, par conséquent, intéressant de chercher à mettre en évidence les modifications de la zone maritime d'embouchure aussitôt après le blocage de l'essentiel de ces transports par le barrage de Diama et de tenter de déterminer aussi l'incidence de processus purement hydrauliques sur ces changements.

L'interaction du fleuve et de la mer conduit, dans le cas du Sénégal, à considérer non seulement l'évolution de la zone d'embouchure, faite en comparant l'imagerie satellitaire fournie par deux scènes SPOT (1er octobre 1986 et 28 novembre 1990), mais aussi les indices de stabilité de la Langue de Barbarie.

Cette étude a été réalisée à partir des stations de suivi topobathymétrique et d'analyse sédimentologique mises en place sur la Langue de Barbarie dans sa partie faisant face à Gandiole (*cf supra*) où six levés ont été exécutés au cours de la période 1989-91.

CHAPITRE VII

ETUDE DES MODIFICATIONS ENTRE DIAMA ET L'EMBOUCHURE D'APRES L'IMAGERIE SATELLITAIRE

E.H. Salif DIOP
Hervé CHEVILLOTTE

Le but de ce travail est de déterminer les modifications survenues entre 1986, juste après la mise en eau du barrage de Diama, et 1990, en particulier dans la zone estuarienne et l'embouchure du fleuve Sénégal.

1. MÉTHODOLOGIE

Deux images multispectrales du satellite SPOT, localisées entre le barrage de Diama et l'embouchure du fleuve Sénégal, (environ entre 16°05' lat. N et 16°25' long. W) ont été utilisées pour cette étude : la première (021-318) en date du 1er octobre 1986 et la seconde (021-318) en date du 28 novembre 1990. Nous les appelerons ci-après, pour simplifier, "image de 1986" et "image de 1990". Les logiciels et matériels employés pour leur traitement sont le logiciel «Planète» de l'ORSTOM sur station de travail couleur Unix et une station Micro-Péricolor 3100/MATRA MS2I de l'UTIS/CRODT (Unité de Traitement d'Imagerie Satellitaire-Centre de Recherches Océanographiques de Dakar-Thiaroye).

Pour la mise en évidence des modifications intervenues sur l'embouchure du fleuve Sénégal et le barrage de Diama, entre 1986 et 1990, la méthodologie a été la suivante :

— constitution de deux classifications dites supervisées d'après la méthode barycentrique pour les sous-régions du 28 novembre 1990. Ces classifications ont permis l'identification d'un certain nombre de classes ou thèmes grâce à l'utilisation conjointe de supports cartographiques tels que les cartes topographiques, géologiques et géomorphologiques au 1/200 000 des secteurs étudiés (fig.22 et 23) ;

— constitution d'une série de compositions colorées et d'une composition en pseudo-couleur (fig. 24 à 27) à partir d'imagettes 512 x 512 pixels montrant chacune des sous-régions à deux dates différentes.

— mise en évidence, sur les images de 1986 et 1990, des contours de l'embouchure du fleuve Sénégal à partir d'une transformation de voisinage par filtre médian et d'un traitement par filtrage sur chaque canal XS3 (fig. 28).

— étude comparative des images de 1986 et de 1990 à partir des résultats obtenus avec les compositions colorées et les classifications.

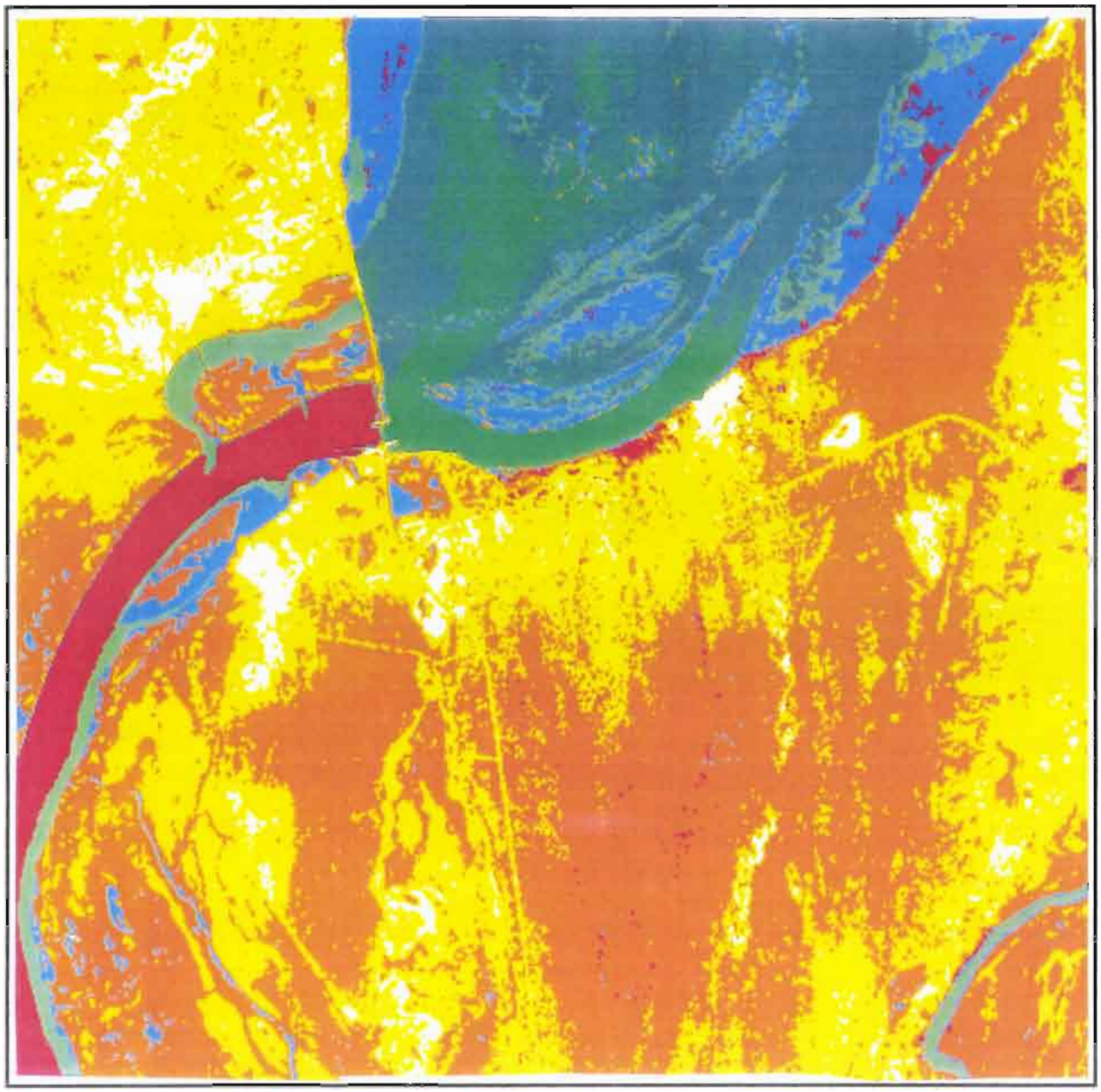
Enfin et dans tous les cas, les comptes numériques des canaux ont été utilisés sans correction des effets atmosphériques qui restent faibles sur cette partie septentrionale du Sénégal.

2. RÉSULTATS DE LA COMPOSITION COLORÉE ET DES CLASSIFICATIONS SUPERVISÉES.

L'interprétation de la composition colorée au niveau du barrage de Diama montre une nette différence du point de vue de la qualité de l'eau entre l'image d'octobre 1986 et celle de novembre 1990 (fig.24 et 25). Cela est dû en particulier à la situation du barrage de Diama :

— ouvert le 1er/10/86 avec, comme caractéristiques, des masses d'eaux saumâtres chargées en particules solides et totalement «homogènes» sur l'image.

— fermé (ou presque) le 28/11/90 puisque seules deux vannes sur sept étaient légèrement ouvertes avec un débit de 30 $m^3.s^{-1}$ (Ba, *comm. orale*) alors qu'en période de crue, lorsque toutes les vannes sont ouvertes, le débit varie approximativement entre 500 et 1400 $m^3.s^{-1}$. Du reste, cette fermeture du barrage de Diama demeure plus conforme aux observations tirées de l'interprétation de l'image SPOT du 28/11/1990.



Eaux fluviales

Mélange eaux douces-eaux salées

Eaux turbides (en amont du barrage de Diama)

Eaux turbides (zones plus profondes)

Zones dépressionnaires inondables

Végétation des cordons sableux littoraux

Surfaces réflectantes des cordons littoraux

Zones dénudées

Végétation chlorophyllienne

Fig. 22 : Classification dirigée de l'image SPOT du 28 novembre 1990 sur le barrage de Diama

Cette dernière image (fig. 24) est particulièrement intéressante puisqu'elle met en relief deux masses d'eaux différentes :

- en amont du barrage de Diama avec de l'eau douce turbide qui présente les comptes numériques les plus élevés dans les classes d'eaux, en particulier dans les canaux visibles ou proches du visible XS1 (0,50-0,59 µm) et XS2 (0,61-0,68 µm). Des concentrations de l'ordre de 42,9 $mg.l^{-1}$ ont été mesurées sur le terrain (Kane, *comm. orale*). On peut tout à fait bien distinguer les classes des eaux turbides en fonction de la profondeur de leur localisation. Par ailleurs, du fait que la digue mauritanienne n'était pas encore construite en rive droite et que le barrage était fermé, un net débordement des eaux douces turbides est clairement perceptible avec une vaste zone d'inondation que l'on peut aussi mettre en évidence sur l'image de 1986.
- en aval du barrage de Diama, les eaux sont beaucoup plus claires (elles apparaissent cependant en foncé sur l'image en pseudo-couleurs de la fig. 24) et moins chargées en particules solides. Elles sont plus salées (35 ‰ contre 0 ‰ pour les eaux de l'amont). Ces eaux correspondent à la classe 1 du tableau XIV en annexe.

2.1. DÉFINITION DES CLASSES SUR L'IMAGE DU BARRAGE DE DIAMA

D'après les travaux antérieurs sur le terrain et grâce aux cartes topographiques et géologiques du secteur étudié, neuf types de paysages ont pu être identifiés. Le dernier type représente la végétation très chlorophyllienne active. Il est basé sur le rapport XS3/XS2 car la végétation présente une réflectance plus forte dans le canal XS3 et plus faible dans le canal XS2 (tabl.XIV, en annexe). L'étude de la matrice de confusion pour l'image du barrage de Diama de nov.1990 (tabl.XV, en annexe) montre que toutes les classes définies sont restées stables à quelques exceptions près (classes 5 et 9 où les valeurs sont successivement de 78 et de 86 %). Il est cependant nécessaire d'opérer une segmentation plus fine pour la classe 6, afin de bien discriminer les zones de vasières anciennes des cordons littoraux récents.

2.2. DÉFINITION DES CLASSES SUR L'IMAGE DE L'EMBOUCHURE DU FLEUVE SÉNÉGAL

L'image de 1990 fait apparaître, par rapport à celle de 1986, des barres d'embouchure et des hauts-fonds (classe 5, tabl. XVI, en annexe) dont la présence explique, en plus de la fermeture du barrage de Diama, l'absence de ces importants panaches turbides, constitués d'eaux chargées d'argiles et de limons, qui se déversaient à cette période du maximum hydrologique sur le plateau continental au droit de l'embouchure du fleuve (fig. 26 et 27 de l'image de 1986). Au demeurant, on retrouve à peu près les mêmes classes taxonomiques (au nombre de 7) si l'on exclut les barres d'embouchure, visibles uniquement sur l'image de 1990.

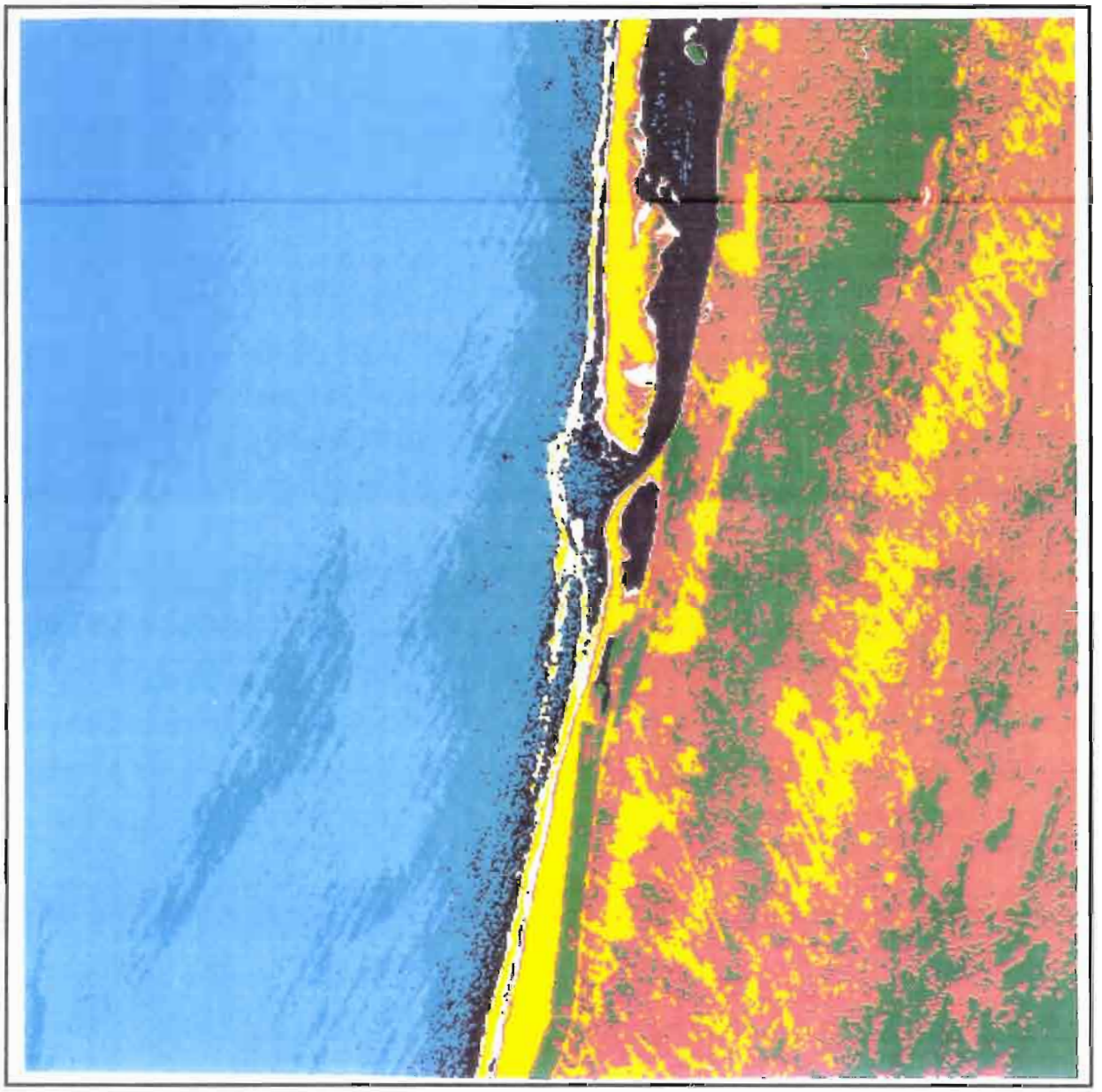
L'analyse de la matrice de confusion (tabl. XVII, en annexe) montre que ce sont les classes 4 et 5 (voir tabl. XVI) qui sont les moins bien définies. Pour une classification plus fine, il faudra nécessairement procéder à un redécoupage plus approprié. Les autres classes (eaux, sols, dunes semi-fixées, végétation active...) restent cependant stables. Leur détermination est donc correcte.

3. COMPARAISON DES IMAGES DE 1986 ET 1990

La première remarque relève de l'extension méridienne très visible de la Langue de Barbarie ainsi que son élargissement dans sa partie distale. En effet, la comparaison des deux images montre une extension très nette de cette flèche sableuse vers le sud atteignant entre 3400 et 3600 m sur l'image SPOT de 1990 (fig. 28) ; ce qui a visiblement contribué au rétrécissement de la zone de l'embouchure du fleuve, puisque seulement 120 m de large ont été mesurés contre 360 à 400 m sur l'image de 1986.

La deuxième remarque est que, entre 1986 et 1990, la flèche sableuse de la lagune de Mboumbaye s'est au moins raccourcie de 2500 à 3000 m face à la progression concomitante de la Langue de Barbarie. Sur l'image de 1990, la lagune de Mboumbaye se trouve refermée car la partie distale de la flèche sableuse orientée sud-nord s'est accolée au rivage. Cette nouvelle disposition de la flèche de Mboumbaye met en évidence une lagune complètement isolée du reste des eaux du fleuve et du proche océan.

La troisième remarque est qu'une barre d'embouchure nettement visible, car émergée à marée basse, commence à se développer, contribuant à accroître les phénomènes de colmatage et de sédimentation. Visiblement et du fait de la mise en place du barrage anti-sel, le fleuve Sénégal ne fonctionne plus comme auparavant entre Diama et l'embouchure. Ainsi la dynamique marine prend nettement le pas sur la dynamique fluviale, avec des séries d'édifications sableuses perceptibles sur l'imagerie de 1990 qui semblent plaider en faveur d'une progradation vers le large de cette partie sud de l'embouchure du fleuve Sénégal. Bien entendu, les panaches turbides identifiés pour la même période sur l'image de 1986 sont quasiment absents.



Eaux profondes claires

Eaux intermédiaires

Eaux turbides (zone de déferlement des vagues)

Mélange eaux fluviales-eaux de mer / Hauts-fonds

Barres d'embouchure et hauts-fonds

Sols sableux dénudés et minéralisés

Dunes semi-fixées (peu couvertes de végétation)

Végétation active (saine et chlorophyllienne)

Fig. 23 : Classification dirigée de l'image SPOT du 28 novembre 1990 sur l'embouchure du fleuve Sénégal

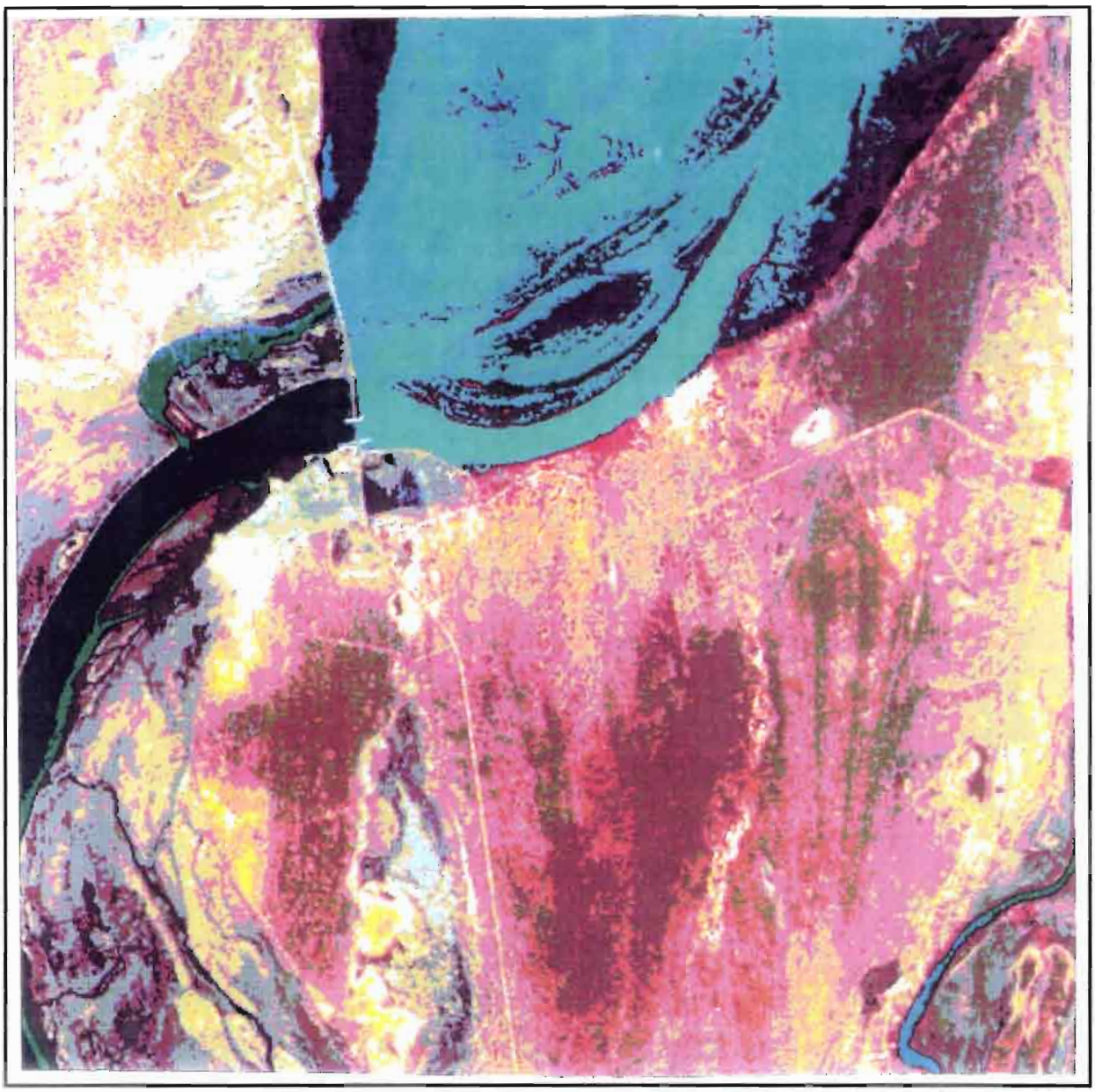


Fig. 24 : Composition colorée de l'image SPOT du 28 novembre 1990 sur le barrage de Diama *(établie avec le logiciel Planète)*

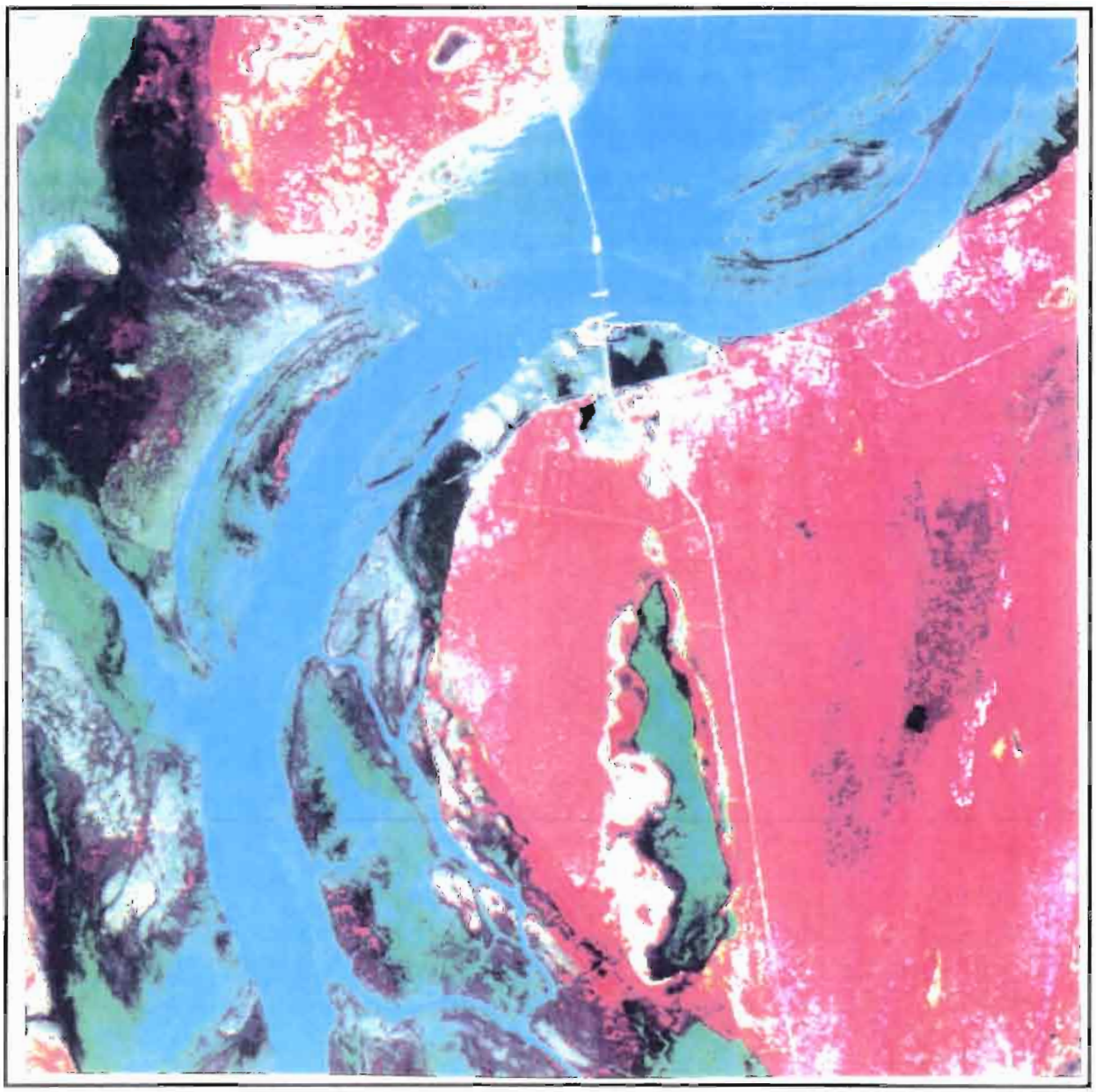


Fig. 25 : Composition colorée de l'image SPOT du 1er octobre 1986 sur le barrage de Diama *(établie avec le Péricolor 3100/Matra MS21)*

Fig. 26 : Composition colorée de l'image SPOT du 1er octobre 1986 sur l'embouchure du fleuve Sénégal *(établie avec le Péricolor 3100/Matra MS21)*

Fig. 27 : Transformation de voisinage par filtre médian sur le canal XS3 et composition en pseudo-couleurs de l'image SPOT du 1er octobre 1986 . Embouchure du fleuve Sénégal
(établie avec le Péricolor 3100/Matra MS2I)

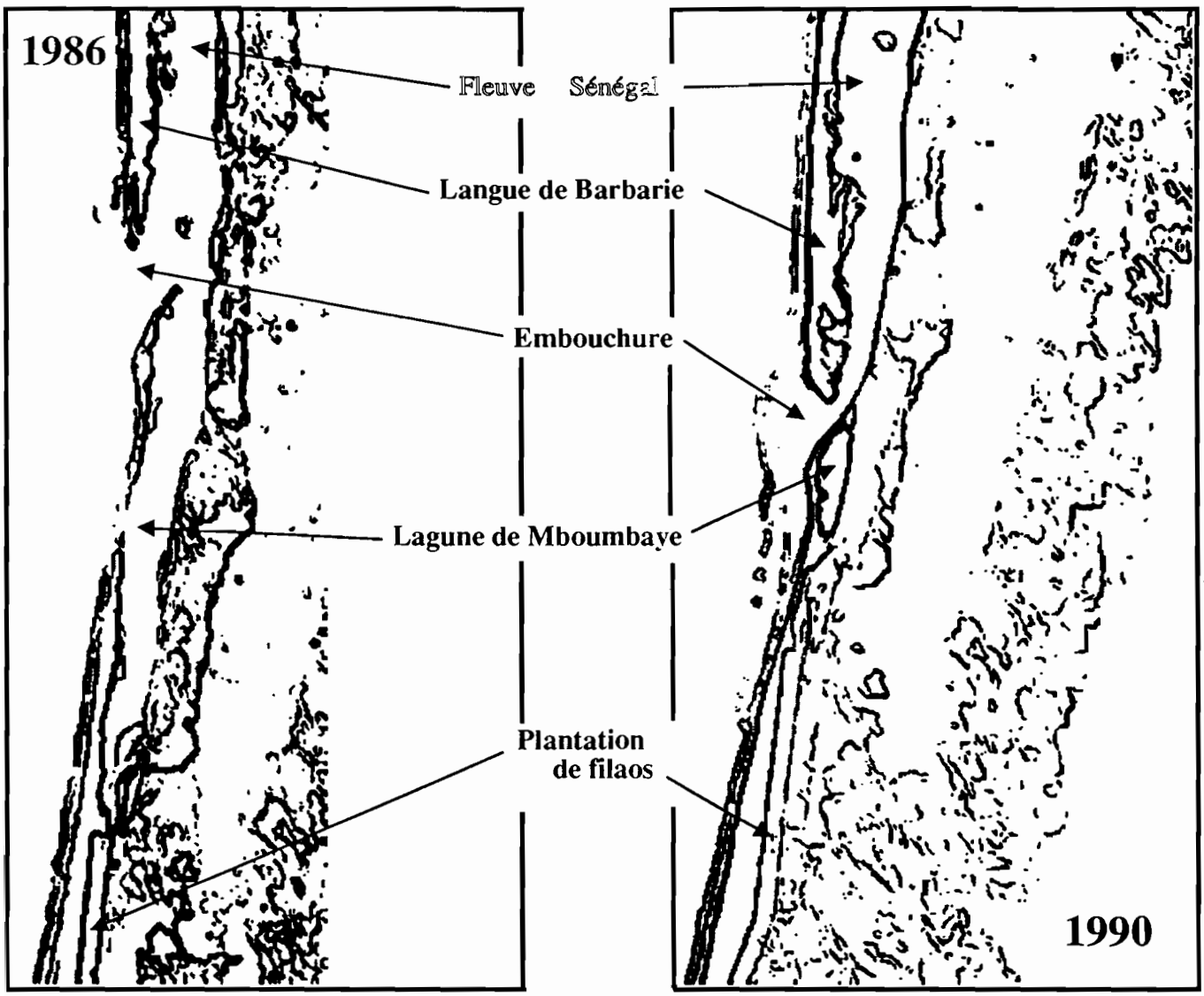


Fig. 28 : Variations de l'embouchure du fleuve entre 1986 et 1990

4. CONCLUSION

Assiste-t-on à des phénomènes durables pouvant aboutir, de nouveau, à la fermeture de cette embouchure ? Cela est possible car la construction du barrage de Diama a contribué à réduire très fortement les phénomènes « d'effets du chasse » qui étaient provoqués jusqu'à présent par le déversement régulier des eaux du fleuve Sénégal, en particulier à la date de son maximum hydrologique (septembre/octobre ou octobre/novembre). Du reste, la fermeture quasi-constante du barrage continuera à favoriser l'extension vers le sud de la flèche sableuse de la Langue de Barbarie qui pourrait sous peu s'accoller au littoral. Devrait-on alors, à titre d'hypothèse, assister encore une fois à l'ouverture d'une embouchure plus septentrionale ?

Ainsi cette étude diachronique par comparaison de deux images SPOT a montré que, dans la zone du littoral près de l'embouchure du fleuve Sénégal, la mise en place du barrage de Diama a entraîné des changements notables dans l'équilibre dynamique du système fluvio-lagunaire dans le sens d'une sédimentation plus accrue avec une fermeture de la lagune de Mboumbaye (fig.28). D'où la nécessité d'un programme de surveillance continue de la côte dans ce secteur ; c'est l'une des conclusions de l'opération 2 du projet CAMPUS sur l'après-barrages dans la vallée du Sénégal.

CHAPITRE VIII

PROCESSUS HYDRO- ET MORPHO-SEDIMENTAIRES ET STABILITE DE LA FACADE DU DELTA

J. Paul BARUSSEAU
Cyr DESCAMPS
Bachir DIOUF
Alioune KANE
Jean-Luc SAOS

Sur les côtes sableuses, en mer à faible marée (microtidale), l'équilibre du trait de côte est assuré par une alimentation en matériel sédimentaire issu des bassins-versants. Ce matériel transite le long de la côte à l'intérieur d'une étroite bande qui comprend aussi bien la partie émergée du profil (le cordon littoral et la plage) que sa partie immergée (l'avant-côte). A l'intérieur de cette bande, le jeu des facteurs du transport sédimentaire (la houle et le vent) induit aussi des migrations transversales, notamment vers le large, favorisées par la pente moyenne du profil transversal. Cette exportation du matériel vers le large (érosion) est contrebalancée, dans une certaine mesure, par l'intensité des apports terrigènes et par l'activité de certaines houles.

L'équilibre des côtes sableuses est donc le résultat d'un bilan qui ne concerne pas seulement la plage mais tout le profil actif, du sommet du cordon dunaire aux fonds de 10 à 20 m selon les cas. Le rôle de l'avant-côte est particulièrement sensible. Le rythme des échanges obéit à des logiques diverses inscrites dans des échelles de temps variées ("coups de mer", saison, périodicités pluriannuelles,...).

La bordure maritime du delta du fleuve Sénégal entre dans cette catégorie de littoraux. C'est un système complexe et instable sous l'effet de la conjugaison de phénomènes naturels et de phénomènes anthropiques qui sont, dans la région, principalement liés à l'installation du barrage de Diama et motivent la présente recherche.

1. LES TENDANCES

On se bornera ici à souligner les caractères du domaine régional qui entrent dans le cadre du sujet. Ils concernent l'évolution récente du domaine deltaïque dont la Langue de Barbarie constitue la marge maritime et les données sur les variations actuelles du milieu littoral émergé.

1.1. EVOLUTION RÉCENTE

Le delta du fleuve Sénégal s'ouvre par une embouchure dont la position variable perce un cordon littoral NS : la Langue de Barbarie. Cette situation est l'aboutissement d'une évolution qui se confond avec l'histoire géologique récente du delta. Nous nous limiterons à en présenter brièvement deux aspects concernant l'étape ultime de construction fini-holocène du delta et l'établissement moderne de la Langue de Barbarie.

