

Mémoire présenté le 1/07/1986  
à l'ISE.

Mention TB + Félicitations  
- du Jury -

**10611**

UNIVERSITE DE DAKAR



FACULTE DES SCIENCES

INSTITUT DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

Mémoire de D.E.A. d'Environnement

CONTRIBUTION A LA CONNAISSANCE DE  
LA DYNAMIQUE  
DES PAYSAGES DE LA BASSE-VALLÉE  
DU SENEGAL.

Par **MBARACK DIOP**

**JUILLET 1986**

**JURY :**

- Président** : Amadou Tidiane BA - Directeur de l'ISE - Maître de  
Conférences
- Examineurs** : Pierre Pol DINCKE - Encadreur Principal - Maître de  
Conférences à l'ISE
- Oumar Amadou WANE - Maître-Assistant à l'ISE
- Henry Mathieu LO - Assistant à l'ISE
- Mamadou Moustapha SALL - Maître de Conférences
- au Département de Géographie

A la mémoire d'un père sitôt ravi à notre affection

Comment payer ce lourd tribut que nous devons aux responsables de notre formation sinon leur dédier ce modeste travail qui doit être considéré comme une contribution voire une simple introduction à une entreprise pour laquelle il est déjà possible de prévoir de vastes développements. Je me permets de citer Messieurs M. M. SALL, A. SOW et tout le personnel du Département de Géographie, Mes professeurs à l'ISE : P.P. VINCKE, A. DOYEN et autres. Qu'ils trouvent en ces mots toute mon affection et mes remerciements qui s'adressent aussi à mes camarades de promotion.

PLAN.....	2
Introduction.....	4
<b>Première Partie : Ampleur et formes de la dynamique des paysages de la vallée et du delta du Sénégal.</b>	
I. Problématique.....	7
✓ A. Dynamique Paléoclimatique.....	7
1. Modelé de la vallée alluviale.....	7
2. Explication de la genèse des formes.....	7
✓ B. Facteurs aérologiques et couverture végétale.....	11
1. Formes développées.....	11
2. Analyse des composantes du vent.....	11
3. Seuils d'efficacité des vents.....	13
✓ II. Méthodologie.....	14
A. Méthodes de terrain.....	14
1. Prélèvements.....	14
2. Morphométrie.....	14
B. Photo-interprétation.....	14
1. Les images landsat.....	14
2. La couverture aérienne.....	14
C. Travail de laboratoire.....	14
1. Granulométrie.....	14
2. Interprétation statistique.....	15
III. Paramètres texturaux et dynamique morpho-sédimentaire comparée des Zones-tests.....	17
A. Les paramètres texturaux.....	17
1. Caractérisation du stock sédimentaire moyen.....	17
2. Gradient des paramètres texturaux.....	17
3. Variations texturales latérales.....	19

B. Modes de transport des sédiments.....	23
1. Le diagramme de FRIEDMAN.....	23
2. Diagramme de PASSEGA.....	25
C. Dynamique morphosédimentaire comparée des Zones-Tests.....	27
1. Morphométrie comparée des barkanes.....	27
2. Faciès sédimentaire et morphologie dunaire.....	29
3. Analyse spatio-temporelle de la désertification de la basse Vallée.....	32
Conclusion à la Première Partie.....	33
Deuxième partie : Analyse des susceptibilités dynamiques des différents taxons paysagiques.....	34
I. Couverture végétale et paysages.....	35
A. Les ligneux.....	35
1. La Basse vallée.....	35
2. Le Delta.....	35
B. La strate herbacée et les cultures de décrue.....	35
1. La couverture herbacée.....	35
2. Les cultures de décrues.....	37
II. Context hydrologique de l'activité éolienne.....	39
A. Evolution des modules de crue de 1979 à 1986 à Bakel.....	39
B. Les coefficients mensuels de crue.....	39
III. Essai de typologie et d'identification des secteurs susceptibles de remobilisation éolienne.....	42
1. Les boisements de type galerie ou pseudo-galerie.....	42
2. Les boisements de cuvette.....	43
3. Les zones non "couvertes".....	43
Conclusion à la 2ème partie.....	43
Conclusion générale.....	44
Bibliographie.....	45

## Introduction

Au moment de la mise en eau du barrage de DIAMA et de l'achèvement des ouvrages-clés de Manantali, il est légitime que le regard d'environnementaliste que nous sommes se soit tourné vers un paysage qui porte depuis longtemps déjà la marque de l'occupation humaine et sa volonté d'organisation de l'espace.

Le passé du processus d'aménagement est déjà lourd de conséquences quant à la stabilité du milieu d'autant plus qu'il s'ajoute à cela une sécheresse climatique qui affecte la survie des différents taxons paysagiques.

La démarche proposée refuse la causalité première Causes - Effets - Etat et tente d'instaurer une démarche Hypothèse - Effet reconnu - Facteurs d'évolution qui nous paraît mieux adoptée à des études d'Environnement.