1.1.1. Evolution fini-holocène du delta.

A l'issue du cycle glaciaire correspondant au dernier Würm, le cours fluvial évolue rapidement (Monteillet, 1988). Les premières incursions marines se manifestent il y a 12 000 ans avant le Présent (B.P.) dans le delta et à partir de 8 600 ans B.P. dans la basse vallée.

A partir de 10 000 ans B.P., on distingue mieux les différents secteurs deltaïques dont les limites sont fluctuantes. Le prodelta se caractérise par un faciès de vasières littorales, le front deltaïque présente des intercalations de cordons sableux coquilliers, déjà rencontrés auparavant, alors que la plaine deltaïque montre

des chenaux à remplissage sableux associés à des interbras vaseux. Le climat montre une tendance à l'assèchement.

Vers 8 000 ans BP., la mer s'insinue dans un paléochenal de la plaine deltaïque qui se trouve comblé par la floculation de suspensions fluviatiles. Vers 7 000 ans BP, la montée de la mer soumet la plaine deltaïque à une dynamique plus intense et des cordons sableux typiques du front deltaïque sont mis en place. Vers 5 500 ans BP. le niveau océanique cesse de monter tandis que des cordons constituent à nouveau des îles-barrières à l'abri desquelles le lacis des chenaux deltaïques évolue en un vaste système lagunaire. L'influence fluviatile prédomine alors en raison d'une communication plus difficile du delta avec l'océan.

Dans les affluents deltaïques de l'amont, les séquences holocènes montrent, surtout dans la deuxième moitié de cet épisode, l'invasion marine d'un lac (le Rkiz) et du cours inférieur d'un fleuve côtier (le Ferlo) ; en même temps, ce dernier cesse de couler.

1.1.2. Construction de la Langue de Barbarie.

Les résultats présentés proviennent pour l'essentiel de l'étude de Gac *et al.* (1981). Des embouchures antérieures sont répertoriées au nord de Saint-Louis sur les cartes anciennes. Elles apparaissent dans la morphologie actuelle sous la forme de dépressions formées près des Maringouins et du marigot de Boydet. Au XVIIe siècle, l'embouchure est située dans les environs de Saint-Louis qu'elle atteint avant 1850. De 1850 à 1900, l'extension de la flèche à l'extrémité de laquelle s'ouvre le fleuve est observée jusqu'à 15-16 km au sud et, pendant cette période, sept ruptures sont recensées. En 1900 commence la fixation du cordon littoral de la flèche par les filaos. En 1981, le déplacement atteint 21-22 km au sud de Saint-Louis et 13 ruptures sont connues entre 1900 et 1981; six d'entre elles seulement sont importantes (en durée et en dimension), de telle sorte qu'une périodicité moyenne de 14 ans est souvent évoquée pour expliquer l'importance de la remontée de la langue salée dans le lit mineur du fleuve. Les possibilités maximales d'extension de l'embouchure semblent limitées à une trentaine de kilomètres (27 km en 1959) car la flèche se raccorde alors au rivage "naturel".

1.2. L'ÉVOLUTION ACTUELLE DE LA PLAGE ET DU CORDON LITTORAL.

On n'a pas d'observations détaillées sur la plage de la Langue de Barbarie, mais seulement plus au sud, dans la région de Mboro, où le projet d'une implantation portuaire (Port-Sedar) avait conduit à un certain nombre d'études du milieu littoral.

La comparaison de photos aériennes au 1/50 000 de 1954 (mission 10 F 083) et de 1974 (mission 74 SEN 9/350C) a permis de mesurer un recul du pied de la dune vive de 50 m en moyenne (30 à 70 m selon les secteurs) en 20 ans. Il n'est pas directement possible d'inférer un recul parallèle de la ligne de rivage en raison des incertitudes que recèle l'appréciation de la position de ce contour sur des clichés où les zones humides sont sources de confusion. En outre, au 1/50 000, 50 m ne représentent qu'un millimètre ! On doit rapprocher cette observation de mesures faites plus au nord, dans la région de Nouakchott (Barusseau, 1985), où un recul de la ligne de rivage de l'ordre de 1 $m.an^{-1}$ a été mis en évidence.

2. LES AGENTS PHYSIQUES

Le bilan sédimentaire du domaine littoral est principalement réglé par des facteurs océanographiques et météorologiques.

2.1. LES FACTEURS OCÉANIQUES.

2.1.1. Les courants.

Les eaux de la côte ouest-africaine sont soumises à l'influence de deux courants, le courant froid des Canaries (au nord du Cap Vert) et un contre-courant chaud équatorial (courant de Guinée).

De novembre à mai, sous l'action des alizés, les eaux chaudes et légères de surface sont chassées vers le sud-ouest. Les eaux côtières superficielles sont alors remplacées par des eaux d'upwelling qui amènent en surface des eaux profondes plus froides. D'abord de direction nord-sud, le courant des Canaries, sous l'action de la rotation terrestre, bifurque franchement à l'ouest à la hauteur des Iles du Cap Vert.

De mai à octobre, les eaux accumulées par le contre-courant équatorial dans le Golfe de Guinée se mettent à dériver vers le nord et en surface tout contre la côte ouest-africaine. Les différences de provenance, de température et de densité des masses d'eau alors en mouvement peuvent être à l'origine du caractère instable des écoulements observés en hivernage. De novembre à mai, ce courant disparaît en surface mais subsiste tout de même à 100 m de profondeur.

Contrairement à ce qu'on pourrait penser, l'influence de ces courants n'est pas négligeable. Lors d'une campagne de mesures réalisées au large de Mboro (15°08'27" N, 16°58'12" W) en 1980-81, la Sogreah (1981) a mesuré à 9 m de profondeur, des valeurs mensuelles moyennes de 2 à 10 $cm.s^{-1}$ s'échelonnant de décembre-janvier (plus fortes vitesses) à avril-mai (vitesses les plus faibles). Dans le même temps, des maximums étaient relevés entre 17 et 32 $cm.s^{-1}$ avec la même répartition temporelle. Il s'agit de courants orientés pour l'essentiel parallèlement au rivage. En dépit de l'existence d'une composante de marée (cf. paragraphe suivant), les courants peuvent conserver une même orientation pendant plusieurs jours, soulignant ainsi une certaine indépendance vis-à-vis de la composante tidale. On verra également que le vent peut jouer un rôle sensible dans la distribution des courants, de telle sorte que le courant de fond peut être d'orientation inverse par rapport au courant de surface.

2.1.2. La marée.

La marée sur les côtes sénégalaises est de type semi-diurne. Elle est connue à Dakar, port de référence. A Saint-Louis, elle est faiblement décalée dans le temps par rapport à Dakar.

Le marnage est microtidal (tabl. 23), à peine supérieur à 1 m en vive-eau et à 0.5 m en morte-eau

	VE moyenne		ME moyenne	
	PM	BM	PM	BM
Dakar	1,60	0,40	1,30	0,70
St Louis	1,60	0,35	1,25	0,70
Mboro	1,60	0,30	1,20	0,70

Tabl. 23 : Marnages sur la côte nord du Sénégal.

Les courants déterminés par la marée ne sont sensibles qu'à l'approche du Cap-Vert en raison de la protrusion de la péninsule en mer. Leur vitesse peut atteindre jusqu'à 40 $cm.s^{-1}$. Plus au nord, ils s'atténuent. Un rapport, établi dans la perspective de la construction de Port-Sedar, envisage cependant des vitesses de 35 $cm.s^{-1}$ vers le nord. Ces valeurs sont, comme on l'a vu, en contradiction avec les mesures réalisées par la Sogreah (1981), soulignant que la participation alternée biquotidienne de la marée est faible et ne suffit pas à modifier l'orientation du courant général.

2.1.3. La houle et les vagues.

La distinction entre les deux phénomènes résulte de l'origine de la perturbation. Les vagues sont engendrées localement par les vents soufflant sur la surface de la mer ("mer de vent"); elles ont un caractère irrégulier tant en période qu'en hauteur. Les houles sont liées à l'activité de centres météorologiques perturbés généralement lointains : elles représentent la composante filtrée et régularisée de la mer de vent et, de ce fait, offrent des longueurs d'onde et des périodes plus constantes ; les hauteurs sont toutefois moins uniformes et les différentes ondulations de la houle, caractérisées par des hauteurs alternativement croissantes et décroissantes, se succèdent en "trains de vagues".

A la côte, les houles ont une influence beaucoup plus importante en raison de leur caractère organisé et aussi d'une plus grande stabilité dans le temps. C'est, en conséquence, des houles dont nous parlerons.

a) La houle au large.

Les études faites pour des aménagements côtiers par différents consultants (Nedeco, 1973, Sogreah, 1981) ainsi que des observations établies par les auteurs (Barusseau, 1980) montrent que la houle

prédominante provient du quadrant NW (N 320 à N 360). En période de mousson (hivernage), la houle est de secteur SW pendant un quart à un tiers du temps.

L'amplitude significative excède rarement 3 m de hauteur, mais la houle de probabilité décennale est estimée à 5 m, celle de probabilité centennale à 6,2 m. La houle de hauteur maximale (= 1,8 fois la hauteur significative) intervient généralement pendant les mois d'octobre et janvier, venant du secteur nord. D'après Nedeco (1973), l'interférence de la houle et des vagues provoque une agitation légèrement supérieure à celle de la houle seule.

Les classes de hauteurs les plus fréquentes pour les deux régimes saisonniers reconnus (respectivement de juin à septembre et d'octobre à mai) d'après 25 000 observations navales de la Deutscher Wettendienst vont de 0,75 à 2,25 m. Le secteur N 300 à N est très bien représenté dans les deux périodes tandis que le secteur N 180 à N 240 l'est surtout dans celle qui va de juin à septembre.

b) La houle à la côte.

La déformation de la houle à l'approche de la côte se manifeste par une modification de sa hauteur, de sa longueur d'onde et de son incidence. Dans son profil, la houle devient asymétrique avant de briser sous la forme d'un rouleau dont la distance au rivage dépend du rapport profondeur/hauteur. Comme celui-ci varie pour les différentes vagues d'un train de houle, la distance change. On parle de zone des brisants pour cette région turbulente et dangereuse qui, sur les côtes africaines, constitue la "barre". Entre la barre et la côte, l'eau résultant de l'effondrement des brisants successifs est jetée vers le rivage (zone de déferlement) dans une direction presque orthogonale à celui-ci, mais qui admet, le plus souvent, une composante longitudinale, en fonction de l'incidence terminale de la houle. Cette composante, nourrie par chaque vague qui brise, approvisionne un courant longitudinal, circulant entre le rivage et la zone des brisants : le courant de dérive littorale. Il est généralement orienté du nord au sud sur la côte nord-sénégalaise. Ce courant, une fois dépassé le débit maximal possible compte-tenu de la géométrie de la zone de déferlement, se réoriente brutalement vers le large et restitue alors l'eau accumulée, sous forme d'un courant sagittal (*rip-current*) de compensation.

Dans la zone du *rip-current*, la morphologie des fonds est profondément remaniée. L'avant-côte est marquée de sillons perpendiculaires au rivage, profonds de 0,6 à 1,3 m et larges de 3 à 5 m. Ils se succèdent régulièrement sur une zone de 30 à 40 m. Les vitesses mesurées indiquent des valeurs allant jusqu'à 0,30 $m.s^{-1}$. Elles se corrèlent assez bien avec des valeurs calculées (notamment par la formule d'Eagleson : 0,5 à 0,2 $m.s^{-1}$ selon Nedeco, 1973).

Enfin la dernière composante de la courantologie littorale qui résulte de la déformation de la houle à la côte est une série de mouvements en zig-zag au niveau de la ligne de rivage, liés à la montée de la nappe d'eau de déferlement au-dessus du niveau de la mer au repos. Dans cette zone de jet de rive, le mouvement ascendant entraîne l'eau sur la basse plage où elle remonte le long d'une surface courbe, en général fortement inclinée, limitée en amont par une crête de berme. Au mouvement ascendant de jet de rive fait suite le retrait qui ramène l'eau à la mer où elle rencontre la vague suivante, produisant au niveau de la ligne de rivage, un talus de quelques 20 à 30 cm : la barre de collision.

2.2. LE VENT

Les régimes de vent dans la région côtière du fleuve sont déterminés par quatre centres d'action : trois anticyclones (Açores, Sud-Tunisien, Sainte-Hélène) et un centre dépressionnaire (Sahara).

L'anticyclone des Açores dirige en bordure ouest de l'Afrique un flux de nord à nord-est, l'alizé maritime. L'anticyclone du Sud-Tunisien est responsable de vents du secteur E à NE (alizé continental et harmattan). L'anticyclone de Sainte-Hélène oriente, pendant l'hivernage, les flux de mousson.

Le premier régime est très dominant. D'après les observations réalisées à Yoff, on rencontre l'alizé maritime pendant 73 % du temps. Les flux de S à W existent, quant à eux, pendant 20 % du temps. Les vitesses sont souvent notables : de 7 à 14 $m.s^{-1}$ pendant 46 % du temps, de 5 à 6 $m.s^{-1}$ pendant 38 %, des vents inférieurs à 4 $m.s^{-1}$ pendant le reste.

L'hydrologie superficielle peut être affectée de manière importante par le vent qui chasse l'eau de surface et provoque ainsi une circulation de courants compensateurs. Le phénomène est bien marqué avec les vents du secteur nord à nord-est qui écartent l'eau superficielle de la côte et déterminent ainsi un écoulement de fond vers le rivage. Selon Nedeco (1973), il existe une relation entre la répartition sur la verticale de ce courant

en vitesse (u*) et direction et la vitesse W du vent, mais cela n'est valable que pour des vents perpendiculaires au trait de côte. La relation $u^*_{max} = -19{,}4\ W$ (avec u* en mètres par heure tandis que W est en mètres. s^{-1}) fournit donc un maximum ; le signe moins indique que le courant est de sens opposé.

3. LES OBSERVATIONS TOPOBATHYMÉTRIQUES

Le profil topobathymétrique de la Langue de Barbarie et de son avant-côte comprend trois sections : la plage avec son cordon dunaire, la proche avant-côte et le glacis. Les deux premières sont sujettes à d'importantes variations ; le glacis présente de modestes transformations qui, en général, ne conduisent qu'à de faibles translations d'ensemble du profil.

Le secteur de la base permanente de Gandiole (fig. 10) peut être découpé en deux parties : le nord de la base large (P1 - P4) et la base serrée (P5 - P13) d'un côté, le sud de la base large de l'autre. La différence entre ces deux domaines est dans la pente moyenne, plus faible au sud qu'au nord (respectivement 0,95 à 1,37 % et 1,71 à 1,94 %).

3.1. CARACTÈRES GÉNÉRAUX

La morphologie générale de la zone marine comprend un secteur fluctuant entre le rivage et les fonds de -3 à -4,5 m. La limite inférieure est éventuellement marquée par une barre sédimentaire dont le relief, quand il existe, ne dépasse pas un mètre. Cette barre d'avant-côte n'est parfois qu'un épaulement infléchissant la courbe du fond, parfois elle disparaît dans le changement de pente qui sépare l'avant-côte du glacis.

La pente moyenne de l'avant-côte *sensu stricto* présente des valeurs intermédiaires au niveau de la base serrée de l'observatoire (bornes P5 à P12) par rapport au nord (P1) où la pente est plus forte et au sud (P15 et 16) où elle est plus faible. En réalité, les valeurs moyennes cachent une forte disparité dont l'amplitude dépasse la valeur de la mesure. Sur P10, la valeur la plus faible (juin 1990) atteint 1,13 % tandis que la plus forte (nov. 1991) s'établit à 3,22 %. Sur P16, ces limites sont respectivement 0,78 % (juin 1991) et 3,24 % (juin 1989).

La pente moyenne du glacis montre moins d'écarts (1,67 à 2,30 %), sauf au sud, toujours caractérisé par des valeurs plus faibles (0,88 et 1,35 %). Là encore, de fortes variations au cours du temps relativisent l'intérêt de ces valeurs moyennes.

Les caractères du domaine littoral peuvent être mieux appréciés en examinant successivement:
- les changements dans la position de la ligne de rivage.
- les modifications des profils.
- les variations cartographiques de la bathymétrie.

PROFIL	1-10-89	1-06-90	1-10-90	1-06-91	1-11-91
P 1	31	41	123	41	31
P 5	41	51	72	72	-31
P 6	00	20	41	82	51
P 7	62	51	82	82	72
P 8	72	41	72	51	62
P 9	00	-10	00	00	-10
P 10	-10	31	-10	00	41
P 11	00	123	93	93	113
P 12	-5	10	00	-10	-5
P 15		41	20		51
P 16		00	-31	-82	

Tabl. 24 : Variation (en m) de la position de la ligne de rivage par rapport à la situation de juin 1989.

3.2. CHANGEMENTS DANS LA POSITION DE LA LIGNE DE RIVAGE

Ils sont indiqués dans le tableau 24 en rapport avec la position qu'elle occupait en juin 1989. En effet on constate, à l'issue de la saison sèche 1988-89, un maximum de recul de la côte sur la majorité des profils. Cette étroitesse de la plage représente un état de dégradation qui peut être pris comme référence pour mesurer les aggravations éventuelles et leur localisation.

D'une manière générale, le rivage a progressé, jusqu'en octobre 1990 - juin 1991, dans la partie septentrionale de la zone. Dans la moitié sud de la base serrée, un recul s'instaure au contraire dans cette période, mais la tendance s'inverse ensuite de nouveau. L'opposition est nette, à cet égard, entre les profils de P9 et P10. On doit noter également qu'entre octobre 1989 et juin 1990 la croissance de la largeur de la plage subit un ralentissement ou s'inverse même (P9), de telle sorte qu'on peut imaginer l'existence d'un transfert de matériaux de la zone nord vers la zone sud. A l'extrémité méridionale (P15 et P16), l'évolution est également très contrastée. Il y a donc en permanence, sur l'étendue du rivage, des secteurs en érosion quand d'autres s'engraissent.

3.3. MODIFICATION DES PROFILS

Les profils topobathymétriques sont présentés dans les figures 29.

3.3.1. La partie émergée

On part, en juin 1989, d'une situation où la plage est très rétrécie et généralement basse. L'arrière-plage, dans ces conditions, est en pente redressée pour se raccorder au pied du cordon dunaire. Sur certains profils (P5, P7...), une bâche d'arrière-berme peut se situer sous le niveau de BM.

Dans la période ultérieure, la plage se construit. Cette accrétion est en moyenne de 60 m sur la base serrée (nulle sur P9 et maximum 125 m sur P11). La progradation correspond à l'édification d'une moyenne plage s'articulant avec le revers de berme au niveau d'une bâche de HM. Entre juin et octobre 1989, ce processus s'est réalisé en deux phases marquées par la formation de deux bermes successives (*cf* P5, P8) dont la plus interne est fossilisée par la berme vive observée en octobre.

La berme vive présente une crête située au voisinage de +2 m par rapport aux BM. Elle est précédée par un estran de jet de rive étiré sur une trentaine de mètres et dénivelé d'environ 2 m par la marée ; la pente y est généralement forte (de 5 à 7 %).

3.3.2. La partie submergée.

Compte-tenu de l'existence de la "barre" des houles, la partie la plus proche de la côte n'a pu être systématiquement sondée. Dans ce cas, le raccordement linéaire est une interpolation des données obtenues entre le point le plus distal de la plage et la dernière sonde bathymétrique, au large immédiat de la barre. Cependant nous sommes en droit de penser que ce type de raccordement présente une bonne identité avec la réalité. On voit par exemple, sur le profil P1 de juin 1990 (fig. 29), qu'une barre d'avant-côte existe, les conditions de navigation permettant alors l'approche du rivage. Le profil P5 de la même période ne montre qu'un faible épaulement.

C'est le point le plus significatif de ce littoral que la présence intermittente (20 % des cas) d'une barre sédimentaire d'avant-côte. Elle se manifeste alors sous la forme d'une ride culminant à -3 m au nord de la base serrée, -4 m au sud. Il ne semble pas y avoir de relation entre la situation météorologique générale (en particulier l'alternance saisonnière) et l'occurrence de la barre. Ainsi, elle est observée surtout en juin 1990 et en novembre 1991. Elle est donc plutôt le résultat d'un régime annuel des houles qu'une caractéristique de la saison.

La formation de la barre sédimentaire d'avant-côte et son évolution font que la proche avant-côte est le secteur où s'effectue le maximum des modifications morphosédimentaires. Au-delà, les changements observés sont plus faibles et, sur l'ensemble des profils, les tracés se regroupent dans un faisceau de courbes identiques. Compte-tenu de la précision maximale, de l'ordre de 30 cm, sur les mesures bathymétriques, on peut en conclure que les changements sur le glacis représentent des variations d'épaisseur sédimentaire sans doute inférieures à 50 cm. Cependant, les profils de la base large (P1, P15 et P16) montrent que parfois des modifications plus importantes peuvent survenir, même à une distance éloignée de la côte.

Au-delà de -10 m, les tracés rejoignent des fonds qu'à l'échelle de temps de l'étude on peut considérer comme invariants.

La localisation des profils est indiquée sur la figure 10

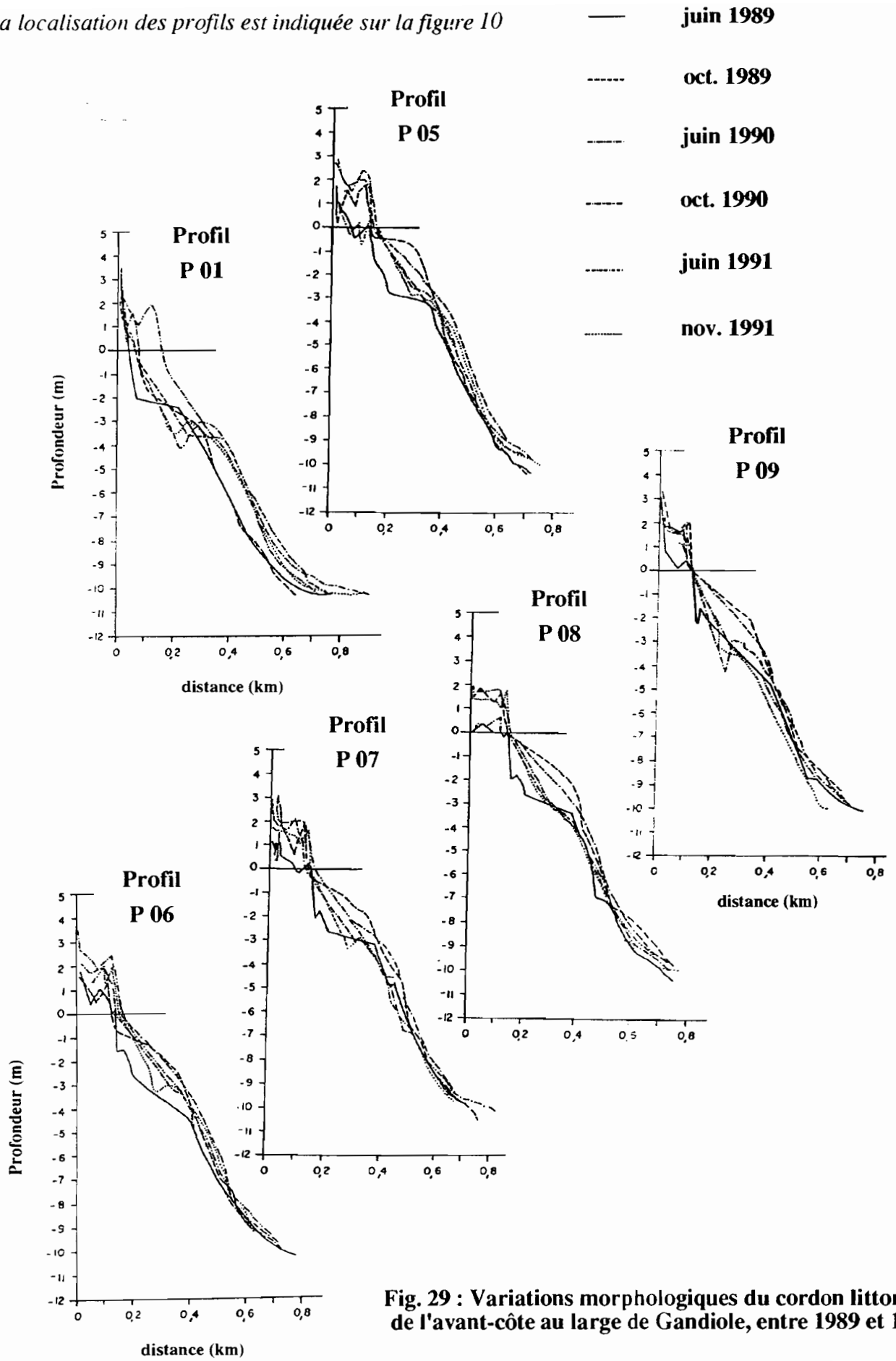


Fig. 29 : Variations morphologiques du cordon littoral et de l'avant-côte au large de Gandiole, entre 1989 et 1991

La localisation des profils est indiquée sur la figure 10

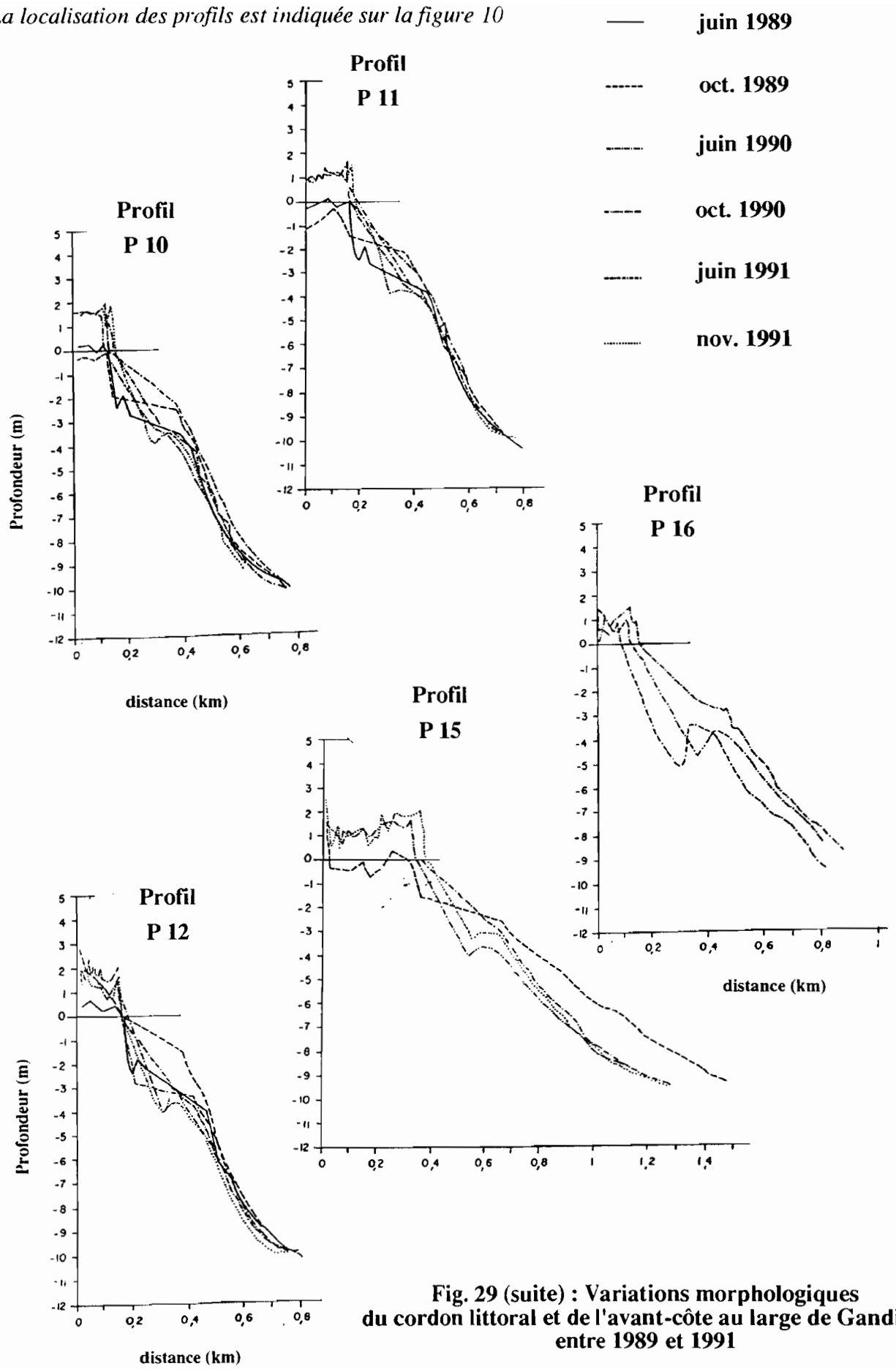


Fig. 29 (suite) : Variations morphologiques du cordon littoral et de l'avant-côte au large de Gandiole, entre 1989 et 1991

Au cours des trois années étudiées, on ne peut donc pas dire qu'il y ait eu une évolution négative du littoral de la Langue de Barbarie dans la région de Gandiole.

Plus intéressante est sans doute l'observation d'une forte disparité des situations dans l'espace et le temps, ainsi que le constat d'une dominance des évolutions interannuelles sur les rythmes saisonniers. Comme la période d'étude est trop courte pour recouvrir la totalité des situations possibles, il faut donc avoir à l'esprit que des évolutions brutales peuvent, hors de toute périodicité, entraîner une modification - positive ou négative - du profil et, par voie de conséquence, de la position de la ligne de rivage.

3.3.3. Recherche d'une prémodélisation.

La courbe-enveloppe de tous les profils obtenus sur la base serrée permet de caractériser un profil moyen à partir duquel on peut chercher à adapter une fonction représentative. Habituellement (Quelennec, 1984), c'est une fonction puissance de type $y = ax^b$. Ici, on constate qu'il n'est pas possible de trouver une fonction unique exprimant la courbe obtenue qui se décompose en deux sections de part et d'autre de l'épaulement. Ces deux courbes fondamentales porteuses du profil ont pour équations :

-sur la proche avant-côte: $y = 0{,}10 \text{ à } 0{,}15.\ x^{0{,}50 \text{ à } 0{,}65}$
-sur le glacis: $y = 0{,}20.\ x^{0{,}50 \text{ à } 0{,}60}$
avec y = profondeur (m) et x = distance à la côte (m).

Plus au sud (P14 et P15), les valeurs du paramètre **a** ne changent pas ; par contre le paramètre **b** augmente, atteignant 0,70 à 0,80.

Reportées dans le diagramme a = f(b) de Quelennec (1984), ces valeurs indiquent une sensibilité à l'érosion - manifeste au niveau du glacis - sur la base serrée, tandis que plus au sud, près de l'embouchure, la Langue de Barbarie est nettement en accrétion, ne montrant aucun signe de sensibilité à l'érosion.

3.4. VARIATIONS CARTOGRAPHIQUES

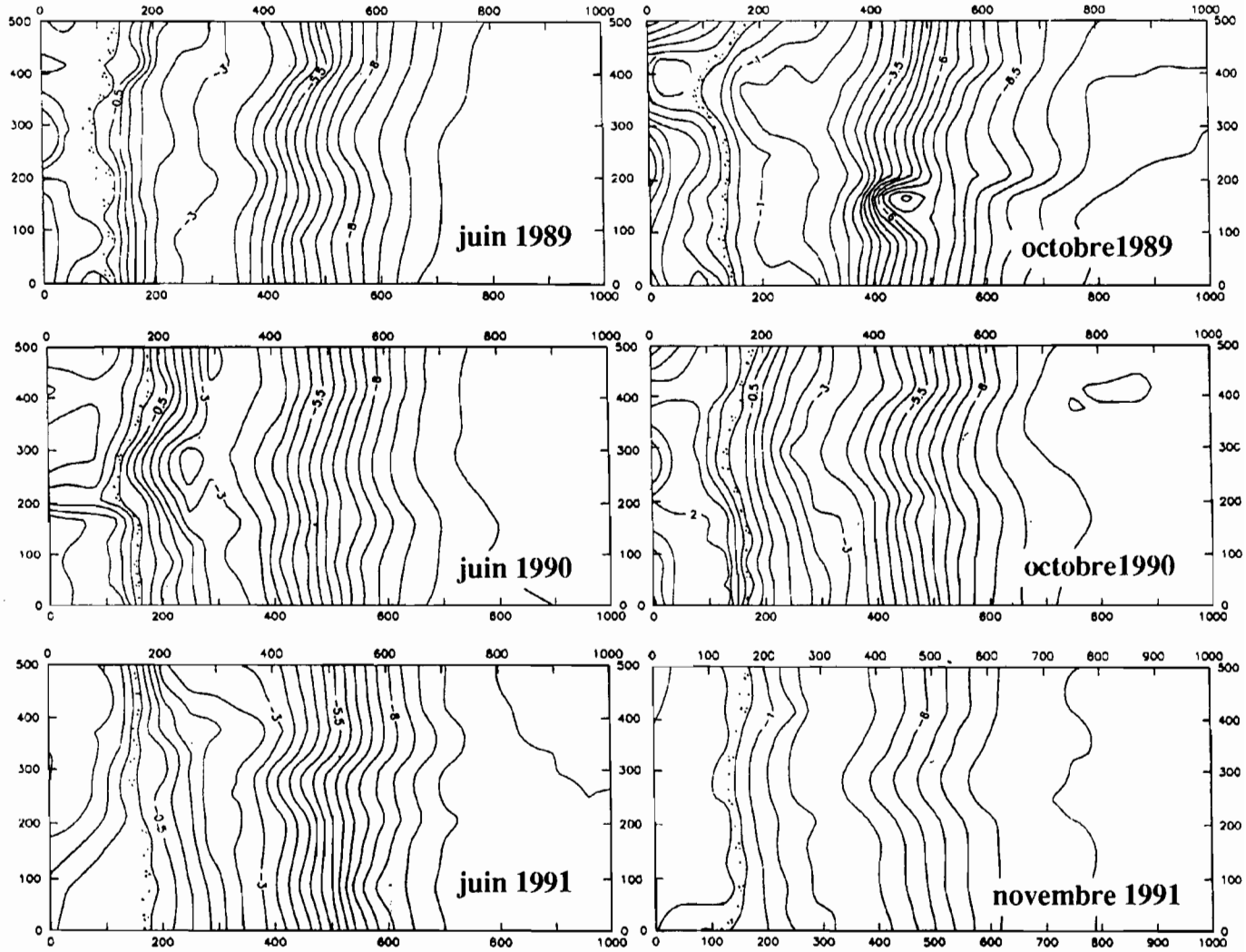
Elles ne concernent que la base serrée, où les profils sont suffisamment rapprochés les uns des autres pour autoriser une interpolation.