Ainsi ce travail s'articule autour de 2 thèmes principaux :

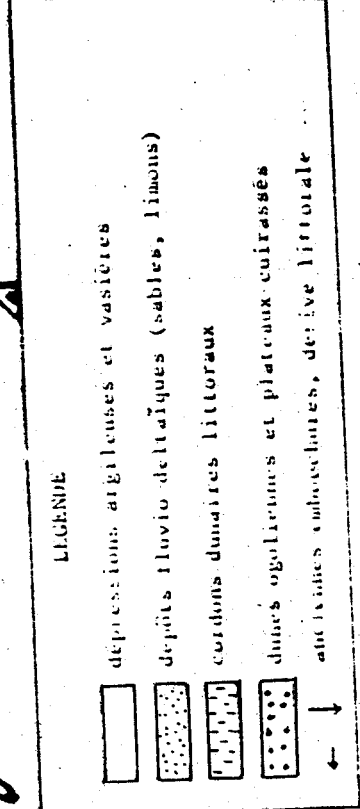
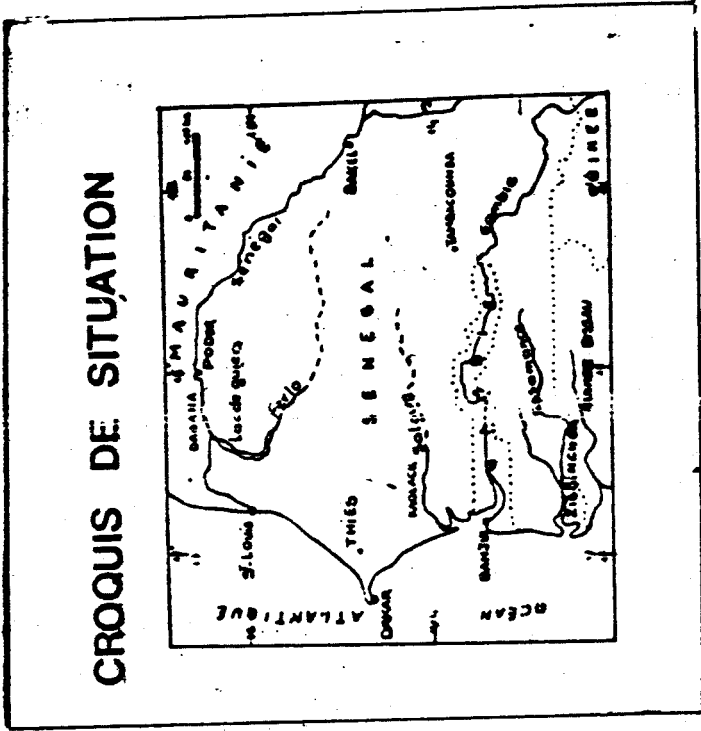
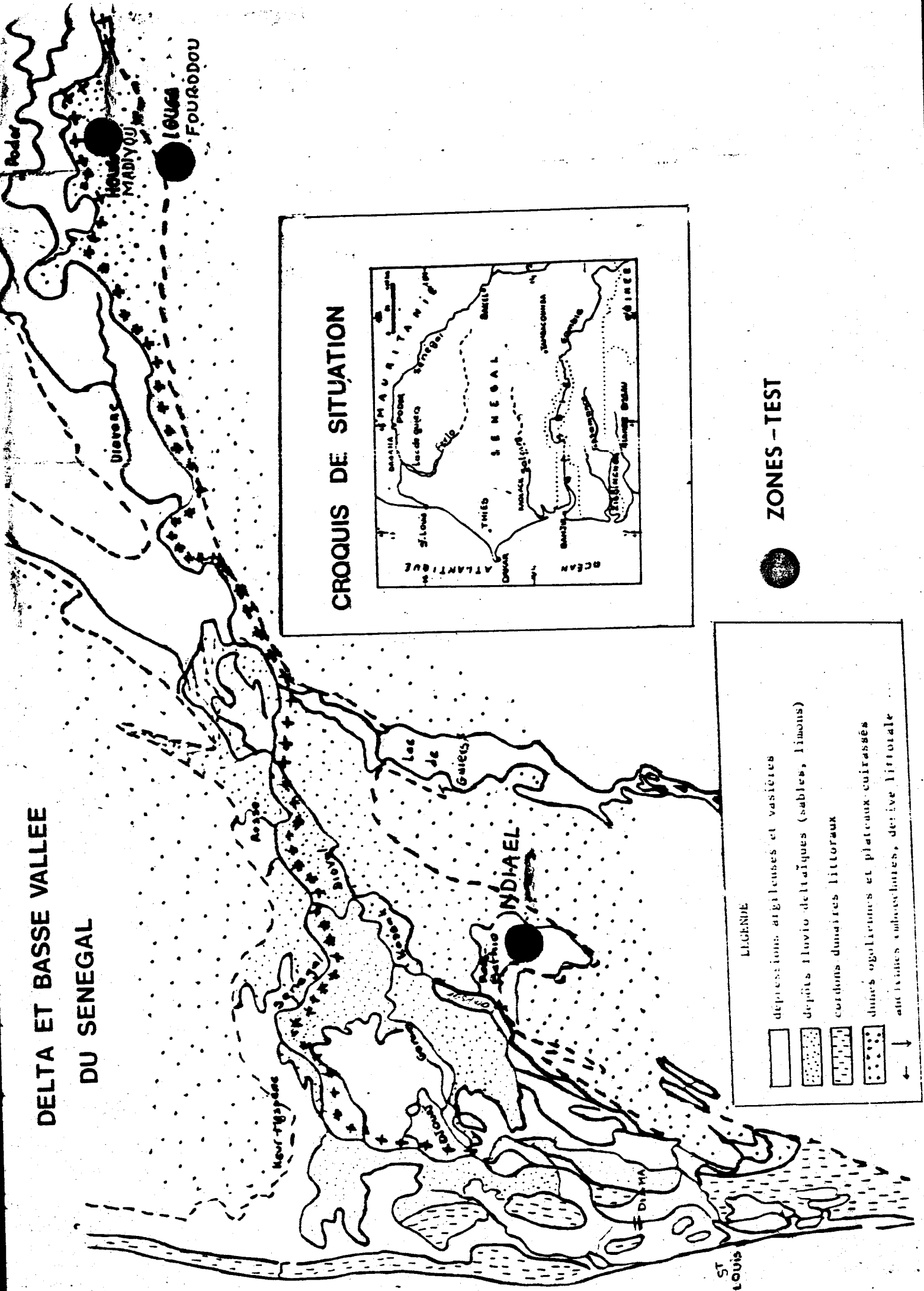
1. contrôles sédimentologiques des aires de remobilisation éolienne en milieu fluvio-deltaïque, les formes développées et l'ampleur de la reprise d'activité par rapport aux milieux continentaux.