Dans les cartes de la figure 30, la représentation concerne aussi bien la partie émergée (plage et base du cordon dunaire) que la partie sous-aquatique (avant-côte). La ligne de rivage est soulignée par un pointillé du côté terre. On note que la basse plage (zone du jet de rive, jusqu'à la crête de berme) ne se distingue pas morphologiquement de la proche avant-côte. L'épaulement où se développe la barre d'avant-côte se matérialise par un desserrement des isobathes dans le domaine -2.50/-4 m entre deux régions plus pentées. Seules les cartes d'octobre 1989 et de juin 1991 ne montrent pas nettement de variation de pente de cet ordre. Là encore, quand existent des écarts par rapport à la disposition standard, ils n'obéissent pas à une logique saisonnière.

Quelques blocs-diagrammes, présentés à titre d'exemple (fig. 31), montrent plus clairement ces différences. On y voit la relation qui existe entre l'épaulement et la barre d'avant-côte et le passage progressif de l'un à l'autre. Un trait important que révèle ce mode de représentation est la permanence d'un chenal situé vers le milieu de la base serrée (profil P9). Son ouverture amont se dessine sur les fonds de 2 m, au sommet de l'épaulement. Il est très probable qu'il s'agisse là d'un drainage de courant d'arrachement dont une seule trace morphologique est notée sur l'étendue de la base serrée. Cependant la connexion avec une morphologie amont identique n'est pas étroite. On en voit un exemple en octobre 1990. Par contre, sur les autres blocs-diagrammes, la proche avant-côte montre des irrégularités plus dispersées, disposition qui conduit à envisager un mode de fonctionnement comprenant :

- le drainage de la dérive littorale au niveau de *rip-currents* en position fluctuante dans la proche avant-côte, en même temps que l'évolution morphosédimentaire y détermine des changements de l'organisation des lignes de relief.
- le captage de ce flux de retour au niveau d'entonnoirs permanents en haut d'épaulement ; cette permanence soulignant le caractère plus stable des fonds à partir de cette profondeur.

En comparant deux cartes topobathymétriques consécutives dans le temps, on observe les variations du fond. Un exemple de ces cartes est donné dans la figure 32 (les pointillés indiquent les zones d'accumulation).. Les cartes-différences montrent que de légers changements interviennent aussi au-delà de l'épaulement et de la barre d'avant-côte (en ne prenant en considération que les variations dont le module absolu est supérieur à 0,5 m). Ils ne concernent toutefois que la partie supérieure du glacis. Par rapport au chenal de drainage permanent, les dépôts se situent en aval-transit par rapport à la direction dominante des houles. Mise à part la



Toutes les distances sont en mètres

Fig. 30 : Cartes topographiques du cordon littoral et de l'avant-côte au large de Gandiole entre 1989 et 1991

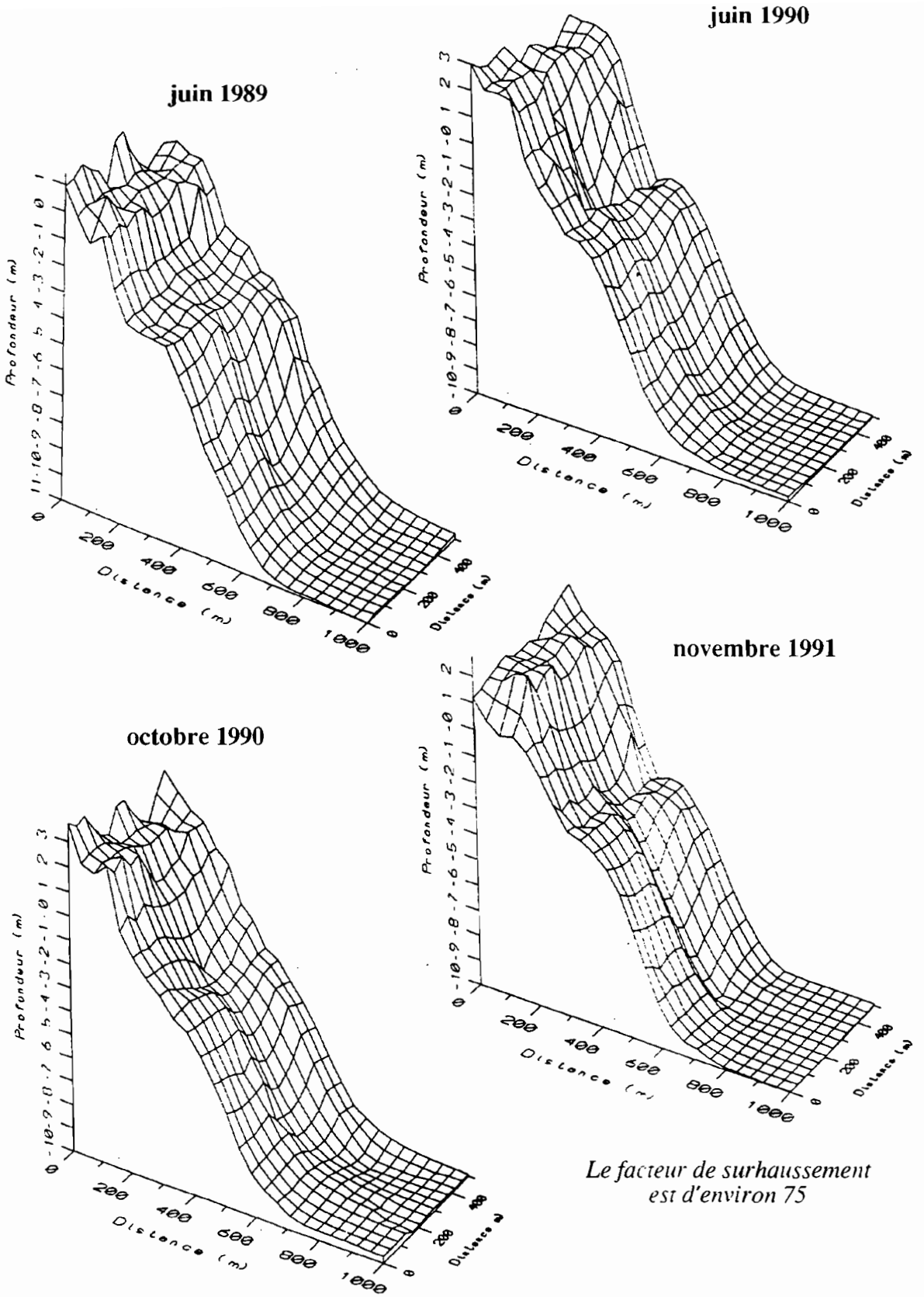


Fig. 31 : Blocs-diagrammes du cordon littoral et de l'avant-côte au large de Gandiole

période de juin à octobre 1990, où les modifications positives ou négatives sont insignifiantes, il y a alternance de phases d'érosion et de sédimentation, principalement localisées dans la proche avant-côte et sur l'épaulement. Le rythme n'est pas saisonnier ; ainsi, après l'hivernage 1989, l'érosion a plutôt dominé sur l'avant-côte, alors que l'accrétion y est manifeste après l'hivernage 1991.

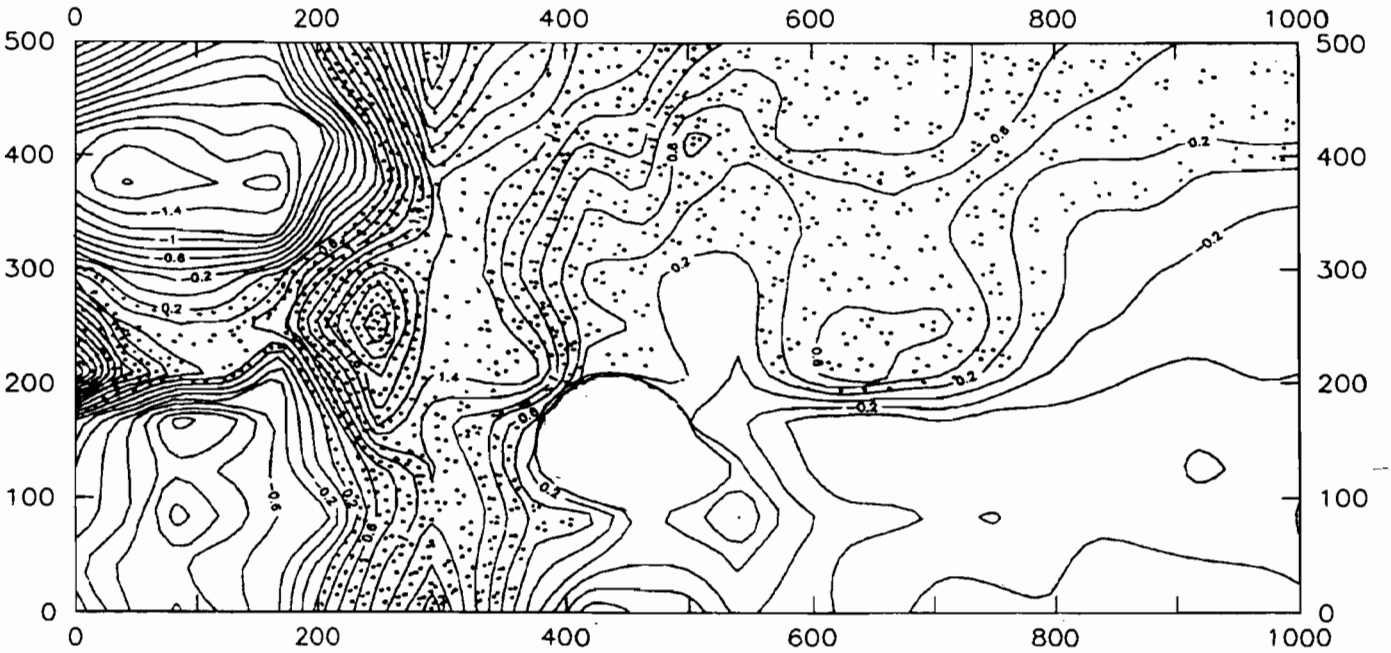


Fig. 32 : Isovaleurs d'érosion et de sédimentation sur le cordon et l'avant-côte au large de Gandiole entre octobre 1989 et juin 1990
(toutes les valeurs sont en mètres)

4. OBSERVATIONS SÉDIMENTOLOGIQUES

4.1. EVOLUTION DES MATÉRIAUX AU COURS DU CYCLE ANNUEL

4.1.1. Localisation des échantillons et modalités des observations.

Compte-tenu de l'absence de morphologies fortement différenciées dans la plus grande partie des cas, on a préféré réaliser un échantillonnage en fonction de la profondeur. L'échantillonnage a été exécuté en plongée en juin 1989, octobre 1989, juin 1991 et novembre 1991.

L'étude granulométrique a débouché sur un inventaire des caractéristiques texturales de chaque sable. On définit ici le sédiment par :

- un indice de position : la médiane en notation ϕ (cologarithme base 2 de la dimension en mm): Md = P50 (avec Md, dimension correspondant au percentile tel que 50 % du matériel est plus fin et 50 % plus grossier).
- un indice de triage (ϕ) :

$$s_I = (P84 - P16) / 4 + (P95 - P5) / 6.6$$

- un indice d'asymétrie (ϕ) :

$$SK_I = ((P16 + P84 - 2P50) / 2(P84 - P16)) + ((P5 + P95 - 2P50) / 2(P95 - P5))$$

- un indice d'angulosité (ϕ) :

$$K_G = (P95 - P5) / 2.44(P75-P25$$

Les résultats généraux sont présentés dans les tableaux XVIII en annexe. Dans les paragraphes suivants, on examine l'influence de la profondeur et de la pente locale sur les changements granulométriques observables au cours d'un cycle de mesures dépassant le cadre annuel. Leurs modalités sont également précisées par des corrélations entre paramètres granulométriques. Enfin, on tente de mettre en évidence les fractions dimensionnelles mobilisées au cours de ces changements.

4.1.2. Rôle de la profondeur.

Il est habituel de noter un amenuisement du matériel du fond dans le cas d'une côte soumise à une sédimentation active. Il existe effectivement ici une bonne corrélation générale entre la médiane et la profondeur, qui s'exprime par l'équation (calculée sur l'ensemble des valeurs moins deux résultats de juin 1990) : $Md_\phi = -0{,}1125d + 1{,}875$ (Md_ϕ : médiane en unité phi ; d : profondeur en mètres).

On remarque toutefois une grande dispersion des valeurs au niveau -3 m, c'est-à-dire dans la zone de l'épaulement-barre où se localise un maximum de la variabilité morphologique du système. Les variations au cours du temps sont, cependant, moins importantes que la variabilité spatiale et indépendantes du climat saisonnier. Comme les hétérogénéités spatiales ne sont que la réplique de variations dans le temps, on doit en conclure qu'il existe plusieurs échelles pour ces dernières et que la durée de la période étudiée n'a pas permis de balayer tout le spectre pertinent.

Le classement des grains se dégrade dans les zones les plus fluctuantes de la morphologie. Globalement on a donc un accroissement de la valeur de l'indice de triage au niveau -3 m.

Dans 37 cas sur 51, l'asymétrie est nulle ou faiblement positive. Cela indique un meilleur classement du côté des grossiers. Cette tendance caractérise plutôt des milieux où s'effectue un dépôt. Les valeurs se disposent dans des champs relativement limités des diagrammes asymétrie/profondeur sauf en ce qui concerne les sédiments les plus profonds et ceux de la basse plage. Les variations au cours du temps sont moins importantes que celles entraînées par la variabilité spatiale.

L'angulosité est le caractère le plus dispersé en fonction de la profondeur. Le plus souvent supérieure à 1 (43 cas sur 51), elle caractérise des courbes leptokurtiques, c'est-à-dire présentant un excès de matériel aux extrémités. Les seules exceptions sont aussi rencontrées au niveau -10 m et sur la basse plage. Si l'on excepte deux valeurs de novembre 1991 (à 0 m et -5 m), il n'y a pas de variabilité temporelle nette.

4.1.3. Rôle de la pente

On a reporté sur le diagramme de la figure 33, le mode granulométrique, dimension des grains les plus fréquents de la population de particules en fonction de la valeur locale de la pente (tableau XIX, en annexe).

Une tendance se dessine vers une augmentation de la dimension centrale des grains en fonction de la pente. Une forte dispersion existe cependant, de telle sorte qu'à un niveau bathymétrique donné, aucune corrélation ne peut-être décrite entre les deux caractères. Plus que la pente locale, c'est donc plutôt le niveau bathymétrique qui implique la modification observée, comme on l'a vu dans le paragraphe précédent.

4.1.4. Corrélation entre paramètres granulométriques.

Une corrélation se dessine entre la médiane et le triage ; elle est entraînée par le décalage du nuage de points de juin 1990 par rapport à ceux d'octobre 1990 et de novembre 1991. Une différenciation de type saisonnier apparaît donc ici. Le matériel serait globalement plus grossier et plus mal trié après la saison sèche, mais cette tendance est fortement influencée par des points appartenant à deux niveaux seulement : la base du talus de collision (limite inférieure de la basse plage) et l'épaulement ; pour les autres, il n'y a pas de différence avec ce que l'on observe avant la saison des alizés.

La même variation portant essentiellement sur la valeur de la médiane influence aussi les corrélations Md/Sk_I et Md/K_G de juin 1990. On observe par contre, en novembre 1991, une augmentation de K_G au-dessus de la zone de dispersion générale. Les courbes deviennent plus leptokurtiques. Les échantillons correspondants sont localisés dans la partie moyenne du profil.

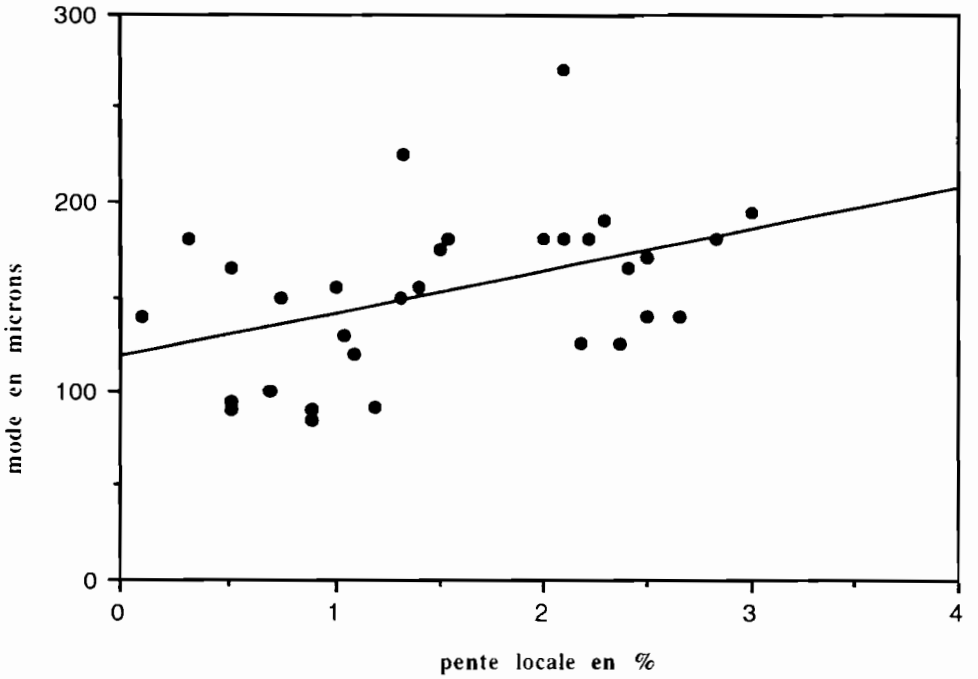


Fig. 33 : Influence de la pente locale sur la granulométrie

4.2. LES FRACTIONS GRANULOMÉTRIQUES MOBILES

Compte-tenu des restrictions apportées par les difficultés d'échantillonnage en plongée dans les conditions d'agitation de la mer au large de la Langue de Barbarie, les comparaisons ne peuvent être faites qu'à trois étages morpho-bathymétriques (-10 m, - 5 m et la ligne de rivage).

4.2.1. Modalités générales des variations texturales.

D'une manière générale, le bilan hydrosédimentaire semble équilibré : il y a compensation des départs, qui surviennent au cours d'une partie du cycle évolutif, par des retours dans une autre partie de ce cycle. Le cas le plus simple est offert par P5 à -10 m et, un peu moins nettement, dans P12 à -5 m ou P5 à 0 m. Dans le premier, par exemple, l'afflux de grains de 125 µm induit une diminution relative d'une fraction plus fine centrée sur la valeur de 80 µm. Cette évolution peut être interprétée de la façon suivante : pendant l'hivernage de 1990, les conditions d'agitation ont déterminé une migration de particules de l'intervalle 100-250 µm (fréquence maximale à 125 µm) qui se sont réfugiées à un étage où elles ont trouvé un régime de stabilité. Mélangées au sédiment de cet étage, elles ont modifié sa structure granulométrique en diminuant relativement l'importance des particules de l'intervalle 62-100 µm (fréquence maximale à 80 µm). Au cours de la suite du cycle (pendant la période annuelle oct. 1990 - nov. 1991, comprenant une saison sèche et un nouvel hivernage), cette perturbation s'est progressivement résorbée, de telle sorte que le sédiment, à l'issue de l'ensemble des transformations subies entre juin 1990 et novembre 1991, est pratiquement inchangé.

Dans ce cas, le bilan de deux hivernages et d'une saison sèche est donc nul, mais on ne sait rien sur la chronologie de la compensation. Plusieurs observations contradictoires peuvent cependant fournir des modèles du déroulement des transformations de l'assemblage granulométrique :

- elle a pu se faire en deux temps pendant la durée de l'étude. On observe cela à 0m en P1 et en P9. Une partie de la perturbation granulométrique initiale (juin - oct. 1990) est compensée pendant la saison sèche suivante (oct. 1990- juin 1991), l'autre partie pendant l'hivernage qui suit (juin 1991 - nov. 1991).
- elle peut être incomplète en terme du cycle d'observation. Ce cas se présente dans P1 à -10 m et P5 à -5 m et montre qu'un afflux de grains de l'intervalle 90-110 µm (fréquence maximale à 100 µm) n'est pas équilibré par un mouvement inverse dans la suite de l'évolution granulométrique.
- elle peut être accélérée. C'est le cas observé en P9 à -10 m et, peut-être aussi, en P12 à -10 m (mais il manque un point d'observation intermédiaire en juin 1991). La compensation y est, en effet, réalisée dès la fin de la saison sèche 1990-91. Par contre, l'hivernage 1991 introduit une nouvelle perturbation granulométrique qui

réplique celle provoquée par l'hivernage précédent, mais par un afflux de particules plus fines (valeur centrale à 80 µm au lieu de 95).

Les changements intervenant dans la structure granulométrique des sédiments obéissent donc à des rythmes variables, quel que soit l'étage considéré. Ils peuvent être occasionnellement saisonniers (P9 à -10 m) mais ce n'est pas la règle générale.

4.2.2. Fractions mobilisées.

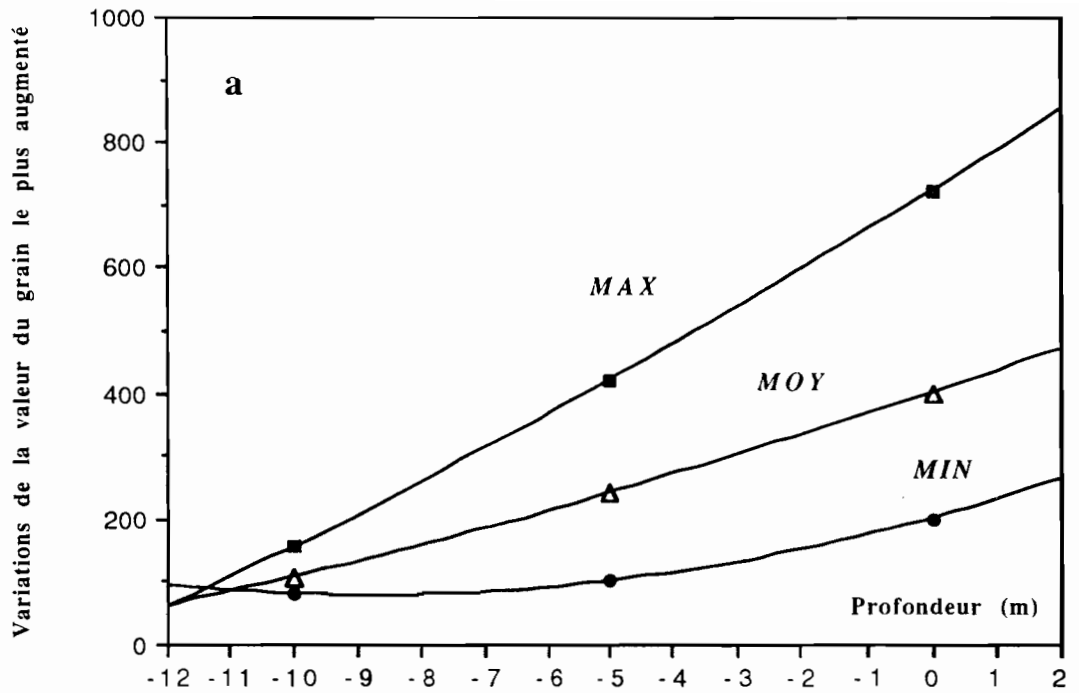
Les modifications observées se traduisent par des augmentations ou des diminutions de la fréquence d'une classe granulométrique donnée. En première étape, on peut penser qu'une augmentation, implique un apport de matériel tandis qu'une diminution manifeste une élimination sélective des grains de l'intervalle dimensionnel considéré. Ces modifications peuvent être définies en tenant compte des valeurs minimale, maximale et moyenne qui ressortent de la comparaison des résultats obtenus sur les différents profils (fig. 34)

La figure 34a rassemble les résultats concernant les modes granulométriques de la fraction augmentée. Il existe, comme on peut le penser, une décroissance des valeurs moyennes de grains susceptibles d'être conduits à des étages bathymétriques de plus en plus profonds : 0,4 mm à 0 m, 0,24 mm à -5 m et 0,107 mm à -10 m. Au niveau du glacis, cette dimension caractéristique est peu fluctuante, elle le devient considérablement à la base de l'épaulement (100 à 405 µm) et encore plus fortement sur la ligne de rivage (200 à 785 µm).

La figure 34b présente la contre-partie de la précédente en illustrant les caractères des fractions apparemment les plus diminuées en fonction de la profondeur. La même observation peut être faite, les marges de fluctuation et les valeurs moyennes diffèrent peu de celles correspondant aux enrichissements, ce qui confirme le jeu de compensations mis en évidence dans ce qui précède.

Saison	Profondeur (m)	Départ	Arrivée
-	- 10	130	105
H	- 10	225	125
H	- 10	80	125
-	- 10	125	80
H	- 10	165	95
SS	- 10	100	155
H	- 10	125	80
H	- 10	165	100
-	- 10	165	100
H	- 5	160	100
-	- 5	205	160
H	- 5	420	155
-	- 5	205	420
H	0	210	420
SS	0	785	250
H	0	320	785
H	0	205	325
-	0	325	200
H	0	255	500
SS	0	500	240
H	0	405	905

Tabl. 25 : Dimension centrale (en microns) des populations apportées (Arrivée) ou éliminées (Départ) en fonction de la saison (H : Hivernage ; SS : Saison Sèche) et de la profondeur.



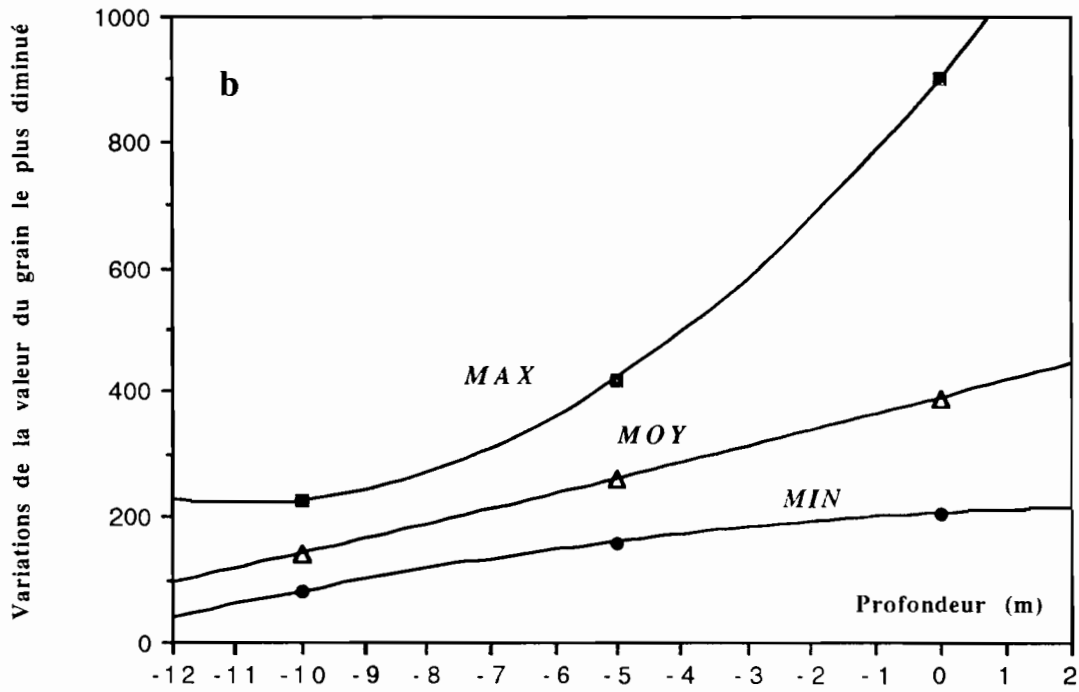


Fig. 34 : Amplitude des variations portant sur la taille du grain dont la fréquence est la plus augmentée ou diminuée, en fonction de la profondeur

Quand on considère l'ensemble des valeurs (tabl. 25) des populations qui semblent apportées ("arrivée") ou éliminées ("départ") en fonction des cas où les saisons sont bien caractérisées (c'est-à-dire dans les situations où les prélèvements ont été opérés en fin de saison sèche -SS- ou d'hivernage -H-), on constate que la situation est contrastée entre la partie basse du profil (-10 m) et la partie haute (0 m). Dans tous les cas, sur la ligne de rivage, le matériel qui "arrive" en hivernage est plus grossier que le matériel qui "part"; c'est le contraire en saison sèche (avec seulement 2 cas observés). A la base du glacis, la situation est inversée : dans quatre cas sur cinq, le matériel entrant est plus fin que le matériel sortant en hivernage ; c'est aussi le contraire en saison sèche (mais avec une seule observation). On peut cependant retenir comme significative, la cohérence du schéma.

Il est cependant troublant de constater que l'hivernage paraît globalement plus effectif que la saison sèche sur les modifications granulométriques, malgré la présence des alizés et des longues houles qui résultent alors des perturbations météorologiques de l'Atlantique nord. Ainsi, au rivage, on observe en hivernage la mise en évidence des fractions grossières (= "arrivée") par départ (réel) des fractions fines qui sont vannées. En bas du glacis, la même situation explique l'arrivée (réelle) de fractions fines mobilisées dans les étages supérieurs et, au contraire, leur départ (réel) quand des conditions de "beau temps" prévalent : on est alors en saison sèche.

5. CONCLUSION

La zone littorale de la Langue de Barbarie, siège de la pérégrination de l'embouchure du Fleuve, a été étudiée aux points de vue morphologique et sédimentologique, au nord de la localisation actuelle de la passe.

La partie sud de la flêche paraît en état d'accrétion (pente plus faible de l'avant-côte, sensibilité nulle à l'érosion d'après la modélisation de type $y = ax^b$), tandis qu'au niveau de la base serrée (face à Gandiole), la partie basse du profil transversal sous-marin montre un certain déséquilibre ; celui-ci pourrait entraîner l'apparition de conditions favorables à la formation d'une embouchure plus septentrionale que l'actuelle.

Cette instabilité demeure toutefois limitée car, d'un point de vue quantitatif, les modifications de la structure granulométrique des matériaux semblent se compenser au cours du temps, avec des rythmes variables, il est vrai, selon les secteurs observés.

La prévision d'une ouverture de l'embouchure en position plus nordique doit en outre être considérée avec prudence pour une autre raison. La période d'étude (1989 - 1991) paraît, en effet, trop courte pour conduire à une appréciation suffisamment fine de tendances naturelles marquées d'abord par une rythmicité pluriannuelle d'amplitude supérieure à celle des processus saisonniers.

QUATRIEME PARTIE

LA DYNAMIQUE DU PAYSAGE DANS LA MOYENNE VALLEE

INTRODUCTION

Dans le cadre du Projet CAMPUS, cette opération de recherche s'était proposée d'étudier les principaux changements d'état du milieu intervenant sous les effets combinés de la sécheresse et des activités humaines.

Au cœur du Sahel, séparant le Ferlo sénégalais de l'Aftout mauritanien, le fleuve Sénégal dessine un large coude qui monte très au nord et traverse les régions les plus sèches du pays : entre Bogué et Dagana, en passant par Podor, c'est la "*Moyenne Vallée*"

Les paysages de cette Moyenne Vallée sont très contrastés, marqués par l'opposition entre le *diéri* et le *walo* (fig. 35).

Le *diéri* correspond aux bordures de la vallée. Les milieux, monotones, sont ceux du Ferlo sableux : dunes et interdunes se succèdent, avec des formes plus ou moins émoussées, parfois ravivées par la sécheresse récente. Ces étendues de sables, rougeâtres vers les sommets, grisâtres vers les bas-fonds, sont couvertes d'une steppe sahélienne souvent très dégradée, faite d'herbes rases et éphémères, dominée par quelques Acacias dispersés.

Le *walo* correspond à la vallée proprement dite, qui s'étale ici sur 10 à 25 km de large. Les milieux surprennent par leur variété et leurs potentialités : levées et terrasses fluviales anciennes ou récentes, certaines limoneuses, d'autres sablonneuses, vastes cuvettes de décantation argileuse, avancées sableuses en provenance du *diéri*... Leur cloisonnement, très net, est lié aux multiples bras et divagations du fleuve. Il se traduit par un couvert végétal diversifié, parfois très dense, et se perçoit à l'échelle de la vallée tout entière, sur plusieurs kilomètres, mais aussi à l'échelle des retraits et des avancées de chaque méandre des cours d'eau, sur quelques dizaines de mètres.

Ce paysage de grande vallée sahélienne s'est profondément transformé sous l'effet des activités humaines et de la sécheresse climatique.

Les activités humaines se partagent, elles aussi, entre le *diéri* et le *walo*. Sur le *diéri*, les quelques cultures de la saison des pluies cèdent vite la place au bétail des pasteurs Peuls. Des chèvres qui s'éparpillent, de grands troupeaux qui passent nonchalamment, accablés de chaleur... Dans le *walo*, au contraire, les activités des paysans Toucouleurs se poursuivent toute l'année, soutenues par de nombreuses aides et interventions extérieures. L'eau et le soleil autorisent en effet toutes les cultures, aux plus forts rendements : la mise en valeur agricole de cette vallée constitue l'une des rares chances de développement durable qui soit offerte au Sénégal.