Les prélèvements ont été effectués dans les secteurs de Podor (Houro Madiyou) pour le matériel fluviodeltaïque, Louga Fourodou (NDIAYENE) pour le matériel continental et Ross-Béthio Ndiel pour le matériel deltaïque.

2. évolution des susceptibilités dynamiques des différents taxons paysagiques par télédétection à partir des Images "Fausse Couleur Composite" et monoconales de Landsat du 30 septembre 1979.

Si au bout de ce travail nous arrivons à identifier correctement les aspects dynamiques des Paysages et à reconnaître les zones à protéger, nous aurions largement couvert la tâche que nous nous sommes assignée tout au début de ce travail.

# DELTA ET BASSE VALLEE DU SENEGAL



## ZONES - TEST





PREMIERE PARTIE :  
AMPLEUR ET FORMES DE LA DYNAMIQUE  
DES PAYSAGES DE LA VALLEE  
ET DU DELTA DU SENEGAL

## I. PROBLEMATIQUE

### A. Dynamique paléoclimatique

#### 1. Modelé de la vallée alluviale

Les successions des taxons paysagiques de la basse vallée du Sénégal (fig. 2) s'établissent sur un substrat argilo-sableux à forte hydromorphie. Ainsi du lit mineur vers le Diéri (milieu continental exondé) ou rencontre :

- des hautes levées deltaïques à texture finement sableuses (Fondé)
- des cuvettes argileuses de décantation : Hollaldé et vindou
- la terrasse nouakchottienne, zone de transition avec le milieu dunaire continental ou Diéri.

Le matériel est un sable à forte proportion d'argile qui passe localement à des argiles de décantation ayant incorporé du sel. La végétation est une steppe sahélienne à *Acacia* (sp.) et *Balanites aegyptica* avec des tamarix dans les zones fortement halomorphes.

Le Diéri est le milieu continental adjacent où les activités agro-pastorales sont fortement dépendantes du régime pluviométrique. Le substrat est essentiellement sableux.

#### 2. Explication de la gènèse des formes

La mise en place des unités géomorphologiques de la basse vallée du Sénégal suit l'évolution géomorphologique au Quaternaire récent des bassins des fleuves Sénégal et Gambie (fig. 3) et s'explique par les fluctuations du climat et du niveau marin (P. MICHEL, 1973).

Après le barrage dunaire de la vallée à l'Ogolien, (18000 BP), le fleuve Sénégal recréuse son lit et rejoint la mer. Cette épisode humide aboutit à une intense pédogénèse et à la formation de sols brun-rouge sur les dunes vers 10000 B.P.

La petite phase sèche centrée sur 7500 provoque des remaniements éoliens localisés des systèmes dunaires.

A la suite de la phase sèche post-tchadienne, le niveau marin, à son maximum, atteint + 2,50 m. La mer pénètre profondément dans les vallées



où elle reprend le matériel dunaire qu'elle dépose sous forme de terrasse. Les apports sableux d'origine marine semblent limités (DIOP, Mb., 1984). A l'amorce du retrait de la mer, une puissante dérive littorale liée à la houle du N.W. s'installe et aboutit à la formation des cordons littoraux vers 4000 B.P. L'embouchure du fleuve Sénégal se déplace vers le sud et la sédimentation fine s'effectue dans la zone du delta vers 3000 B.P.

Au subactuel, à partir de 2000 B.P s'édifient des levées et dunes littorales.

La période actuelle tend vers une péjoration climatique qui affecte le comportement hydrologique du fleuve Sénégal (fig. 4 a et b).

En effet selon (KANE, A., 1985 : "A partir de 1968, conséquence d'une sécheresse sans précédent depuis le début des observations en 1903, le module moyen annuel du fleuve Sénégal n'a cessé de diminuer : il est successivement passé de 771 m<sup>3</sup>/s en 1968 à 765 m<sup>3</sup>/s en 1971, à 747 m<sup>3</sup>/s en 1975, à 736 m<sup>3</sup>/s en 1977 et à 733 m<sup>3</sup>/s en 1979, selon les estimations de (FAURE et GAC (1981) in KANE, A., 1985. La persistance de conditions climatiques défavorables permet d'affirmer qu'en 1985, le module moyen interannuel du fleuve Sénégal s'établira autour de 710 m<sup>3</sup>/s.

La sécheresse signifie un déficit à la fois de la hauteur annuelle des pluies mais aussi de l'écoulement annuel des cours d'eau qui en dépend.

Ainsi la crue efficace de Juillet à Mars provoquait la submersion (accompagnée de dépôts turbides) des cuvettes de décantation. La couche argileuse déposée jouait un rôle de protection contre la déflation mais suite aux aménagements (construction des digues de Podor, Nianga et de route Podor-Dagana) le secteur de Houro Madyou est exondé en toute saison et l'ablation devient continue, favorisée par la salinité et le caractère essentiellement fin des dépôts.

Si bien que, même pour des vents de l'ordre de 2m/s, l'action érosive peut conduire à l'élaboration d'individus morphologiques tels que ceux qu'on y observe actuellement.

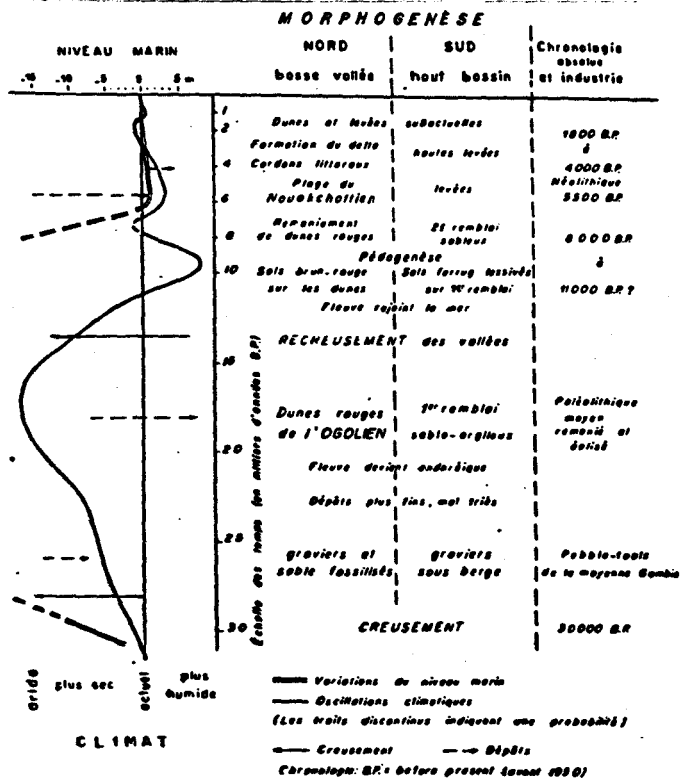
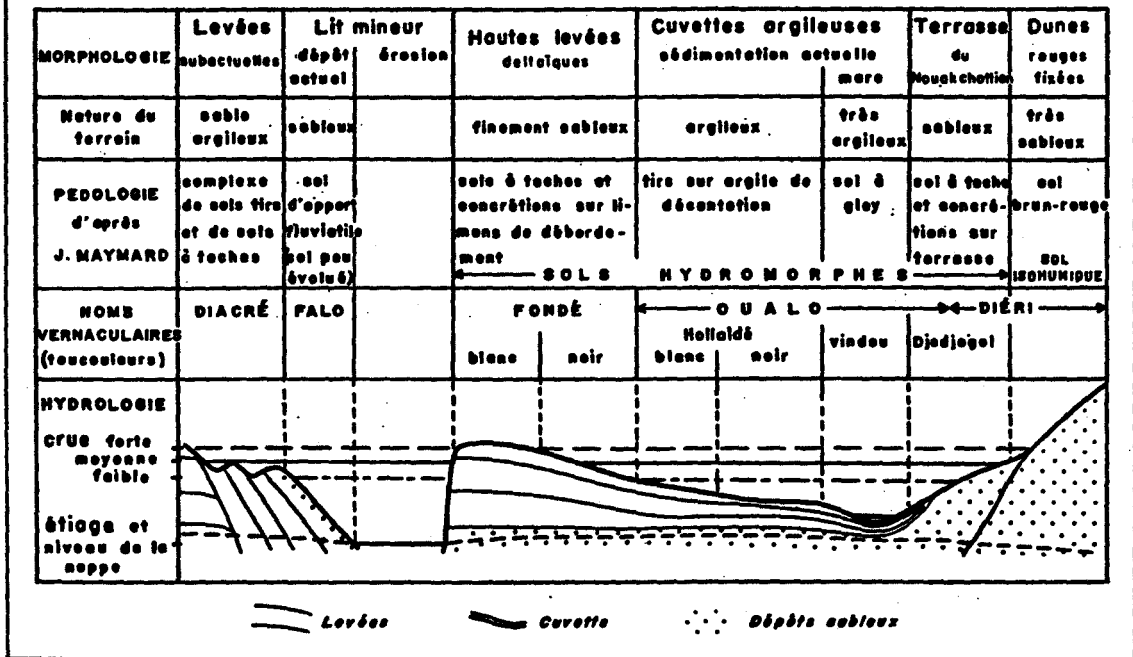
L'analyse des vents responsables de ces édifications a été effectuée pour les stations de Podor, Richard-Toll et Louga (tableau 1).