Mais ces activités de plus en plus intenses ne vont évidemment pas sans conséquences néfastes sur l'environnement. Signe le plus visible de cette dégradation du milieu : le déboisement dû à la coupe de bois de chauffe ou de construction (fig. 36b). A cette dégradation d'origine anthropique s'ajoutent les effets, imprévisibles et catastrophiques, des changements climatiques : d'une année à l'autre, les pluies, déjà très faibles en moyenne, peuvent passer de 300 ou 400 mm à moins de 50 mm (fig. 36a).

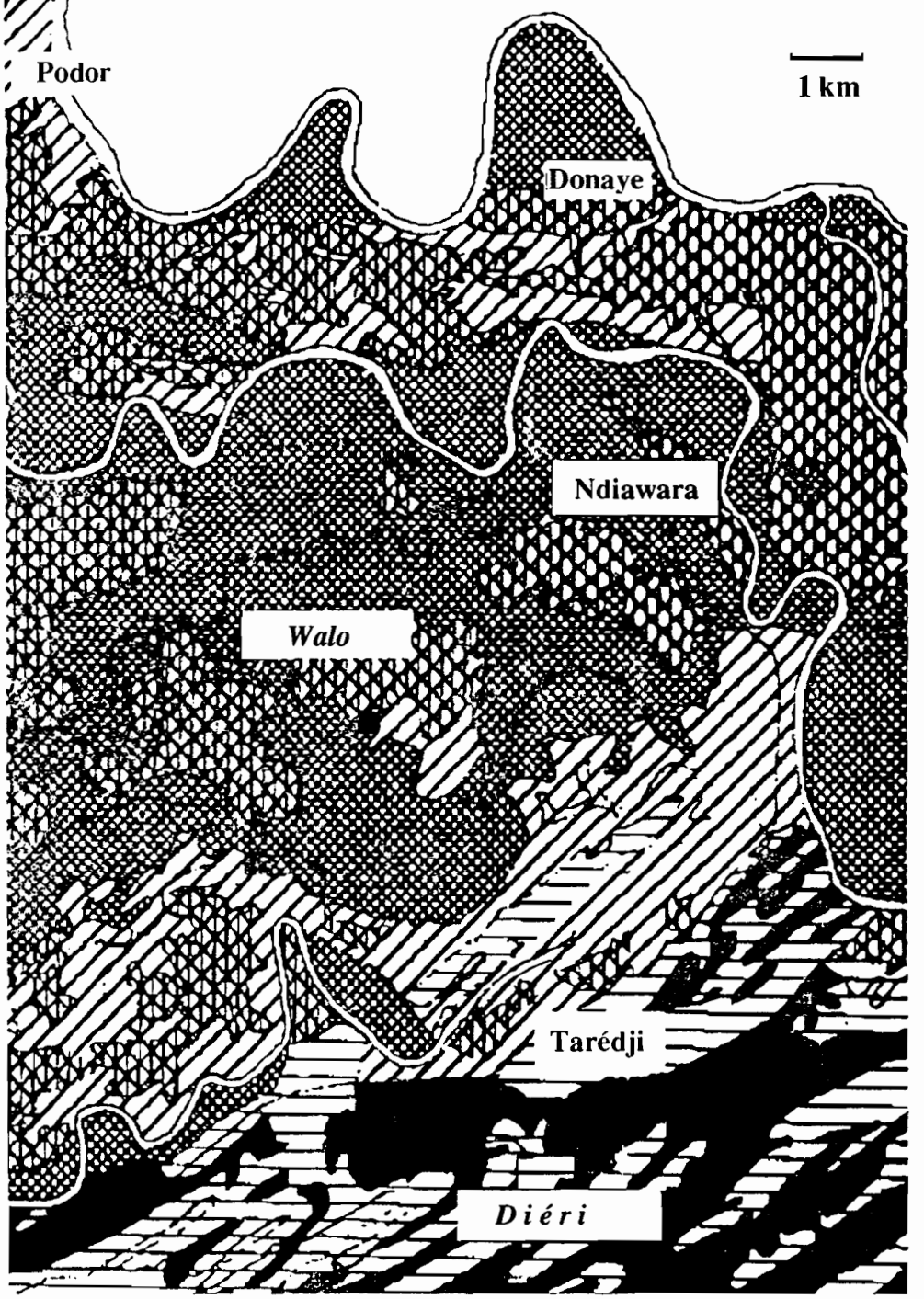
Les travaux de terrain ont été réalisés à deux échelles d'analyse :

- A l'échelle stationnelle, dix points d'observation ont été choisis le long de trois transects recoupant la vallée et ses bordures. Pendant deux ans, sur chacune de ces stations, ont été suivies : l'évolution du couvert végétal ligneux et herbacé, les dynamiques érosives et accumulatives à la surface du sol, les variations du bilan hydrique des sols.
- A l'échelle régionale, en plus de la végétation et des états de surface du sol, des travaux de cartographie ont pris en compte les sols et les formations superficielles, les systèmes de pente, l'occupation du sol. Cette base de données a été utilisée pour la généralisation contrôlée des observations stationnelles et pourrait se traduire par une carte intégrée du milieu naturel à 1/50 000 (coupures Dagana 4a et 4b, Podor 3a et 3b).

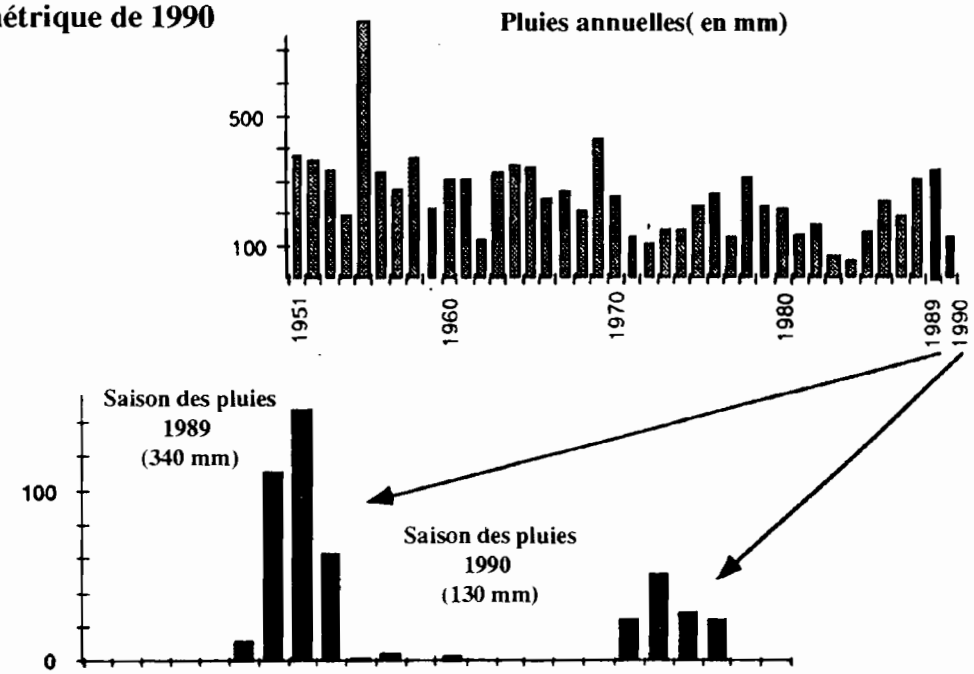
Cette contribution présente les résultats recueillis sur les changements d'état du milieu naturel (107 états différents, caractérisés par plus de 275 000 valeurs chiffrées et une centaine de milieux, décrits par plus de 8 700 variables). Ces résultats, acquis avec des méthodes originales, portent en effet sur un thème qui reste d'actualité : l'intense dégradation de ces paysages sahéliens...

Fig. 35 : Différenciation des milieux naturels dans la "Moyenne Vallée" du fleuve Sénégal (secteur de Tarédji, Ndiawara et Donaye)

(cartographie par Marième Diallo d'après les travaux de P. Michel, 1973)



a : Le déficit pluviométrique de 1990



b : Du diéri au walo, l'augmentation du déboisement

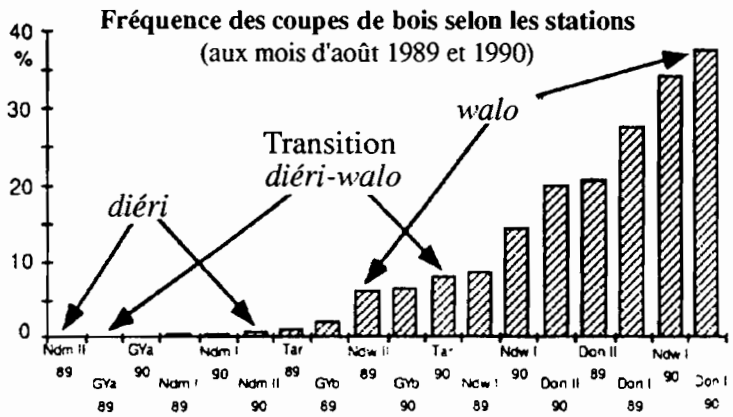
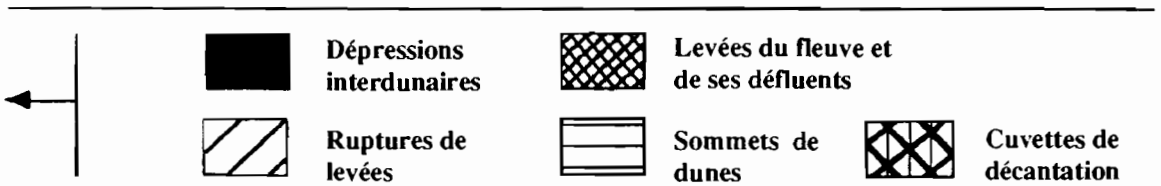


Fig. 36a et 36b : La sécheresse et les activités humaines dans la Moyenne Vallée du Sénégal



CHAPITRE IX

QUESTIONS DE METHODOLOGIE

Jean-François RICHARD
Albert DIAGNE

1. PRINCIPAUX PROBLÈMES

Vouloir dépasser de premières impressions pour étudier, véritablement, la dynamique d'un paysage pose un certain nombre de problèmes (Richard, 1989, Rougerie et Beroutchachvili, 1991).

Il faut tout d'abord essayer d'analyser le milieu dans sa globalité : le déboisement peut avoir des conséquences sur la mobilisation et la déflation du sable mais aussi sur les activités animales et l'humification de la matière organique à la surface du sol, et encore sur l'évaporation et les réserves en eau des sols. La méthode proposée privilégie une vision verticale du milieu, vision complète allant de la cime des arbres jusqu'au substrat purement minéral (ici, le sable des dunes ou les limons du fleuve). Cette méthode d'analyse s'accompagne de la reconnaissance, la plus exacte possible, des différentes composantes du milieu.

A l'aide de diagnostics spécialisés, on définira par exemple l'encroûtement caractéristique de la surface des sols sahéliens, en distinguant tous les stades de formation de ces croûtes, depuis la pellicule de "battance", encore marquée par les traces des gouttes de pluies, jusqu'aux esquilles brisées et démantelées, en passant par les surfaces durcies par la dessiccation. A une première échelle, celle de la station, ce sont 44 de ces diagnostics qui ont été utilisés pour caractériser chaque état du milieu.

Il faut ensuite imaginer des techniques d'observation suffisamment précises pour mettre en évidence des évolutions dont les conséquences se font parfois attendre plusieurs années ; alors que le suivi sur le terrain ne dure, lui, que quelques mois ! La technique retenue tient compte de l'hétérogénéité inhérente au milieu. Elle consiste à caractériser un «point central», jugé représentatif d'un milieu donné, à l'aide de sondages nombreux, mais de plus en plus espacés vers la périphérie de la station.

Chaque station est matérialisée par un point fixe, situé au centre d'un cadre métallique permanent. A partir de ce point, on tend une cordelette selon 8 rayons (orientés selon les points cardinaux). Cette cordelette comporte 25 graduations de plus en plus espacées selon la loi $f(x) = (e^x)^{1/3}$. Soit : 1.5-2-3-4-5-7-10 cm .... 21-29-40 m. Les observations ne concernent, ici, que la partie supérieure du milieu : à chaque marque sur la cordelette, on déplace une tige métallique verticale (la plus fine possible) graduée selon une échelle géométrique partant de la surface du sol (*cf.* tableau 2). C'est le long de cette tige, ou au droit de cette tige pour les hauteurs supérieures à 2 m, que l'on compte le nombre de contacts avec les différentes composantes du milieu, répertoriées selon les diagnostics précédents. Cette technique, déjà expérimentée avec J-C. Filleron en Côte d'Ivoire, s'inspire du "point-quadrat" des phytosociologues (en la généralisant à l'évaluation et au suivi de l'ensemble des volumes naturels directement visibles).

Enfin, le problème sans doute le plus difficile est celui de la validation de ces observations, observations précises mais nécessairement très ponctuelles : quelle est la représentativité d'une dizaine de stations isolées? Comment généraliser? Et conclure à l'échelle d'une région tout entière ?

La solution consiste à multiplier les observations, en suivant toujours les mêmes principes mais en utilisant une technique beaucoup plus rapide à mettre en œuvre. Cette technique est celle du "relevé intégré du milieu", tel qu'il est maintenant largement pratiqué en Afrique de l'Ouest à l'échelle de la région. Toujours selon la verticale, l'ensemble du milieu est analysé en fonction des différentes «strates», «couches» ou «horizons» qui apparaissent sur le terrain, et ce sont toutes les composantes de ces «couches» qui font l'objet de diagnostics et d'évaluations chiffrées.

Les emplacements de ces relevés, qui intègrent cette fois non seulement la végétation et les états de surface du sol mais aussi les sols et les formations superficielles, sont choisis après avoir analysé le paysage lui-même, c'est-à-dire après avoir isolé les "segments paysagiques" qui apparaissent sur les photographies aériennes et qui serviront d'unités cartographiques finales (dans le cas des cartes à moyenne échelle). Les relevés sont ensuite effectués le long de "toposéquences" recoupant les segments du paysage. Le traitement des données recueillies sur le terrain aboutit à des typologies, et c'est par rapport à ces typologies que l'on peut juger de la représentativité de chaque station, et généraliser - ou non - les résultas ponctuels à des "types de milieu" couvrant des espaces plus vastes.

Les stations ont été situées le long de trois toposéquences perpendiculaires à la vallée, tracées au droit de Guem Yalla, Tarédji et Ndioum (fig. 37).

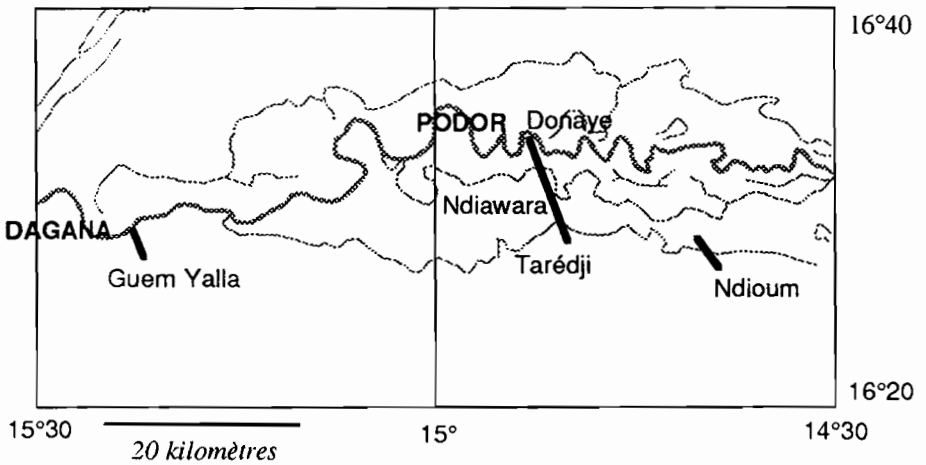


Fig. 3 7: Localisation des observations
(toposéquences et limites des coupures cartographiques à 1:50 000)

Le choix des stations a aussi tenu compte du degré de dégradation du milieu. Certaines observations n'ont pu être menées à leur terme (en particulier dans les cuvettes aménagées), mais d'autres ont permis de saisir les conséquences immédiates d'un déboisement intensif (tabl. 26).

Milieux	"DIERI" Dunes		Transition Diéri/Walo		"WALO"			
	Sommets	Versants	Avancée dunaire	Contact linéaire	Levées anciennes	Levées récentes limoneuses	Levées récentes sableuses	Cuvettes
Protégés						NDW II		
Peu perturbés	Gy I NDM I	Gy II NDM II	TAJ	GY III a			NDM III	Ndm V
Dégradés					Gy V NDW I	Gy VI DON II		Gy IV
En cours de dégradation				GY III b		DON I		

GY : Guem Yalla NDM : Ndioum TAJ : Tarédji NDW : Ndiawara DON : Donaye

Tabl. 26 Echantillonnage et stations retenues
(les stations retenues ont leurs initiales en capitales)

Les observations stationnelles se sont poursuivies de décembre 1988 à octobre 1990. Elles n'ont pas toujours été très régulières mais, par contre, elles ont eu la chance de couvrir deux saisons des pluies très représentatives du phénomène de sécheresse : l'année 1990 a été une année pluviométrique nettement déficitaire par rapport à l'année précédente (fig. 36a).

Au total, pour l'ensemble de la Moyenne Vallée, 107 états du milieu ont été caractérisés, comme sur la partie gauche du tableau 27. Ce sont les changements d'état des dix stations retenues plus haut qui ont été mis en évidence, comme sur la partie droite du même tableau.

2. DÉFINITIONS

Les deux séries de tableaux obtenus (*annexe 2*) permettent de préciser ce que l'on peut entendre par dynamique du milieu.

Le tableau d'un état du milieu concerne une station donnée à une date donnée : la fréquence de chaque composante est reportée en fonction de sa hauteur au-dessus de la surface du sol. Ce genre de tableau peut être schématisé et montrer la structure verticale de l'état considéré (*cf.* fig. 40 et 46).

Le tableau des changements d'état d'un milieu concerne une station donnée, observée ici pendant deux ans. Chaque colonne est le résumé d'un état du milieu : c'est la somme des fréquences des composantes, quelles que soient leurs hauteurs. Le traitement de ce genre de tableau permet d'établir des typologies, et la comparaison de deux colonnes successives correspond — ou non — à un changement d'état significatif.

Deux interprétations sont alors possibles :

- on peut faire apparaître les tendances évolutives marquant la période allant de décembre 1988 à octobre 1990 par simple régression (linéaire ou polynomiale) des diagnostics avec le temps ; ces évolutions recouvrent des changements d'état interannuels qui, dans certains cas, peuvent apparaître irréversibles (*cf.* fig. 44),
- après soustraction de ces tendances évolutives, on peut aussi mettre en évidence des variations cycliques (ce sont les "résidus" des corrélations précédentes.) ; ici, ces variations correspondent à des changements d'état saisonniers réversibles (*cf.* fig. 43).

Ces deux séries de courbes sont plus faciles à comprendre dès que les diagnostics de terrain font eux-mêmes l'objet d'une interprétation préalable et d'une traduction en termes de processus (*annexe 3*) :

- la variation de chaque composante du milieu dans le temps correspond directement à un ou quelques processus élémentaires ,
- la mise en corrélation de toutes ces variations permet de regrouper les composantes du milieu évoluant de la même manière et de définir des processus d'ensemble.

C'est ainsi que sept dynamiques générales ont été mises en évidence et quantifiées :

1 = dépérissement de la végétation, qu'elle soit herbacée ou ligneuse.

2 = développement et expansion de la végétation ligneuse.

3 = régénération naturelle ou traumatique de la végétation ligneuse.

4 = croissance de la végétation herbacée (y compris la végétation lianescente) synchrone avec la floraison de la végétation ligneuse.

5 = activité bio-organique à la surface du sol (associant accumulations de matière organique et activités animales mais aussi piégeage de matière minérale fine et autres phénomènes liés à la formation puis à la fragmentation de la croûte de dessiccation).

6 = dénudation de la surface du sol suivie d'une mobilisation et d'une déflation des sables (laissant sur place, ou plus en aval, des éléments plus grossiers, parfois triés par le ruissellement ; ces éléments grossiers sont dus au moins en partie à des remontées d'origine animale).

7 = perméabilisation de la surface du sol, à la fois liée aux mécanismes bio-organiques évoqués ci-dessus et à des mécanismes physiques (fentes de retrait et démantèlement de la croûte de dessiccation).

Concernant la surface du sol, on retiendra qu'il y a une opposition marquée entre une dynamique d'accumulation, définie par un ensemble de processus étroitement liés entre eux, et une dynamique d'érosion plus ponctuelle, agissant par l'intermédiaire de processus isolés.

TABLEAU D'UN ETAT D'UN MILIEU
Fréquences des diagnostics
X
observées selon 200 sondages verticaux

TABLEAU DES CHANGEMENTS D'ETAT D'UN MILIEU
Fréquences totales des diagnostics
X
relevées à 13 dates différentes

HAUTEURS (en cm)	DIAGNOSTICS : (composantes du milieu)	DATES	(N Etats)
0,1			
0,2	HD : hydrophyse	**Déc-88**	(2)
0,4	DL : dermilite	Jan-89	
0,5	DLE : dermi-épilite	**Fév-89**	(3)
0,6	NDL : néodermilite	**Mar-89**	(4)
0,8	DED : dermilite démantelé	**Avr-89**	(9)
1	PDL : phyco-dermilite	Mai-89	
1,5	PC : phycophytion	Jui-89	
2	ME : mesoépilite	Jui-89	
2,5	MI : microepilite	**Aoû-89**	(10)
3	MA : macroépilite	Sep-89	
3,5	DLA : dermi-appumite	**Oct-89**	(3)
4	NC : nécrumite	Nov-89	
4,5	TE : téphralite	**Déc-89**	(10)
5	GR : graines	Jan-90	
5,5	CO : coprumite	Fév-90	
6	NPZ : nécrophytion zoonique	Mar-90	
8	NPL : nécro. ligneux	**Avr-90**	(10)
10	NPH : nécro. herbacé	Mai-90	
15	NPF : nécro. foliacé	**Jui-90**	(5)
20	EPZ : épizoolite	**Jui-90**	(10)
25	ERZ : érizoolite	**Aoû-90**	(19)
30	NGR :nécrogramen	**Sep-90**	(12)
35	GRF : gramen (feuilles)	**Oct-90**	(10)
40	GRT : gramen (tiges)	Nov-90	
45	NKO : nécrokortode	Déc-90	
50	KOF : kortode (feuilles)		
60	KOT : kortode (tiges)		
70	NPL : nécropléiophyse		
80	PLF : pléiophyse (feuilles)		
90	PLT : pléiophyse (tiges)		
100	PN : pénéphytion		
110	NAF : nanophyse		
120	NAC : cauli-nanophyse		
130	ST- : stylagé (défeuillé)		
140	ST+ : stylagé (feuillé)		
150	STP : styla-pénéphytion		
160	NST : nécrostylagé		
170	PAF :paliphyse (feuilles)		
180	PAC : cauli-paliphyse		
200	PAD : dendri-paliphyse		
250	PAFL : paliphyse (fleurs)		
300	AER : aérophyse fistulaire		
350	AET : aérophyse tubulaire		
400	AEZ : aérophyse zoonique		
450			
500			
550			
600			
650			
700			
750			
800			
850			
900			
950			
1000			

Tabl. 27 : Légende des lignes et colonnes des tableaux présentés en annexe

CHAPITRE X

LES MILIEUX ET LEUR DYNAMIQUE

Jean-François ***RICHARD***
Albert ***DIAGNE***

1. LES ÉTATS DU MILIEU : TYPOLOGIES, SUCCESSIONS ET CARACTÉRISATIONS

A la fois dans l'espace et au cours de l'année, les contrastes sont très forts. Les milieux se présentent sous neuf états très différents : une première analyse factorielle des correspondances, portant sur l'ensemble des observations stationnelles effectuées dans la Moyenne Vallée, donne la typologie suivante (fig. 38 et *annexe 4*).

Etat n° 1 = s'individualisant par la déflation éolienne.

Type n° 13 = état de simplicité maximale, exclusivement caractérisé par le phénomène de déflation éolienne.

Type n° 12 = état simple, marqué par la déflation à laquelle s'associent des phénomènes de dénudation et de mobilisation éoliennes, parfois aussi d'érosion hydrique.

Type n° 11 = état plus complexe, associant un encroûtement de la surface du sol aux processus physiques précédents.

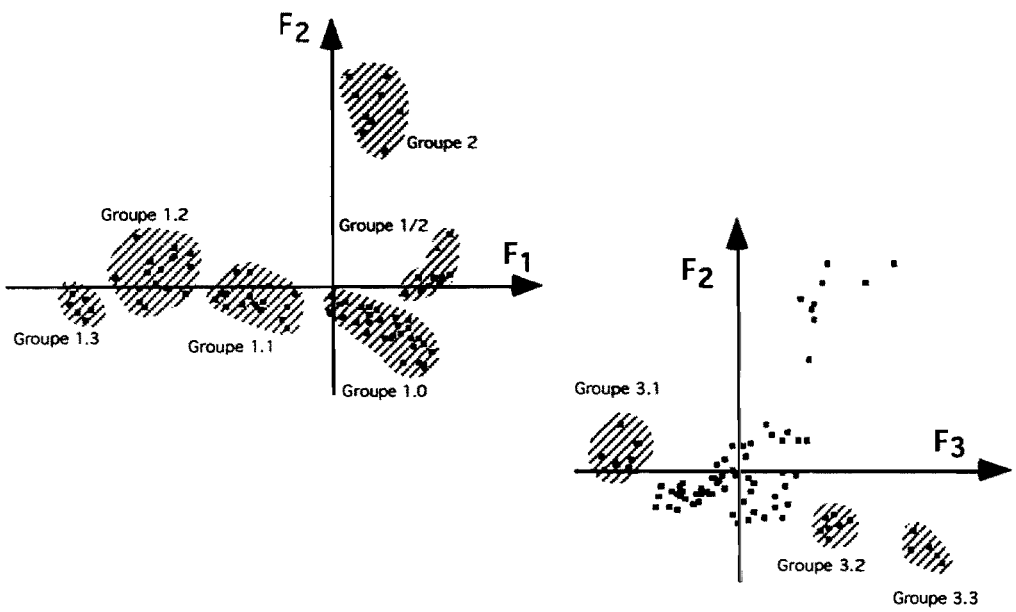


Fig. 38 Typologie des états du milieu par différenciation sur les trois premiers facteurs
(ensemble de la Moyenne Vallée - Analyse factorielle des correspondances)

Type n°10 = état de complexité maximale, marqué par l'interférence de trois séries de processus : déflation plus érosion et encroûtement de la surface du sol comme précédemment mais aussi accumulations organique et minérale fine liées à l'apparition d'un couvert végétal ligneux.

Etat n° 1/2 = état complexe — de "transition" — caractérisé par l'importance et la persistance du couvert végétal ligneux, expliquant des phénomènes d'accumulations organique et minérale fine eux aussi très importants, auxquels s'ajoutent cependant des phénomènes de déflation et d'encroûtement fréquents.

Etat n° 2 = état de complexité moyenne, mais hétérogène et très particulier, caractérisé par l'intensité et la variété des processus liés au vent et à l'eau.

Etat n° 3 = s'individualisant par l'encroûtement de la surface du sol.

Type n° 33 = état complexe, marquant le passage du phénomène de "battance" (réorganisation et tassements de surface sous l'impact de la pluie) au phénomène d'"encroûtement" (durcissement puis décollement de cette surface dus à la dessiccation) et correspondant, par ailleurs, au maximum de développement de la végétation herbacée.

Type n° 32 = état complexe, marqué par l'"encroûtement" de la surface du sol, par la fin (ou le début) du phénomène de "battance" et par l'apparition (ou la disparition) du phénomène de déflation.

Type n° 31 = état complexe, mal défini, toujours marqué par l'"encroûtement" de la surface du sol mais aussi par une déflation plus importante que dans l'état précédent. Il peut être aussi caractérisé par une végétation herbacée abondante mais totalement desséchée.

Au cours de l'année, en réponse pourtant aux mêmes variations climatiques saisonnières, les milieux ne réagissent donc pas tous de la même façon. Abstraction faite de la sécheresse et des interventions humaines, et en essayant de regrouper les stations ayant les mêmes réactions, on peut distinguer six successions d'états, différentes à la fois par la récurrence, les dates d'apparition et la durée des types d'états précédents (fig. 39).

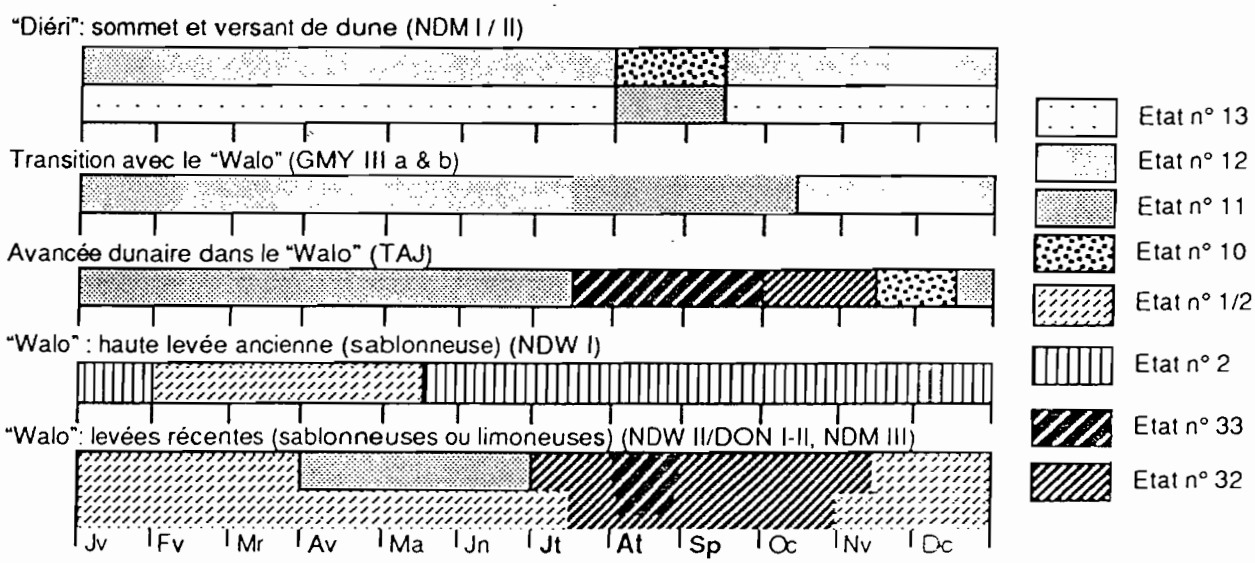


Fig. 39 "Comportement" des milieux au cours de l'année
(Successions des types d'état du milieu)

Ces «comportements» ont une signification très générale, en particulier liée à l'opposition saison sèche - saison des pluies. Mais la structure de chacun des états dépend aussi, évidemment, de l'état originel du milieu considéré.

Dans l'espace cette fois, d'autres typologies ont donc été effectuées cas par cas, station par station (*annexe 5*). Elles ont permis d'individualiser et de sélectionner quatorze «états types», à la fois représentatifs des états statistiques "moyens" qui viennent d'être analysés et tels qu'on peut les voir sur le terrain (*annexe 6* et fig. 40).

• Dans le *diéri*, la dune de Ndioum a un comportement hiératique, limité à la succession de deux états. Sur le sommet, un très bref état de type 10 correspond au maximum pluviométrique et un très long état de type 12 correspond au reste de l'année : au mois d'août, les états de surface du sol sont relativement différenciés,

protégés par une végétation herbacée vite desséchée, alors que tout le reste de l'année ils sont effacés ou noyés sous un important recouvrement sableux. Le versant de la dune a un comportement identique, mais avec des états de structure encore plus simples (respectivement, un état de type 11 en août et un état de type 13 le reste de l'année)! La croûte de surface du sol, peu consistante, se désagrège rapidement après la saison des pluies et laisse vite la place aux sables en mouvement.

• La transition directe avec le *walo* a un comportement comparable, à la fois simple et bien réglé, mais les effets de la saison des pluies se font sentir plus longtemps (sur trois mois, entre juillet et octobre). Cet état de saison des pluies (de type 11) laisse ensuite la place à un état de saison sèche (de type 12) marqué par la déflation et la dénudation de la surface du sol. Beaucoup plus complexe et original est le comportement de l'avancée dunaire étudiée à Tarédji. Cette station, relativement boisée, se caractérise par la succession de quatre états très caractéristiques :

- pendant la saison des pluies (de mi-juillet à fin-septembre), l'état du milieu est de type 33 : une pellicule de "battance" plus importante que les sables en transit et une végétation herbacée en pleine croissance (mais aussi une végétation ligneuse au minimum de son recouvrement) en sont les principales composantes,

- à la fin de la saison des pluies (de début octobre à mi-novembre), un état de type 32 se traduit par une structure de complexité "maximale" : la végétation herbacée est au maximum de son développement en hauteur, la végétation ligneuse au maximum de sa densité, la surface du sol au maximum de sa stabilité.

- au début de la saison sèche (de mi-novembre à mi-décembre), un état de type 10 est comparable à l'état précédent avec cependant deux différences notables : le dessèchement de la végétation herbacée (sur pied ou sous forme de litière) bien sûr, mais aussi l'apparition de larges plages de sol mis à nu.

- le reste de l'année (de mi-décembre à mi-juillet), le milieu conserve une structure relativement complexe de type 11, avec une litière végétale fréquente mais aussi avec des phénomènes de déflation et d'érosion.