---

DIOP, Mb., 1984.- *Le delta sous-lacustre du Ouïers : étude géomorphologique (réf. : 8).*

KANE, A., 1985.- *Le bassin du fleuve Sénégal à l'embouchure. Flux continentaux dissous et particuliers, invasion marine dans la vallée du fleuve (Réf. 10).*

**Fig 2 COUPE SCHEMATIQUE DE LA BASSE VALLEE DU SENEGAL**  
dans la région de Podor (P. MICHEL: 1973)



**Fig 3 Bassin du Fleuve Sénégal**  
l'évolution géomorphologique au Quaternaire récent  
selon les fluctuations du climat et du niveau marin  
(P. Michel: 1973)

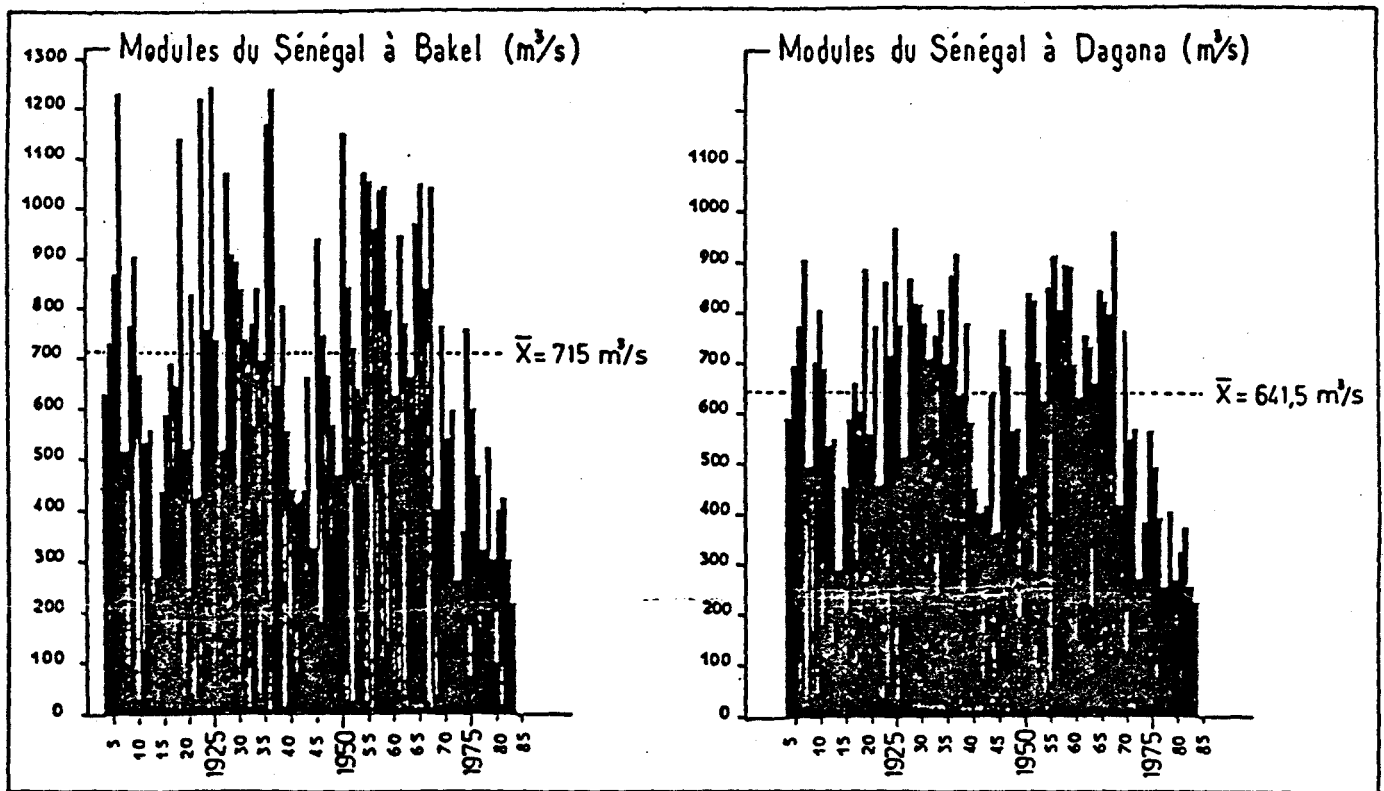


Figure 45 : Evolution des écoulements du Sénégal (m<sup>3</sup>/s) depuis 1903 à Bakel et à Dagana.

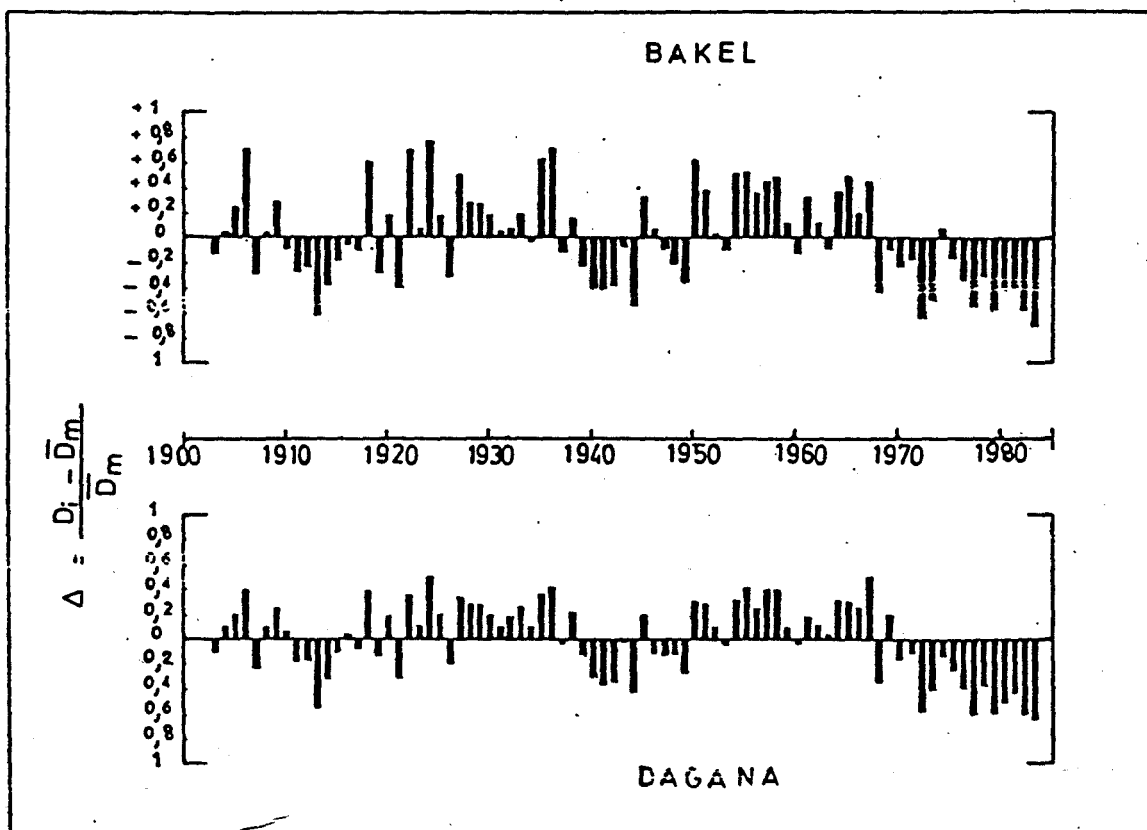


Figure 46 : Variation des écarts à la normale depuis 1903 à Bakel et à Dagana. (KANE, 1985)

## **B. Facteurs aérologiques et couverture végétale**

### 1. Formes développées

La destruction de la structure superficielle des sols fluviodeltaïques légèrement salées et la discontinuité de la couverture végétale autorise une remobilisation du matériel par les vents de saison sèche et l'édification de barkanes, nebkhas et rebdous. Les observations lors de la mission du 05 Juin 1985 portent sur ces formes vives typiques des phénomènes éoliens et montrent leur évolution positive et l'augmentation de l'efficacité des vents. De l'avis des populations locales, les formes datent respectivement de 3 et 5 ans pour les secteurs fluviodeltaïque et dunaire.

### 2. Analyse des composantes du vent

On distingue 3 directions aérologiques prédominantes (tabl. 1) :

- un vent du quadrant Nord à Est d'Octobre à Avril correspondant à l'alizé continental. La composante Nord-Est à Richard-Toll, avec une vitesse moyenne de 2,07 m/s, passe à une dominante nord plus accusée à Louga avec 2,72 m/s et devient Est à Est-Nord-Nord-Est à Podor avec un accroissement de la vitesse (3,37 m/s). Le balancement vers le Nord-Est provoque des remaniements localisés. Cette composante est responsable de l'édification des barkanes de Houro-Madyou.

Dans sa progression sur le territoire sénégalais, cette composante perd de son dynamisme au profit d'autres secteurs.

- un vent de secteur Nord-Ouest à Ouest-Nord-Ouest qui souffle durant les mois de Mai, Juin Juillet à Richard-Toll avec une vitesse moyenne de 2,92 m/s et d'Avril à Juin à Louga (2,73 m/s de vitesse moyenne). Cette composante disparaît à la station de Podor située plus à l'Est et semble être confinée au secteur atlantique.

- un vent de secteur Sud-Ouest qui souffle d'Août à Septembre à Richard-Toll, de Juin à Septembre à Podor et de Juillet à Novembre à Louga. Les vitesses moyennes pour ces stations sont respectivement de 2,19 m/s, 3,01 m/s et 2,50 m/s. Sa période d'activité coïncide avec la saison pluvieuse.