A noter, dans cette succession, des phénomènes de retard (comme celui du développement de la végétation ligneuse intervenant plus d'un mois après les pluies), des phénomènes de persistance (comme celui du dessèchement de la végétation herbacée.) ou encore des phénomènes de latence (comme la permanence, plus ou moins masquée, des transits minéraux à la surface du sol.).

Dans le *walo*, les comportements du milieu sont moins réguliers. Il est difficile de faire abstraction, ici, d'activités humaines presque partout présentes. Sur les levées fluviatiles récentes, le comportement de la station de Ndiawara II, encore peu dégradée en 1989, rappelle le précédent : de longs états de saison des pluies et des états de saison sèche différenciés. Au contraire, le comportement des stations de Donaye I-II et de Ndioum III, beaucoup plus dégradées, est à nouveau bipolaire : un état de saison des pluies (début août à fin octobre) et un état de saison sèche (de novembre à juillet). Sur la levée fluviatile ancienne, c'est surtout la station de Ndiawara I qui semble avoir eu un comportement aberrant, dominé par un état de type 2 pendant toute l'année (sauf au cœur de la saison sèche). Malgré ces interventions humaines, y compris sur les stations choisies dans des "forêts classées", on notera que le *walo* s'individualise (toujours ou encore ?) par la fréquence des phénomènes d'accumulation organo-minérale de saison sèche (état de type 1/2).

2. LES CHANGEMENTS D'ÉTATS DU MILIEU

Les successions d'états et les états précédents dépendent évidemment, en premier lieu, des variations climatiques saisonnières. Toutes les analyses de données opposent, ici, processus de saison des pluies et processus de saison sèche.

C'est ainsi que sur l'ensemble des stations, les phénomènes de fixation de la surface du sol en saison des pluies, notamment la formation d'une pellicule bio-organique, sont très significatifs et s'opposent à des processus de saison sèche (mobilisation des sables et déflation) qui aboutissent, eux, à la dénudation de cette surface (fig. 41).

Station par station, au cours de l'année, à ces oppositions saison des pluies-saison sèche s'ajoutent des associations voire des ordres de processus (fig. 42).

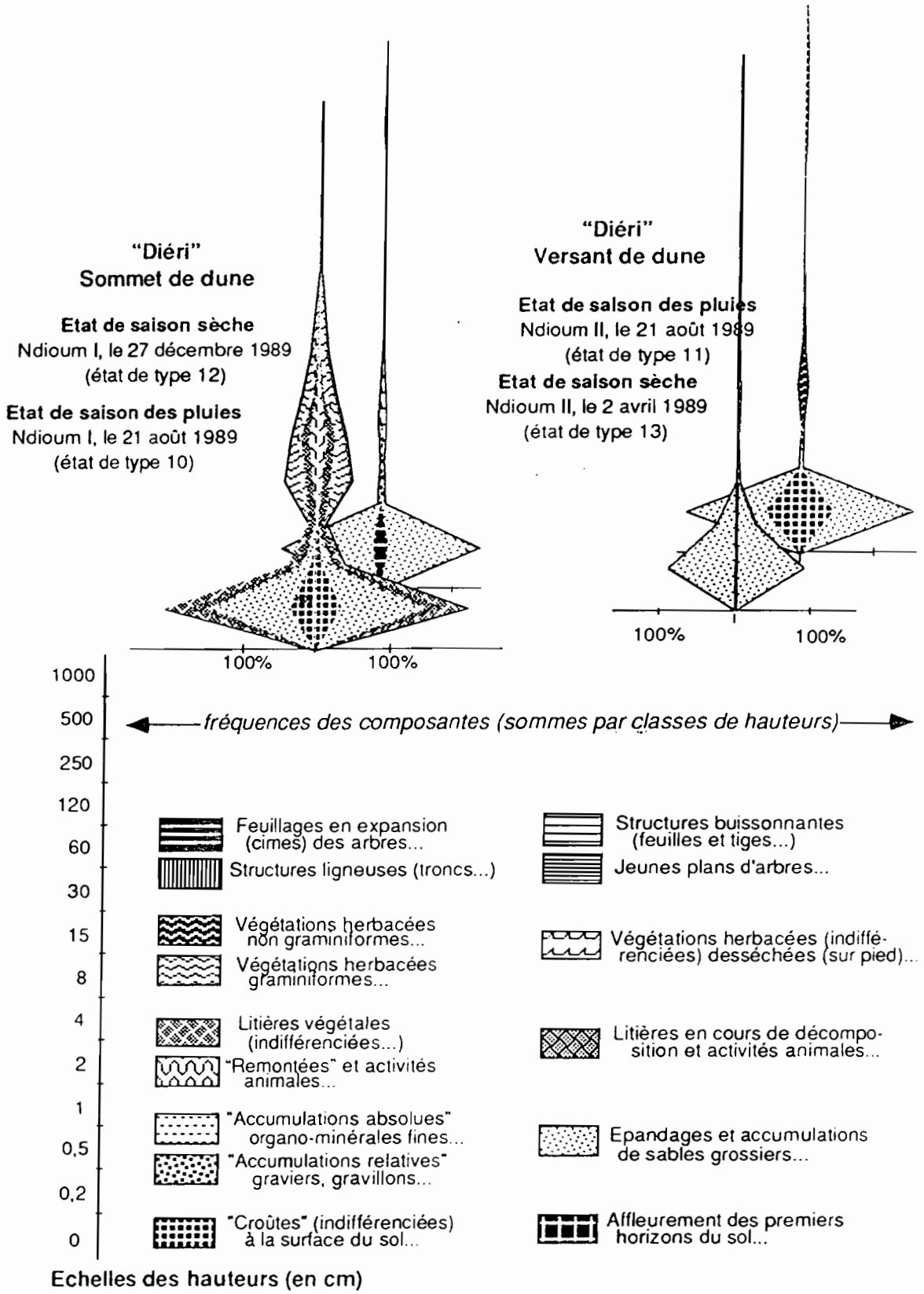


Fig. 40 a et b Structure des états du milieu dans le *diéri*
(et légende des figures 40 et 46)

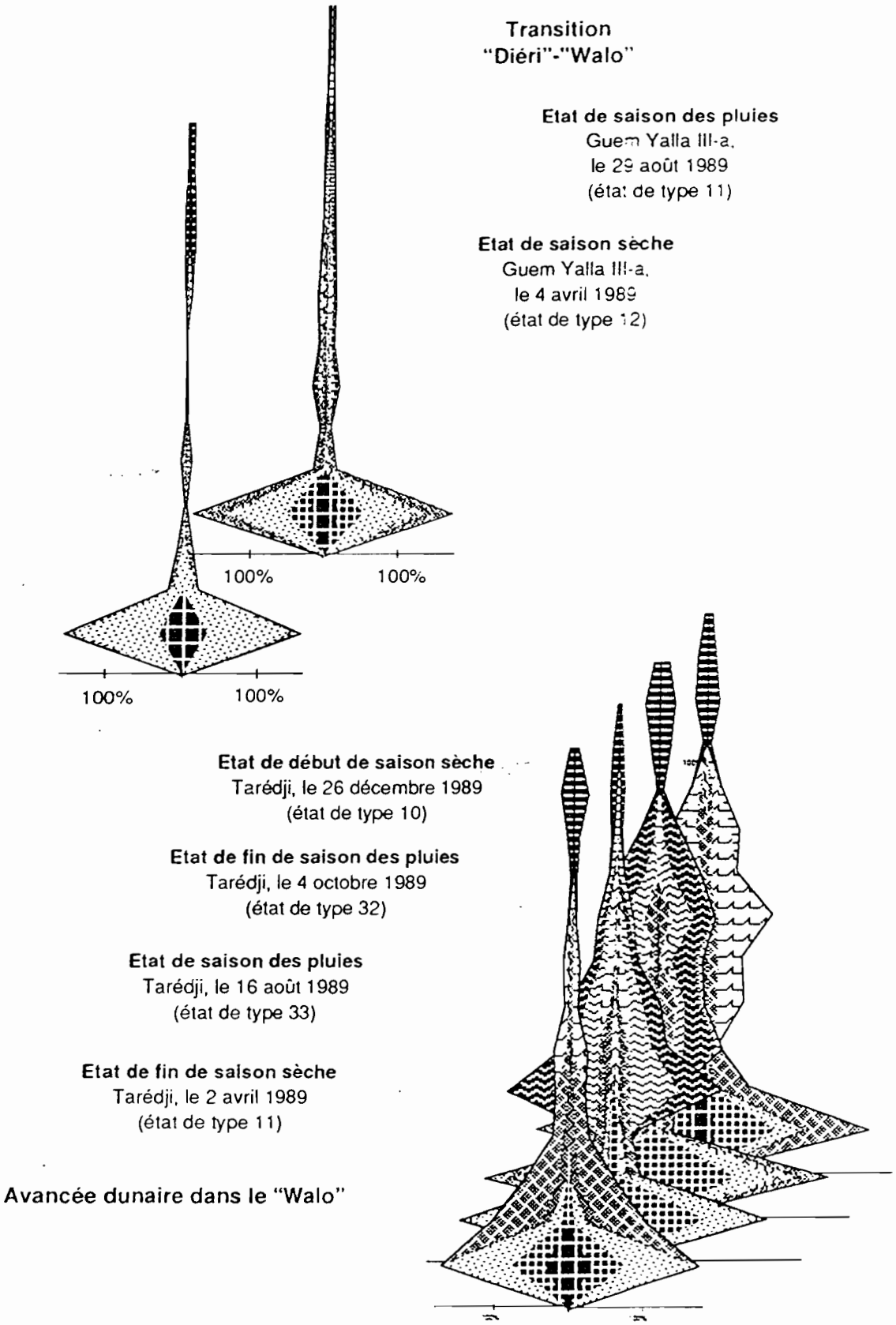


Fig. 40c et d Structure des états du milieu à la transition *diéri - walo*

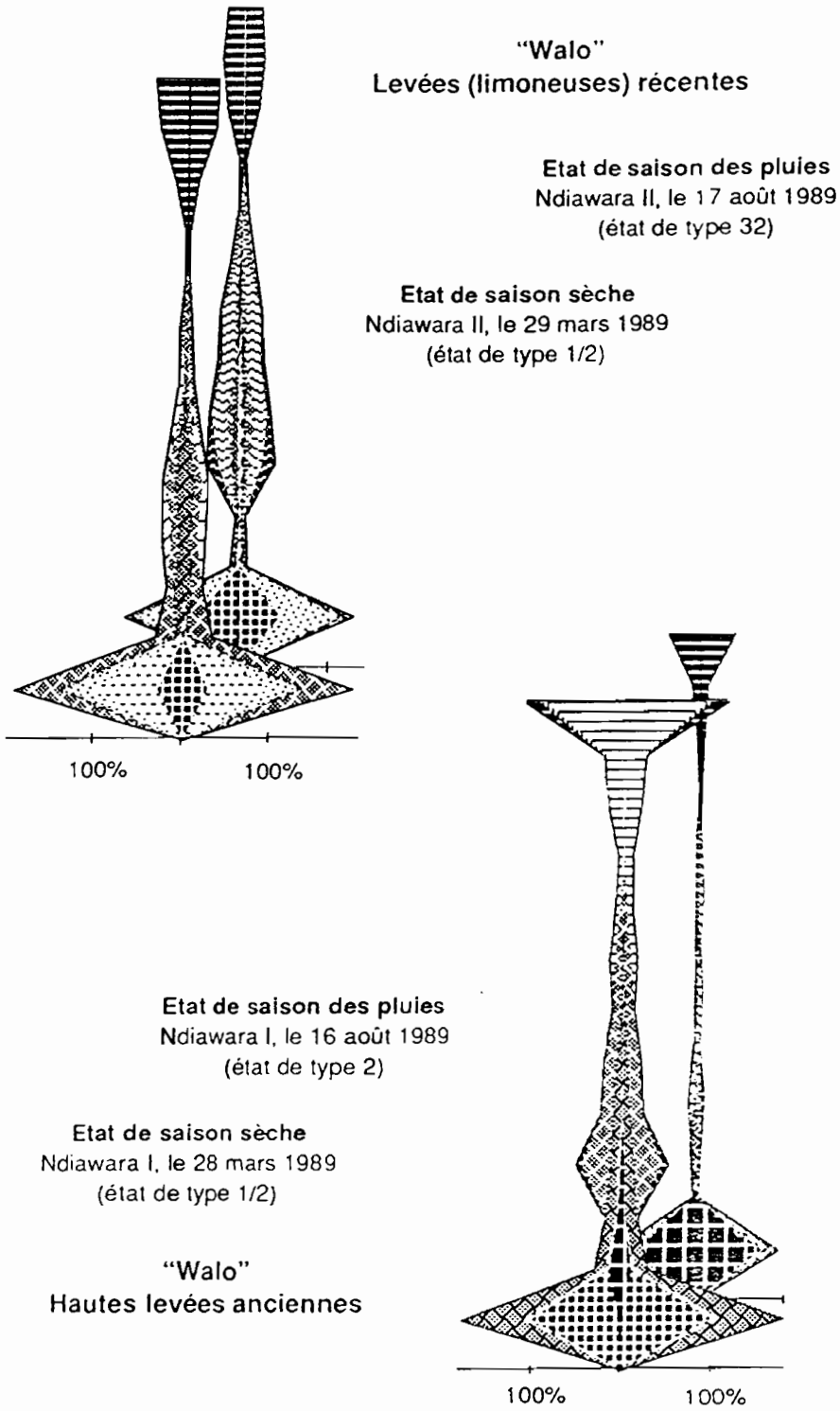


Fig. 40 e et f Structure des états du milieu dans le *walo*

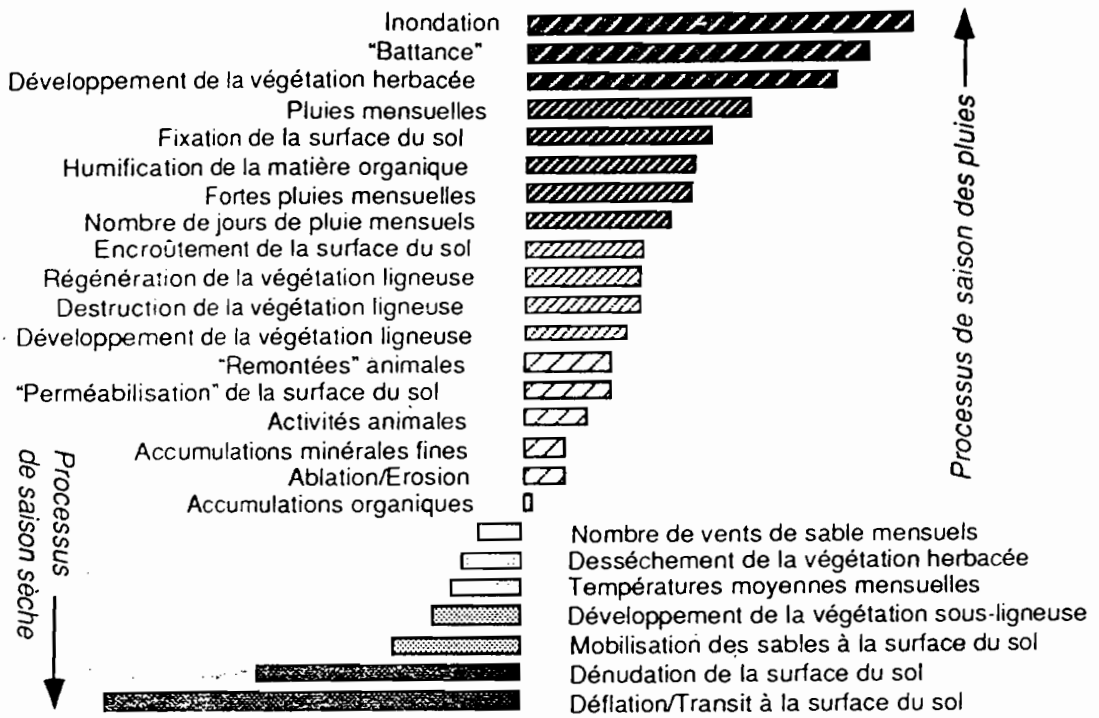


Fig. 41 : Différenciation des processus de saison sèche et de saison des pluies
(sur le premier facteur de l'AFC "ensemble des états")

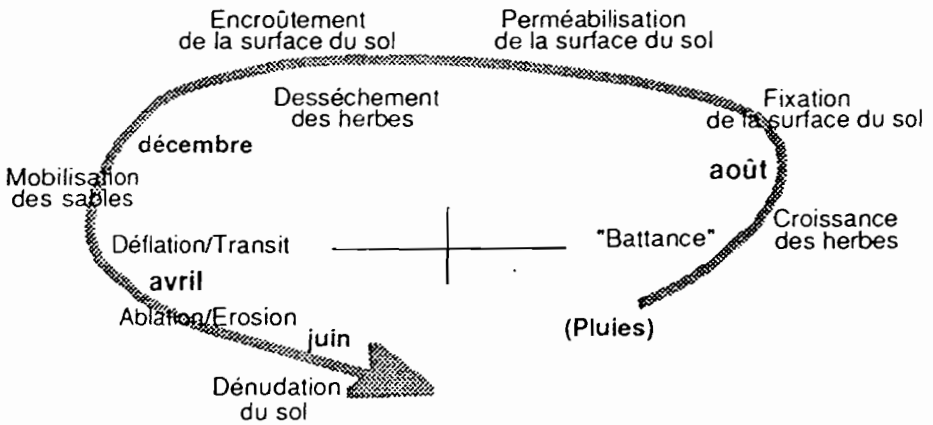


Fig. 42 : Transition *diéri-walo* : un "cycle" annuel à la surface du sol
(sur les deux premiers facteurs de l'AFC "Guem Yalla III-a")

2.1. CYCLES SAISONNIERS

Dans l'exemple précédent, pris dans un milieu au comportement simple et régulier, la séquence «Battance ⟶ Dénudation» ne correspond pas seulement à un ordre d'apparition des processus d'érosion à la surface du sol. Sur le graphique factoriel, cette séquence de processus dessine aussi un véritable cycle annuel.

Ces cycles saisonniers - qui se trouvent à l'origine de changements d'état apparemment réversibles - sont représentés sur les figures 43 : les courbes montrent les variations relatives de tous les processus observés à Ndioum I et Tarédji, deux milieux relativement peu perturbés par les activités humaines actuelles, que l'on pourra comparer au milieu en cours de dégradation de Ndiawara II et au milieu déjà très dégradé de Donaye II.

Sur le sommet de la dune de Ndioum, les effets de la saison des pluies sont strictement concentrés sur le mois d'août, il n'y a pas d'arrière-saison. Le milieu ne "vit" qu'un mois dans l'année : le reste du temps interviennent des mécanismes d'érosion physique sans récurrence prévisible! On notera que la dynamique de la végétation ligneuse ne dépend qu'en partie de ce cycle saisonnier. Et l'on remarquera surtout que la sécheresse de 1990 a eu des conséquences nettement perceptibles : elle s'est traduite par une baisse de l'intensité des processus bio-organiques de surface, relayée par une augmentation de la macro-porosité et de la dénudation du sol.

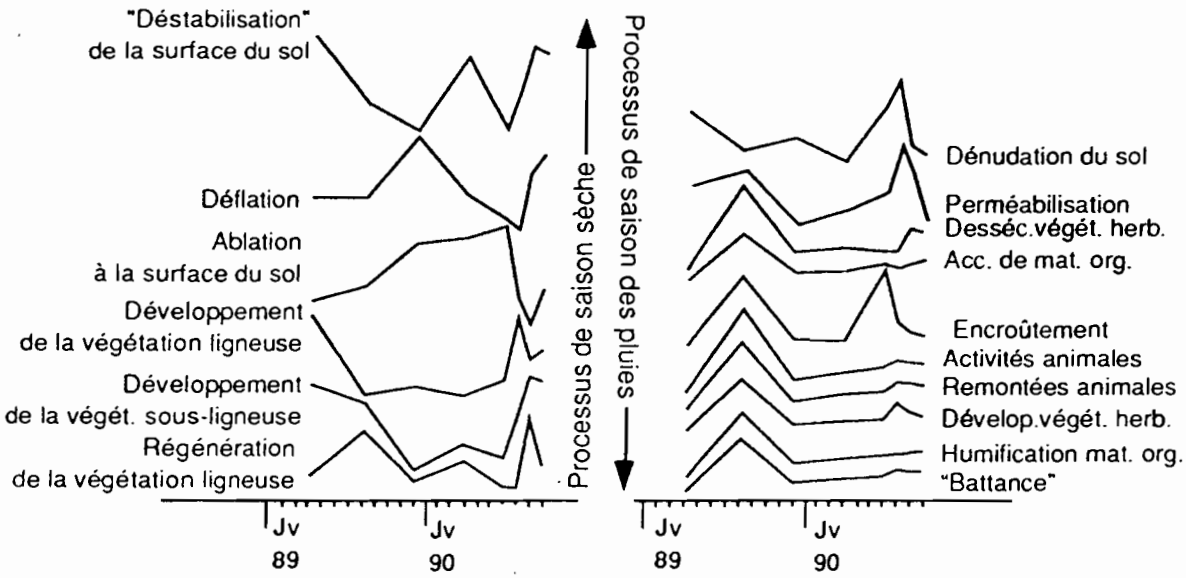


Fig. 43 a Cycles saisonniers sur le sommet de dune de Ndioum I (*diéri*)
(résidus des régressions linéaires des diagnostics avec le temps)

A Tarédji, sur l'avancée dunaire dans le *walo*, les conséquences directes de cette sécheresse sont moins sensibles (elles sont cependant visibles dans une augmentation de la macro-porosité et dans une diminution de la stabilité du sol en surface). Ce qui est plus remarquable entre 1989 et 1990, c'est la durée de fonctionnement plus brève et plus tardive des processus bio-organiques liés aux pluies. Comme précédemment, la dynamique de la végétation ligneuse reste imprévisible et dépend, au moins en partie ici, des activités humaines (on notera qu'en réponse au phénomène de nécrose naturelle ou anthropique, le pouvoir de régénération de cette végétation ligneuse est à la fois immédiat et important). Dernière remarque, expliquant la succession d'états nettement différenciés observée à Tarédji : les processus de saison des pluies sont progressivement décalés dans le temps, depuis les phénomènes de restructuration précoce de la surface du sol jusqu'aux activités animales les plus tardives.

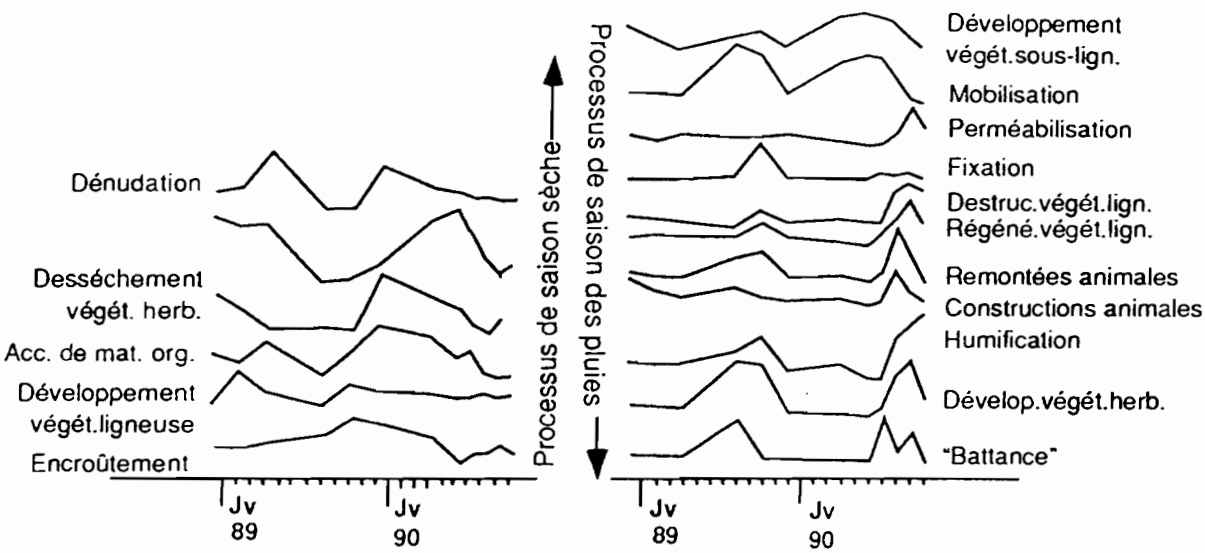


Fig. 43 b Cycles saisonniers sur l'avancée dunaire de Tarédji (*diéri-walo*)
(résidus des régressions linéaires des diagnostics avec le temps)

Alors que les milieux précédents de Ndioum et Tarédji (sur sols sableux) se définissent surtout par l'importance des changements intervenant en saison des pluies, les deux milieux suivants (sur sols limoneux) s'individualisent aussi par des processus et des composantes qui n'apparaissent qu'au cœur de la saison sèche : l'accumulation de matière organique et le "piégeage" de la matière minérale fine, le dessèchement et la persistance de la couverture herbacée, le transit et la déflation des sables à la surface du sol.

C'est ainsi qu'à Ndiawara II, il y a autant de phénomènes spécifiques à la saison sèche que de phénomènes spécifiques à la saison des pluies. On notera aussi deux associations de processus intervenant de

manière assez surprenante : l'activité animale en saison sèche, l'érosion éolienne en saison des pluies. Sans doute faut-il voir dans ce dernier phénomène le résultat immédiat de l'intervention humaine et de la destruction de la couverture végétale.

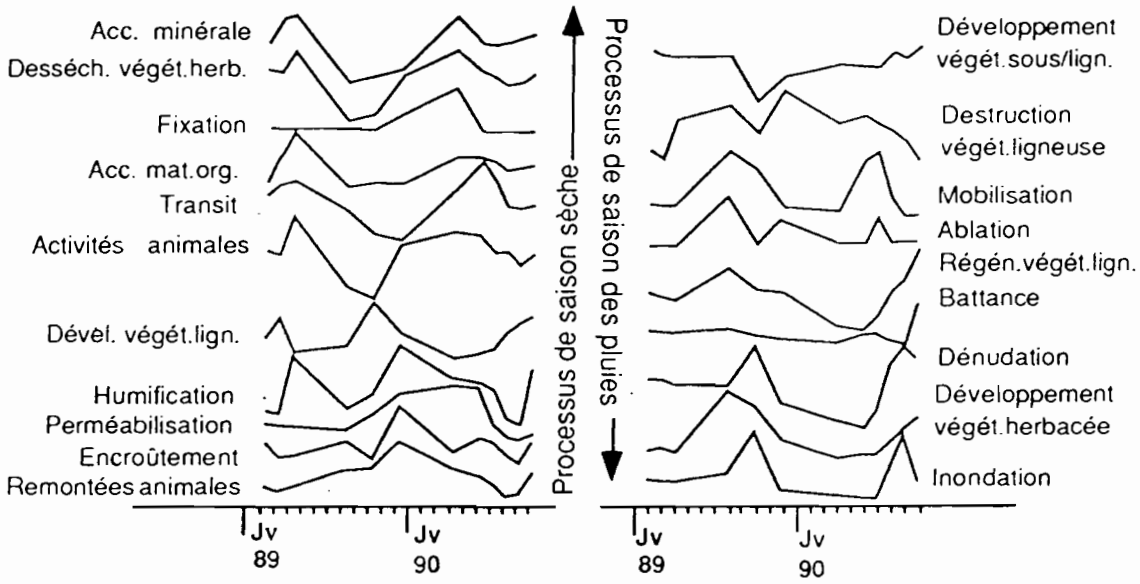


Fig. 43c : Cycles saisonniers sur la levée subactuelle de Ndiawara II (*walo*)
(résidus des régressions linéaires des diagnostics avec le temps)

Les changements d'état saisonniers de la levée fluviatile de Donaye II sont tout à fait comparables à ceux de Ndiawara II (en particulier, on notera le dédoublement des activités animales au cours de l'année et le "piégeage" des poussières minérales dans les fentes de retrait du sol en saison sèche), mais ils apportent une précision supplémentaire : la baisse des précipitations et la faiblesse du couvert végétal herbacé en 1990 apparaissent comme relayées par les processus de tassement et d'encroûtement de la surface du sol. Des mécanismes qui semblent ainsi autant, sinon plus, liés à la sécheresse qu'à la pluie.

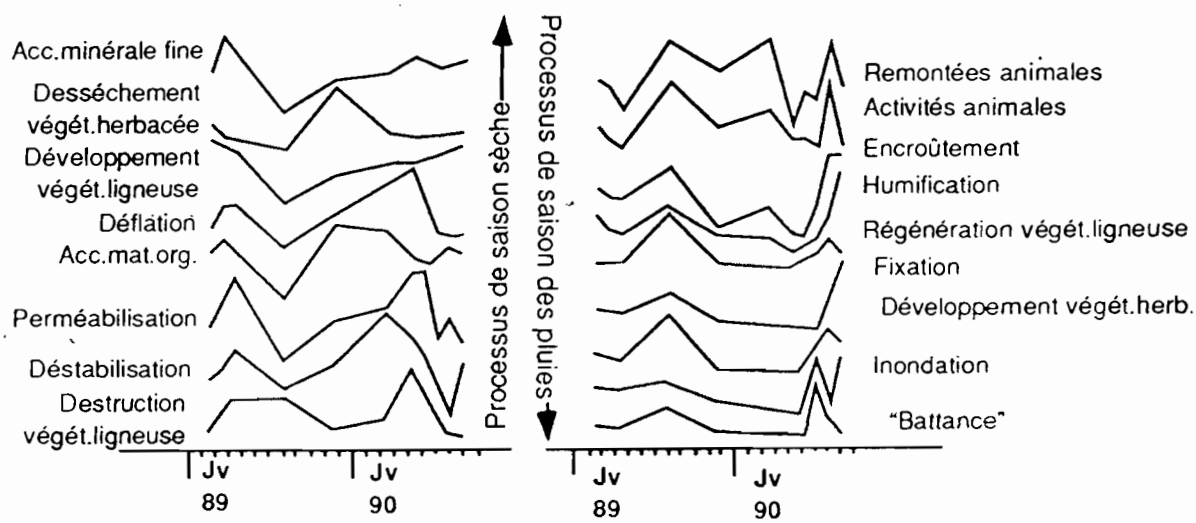


Fig. 43d Cycles saisonniers sur la levée fluviatile récente de Donaye II (*walo*)
(résidus des régressions linéaires des diagnostics avec le temps)

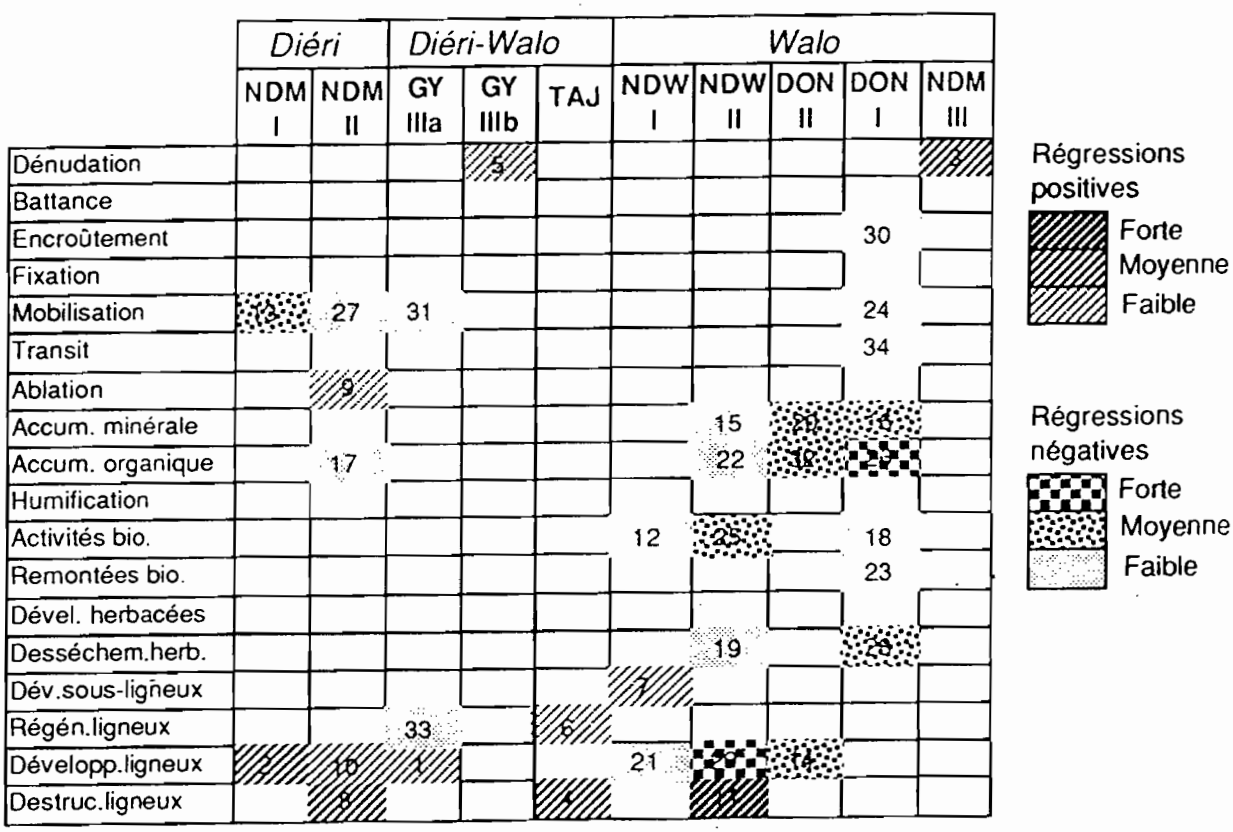
2.2. TENDANCES ÉVOLUTIVES

A l'échelle de la Moyenne Vallée, aucune évolution générale significative n'a été mise en évidence entre les années 1989 et 1990. Tout au plus peut-on soupçonner une tendance à la baisse des processus d'accumulation (recouvrements végétaux, activités animales, accumulations organiques et minérales fines) et une très légère tendance à la hausse de quelques processus d'érosion ("pavages" grossiers, dénudation du sol). Malgré la sécheresse de 1990 (60% de pluies en moins qu'en 1989), et des activités humaines qui n'ont pas diminué pour autant, le paysage naturel ne semble évoluer et réagir que très lentement.