STATIONS MOIS	RICHARD-TOLL		PODOR		LOUGA	
	VITESSE MOYENNE	DIRECTION PREDOMINANTE	VITESSE MOYENNE	DIRECTION PREDOMINANTE	VITESSE MOYENNE	DIRECTION PREDOMINANTE
JANVIER	1,88	NE	3,84	ENE	2,82	N
FEYRIER	2,31	E	3,94	E	2,83	N
MARS	2,63	NE	3,84	NE	3,03	NNE
AVRIL	2,98	NE	3,14	NE	2,66	NNW
MAI	2,92	NW	2,92	NE	2,61	NNW
JUIN	2,94	NW	3,20	SW	2,92	WNW
JUILLET	2,91	NW	3,37	SW	2,56	W
AOUT	2,39	SW	2,85	W	2,66	SW
SEPTEMBRE	2,00	SW	2,63	W	2,43	SW
OCTOBRE	1,79	NE	2,45	E	2,38	WSW
NOVEMBRE	1,51	NE	3,07	E	2,47	W
DECEMBRE	1,43	NE	3,43	E	2,38	N

Tableau 1 : VITESSES MOYENNES MENSUELLES (en m/s) ET DIRECTIONS PREDOMINANTES DES VENTS AU SOL (PERIODE 1971-1980) (DONNEES ASECNA ET CSS).

### 3. Les seuils d'efficacité des vents

Le seuil critique de mise en mouvement des sédiments des ensembles dunaires de diamètre compris entre 200 et 220 micromètres est de l'ordre de 6 m/s pour le Sénégal Nord-Occidental (A. T. **DIAW**, 1982). Ce seuil nous paraît difficilement applicable ici car il est surestimé par rapport au diamètre moyen de notre stock (< 125  $\mu\text{m}$ ).

La prédominance des directions Est-Nord-Est et Nord-Est des migrations sédimentaires s'explique par la fixation, en période pluvieuse, des sols par un tapis graminéen et l'humidité importante interdit la remobilisation des sables, les processus d'érosion hydrique (ravinement) prédominent.

\* \*  
\*

## II. METHODOLOGIE

### A. Méthodes de terrain

La mission effectuée au début de Juin 1985 a porté sur trois secteurs :

- Podor (Houro Madyou)
- Louga Fouradou (Ndiayène)
- Ross-Béthio (Ndiael).

1. Les prélèvements ont été effectués sur :

- les dépôts fluviodeltaïques (croûte <sup>de battance</sup> et sédiments de profondeur)
- les barkanes (flanc au vent, flanc sous le vent, cornes et face de remaniement) <sup>de progression</sup> <sup>d'éboulement.</sup>
- les nebkhas, rebdous et les rides de déflation. Une deuxième mission d'observation (Fév. 86) a été nécessaire.

2. Nous avons également effectué des mesures morphométriques sur les aires de déflation (superficie des périmètres de déflation), sur les barkanes dont :

L = ouverture des cornes

H = hauteur

F = largeur du flanc <sup>au vent.</sup> <sup>de progression</sup>

### B. La Photointerprétation

Le travail cartographique a été effectué à partir des images du 30 Septembre 1979 de la mission **NASA-LANDSAT E30** avec une superposition des canaux MSS 4, 5, et 7. Nous disposons en outre de l'assemblage des photographies aériennes **O.M.V.S.** de Janvier 1980 dont l'interprétation a permis d'arriver à une taxonomie plus fine.

### C. Le travail de Laboratoire

#### 1. Granulométrie

Les échantillons ont été tamisés sous l'eau à 50 microns. Cette coupure à 50 um se justifie par le fait que le travail a porté essentiellement sur la morphologie dunaire et l'étude statistique des populations de grains de diamètre supérieur à 50 micromètres paraissait valable pour différencier les milieux. Les grains de diamètre inférieur à 50 um ne sont envisagés ici

Et ce la  
m'arrive  
date

*oult.* ) que par leurs proportions dans le stock sédimentaire. D'autant plus que les actions dynamiques liées à cette fraction pélagique ont été suffisamment étudiées par (P. MICHEL, 1973).

## 2. Interprétation statistique des caractères granulométriques

L'étude des populations de grains a été effectuée par les paramètres texturaux de FOLK, R. L. et WARD, W. C. (1957) exprimés en unités Phi ( $\phi$ ) ; phi étant égal au logarithme de base deux du diamètre du grain exprimé en millimètres (tabl. 2).

N° du TAMIS	Ouverture en mm	Ouverture en Unités $\phi$	N° du TAMIS	Ouverture en mm	Ouverture en Unités $\phi$
34	2	-1	25	0,250	2
33	1,6	-0,68	24	0,200	2,32
32	1,25	-0,32	23	0,160	2,64
31	1	0	22	0,125	3
30	0,800	0,32	21	0,100	3,32
29	0,630	0,67	20	0,080	3,64
28	0,500	1	19	0,063	4
27	0,400	1,32	18	0,050	4,32
26	0,315	1,67	17	0,040	4,64

Tableau 2 : TABLEAU DE CONVERSION DES DIAMETRES EXPRIMES (en mm, en Unités Phi ( $\phi$ )).