C'est à l'échelle de chaque station que ces évolutions deviennent vraiment significatives et qu'il se confirme qu'elles sont pratiquement toujours allées dans un sens péjoratif (tabl. 28).

• Les milieux du *diéri* n'ont guère changé car, à vrai dire, ils avaient peu à offrir au changement! Le sommet de la dune de Ndioum présente même des signes d'agradation (liés à la croissance naturelle de la végétation ligneuse). C'est surtout le versant qui montre les signes d'une dégradation d'ailleurs assez faible (liés, eux, à la destruction de cette végétation par l'homme) : diminution de la litière végétale, augmentation de l'érosion éolienne.

• Ce sont les milieux de transition entre le *diéri* et le *walo* qui sont apparemment restés les plus stables. A Guem Yalla toutefois, ce milieu de contact a été marqué par une forte augmentation de la dénudation du sol (surtout dans le cas de la station III-b qui subit une pression anthropique, parfaitement visible sur le terrain). A Tarédji, les conséquences d'un déboisement relativement intense ne se sont pas (encore ?) fait sentir sur l'évolution des autres composantes du milieu. On remarquera même, au contraire, que la réaction positive de la végétation ligneuse - cette capacité de régénération déjà perçue à l'échelle de la saison - s'est maintenue pendant les deux années d'observation.



Tabl. 28 Tendances évolutives des milieux naturels dans la Moyenne Vallée du fleuve Sénégal (1989 - 1990)

(régressions linéaires des composantes du milieu avec le temps)

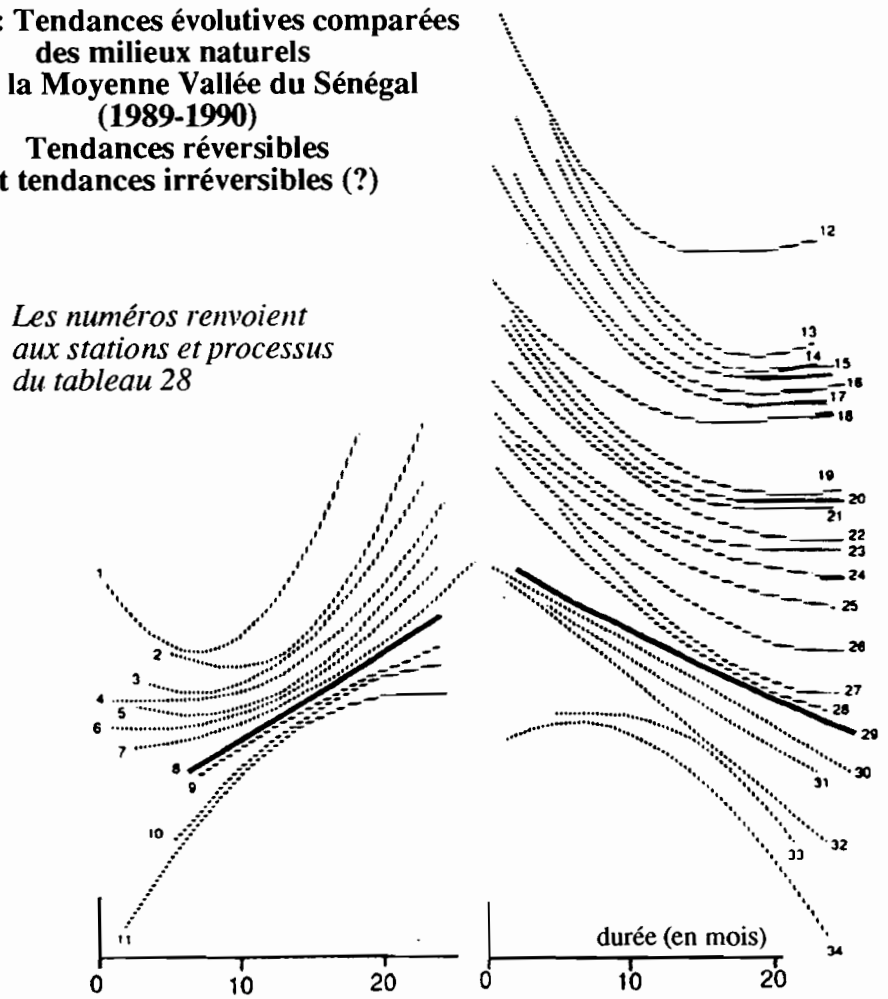
Ce sont bien sûr les milieux du *walo*, les plus directement soumis aux activités humaines, qui se sont révélés les plus instables : plus de 20% de leurs composantes ont radicalement changé entre 1989 et 1990 !

Ce sont ces milieux qui ont subi les formes de dégradation les plus nombreuses et les plus intenses : coupes de bois de plus en plus radicales (Ndiawara), dépérissement de la végétation herbacée, baisse des activités animales, diminution et même arrêt des processus d'accumulation organo-minérale à la surface du sol (Donaye). Le résultat s'est généralisé à presque toutes les unités paysagiques du *walo*. De ce point de vue, "Hautes levées" et "Levées récentes" du fleuve ne se distinguent plus guère!

D'ailleurs, si l'on reprend l'ensemble de ce tableau, on s'aperçoit qu'aucun des milieux étudiés n'échappe totalement à cette érosion globale. C'est surtout le fait que les formes de dégradation changent d'un milieu à l'autre qui explique l'absence d'évolutions statistiques significatives à l'échelle du paysage : encore une fois, il faut souligner que les milieux ne réagissent pas tous de la même façon aux agressions climatiques et anthropiques.

Sans prétendre à une projection dans l'avenir, on peut néanmoins regrouper ces évolutions en quatre familles, en essayant de se demander s'il s'agit encore de phénomènes cycliques, mais se reproduisant à l'échelle de plusieurs années, ou si certaines courbes ne préfigureraient pas des changements d'état irréversibles (fig. 43 et *annexe 7*, où l'on trouvera une évaluation de l'intensité de ces variations interannuelles).

Fig. 44 : Tendances évolutives comparées des milieux naturels dans la Moyenne Vallée du Sénégal (1989-1990) Tendances réversibles et tendances irréversibles (?)



Positives ou négatives, la plupart de ces évolutions semblent tendre vers une asymptote, c'est-à-dire vers une nouvelle stabilité située parfois au delà mais, beaucoup plus souvent, en deçà de l'état initial du milieu. C'est

en particulier le cas des processus de biostasie (activités animales et accumulations organo-minérales à la surface du sol).

Toutefois, plus de 35 % de ces évolutions semblent devoir se poursuivre, ou du moins n'ont montré aucun signe de ralentissement pendant la période étudiée : c'est l'exemple de la mobilisation des sables et de la dénudation du sol dans les deux stations de Guem Yalla III-a et de Donaye I.

Enfin, certaines de ces évolutions semblent aléatoires, partagées, comme celles de la végétation. Ces dernières dépendent d'interventions humaines parfois brutales et ponctuelles, et elles échapperaient ainsi, en partie, à la dynamique d'ensemble.

3. LA DÉGRADATION DES MILIEUX

Pour donner des exemples précis, visibles sur le terrain, et pour essayer de montrer quelles ont été les influences respectives de la sécheresse et du déboisement, nous comparerons enfin les états du milieu observés en août 1989 à ceux observés une année plus tard, en août 1990 (fig. 46).

Chaque cas mériterait un commentaire particulier. Car, encore une fois, chaque milieu suit ou subit une évolution particulière. Mais on peut aussi établir un bilan de la dégradation à l'échelle du paysage, en faisant la somme de ces évolutions individuelles au sein de l'opposition majeure *diéri-walo*. Ce partage géographique correspond d'ailleurs assez étroitement aux activités humaines et à leur impact sur le milieu, notamment à l'intensité des coupes de bois telles qu'elles ont été évaluées sur le terrain (fig. 45 et 36b). Sur les figures 46, les trois indices permettent d'apprécier et de quantifier l'influence de l'homme sur le milieu ; le feu et surtout les bois morts mais aussi la fréquence des rejets de souche, témoignant de la croissance végétale.

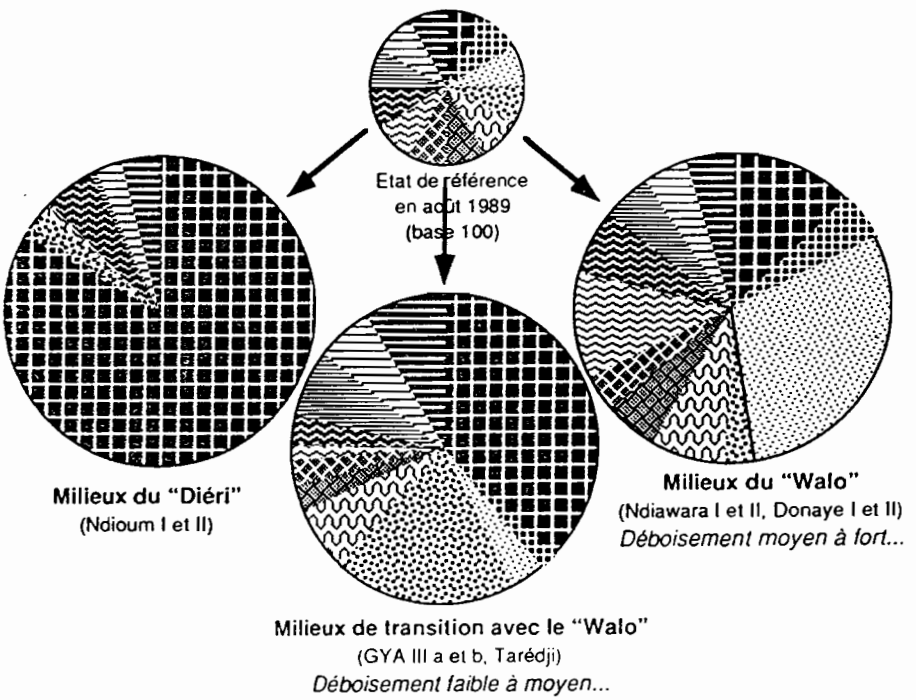


Fig. 45 Un bilan de l'évolution 1989-1990 des milieux.
(même légende que les figures 40et 46)

Sur le *diéri*, la dune de Ndioum a vu sa végétation se diversifier sinon se maintenir, mais cela n'a pas empêché une extension spectaculaire de la dénudation du sol déclenchée par la sécheresse. Sur le versant, le milieu s'est même réduit à la plus simple expression structurale qu'on puisse imaginer : l'ensablement s'est généralisé, les phénomènes d'encroûtement ont disparu.

Au contact *diéri-walo*, la végétation paraît, dans son ensemble, avoir assez bien résisté. Mais le retard et la diminution de la couverture herbacée, même peu marqués, suffiraient à expliquer l'extension des sols érodés et des "pavages grossiers", témoins de l'ablation des particules organo-minérales plus fines. L'avancée dunaire de Tarédji a, par contre, conservé un milieu de structure relativement complexe malgré des coupes de bois déjà importantes.

Ce sont surtout les stations du *walo* qui se sont dégradées sous les effets du déboisement. Les conséquences, en particulier sur la dénudation du sol et surtout sur son ensablement, sont particulièrement visibles à Ndiawara II et à Donaye I. A Ndiawara II, où la végétation herbacée de 1990 a été cinq fois moins importante qu'en 1989, les activités animales ont diminué de moitié, et les accumulations organo-minérales fines, qui caractérisaient ces milieux de *walo,* ont presque totalement disparu. A Donaye I, on enregistre les mêmes tendances évolutives et les mêmes chiffres : la fréquence des activités animales passe de 20 à 10%, celle des litières de 30 à 0 %, celle des apports limono-argileux de 60 à 0 %. Quant à la station de Donaye II, marquée par des phénomènes de même intensité, on a l'impression qu'elle restera toujours en l'état de dégradation très avancée qui était celui du début des observations !

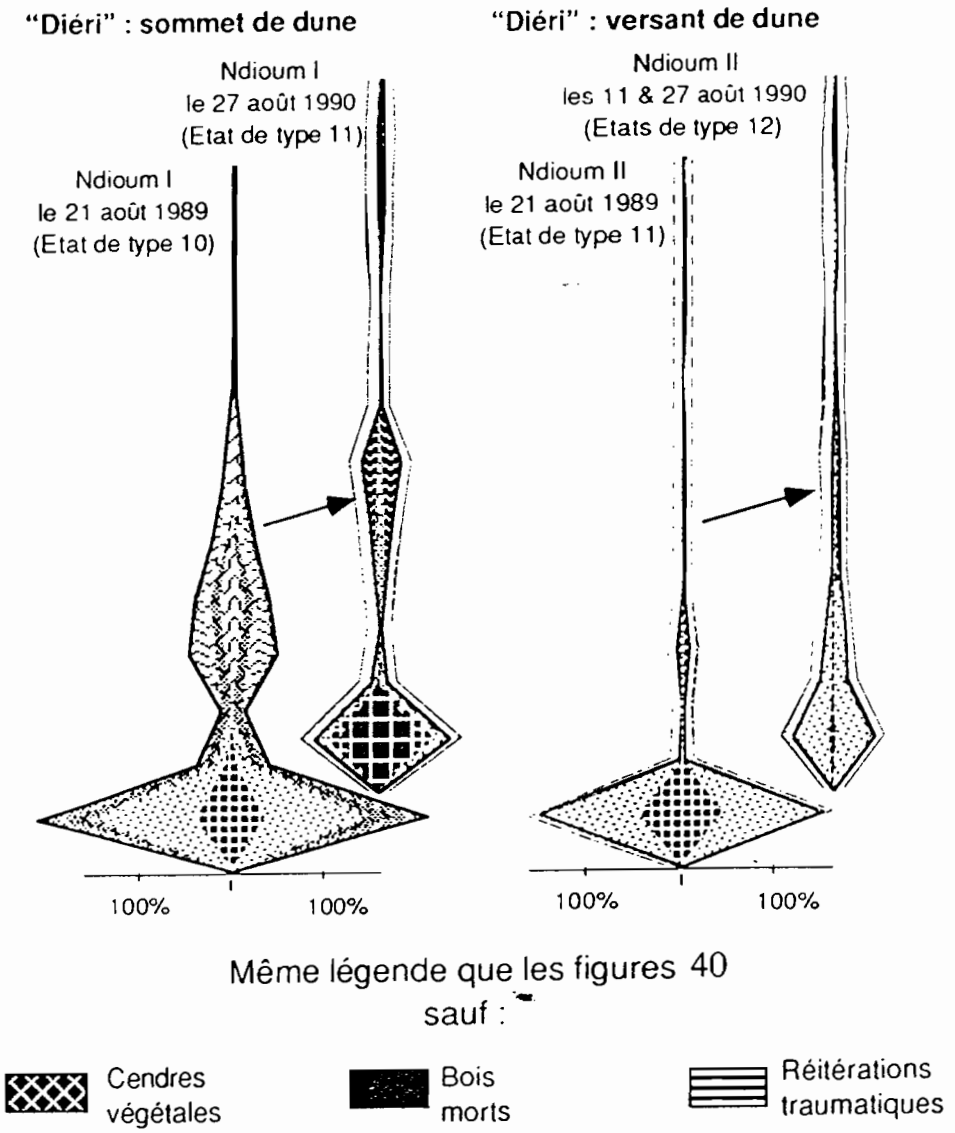
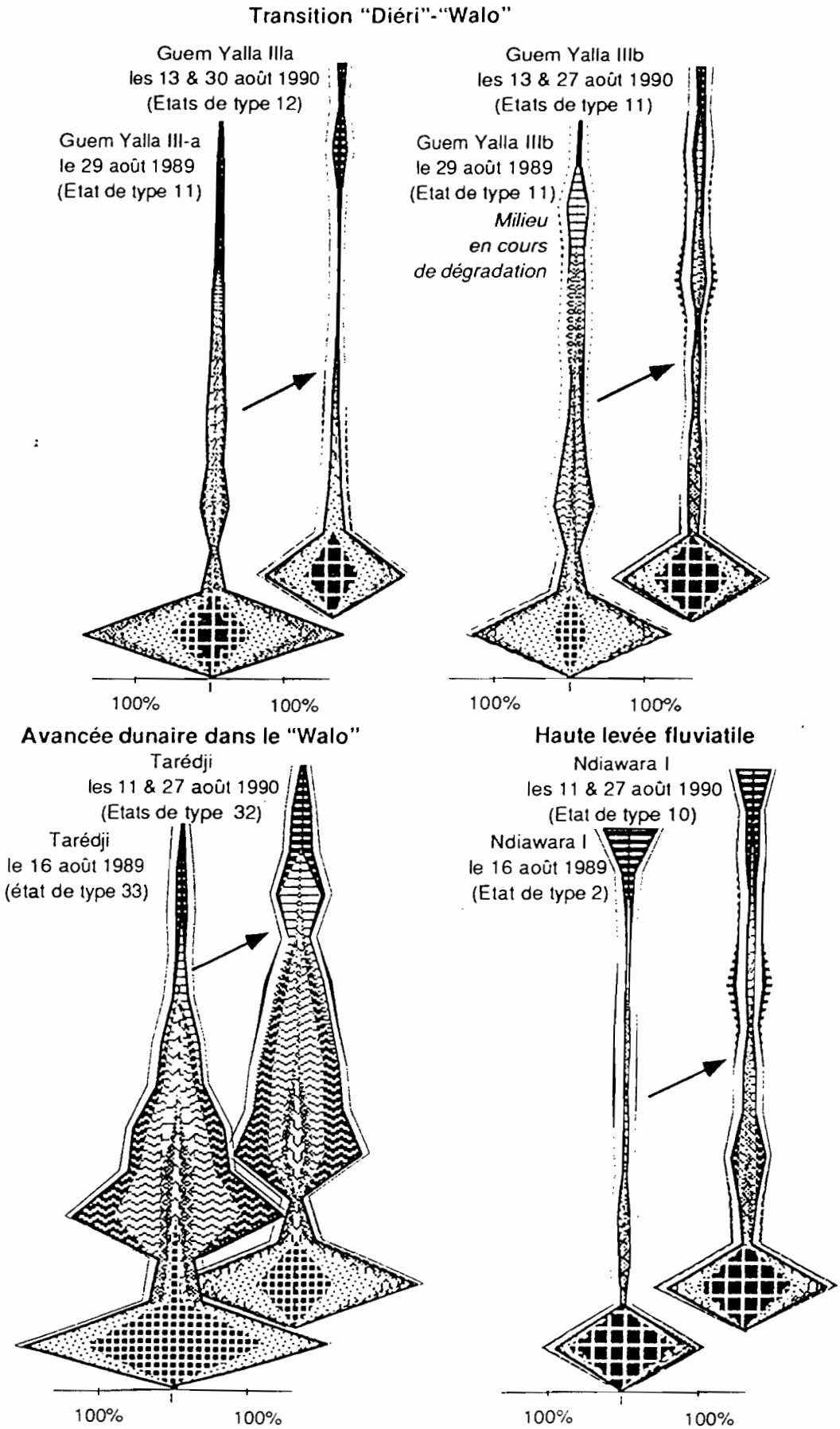
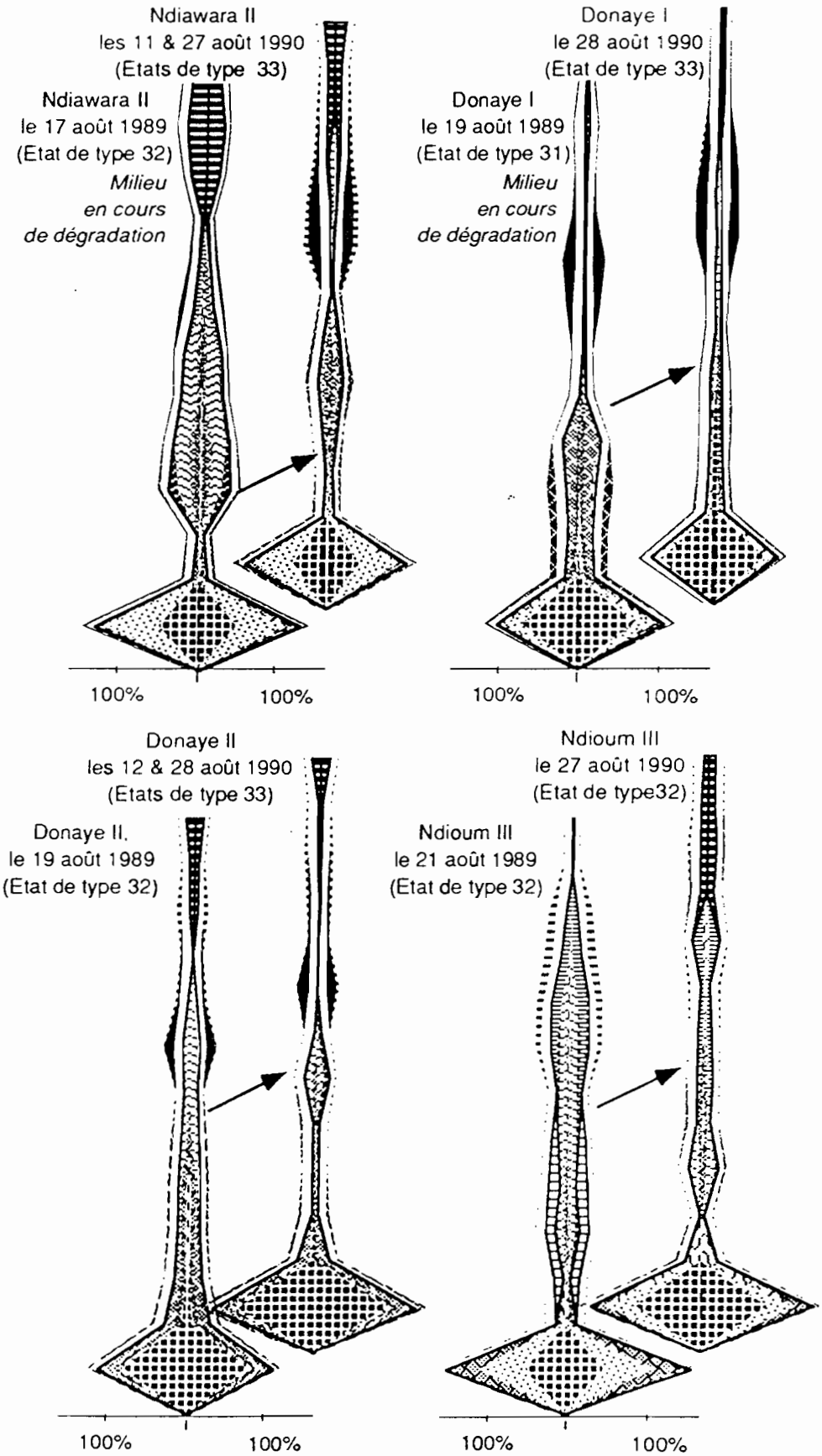


Fig. 46 a, b et c La dégradation des milieux naturels dans la Moyenne Vallée du fleuve Sénégal (1989 - 1990)

(les figures 46b et 46c sont p. 124 et 125)


Transition "Diéri"-"Walo"
Guem Yalla IIIa
les 13 & 30 août 1990
(Etats de type 12)
Guem Yalla III-a
le 29 août 1989
(Etat de type 11)
100%
100%
Guem Yalla IIIb
les 13 & 27 août 1990
(Etats de type 11)
Guem Yalla IIIb
le 29 août 1989
(Etat de type 11)
Milieu
en cours
de dégradation
100%
100%
Avancée dunaire dans le "Walo"
Tarédji
les 11 & 27 août 1990
(Etats de type 32)
Tarédji
le 16 août 1989
(état de type 33)
100%
100%
Haute levée fluviatile
Ndiawara I
les 11 & 27 août 1990
(Etat de type 10)
Ndiawara I
le 16 août 1989
(Etat de type 2)
100%
100%

Levées fluviatiles subactuelles



CHAPITRE XI

L'EVOLUTION DES MILIEUX NATURELS EN 1989-90

Jean-François RICHARD
Albert DIAGNE

1. ETHOLOGIE DU PAYSAGE.

Au terme de cette étude, nous nous proposons de changer d'échelle d'analyse, c'est-à-dire de passer des stations précédentes, et des résultats qu'elles viennent de nous fournir, au paysage vu dans son entier. La méthode, donnée en *annexe 8* a été testée sur le secteur de Tarédji (fig. 35), où se trouvent les stations de Donaye, Ndiawara et Tarédji.

Cinq premières cartes montrent les principaux états du paysage au cours de l'année. Les périodes retenues correspondent aux moments où ce paysage présente un maximum de diversité : les cartes sont la projection spatiale des types d'états et des successions d'états schématisés sur la figure 39 avec les mêmes légendes (fig. 47 a - e).

Au maximum des pluies, tout le *walo* s'uniformise sous sa couverture herbacée même si, à la surface du sol, les phénomènes de battance commencent déjà à laisser la place aux phénomènes d'encroûtement. Le *diéri* conserve, au contraire, une certaine variété, grâce à des états du milieu un peu plus complexes sur les sommets de dune que sur les versants.

A la fin de cette saison des pluies, le paysage du *walo* est toujours aussi uniforme, mais les états du milieu ont changé, subissant l'interférence des premiers processus de saison sèche (mobilisation des sables), ils sont devenus plus hétérogènes. Quant au paysage du *diéri*, il prend rapidement l'aspect appauvri et desséché qu'il va garder tout le reste de l'année ; c'est, dès cette date, le domaine sans partage de la déflation éolienne.

Au début de la saison sèche, les avancées dunaires les plus boisées que l'on puisse trouver dans le *walo* s'individualisent par la persistance des herbes sèches et des activités animales associées. Le reste du *walo* présente un état remarquable : sous une végétation ligneuse arrivée à son maximum de développement saisonnier, c'est surtout à ce moment-là que se produisent les phénomènes d'accumulation organo-minérale fine.

Au cœur de la saison sèche, les quelques dunes au contact du *walo* s'individualisent encore ; les effets de la déflation éolienne n'empêchent pas la poursuite de quelques processus accumulatifs. Mais le reste du paysage, *walo* ou *diéri*, ne change plus.

A la fin de la saison sèche, ce cycle saisonnier conduit finalement à distinguer une autre unité paysagique constituée par certaines levées fluviatiles récentes, dont les milieux semblent avoir conservé une dynamique trans-accumulative toute l'année. Pour le reste, l'opposition *diéri-walo* s'est atténuée mais ne disparaît pas et n'a jamais totalement disparu !

Cette opposition majeure *diéri-walo* est encore mieux illustrée par la dernière carte, où sont comptabilisés les états du milieu qui se suivent dans l'année (fig. 48) : la simplicité et la régularité du comportement du *diéri* s'oppose à la complexité, et parfois au déréglement, des comportements du *walo*.

2. CONCLUSION

Au delà de l'opposition majeure entre les bordures de la vallée du fleuve Sénégal - le *diéri* - et la vallée ell-même - le *walo* - on est frappé par l'extrême diversité des milieux naturels. Cette diversité est due au grand

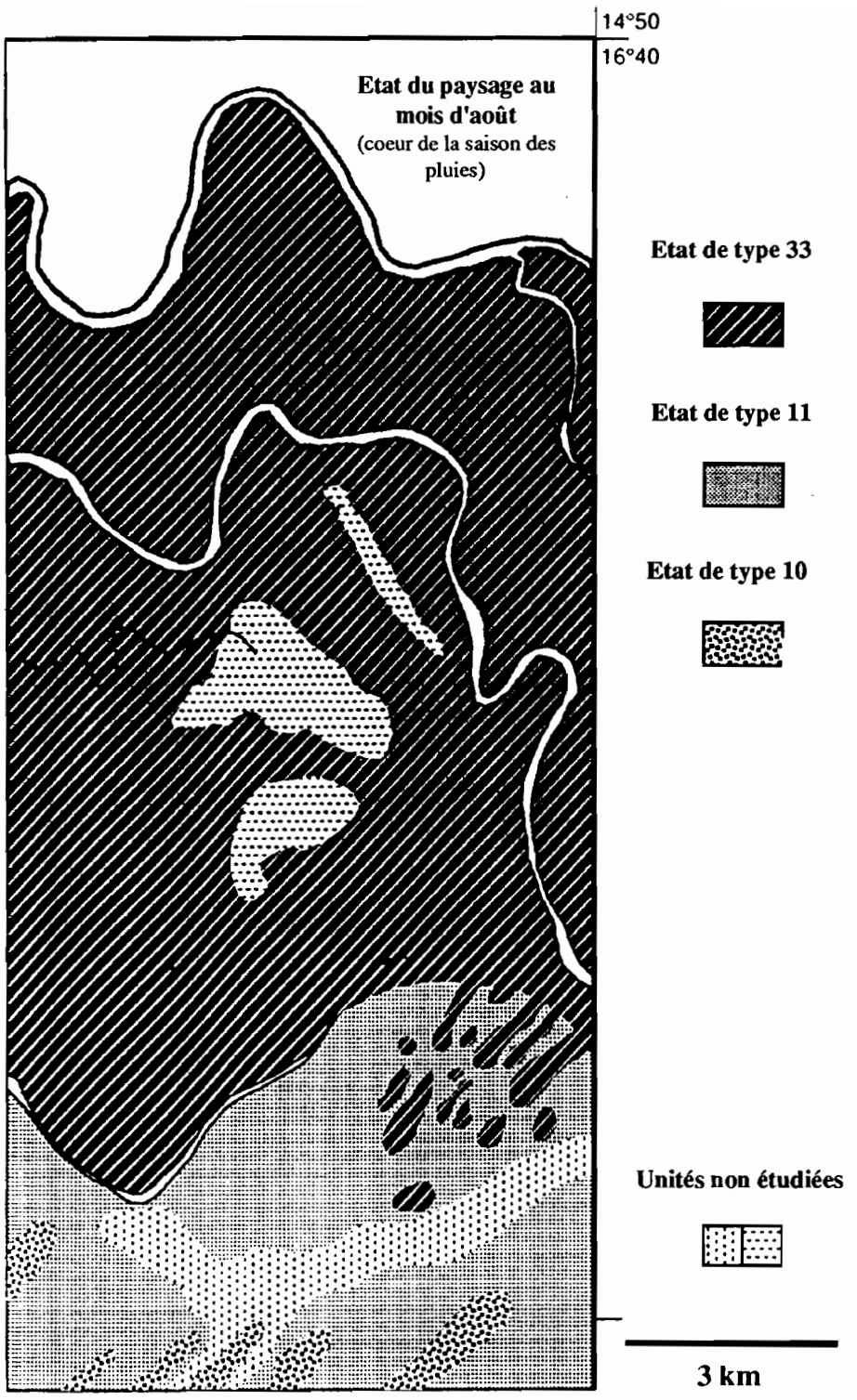


Fig. 47a : Le paysage de Tarédji au mois d'août

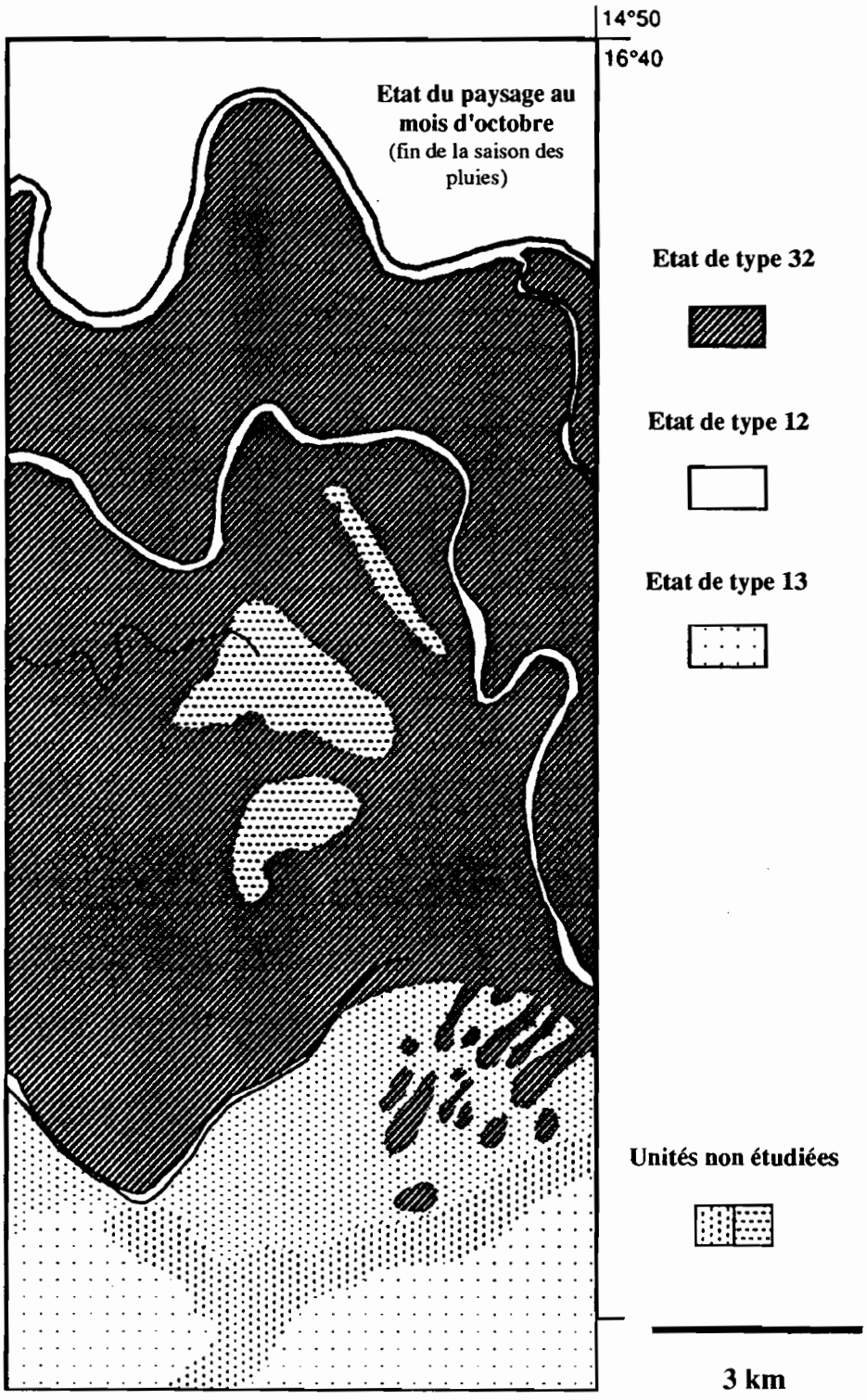


Fig. 47b : Le paysage de Tarédji au mois d'octobre

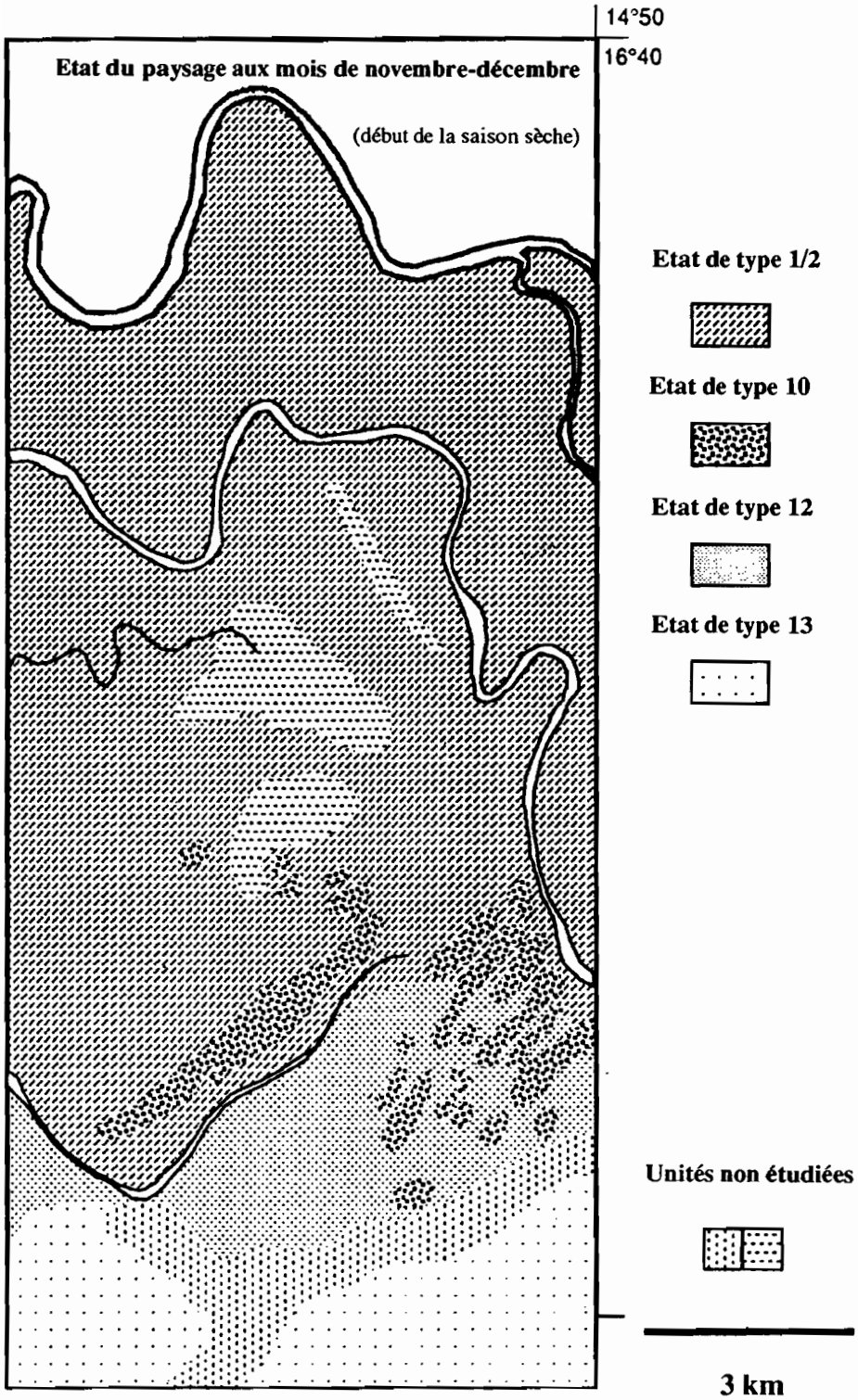


Fig. 47c : Le paysage de Tarédji aux mois de novembre-décembre

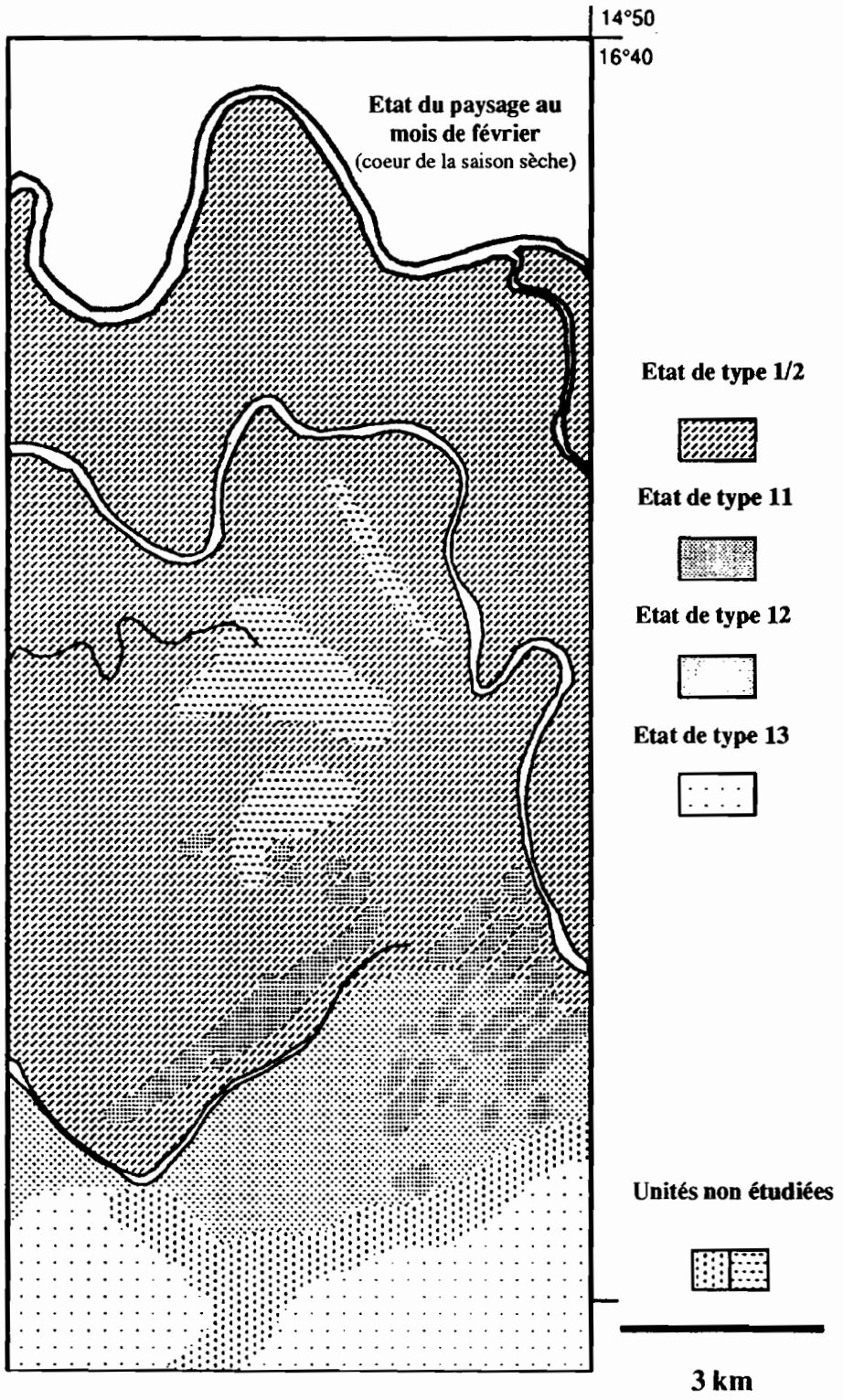


Fig. 47d : Le paysage de Tarédji au mois de février

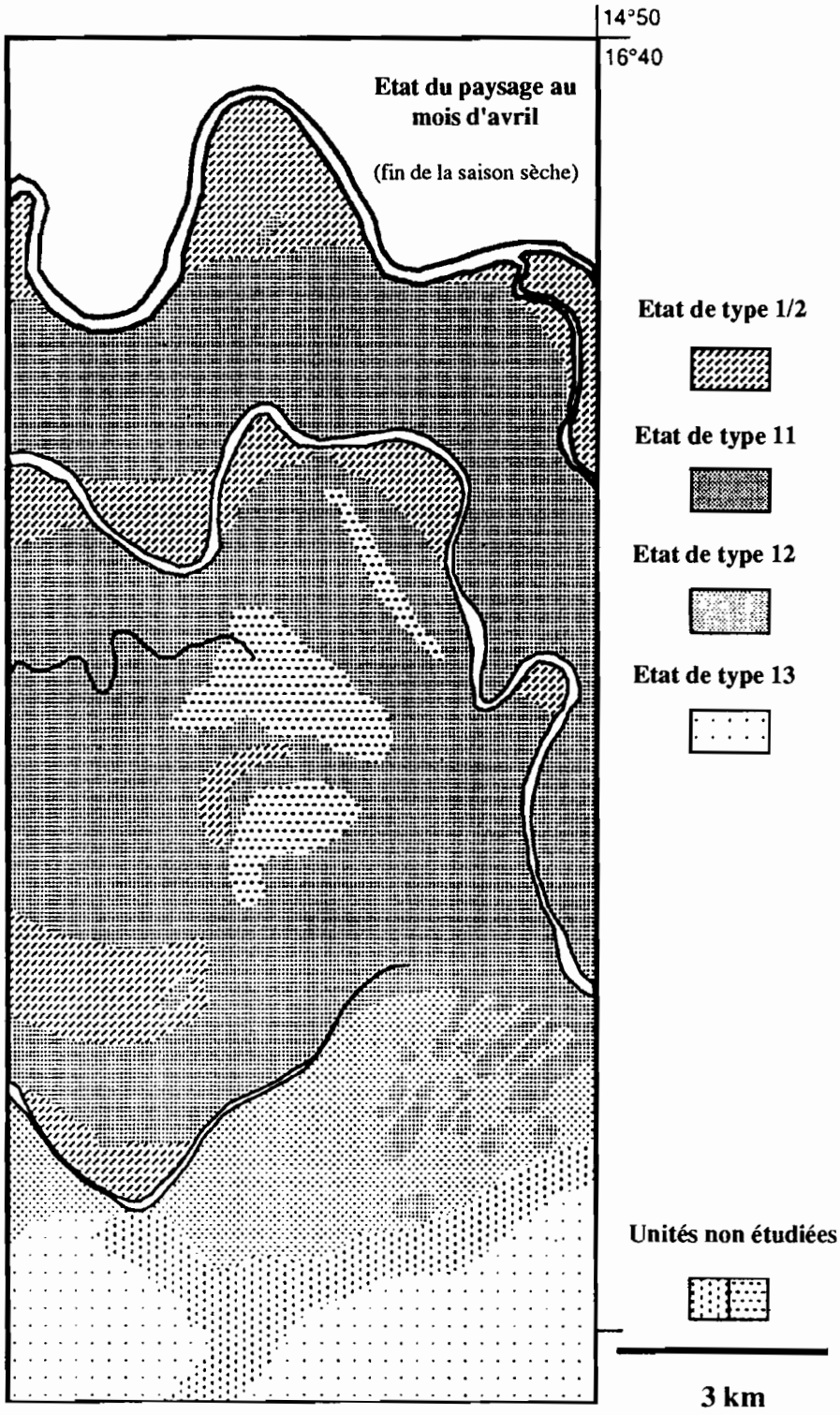


Fig. 47e : Le paysage de Tarédji au mois d'avril

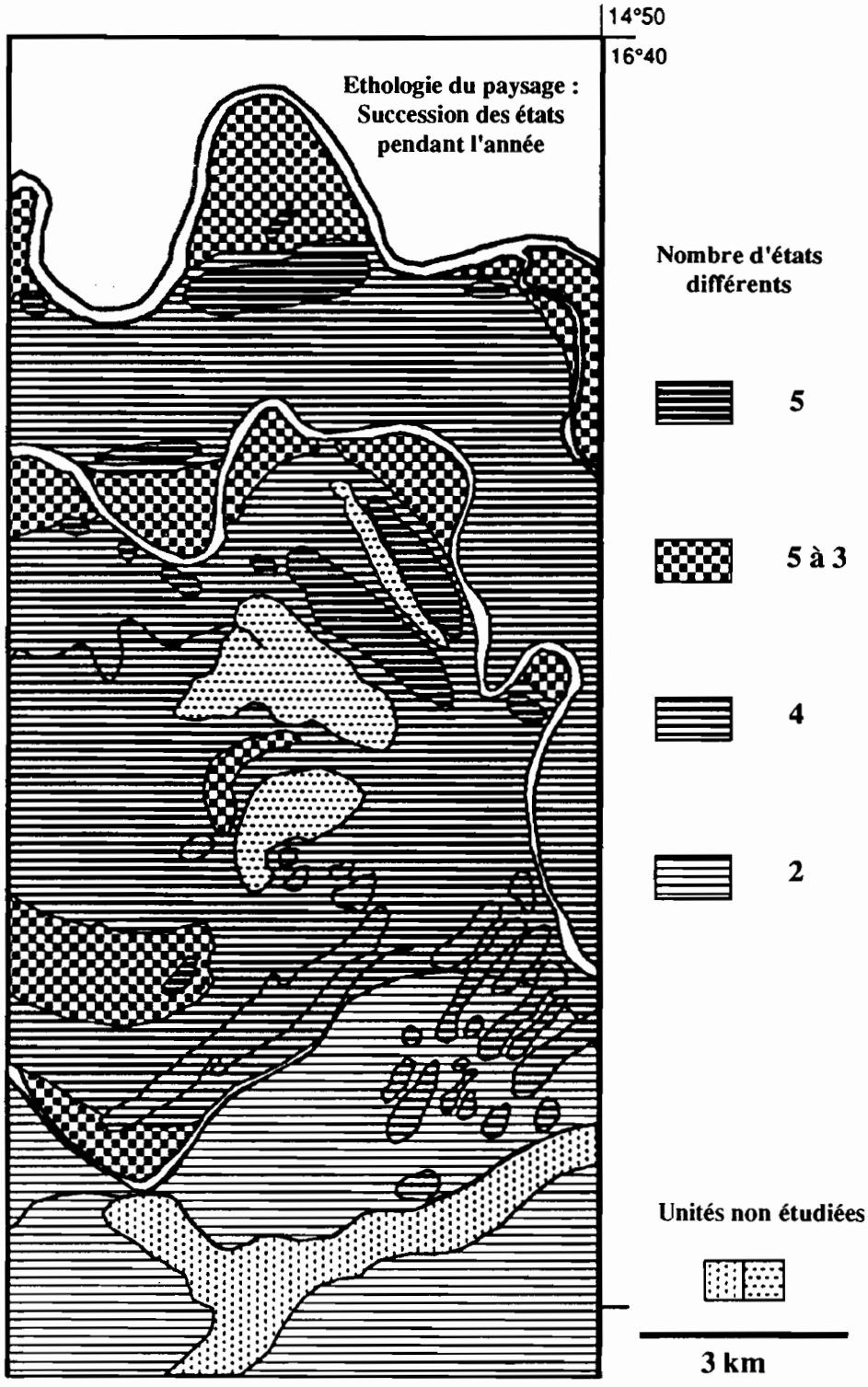


Fig. 48 : "Ethologie du paysage", secteur de Tarédji

nombre de processus biophysiques en présence, que ces processus soient d'érosion ou d'accumulation. Certains annoncent, certes, le désert proche (comme la mobilisation et le transit des sables à la surface du sol) mais d'autres profitent de la présence du fleuve et de ses inondations périodiques (comme la végétation ligneuse et les activités animales), et certains bénéficient même du dépérissement du *diéri*, pour enlever à celui-ci et donner à celui-là (comme le dépôt de matière minérale fine à certaines périodes de l'année dans le *walo*).

Cette diversité, première richesse naturelle à préserver, se retrouve dans le comportement de chaque milieu au cours de l'année.

Le *diéri*, à vrai dire, semble immuable. A part la brève période d'activités du mois d'août, il reste figé, presque tout le temps ennoyé sous ses sables... Quelle différence avec le *walo* , où se succèdent et s'associent jusqu'à cinq états du milieu très différents ! C'est ici, surtout à la surface du sol, qu'il faut faire la part des mécanismes liés à l'eau et des mécanismes liés à la sécheresse. Parmi les premiers, on peut noter la force des équilibres bio-organiques et, parmi les derniers, l'importance prise par les phénomènes d'"encroûtement"...

Cette diversité se retrouve encore, et surtout peut-être, dans les évolutions observées au cours de deux années successives : pratiquement aucun des dix milieux étudiés n'a évolué de la même façon !

Certains n'ont guère changé. C'est le cas des milieux situés entre le *diéri* et le *walo* , qui sont à la fois de structure complexe et à l'écart des plus fortes pressions humaines, mais c'est aussi le cas des milieux les plus appauvris, de ceux qui n'ont plus rien à offrir au changement, où qu'ils soient ! Pour la plupart, toutefois, ces milieux ont beaucoup changé. C'est surtout le cas des milieux étudiés sur les levées fluviales récentes qui ont changé, pourrait-on dire, à "20" et jusqu'à "40 %"... Le fait le plus remarquable, c'est que ces évolutions ne concernent pas les mêmes processus élémentaires et qu'elles semblent ainsi se faire dans autant de directions différentes (ceci explique, d'ailleurs, la difficulté d'établir une "moyenne", et une fausse impression "statistique" de stabilité du paysage).

Par contre, ce qui rapproche malheureusement tous ces milieux et ce qui tendrait à les uniformiser, c'est la nature même de ces évolutions.

Sauf exceptions, toutes les évolutions enregistrées se traduisent en effet par une perte de matière végétale, organique ou minérale. Et plus du tiers de ces "érosions" semble irréversible, ou du moins pourrait se poursuivre au-delà des deux années d'observation... Il est difficile d'établir, ici, la part de responsabilité qui revient à la sécheresse de 1990 et à la destruction de la végétation par l'homme (la première serait plutôt responsable de la dénudation des sols du *diéri* , la seconde de l'ensablement des sols du *walo* ?). Mais ce qui est sûr, c'est qu'entre 1989 et 1990, cette dégradation du milieu s'est concrétisée par des chiffres impressionnants : une végétation cinq fois moins dense, des activités animales deux fois moins importantes à la surface du sol, des litières qui disparaissent totalement, des dépôts d'argiles ou de limons qui s'arrêtent...

CONCLUSIONS GENERALES

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Pierre MICHEL
Michel MIETTON

Les recherches menées dans le cadre de ce programme CAMPUS ont fourni une masse importante de données, pendant un laps de temps relativement court (trois ans), sur la situation et les tendances de l'évolution dans les secteurs-clés de la moyenne vallée, du delta, de l'estuaire et du littoral adjacent. Elles ont été effectuées par une équipe pluridisciplinaire et concernent des aspects variés de la morphodynamique, allant des processus hydro- et morphosédimentaires jusqu'à la transformation du paysage, en passant par la caractérisation de changements écologiques.

Une première retombée, immédiate, concerne l'aide à la formation : celle-ci s'est concrétisée dans la préparation de travaux universitaires par de jeunes enseignants-chercheurs et étudiants sénégalais. Ainsi A. Kane et N. Diop ont fait l'essentiel de la partie "terrain" de leur thèse de doctorat. A. Diagne a terminé sa thèse de 3ème cycle et trois autres sont en cours d'élaboration. Des étudiants avancés ont préparé des mémoires de Maîtrise et des Diplômes d'Etudes Approfondies de géographie physique en participant aux opérations de recherche : pas moins de dix-sept mémoires ont été soutenus au département de Géographie de Dakar entre 1989 et 1991. Plusieurs chercheurs ou futurs chercheurs ont pu travailler avec des techniques de pointe, comme la télédétection, ou des méthodes nouvelles de géographie quantitative.

Sur le plan des connaissances scientifiques, les résultats obtenus par les trois opérations composant ce programme constituent une réelle avancée. Ils montrent l'évolution actuelle d'une grande vallée alluviale en milieu tropical sec, sous l'effet combiné de la mise en service de barrages et de la sécheresse persistante. Prenant en compte la quantification de nombreux paramètres, ils permettront des comparaisons avec des travaux menés dans la vallée du Niger ou dans d'autres grandes vallées des domaines tropical et subaride. Les observations et mesures aux échelles stationnelles et régionales mettent en évidence les principaux changements des milieux sahéliens et forment un élément de base d'une étude générale de la dégradation des paysages de l'Afrique occidentale. Les côtes sableuses, souvent instables, peuvent subir une transformation rapide par suite d'interventions humaines ; ainsi l'estuaire du Sénégal, pour lequel nous disposons maintenant de données chiffrées recueillies près de l'embouchure et sur le littoral proche, demeure fragile puisqu'il n'est séparé de l'océan que par un mince cordon littoral.

o ° o

Comme contribution au développement, les recherches menées dans le cadre de ce projet livrent des informations sur l'évolution de l'estuaire et du paysage en général, mais aussi des données directement utilisables pour les aménagements hydro-agricoles existants ou à venir. Les résultats sont très probants : le vent est devenu l'agent morphodynamique majeur. Les surfaces de déflation se sont développées considérablement dans le delta avec la disparition presque totale de la végétation et l'absence de brise-vents. L'étude des nebkas a permis d'établir une typologie et un schéma de leur évolution. Les lits fossiles se colmatent : depuis 1964 un recouvrement de 60 cm de limons éoliens s'est déposé sur le niveau argileux de décantation, ce qui représente en moyenne 2 cm/an. Le passage du régime hydrologique naturel à un régime artificiel n'a pas conduit, semble-t--il, à une stabilisation des berges du fleuve en amont de Richard-Toll. Par contre, une importante sédimentation se produit dans le moyen delta avec la transformation du système hydraulique par les aménagements rizicoles. Les chenaux du Gorom-Lampsar servent de petites retenues d'eau, à courant très faible ou nul ; une végétation aquatique s'y installe. Le colmatage du lit est de l'ordre de 3 cm/an et des dépôts encombrent des canaux d'irrigation.

La réhabilitation d'une série de casiers rizicoles a été effectuée récemment ou est en cours dans le delta. Elle peut être qualifiée d'opération de récupération de superficies abandonnées à la suite d'une erreur d'aménagement ou d'une dégradation du milieu : déflation éolienne, ensablement, sédimentation, salinisation des terres. L'opération consiste en un replanage total, une refonte du système de drainage et un nouveau découpage parcellaire. Ainsi une meilleure maîtrise des effets négatifs de la morphodynamique devient nécessaire, car la réhabilitation coûte cher.

La vaste cuvette du Ndiael, étudiée spécialement, offre des possibilités. Les avantages de son aménagement peuvent être appréhendés à différentes échelles spatiales : locale, régionale, nationale et même internationale si l'on considère que la création d'une réserve d'avifaune, notamment pour les migrateurs paléarctiques, pourrait renforcer les capacités d'accueil d'oiseaux déjà nombreux dans le Parc voisin, mondialement connu, du Djoudj. Pour autant, il est clair que ces intérêts sont parfois contradictoires et qu'un compromis doit être patiemment étudié à travers un schéma d'aménagement intégré. Ce devrait être aussi l'intérêt de ce site du Ndiael que d'être un "laboratoire" permettant de tester les impacts des remises en eau douce des nombreuses cuvettes du delta.

Au barrage de Diama, les mois d'août, septembre et octobre rassemblent la quasi-totalité (95 %) de la charge solide. Les eaux stockées dans la retenue, se décantent lentement ; à l'aval, la turbidité se réduit dès la fermeture des vannes, comme le montre la photo mise en couverture de cet ouvrage. Le barrage constitue, en effet, une rupture pour le régime du fleuve et modifie certains caractères physiques et hydrodynamiques des masses d'eau dans sa partie estuarienne. En période d'étiage, la remontée saline est stoppée, comme prévu. En aval du barrage, les salinités restent toujours inférieures ou égales à celles de l'eau de mer ; un phénomène de dilution est provoqué par des lâchers d'eau douce. Ainsi l'estuaire se trouve dans des conditions très différentes de celles observées avant la mise en service progressive du barrage. Pendant les hautes eaux, le passage d'un milieu marin homogène à un milieu sous dominante fluviale s'effectue beaucoup plus vite qu'auparavant. Mais les quantités de matières en suspension relevées en 1991 à Saint-Louis sont comparables à celles mesurées en 1981-82. Par contre, les changements hydrologiques sont enregistrés par l'évolution de la faune benthique testacée, en aval et surtout en amont du barrage.

Les comparaisons des profils topobathymétriques levés au niveau de Gandiole, en aval de Saint-Louis, indiquent une tendance au creusement dans le chenal de l'estuaire. Ainsi pour la période de mesures allant de juin 1989 à novembre 1991, soit 29 mois, on constate un approfondissement moyen d'une trentaine de centimètres ; mais il n'est pas régulier dans l'espace, ni uniforme dans le temps. Dans le secteur littoral, près de la rive sud de l'embouchure, la construction du barrage de Diama a entraîné des modifications dans l'équilibre dynamique du système fluvio-lagunaire, marquées par une sédimentation accrue avec une fermeture de la lagune de Mboumbaye. Juste en face, l'extrémité du cordon sableux de la Langue de Barbarie paraît en état d'accrétion, caractérisé par la pente plus faible de l'avant-côte et une sensibilité nulle à l'érosion. Par contre, à la hauteur de Gandiole, la partie basse du profil transversal sous-marin montre un certain déséquilibre : ceci pourrait entraîner l'apparition de conditions favorables à la formation d'une embouchure plus septentrionale que l'actuelle.

La vallée alluviale du Sénégal avec ses bordures présente une extrême diversité des milieux naturels. Elle est due au grand nombre de processus biophysiques en présence, qu'ils soient d'érosion ou d'accumulation. Certains annoncent le désert proche, comme la mobilisation des sables et limons à la surface du sol, mais d'autres profitent de la présence du fleuve et des submersions, comme la végétation ligneuse et les activités animales. La plupart de ces milieux ont beaucoup changé ; c'est surtout le cas de ceux étudiés sur les levées fluviatiles récentes. Presque toutes les évolutions enregistrées se traduisent par une perte de matière végétale, organique ou minérale. Et plus du tiers de ces dégradations semble irréversible... Il est difficile d'établir la part de responsabilité qui revient à la sécheresse de 1990, à la destruction de la végétation par l'homme et aux modifications du régime hydrologique par les mises en service progressives des deux barrages. Mais il est, hélas, certain qu'entre 1989 et 1991 cette dégradation générale du milieu s'est concrétisée par des chiffres impressionnants : une végétation cinq fois moins dense, des activités animales deux fois moins importantes à la surface du sol, des litières qui disparaissent totalement, des dépôts d'argiles ou de limons qui s'arrêtent par absence d'inondation.

o ° o

Toutes ces recherches ont porté sur une période très courte de l'après-barrages, qui apparaît surtout comme une phase de transition : en effet, le niveau des eaux au barrage de Diama n'était pas élevé puisque, sur la rive mauritanienne, la digue de protection des terres le long du fleuve n'a été terminée que début 1992 ; ainsi il fallait ouvrir plus souvent les vannes pour éviter des submersions nuisibles dans cette partie du delta. Nous avons manqué par ailleurs, pendant cette période de mise en fonctionnement du barrage, de données précises sur les lâchers d'eau depuis la grande retenue de Manantali. Il est donc indispensable de continuer des travaux d'observations précises et de mesures sur le terrain pendant plusieurs années.

Les recherches doivent être poursuivies, tout particulièrement dans le delta, pour différentes raisons. Le delta constitue encore une des très rares réserves foncières dans un domaine sahélien meurtri par la sécheresse et à un moment où les demandes de terres, susceptibles de surcroît d'être aménagées par irrigation, sont nombreuses. Toutefois, ces aménagements peuvent introduire des dysfonctionnements écologiques - liés à

un apport d'eau désormais douce - et humains par afflux de population. Il y a donc lieu d'opérer un suivi rigoureux et de procéder à des analyses d'impacts plus fines, mieux adaptées au contexte actuel, que celles qui ont précédé la construction des barrages.

Pour leur part, les départements de Géographie des universités de Dakar et de Strasbourg ont entrepris de relancer ce suivi et de mieux appréhender le fonctionnement d'un milieu en équilibre instable. A cette fin, deux centrales de mesures ont déjà été installées, avec l'aide du ministère français de la Coopération, à proximité de Ross Béthio, c'est à dire au coeur du delta :

- l'une limnimétrique, installée sur le Lampsar, permettra à terme de connaître les variations de débit et les potentialités hydrologiques de ce défluent principal du fleuve Sénégal ;

- l'autre est une station climatique, possédant six capteurs (vitesse et direction du vent à 2 m de hauteur et à 10 m, pluie, ensoleillement, pression atmosphérique) permettant d'assurer un enregistrement continu de ces paramètres suivant différents pas de temps. L'accent est mis dans cette recherche sur l'analyse du vent, facteur essentiel et pourtant trop méconnu, afin de pouvoir assurer une lutte antiérosive appropriée et bien nécessaire si l'on veut éviter le comblement des canaux et des cuvettes qu'on se propose de remettre en eau... A terme, la centrale devrait être équipée aussi d'un capteur mesurant la composante verticale du vent, la plus efficace et la plus susceptible d'arracher du sol des particules argilo-limoneuses. Ce suivi devrait être couplé à des mesures de transferts de ces fines et des sables.

D'un autre côté, les travaux entrepris sur la base permanente de Gandiole par le laboratoire de Sédimentologie de Perpignan et les départements de Géographie et Géologie de Dakar devront être poursuivis : les mesures et les prélèvements pour analyses en aval de Diama permettront d'établir un modèle de fonctionnement de l'estuaire, maintenant que le plan d'eau du barrage peut rester élevé grâce à l'achèvement de la digue sur la rive mauritanienne. Les modifications dans l'équilibre dynamique du système fluvio-lagunaire qui se produisent près de l'embouchure doivent être suivies et précisées par un programme de surveillance continue de la côte dans ce secteur ; elle pourra également être réalisée par l'étude d'images satellitaires complétée par des travaux de terrain. Les conclusions concernant la zone littorale de la Langue de Barbarie doivent être considérées avec prudence. La période d'étude paraît, en effet, trop courte pour conduire à une appréciation suffisamment fine de tendances naturelles marquées par une rythmicité pluriannuelle d'amplitude supérieure à celle des processus saisonniers.

Les travaux menés de 1989 à 1992 indiquent des débuts d'évolution en liaison avec l'implantation des barrages de Manantali et de Diama. Des mesures et des observations fines étalées sur une période plus longue sont maintenant nécessaires pour confirmer et préciser les tendances actuelles et en déterminer les relations causales.

BIBLIOGRAPHIE

Ausseil-Badie J. (1983).- Distribution écologique des Foraminifères de l'estuaire et de la mangrove du fleuve Sénégal. - *Arch. Sc.*, Genève, 3, 437-450.

Ausseil-Badie J. & Monteillet J. (1985). - Incidence des variations climatiques récentes enregistrées par la microfaune et la malacofaune des estuaires du Sénégal et du Saloum. - *Océanogr. trop.*, Paris, 20, 3 , 151-160.

Ba M. (1988). - Hydrologie de l'estuaire du Sénégal : impact du barrage de Diama. - In : *Rapport Final EPEEC*, UNESCO, Div. Sciences de la Mer, PNUD, Dakar, 16-32.

Ba M. & Sy I. (1987). - Introduction à la sédimentologie de la Langue de Barbarie et à l'hydrologie de l'estuaire du Sénégal : impact du barrage de Diama. - In : *Rapp.Final EPEEC*, UNESCO, Div. Sciences de la Mer, PNUD, Dakar, 5-42.

Barusseau J.P. (1980). - Essai d'évaluation des transport littoraux sableux sous l'action des houles entre Saint-Louis et Joal (Sénégal). - *Bull. ASEQUA*, Dakar, 58-59, 31-39.

Barusseau J.P. (1985). - Evolution de la ligne de rivage en R.I. de Mauritanie. UNESCO, rapp. multig., 104 p.

Barusseau J.P., Diop E.H.S. & Saos J.L. (1985). - Evidence of dynamical reversal in tropical estuaries, geomorphological and sedimentological consequences (Saloum and Casamance rivers, Sénégal). *Sedimentology*, 32, 543-552.

Barusseau J.P., Giresse P., Faure H., Lézine A.M. & Masse J.P. (1987). - Marine sedimentary environments on some parts of the tropical and equatorial of Africa during the late Quaternary. - *Continental Shelf Research* , Oxford, 8, 1-21.

Berthelot R. (1956). - Mesures de débits solides sur le Logone. - ORSTOM Fort-Lamy (Tchad), rapp. multig. 6 p.

Billon B. (1967). - Mise au point des mesures de débits solides en suspension.- Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., II, 3-14.

Bouette J. (1988).- L'axe Gorom-Lampsar : ensablement et écoulement. - Etudes techniques, rapp. 3, S.A.E.D., 17p.

Carbonnel G. (1986). - Les Ostracodes des estuaires tropicaux de l'Actuel (Sénégal et Gambie) : application au Néogène (molasse Franco-Suisse). - *Paleogeogr., Paleoclimatol., Paleoecol.*, 57, 213-240.

Colombani J. (1967). - Contribution à la méthodologie des mesures systématiques des débits solides en suspension. - Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., IV, 4-27.

Corbin D. & Cecchi P. (1991). - Hydrobioclimat du fleuve Sénégal dans la zone d'influence du barrage de Diama : compilation des données recueillies d'avril 1988 à juin 1990. CRODT, Dakar, Archives n° 185, 48 p.

D.G.R.H.- Sénégal (1992). - Estimation des coûts des travaux d'aménagement pour la remise en eau de la cuvette du Ndiael. - Direction du Génie Rural et de l'Hydraulique, Dakar, rapp. de mission, 22 p.

Debenay J.P. (1990). - Recent foraminiferal assemblage and their distribution relative to environmental stress in the paralic environments of West Africa (Cap Timiris to Ebrie lagoon). - *Foram. Res.*, 20, 3, 267-282.

Gac J.Y. (1979). - Géochimie du lac Tchad. Bilan de l'altération de l'érosion et de la sédimentation. - Thèse Université Louis Pasteur, Strasbourg, 249 p.

Gac J.Y., Carn M.. & Saos J.L.(1986a). - L'invasion marine dans la basse vallée du Sénégal. - *Rev. Hydrobiol. Trop.*, 1: 3-17.

Gac J.Y., Carn M. & Saos J.L.(1986b). - L'invasion marine dans la basse vallée du Sénégal. - *Rev. Hydrobiol. Trop.*, 2: 93-103.

Gac J.Y. *et al.* (1991). - L'impact de la sécheresse sur le bilan actuel du fleuve Sénégal à Bakel. - Ann. ORSTOM, projet CEE (EQUESEN), 32 p.

142

Gac J.Y.& Kane A. (1986a). - Le Fleuve Sénégal : I Bilan hydrique et flux continentaux de matières particulaires à l'embouchure. - *Sci. Géol., Bull.*, 39, 1, 99-130.

Gac J.Y.& Kane A. (1986b). - Le Fleuve Sénégal : II Flux continentaux de matières dissoutes à l'embouchure. - *Sci. Géol., Bull.*, 39, 2, 151-172.

Gac J.Y., Kane A. & Monteillet J. (1981). - Migrations de l'embouchure du fleuve Sénégal depuis 1850. ORSTOM, sec. Géologie, XII, 1, 73-75.

Guilcher A. & Nicolas J.P. (1954). - Observations sur la Langue de Barbarie et les bras du Sénégal aux environs de Saint-Louis. - *Cah. comm. Océanogr. Et. Côtes Fr.*, 6 , 227-243.

Kane A. (1985). - Le bassin du Sénégal à l'embouchure. Flux continentaux dissous et particulaires. Invasion marine de la basse vallée u fleuve. Contribution à l'hydrologie fluviale et à la dynamique estuarienne en milieu sahélien. - Thèse 3ème cycle, Nancy II, 205 p.

Mahé G. (1993). - Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. - ORSTOM, Coll. Etudes et Thèses, Paris, 438 p.

Mandin R. (1957). - Rapport sur les mesures de débits solides à Dagana-Bakel-Fadougou. - Miss. Aménag. Sénégal, Saint-Louis, 6 p.

Michel P. (1957). - Rapport préliminaire sur la géomorphologie de la vallée alluviale du Sénégal et sa bordure. - Miss. Amén. Sén., Saint-Louis, 85 p.

Michel P. (1968). - Genèse et évolution de la vallée du Sénégal, de Bakel à l'embouchure (Afrique occidentale). - *Zeitschr. Geomorphol.*, N.F., 12, 318- 349.

Michel P. (1969). - Le façonnement actuel de la vallée du Sénégal et de ses bordures, de Bakel à Richard-Toll. - *Comité trav. hist. sci.*, Paris, Bull. Sect. Géogr., 80, 447-484.

Michel P. (1973). - Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude Géomorphologique. - Thèse d'Etat, Strasbourg, 1970. Mém. ORSTOM 63, 3 t., 752 p., cartes h.t.

Michel P. (1985). - Sécheresse et transformation de la morphodynamique dans la vallée et le delta du Sénégal. - *Rev. Géom. Dyn.*, Paris, 4, 113-130.

Michel P. (1990). - La vallée du Sénégal : milieu naturel, mise en valeur et aménagements. - CEGET, Bordeaux, *Espaces Tropicaux* 2, 169-188.

Michel P. & Durand J.H. (1978). - La vallée alluviale du Sénégal (Afrique de l'Ouest) Relations géomorphologie - sols - aptitudes culturales et leur cartographie au 1/50 000. - *Catena* 5, 2 , 213-225.

Michel P. & Sall M. (1984). - Dynamique des paysages et aménagements de la vallée alluviale du Sénégal. - In Mém. ORSTOM 106, 89-109.

Mietton M. & Humbert J.(1991). - Le projet de remise en eau du Ndiael (Sénégal). Pré-faisabliité hydraulique, bilan hydrologique et impacts. - Univ. Louis-Pasteur, Strasbourg - C.N.R.S. (CEREG), 81 p., 2 cartes h.t.

Millet B. (1991). - Modélisation numérique de la circulation de marée et de la dispersion du sel dans l'estuaire du fleuve. - CRODT, Dakar, document de travail, 31 p.

Monteillet J. (1988). - Envrironnements sédimentaires et paléoécologie du delta du Sénégal au Quaternaire.- Thèse Univ. Perpignan, 267 p.

Monteillet J., Ausseil-Badie J. & Carbonnel G. (1982). - Malacofaune et microfaune (Foraminifères et Ostracodes) d'un milieu estuarien tropical : le delta et la basse vallée du Sénégal. - Géobios, Lyon, 15, 2 , 237-242.

Monteillet J., Kane M., Saos J.L., Diouf B. (1990). - Environnements sédimentaires du bas Sénagal après la mise en eau du barrage de Diama : analyse des particules supérieures à 100 mm. - In Rapp. techn. UNESCO-COMARAF, Dakar, 4, 39-51.

Monteillet J. & Rosso J.C. (1977). - Répartition de la faune testacée actuelle (Mollusques et Crustacés Cirripèdes) dans la basse vallée du fleuve Sénégal. - Bull. Instit. fond. Afr. noire, Dakar. 29, A, 4, 789-820.

NEDECO (1973). - Plan Directeur : Etudes océanographiques. - Rapp. non publ., Delft, t. VI, A, Etudes hydrographiques, 20 p.

Nouvelot J.F. (1969). - Mesures et études des transports solides en suspension au Cameroun. - Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., VI, 43-85.

O.M.V.S. (1973). - Etude hydroagricole du bassin du fleuve Sénégal. - S.E.D.A.G.R.I., Paris, rapp. O.M.V.S.- P.N.U.D.- F.A.O.

O.M.V.S. (1989). - Bilan de gestion des eaux du fleuve Sénégal pendant la campagne de saison sèche 1988-89. - Dakar, juin 1989, 14 p., 13 annexes.

Olivry J.C. (1987). - Les conséquences durables de la sécheresse actuelle sur l'écoulement du fleuve Sénégal et l'hypersalinisation de la basse Casamance. Veille Climatique Satellitaire, 17, 31-39.

Pagès J. (1986). - L'environnement d'un estuaire hyperhalin tropical : la Casamance. - In : UNESCO, Div. Sciences de la Mer, Rapport Final EPEEC, Dakar , 7-33.

Piétukowski T. (1990). - Déversement au barrage de Diama (1986-1989). - Rapp. proj. Suivi des eaux souterraines, USAID-OMVS, Saint-Louis, 8 p., annexes.

Pinson-Mouillot J. (1980). - Les environnements sédimentaires actuels et quaternaires (Nord de la presqu'île du Cap Vert). - Thèse 3ème cycle, Univ. Bordeaux I, 106 p.

Pritchard D.W. (1967). - What is an estuary : physical viewpoint. - In : Lauff G.N. ed. *Estuaries*, Am. Assc. Adv. Sci. Publ., 83, 3-5.

Probst J.L. (1992). - Géochimie et hydrologie de l'érosion continentale. Mécanismes, bilan global actuel et fluctuations au cours des 500 derniers millions d'années. - *Sciences Géologiques*, 94, 161 p.

Quelennec R.E. (1984). - Intérêt de l'analyse des profils de plage pour l'étude de la dynamique sédimentaire littorale. Cas du littoral du delta du Nil. - L'hydraulique et la maîtrise du littoral, 18èmes journées de l'Hydraulique, Marseille, 6 p.

Rebert J.P. (1980). Aperçu sur l'hydrologie du plateau continental ouest-africain, de la Mauritanie à la Guinée. - Rapp. COPACE:PACE, 78/10, 4 p.

Reichhold W. (1978). - Der Senegalstrom, Lebensader dreier Nationen. - *Afrika Studien* , München, Weltforum Verleg, 102, 383 p.

Richard J.F. (1989). - Le paysage, un nouveau langage pour l'étude des milieux tropicaux. - ORSTOM, Paris, 210 p.

Rochette C. (1974). - Le bassin du fleuve Sénégal. - Monographie hydrologique ORSTOM, 1, 442 p.

Rougerie G.E. & Beroutchachvili N. (1991). - *Paysages et géosystèmes*. - Armand Colin édit., Paris, 302 p.

Sall M. (1982) Dynamique et morphogenèse actuelles au Sénégal occidental. - Thèse Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, 522 p.

Saos J.L. (1985). - Mesures hydrologiques dans le Saloum. In : l'estuaire et la mangrove du Sine Saloum, résultats d'un atelier régional UNESCO-COMAR, Dakar, du 28 février au 5 mars 1983. UNESCO, Div. Sciences de la Mer, Paris, rapp. 32, 7-14.

S.C.E.T. (1969).- Sédimentation et écoulement dans le Lampsar. Rapp. S.C.E.T.

SOGREAH (1981). - Etude de la houle, du vent, du courant sur le site de Port-Sédar. Rapp. non publ., R 35 1160, 47 p., tabl., pl.

Toupet C. & Michel P. (1979). - Sécheresse et aridité : l'exemple de la Mauritanie et du Sénégal. - *Géogr. et Ecol. Trop.* 3, 137-157.

Tricart J. (1954). - Influence des sols salés sur la déflation éolienne en Basse-Mauritanie et dans le delta du Sénégal. *Rev. Géom. Dyn.*,3, 124-132.

Tricart J. (1961). - Notice explicative de la carte géomorphologique du delta du Sénégal. - Mém. B.R.G.M. 8, 137 p

THESES ET MEMOIRES

BOUSSO Adama Fily (1991).- Cartographie et étude des milieux biophysique de Thilé Boubakar (région de Saint-Louis). Univ. de Dakar, dept. Géographie, Mem. Maîtrise, 3 cartes h.t. au 1/50 000.

DIAGANA Cheikhna (1989).- Approche méthodologique de l'évolution de la végétation en zone sahélienne (exemple de la vallée du Sénégal). Univ. de Dakar, dept. Géographie, Mem. D.E.A., 30 p.

DIAGNE Albert (1989).- Contribution à l'étude de la répartition spatiale des composantes du milieu naturel (moyenne vallée du fleuve Sénégal). Univ. de Dakar, dept. Géographie, Mem. D.E.A., 35 p.

DIAGNE Albert - Organisation et dynamique des milieux naturels dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Contribution à l'étude du bilan hydrique d'un paysage. Univ. de Dakar, dept. Géographie, Thèse 3ème cycle en cours.

DIALLO Marième (1990).- Etude et cartographie des milieux biophysiques de Ndioum (moyenne vallée du Sénégal). Univ. de Dakar, dept. Géographie, Mem. Maîtrise, 106 p., carte h.t. au 1/100 000.

DIOP Amadou - Le cycle de l'eau dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Contribution à l'étude du bilan hydrique d'un paysage. Univ. de Dakar, dept. Géographie, Thèse 3ème cycle en cours.

DIOP Mamadou. (1991).- Les schorres à herbacées de la région de Saint-Louis. Etude géomorphologique. Univ. de Dakar, dept. Géographie, Mem. Maîtrise, 108 p.

DIOUF Abdoulaye. (1990).- L'évolution actuelle de la vasière à mangrove de Saint-Louis. Univ. de Dakar, dept. Géographie, Mem. Maîtrise, 79 p.

FAYE Abdoulaye. (1990).- Eau et milieu physique dans le bassin de l'axe Gorom-Lampsar (moyen delta du Sénégal). Univ. de Dakar, dept. Géographie, Mem. Maîtrise, 82 p.

FAYE Abdoulaye.- Gestion et qualité des eaux du Sénégal dans le haut delta du fleuve (secteur de Richard-Toll). Thèse 3ème cycle en cours.

FAYE Mahmoud. Salman. (1990).- La déflation éolienne et ses effets dans les casiers hydro-agricoles du Boundoum (moyen delta du Sénégal). Univ. de Dakar, dept. Géographie, Mem. Maîtrise, 102 p.

FOUNE Babacar. (1990).- Déflation éolienne et remblaiement des paléo-talwegs dans le moyen delta du Sénégal. Univ. de Dakar, dept. Géographie, Mem. Maîtrise, 94 p.

MOCTAR Abdoul (1990).- Etude et cartographie des milieux biophysiques : la végétation (vallée du fleuve Sénégal, secteur de Podor). Univ. de Dakar, dept. Géographie, Mem. Maîtrise, 101 p., 3 cartes h.t. au 1/50 000.

MUSTAPHA Mahamat Ali (1990).- Impact des grands aménagements sur quelques composantes de l'environnement. Univ. de Dakar, dept. Géographie, Mem. D.E.A., 47 p.

MUSTAPHA Mahamat Ali .- L'aménagement des grandes vallées soudano-sahéliennes. Contribution à l'étude des mounvements de populations dans la basse et moyenne vallée du fleuve Sénégal. Thèse 3ème cycle en cours.

NDECKY Augustin. (1991).- Intensité des pluies, ruissellement et érosion dans l'Ile à Morphil (moyenne vallée du Sénégal). Univ. de Dakar, dept. Géographie, Mem. Maîtrise, 75 p.

SECK Serigne.Mbacké. (1991).- Dynamique actuelle de la cuvette du Ndiael (delta méridional du Sénégal). Etude géomorphologique. Univ. de Dakar, dept. Géographie, Mem. Maîtrise, 120 p.

SY Boubou.Aldiouma. (1990).- Intensité des vents et formation de nebkhas dans la région de Ross-Bethio (moyen delta du Sénégal). Univ. de Dakar, dept. Géographie, Mem. Maîtrise, 113 p.

LISTE DES FIGURES

Fig. 1 Partie inférieure de la vallée alluviale du Sénégal
Fig. 2 Réseau de postes d'observation de la morphodynamique
Fig. 3 Débits éoliens et vitesses des vents à Fondé Boki
Fig. 4 Débits solides instantanés et vitesses de vents à Boundoum-ouest
Fig. 5 Cuvettes aménagées en tertiaire par la SAED dans le delta du fleuve Sénégal
Fig. 6 Variations des concentrations moyennes journalières des M.E.S. avec les débits à Diama en 1989
Fig. 7 Le Ndiael et son environnement hydro-morphologique
Fig. 8 Variations mensuelles du volume d'eau dans la cuvette du Ndiael (scénario hydrologique n°2)
Fig. 9 Localisation des stations
Fig. 10 Localisation et disposition de la base d'observations fluvio-marines de Gandiole
Fig. 11 Vitesses de courant à Gandiole
Fig. 12 Variations de température à Gandiole
Fig. 13 Variations de salinité à Gandiole
Fig. 14 Variations des matières en suspension à Gandiole
Fig. 15 Distributions granulométriques caractéristiques du matériel en suspension
Fig. 16 Variations au cours du temps de la fréquence des fractions granulométriques caractéristiques du matériel en suspension
Fig. 17 Composition des sédiments
Fig. 18 Granulométries caractéristiques des sédiments du fond du chenal
Fig. 19 Variations morphologiques dans la vallée estuarienne à Gandiole en 1990
Fig. 20 Représentation tridimentionnelle des variations morphologiques à Gandiole en 1991
Fig. 21 Isovaleurs d'érosions et de sédimentation dans la vallée estuarienne à Gandiole
Fig. 22 Classification dirigée de l'image SPOT du 28 11.1990 sur le barrage de Diama
Fig. 23 Classification dirigée de l'image SPOT du 28 11.1990 sur l'embouchure du fleuve Sénégal
Fig. 24 Composition colorée de l'image SPOT du 28 11.1990 sur le barrage de Diama
Fig. 25 Composition colorée de l'image SPOT du 1.10 1986 sur le barrage de Diama
Fig. 26 Composition colorée de l'image SPOT du 1.10.1986 sur l'embouchure du fleuve Sénégal
Fig. 27 Transformation de voisinage par filtre médian et composition en pseudo-couleurs de l'image SPOT du 1.10 1986. Embouchure du fleuve Sénégal
Fig. 28 Variations de l'embouchure du fleuve entre 1986 et 1990
Fig. 29 Variations morphologiques du cordon littoral et de l'avant-côte au large de Gandiole, entre 1989 et 91
Fig. 30 Cartes topographiques du cordon littoral et de l'avant-côte au large de Gandiole, entre 1989 et 1991
Fig. 31 Blocs-diagrammes du cordon littoral et de l'avant-côte au large de Gandiole, entre 1989 et 1991
Fig. 32 Isovaleurs d'érosion et de sédimentation du cordon littoral et de l'avant-côte au large de Gandiole, entre octobre 1989 et juin 1990
Fig. 33 Influence de la pente locale sur la granulométrie
Fig. 34 Amplitude des variations granulométriques en fonction de la profondeur
Fig. 35 Différenciation des milieux naturels dans la Moyenne Vallée du Sénégal
Fig. 36 La sécheresse et les activités humaines dans la Moyenne Vallée du Sénégal
Fig. 37 Localisation des observations
Fig. 38 Typologie des états du milieu par analyse factorielle
Fig. 39 Comportement des milieux au cours de l'année
Fig. 40 Structures des états du milieu dans le *diéri* et le *walo*
Fig. 41 Différenciation des processus de saison sèche et de saison des pluies
Fig. 42 Transition *diéri - walo* : un cycle annuel à la surface du sol
Fig. 43 Cycles saisonniers
Fig. 44 Tendances évolutives comparées des milieux naturels dans la Moyenne Vallée du Sénégal
Fig. 45 Un bilan de l'évolution 1989 - 1990 des milieux
Fig. 46 La dégradation des milieux naturels dans la Moyenne Vallée du Sénégal
Fig. 47 Le paysage de Taredji entre les mois d'août et d'avril
Fig. 48 Ethologie du paysage (secteur de Tarédji)

LISTE DES TABLEAUX

Tabl. 1 Classes de vents maximums instantanés à Saint-Louis (toutes saisons)

Tabl. 2 Classes de vents maximums instantanés de saison sèche

Tabl. 3 Fréquence directionnelle des vents efficaces (> 5 m/s)

Tabl. 4 Ablation et accumulation (en cm) à la station de Ndiael 1

Tabl. 5 Ablation et transport (en cm) à la station de Ndiael 2

Tabl. 6 Ablation et apport (en cm) à la station de Ross-Bethio

Tabl. 7 Ablation et accumulation (en cm) à la station de Guiladou 1

Tabl. 8 Ablation et accumulation (en cm) à la station de Guiladou 2

Tabl. 9 Migration des dunes (en m) à la station de Ndiayène 1

Tabl. 10 Migration des barkhanes (en m) à la station de Ndiayène 2

Tabl. 11 Modifications morphométriques du ravin de Ndiawara entre 1988 et 1992

Tabl. 12 Recul moyen des berges (en m) aux stations de la vallée

Tabl. 13 Volumes moyens annuels (en millions de m3) écoulés au barrage de Diama

Tabl. 14 Hauteur d'eau à la station de Diama

Tabl. 15 Evolution des débits moyens mensuels (m3/s) à Diama depuis 1986

Tabl. 16 Concentration des flux de matières en suspension à la station de Diama-amont

Tabl. 17 Variations des concentrations moyennes journalières des matières en suspension à Diama en 1989

Tabl. 18 Bilan des flux de matières en suspension à la station de Diama 1990-91

Tabl. 19 Programme de réhabilitation des périmètres

Tabl. 20 Amplitude thermique journalière de l'air

Tabl. 21 Amplitude thermique journalière de l'eau de surface

Tabl. 22 Variation surfacique (en m2) du maître-couple sédimentaire sur les profils de la base de Gandiole

Tabl. 23 Marnages sur la côte nord du Sénégal

Tabl. 24 Variation (en m) de la position de la ligne de rivage par rapport à la situation de juin 1989

Tabl. 25 Dimension centrale (en microns) des populations apportées ou éliminées en fonction de la saison

Tabl. 26 Echantillonnage et stations retenues

Tabl. 27 Légende des lignes et colonnes des tableaux présentés en annexe

Tabl. 28 Tendances évolutives des milieux naturels dans la Moyenne Vallée du fleuve Sénégal (1989-1990)

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS 1
1. Le milieu naturel et sa dégradation 2
2. Domaines d'étude et équipes de recherche 2

PREMIERE PARTIE : FACTEURS PHYSIQUES DE L'EVOLUTION DU DELTA ET DE LA MOYENNE VALLEE

CHAPITRE I : LA DYNAMIQUE ÉOLIENNE 9
1. L'importance des vents 9
1.1. L'intensification des vents de 1979 à 1989 9
1.2. Ablation, transport et accumulation 10
1.2.1. Les flux détritiques au sol mesurés *in situ* 10
1.2.2. Les flux détritiques au sol déduits des vents efficaces 11
1.2.3. La prédominance des surfaces de transit 11
2. Conséquences des actions éoliennes 13
2.1. Formation et extension des champs de nebkas 13
2.1.1. Densité et typologie 14
2.1.2. Structure et mise en évidence des épisodes d'engraissement. 14
2.2. Colmatage des lits fossiles. 15
2.3. Remaniements sur les dunes du *dieri*. 16

CHAPITRE II : HYDROLOGIE ET HYDRODYNAMIQUE 19
1. Erosion et sédimentation 19
1.1. Ravinement 19
1.2. Sapement des berges 19
1.3 Dysfonctionnement de l'axe Gorom-Lampsar 20
2. L'impact du barrage de Diama 20
2.1. Hydrologie dans la basse vallée et le delta 20
2.1.1. L'abondance fluviale 22
2.1.2. Les fluctuations du plan d'eau de Diama 23
2.1.3. L'évolution des débits journaliers, mensuels et annuels 23
2.2. Les apports fluviaux de matières en suspension 24
2.2.1. Le protocole des prélèvements de matières en suspension. 24
2.2.2. L'évolution saisonnière de la turbidité 24
2.2.3. Les flux mensuels et annuels de matières en suspension 26

CHAPITRE III : CONSÉQUENCES SUR LA MISE EN VALEUR 29
1. Répercussions sur les aménagements hydrauliques du delta 29
2. Le projet de remise en eau du Ndiael et ses impacts possibles 31
2.1. Présentation de l'étude 31
2.2. Principaux enseignements 31

DEUXIÈME PARTIE : EVOLUTION HYDROLOGIQUE, MORPHOSÉDIMENTAIRE ET ÉCOLOGIQUE DU BIEF ESTUARIEN EN AVAL DE DIAMA

CHAPITRE IV : LES MASSES D'EAU DE LA PARTIE ESTUARIENNE 41

1. Caractères hydrodynamiques du régime après-barrage 41
2. Caractéristiques physiques des masses d'eau 43
   2.1. Température 43
   2.2. Salinité 46
3. Les matieres en suspension 49
4. Synthèse des observations 49

CHAPITRE V : CARACTÈRES HYDROLOGIQUES, SÉDIMENTOLOGIQUES ET MORPHOLOGIQUES DU BAS ESTUAIRE 53

1. Les eaux estuariennes 53
   1.1. Caractères hydrologiques 53
      1.1.1. En période de hautes eaux fluviales 53
      1.1.2. En période de basses eaux 53
   1.2. Caractères hydrodynamiques 53
   1.3. Le matériel en suspension 54
2. Le matériel du fond du chenal 56
3. La morphologie du chenal 57
4. Conclusions 62

CHAPITRE VI : CARACTÉRISATION DES CHANGEMENTS ÉCOLOGIQUES DU BAS-SÉNÉGAL 63

1. Distribution naturelle des assemblages faunistiques testacés 63
2. Présentation des résultats 64
   2.1. Le site de Mbao 64
   2.2. Le site de Gandiole 64
   2.3. Les stations de Leybar, Bango et Diama aval. 65
   2.4. Les stations de Diama-amont, Maka, Tiguet 66
   2.5. Les stations deKheune à Richard Toll 67
3. Conclusion 68

TROISIÈME PARTIE : L'EMBOUCHURE ET LA FACADE MARITIME : EVOLUTION MORPHOLOGIQUE ET SÉDIMENTAIRE

CHAPITRE VII : ETUDE DES MODIFICATIONS ENTRE DIAMA ET L'EMBOUCHURE D'APRÈS L'IMAGERIE SATELLITAIRE 73

1. Méthodologie 73
2. Résultats de la composition colorée et des classifications supervisées. 73
   2.1. Définition des classes sur l'image du barrage de Diama 74
   2.2. Définition des classes sur l'image de l'embouchure du fleuve Sénégal 74
3. Comparaison des images de 1986 et 1990 74
4. Conclusion 81

CHAPITRE VIII : PROCESSUS HYDRO ET MORPHOSÉDIMENTAIRES ET STABILITÉ DE LA FACADE DU DELTA 83
1. Les tendances 83
1.1. Evolution récente 83
1.1.1. Evolution fini-holocène du delta. 83
1.1.2. Construction de la langue de Barbarie. 84
1.2. L'évolution actuelle de la plage et du cordon littoral. 84
2. Les agents physiques 84
2.1. Les facteurs océaniques. 84
2.1.1. Les courants. 84
2.1.2. La marée. 85
2.1.3. La houle et les vagues. 85
2..2. Le vent 86
3. Les observations topobathymétriques 87
3.1. Caractères généraux 87
3.2. Changements dans la position de la ligne de rivage 88
3.3. Modification des profils 88
3.3.1. La partie émergée 88
3.3.2. La partie submergée. 88
3.3.3. Recherche d'une prémodélisation. 91
3.4. Variations cartographiques 91
4. Observations sédimentologiques 94
4.1. Evolution des matériaux au cours du cycle annuel 94
4.1.1. Localisation des échantillons et modalités des observations. 94
4.1.2. Rôle de la profondeur. 95
4.1.3. Rôle de la pente 95
4.1.4. Corrélation entre paramètres granulométriques. 95
4.2. Les fractions granulométriques mobiles 96
4.2.1. Modalités générales des variations texturales. 96
4.2.2. Fractions mobilisées. 97
5. Conclusion 99

QUATRIÈME PARTIE : LA DYNAMIQUE DU PAYSAGE DANS LA MOYENNE VALLEE

CHAPITRE IX : QUESTIONS DE MÉTHODOLOGIE 107
1. Principaux problèmes 107
2. Définitions 109

CHAPITRE X : LES MILIEUX ET LEUR DYNAMIQUE 111
1. Les états du milieu : typologies, successions et caractérisations 111
2. Les changements d'états du milieu 113
2.1. Cycles saisonniers 117
2.2. Tendances évolutives 120
3. La dégradation des milieux 122

CHAPITRE XI : L'ÉVOLUTION DES MILIEUX NATURELS EN 1989-90 127
1. Ethologie du paysage 127
2. Conclusion 127

CONCLUSIONS GENERALES 137

BIBLIOGRAPHIE 141

THESES ET MÉMOIRES 145

LISTE DES FIGURES 147

LISTE DES TABLEAUX 148

TABLE DES MATIÈRES 149

ANNEXES 153

ANNEXES

(Sur disquette 3,5" 2HD enregistrée sur Macintosh avec logiciel WORD 5.0)

Annexe 1 : Données concernant les Chap. I à VIII

Tabl.. I	Hauteur d'eau, vitesse et direction de courant le 19 mars 1991 à Gandiole **(Chap IV)**
Tabl.. II	Hauteur d'eau, vitesse et direction de courant le 27 juin1991 à Gandiole **(Chap IV)**
Tabl.. III	Hauteur d'eau, vitesse et direction de courant le 24 juillet 1991 à Gandiole **(Chap IV)**
Tabl.. IV	Hauteur d'eau, vitesse et direction de courant le 10 septembre 1991 à Gandiole **(Chap IV)**
Tabl. V	Hauteur d'eau, vitesse et direction de courant le 7 novembre 1991 à Gandiole **(Chap IV)**
Tabl. VI	Caractéristiques physico-chimiques et MES dans l'estuaire du Sénégal **(Chap IV)**
Tabl. VII	Variations tidales de la température et de la salinité à Gandiole **(Chap IV)**
Tabl. VIII	Localisation des échantillons du matériel du fond du chenal **(Chap. V)**
Tabl. IX	Nature et distribution des tests et des particules des sédiments du Sénégal dans les stations du site de Mbao **(Chap. VI)**
Tabl. X	Nature et distribution des tests et des particules des sédiments du Sénégal dans les stations du site de Gandiole **(Chap. VI)**
Tabl. XI	Nature et distribution des tests et des particules des sédiments du Sénégal dans les stations de Leybar, Bango et Diama-aval **(Chap. VI)**
Tabl. XII	Nature et distribution des tests et des particules des sédiments du Sénégal de la retenue de Diama jusqu'à la station de Tiguet **(Chap. VI)**
Tabl. XIII	Nature et distribution des tests et des particules des sédiments du Sénégal dans les stations de Kheune à Richard-Toll **(Chap. VI)**
Tabl. XIV	Classification supervisée de l'image SPOT du barrage de Diama du 28.11.90 **(Chap. VII)**
Tabl. XV	Matrice de confusion pour l'image du barrage de Diama du 28.11.90 **(Chap. VII)**
Tabl. XVI	Classification supervisée de l'image SPOT de l'embouchure du 28.11.90 **(Chap. VII)**
Tabl. XVII	Matrice de confusion pour l'image de l'embouchure du 28.11.1990 **(Chap. VII)**
Tabl. XVIII	Caractères granulométriques des sédiments de l'avant-côte, base de Gandiole **(Chap. VIII)**
Tabl. XIX	Mode granulométrique et pente topographique locale sur la base de Gandiole **(Chap. VIII)**
Texte	Méthode d'étude de l'environnement sédimentaire du bas Sénégal **(Chap. VI)**

Annexe 2 : Tableaux d'observation des états du milieu (exemples et extraits) et tableau des changements d'état d'un milieu **(Chap. IX)**

Annexe 3 : Interprétation des diagnostics en termes de processus élémentaires et définition des processus d'ensemble à partir des corrélations entre diagnostics **(Chap. IX)**

Annexe 4 : Typologie des états du milieu (ensemble des stations) : fréquence des processus caractéristiques de chaque type et sous-type d'état du milieu **(Chap. X)**

Annexe 5 : Typologie des états du milieu (stations séparées) : individualisation des états sur les deux premiers facteurs et choix des états-types **(Chap. X)**

Annexe 6 : Etats du milieu. Profils verticaux comparés des états-types **(Chap. X)**

Annexe 7 : Tendances évolutives des composantes du milieu en 1989-1990 **(Chap. X)**

Annexe 8 : Typologie des strates, couches et horizons des formations végétales ligneuses et herbacées, des états de surface du sol, du sol et des formations superficielles, et typologies d'ensemble **(Chap. XI)**

De 1989 à 1992, des recherches intensives ont été menées dans le cours inférieur du fleuve Sénégal, dans son delta et la zone littorale adjacente dans le cadre d'un projet Campus associant les Universités de Dakar, de Perpignan, de Strasbourg et l'ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération). Elles ont été effectuées par une équipe pluridisciplinaire et concernent des aspects variés de la morphodynamique, depuis les processus élémentaires de sédimentation jusqu'à la transformation des paysages et des biotopes.

Les observations et mesures mettent en évidence les principaux changements des milieux sahéliens. Ces modifications se répercutent sur les aménagements hydro-agricoles, et contribuent à l'étude générale de la dégradation des paysages en Afrique occidentale.

Les résultats obtenus montrent l'évolution actuelle d'une grande vallée alluviale en milieu tropical sec, sous l'effet combiné de la mise en service de barrages et de la sécheresse persistante. La quantification de nombreux paramètres permettra d'utiles comparaisons avec d'autres bassins fluviaux du domaine tropical subaride.

Pierre MICHEL est professeur émérite de Géographie tropicale à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg. Il a résidé une quinzaine d'années au Sénégal, et la plupart de ses travaux ont porté sur la géomorphologie des vallées tropicales.

Jean-Paul BARUSSEAU est professeur de Géologie à l'Université de Perpignan ; ses travaux concernent la dynamique actuelle des côtes sableuses et la reconstitution des environnements quaternaires par l'analyse sédimentologique.

Jean-François RICHARD est directeur de recherches à l'ORSTOM ; géographe, il s'est spécialisé dans la dynamique des paysages en milieu tropical.

Mamadou M. SALL est professeur de Géographie physique à l'Université de Dakar. Il s'intéresse aux problèmes de la morphogenèse actuelle, particulièrement au facteur éolien dont le rôle est primordial dans le Sahel.

Publications de l'Université de Perpignan
52, avenue de Villeneuve — 66860 PERPIGNAN CEDEX

ISBN : 2.908912-14-7

Prix : 100 F