Sur la base des données obtenues, nous avons étudié la dynamique des sédiments en faisant une distinction entre :

- les sables d'accumulations éoliennes récentes
- les sables à caractère fluviodeltaïque
- les sables éoliens typiques

*qui appelle vers  
sable éolien  
typique*  
par construction du diagramme de G.M. FRIEDMAN (1961) et de H. PASSEGA (1964). L'analyse physicochimique : détermination du Ph a été intégrée dans cette partie. Elle a été effectuée selon la méthode "La Motte Chemical".



La programmation informatique (annexe III), conçue par A. SOW du Département de Géographie a été un outil remarquable par la rapidité d'exécution et la fiabilité des résultats obtenus.

L'intérêt d'une telle méthodologie est qu'elle permet de mesurer l'ampleur des actions dynamiques et de modéliser la réponse des différents milieux pour déboucher sur une quantification (projection) des transits sédimentaires comparés des différents secteurs.

En outre, il nous a paru nécessaire de présenter en annexe quelques généralités sur la télédétection du fait que, nous avons largement fait appel à l'interprétation d'images satellites.

Les annexes  
sont les  
pages.

### III. PARAMETRES TEXTURAUX ET DYNAMIQUE MORPHOSEDIMENTAIRE COMPAREE DES ZONES-TEXTS.

#### A. Les Paramètres texturaux

##### 1. Caractérisation du stock sédimentaire moyen

L'estimation à 95 % de l'intervalle de confiance pour le stock sédimentaire de grain moyen MZ 3,05  $\phi$  et d'écart type 0,35 donne des valeurs du diamètre comprises entre 2,82 et 3,27  $\phi$ . Ce qui confirme la représentativité de l'échantillonnage pour les différents milieux étudiés. La réponse sédimentaire moyenne est donnée par le tableau 3.

Paramètres Milieux	MZ	Si	SKi	Kg	PH	$\leq 50 \mu m$
Houro Madiyou	3,15 $\pm 1,87$	0,45 $\pm 2,18$	0,15 $\pm 1,06$	1,11 $\pm 0,01$	6,17 NS	19,20 $\pm 2,07$
Louga Fouradou	2,63 $\pm 0,30$	0,38 $\pm 0,12$	0,00 $\pm 0,18$	1,30 $\pm 0,35$	6,11 NS	2,63 $\pm 2,28$
Ndiael	3,27 $\pm 0,43$	0,65 $\pm 0,34$	-0,17 $\pm 0,20$	0,90 $\pm 0,15$	6,66 $\pm 0,30$	48,75 $\pm 20,44$
Stock Sed Total	3,05 $\pm 0,35$	0,41 $\pm 0,23$	0,03 $\pm 0,15$	1,10 $\pm 0,24$	6,31 $\pm 0,16$	22,65 $\pm 8,26$

Tableau 3 : DISTRIBUTION DES PARAMETRES POUR LES 3 MILIEUX  
L'examen de ce tableau appelle plusieurs commentaires :

- la taille moyenne des particules du stock sédimentaire se situent à 3,05  $\phi$  (125  $\mu m$ ) soit un sable très fin avec un écart-type fort (0,35) qui montre de grandes variations texturales
- c'est un sable généralement bien trié (Si = 0,41) présentant une distribution symétrique (Ski  $\approx$  0) pour des courbes leptocurtiques (Kg > 1)
- le taux moyen de pélites ( $\leq 50 \mu m$ ) est de l'ordre de 23 % avec de très fortes variations (écart-type = 8,26) dans un milieu légèrement acide (pH variant de 6,11 à 6,77).

##### 2. Gradient des paramètres texturaux

Le Grain Moyen (MZ) l'indice de dispersion (Si), le taux de pélites ( $\leq 50 \mu m$ )

et le pH augmentent selon un gradient Ndiael - HouroMadyou - Louga Fouroudou (tabl. 3).

Ce dernier milieu se différencie des deux autres par son matériel grossier ( $MZ = 2,63 \phi$ ), mieux trié (Si faible : 0,38) avec des courbes symétriques ( $SKi \pm 0$ ) et leptocurtiques ( $Kg = 1,30$ ). L'acidité du sol s'accompagne d'un taux de pélites faible, de l'ordre de 3 %.

Le Ndiael présente un matériel très fin ( $MZ > 3,25 \phi$ ), mal trié (par rapport à Houro Madyou) avec un excédent en éléments grossiers ( $SKi < 0$ ) pour des courbes platicurtiques ( $Kg < 1$ ). Cependant les mêmes indices sont observés à Houro Madyou sauf pour  $SKi$  dont la valeur est supérieure à zéro.

Ces tendances permettent de dégager trois faciés sédimentaires :

- un faciés fluviodeltaïque pour le secteur de Houro Madyou à sable très fin, très bien trié avec un pourcentage pélique moyen (20 %) en milieu légèrement acide.

- un faciés typique de cuvette argileuse de décantation (marigot de vidange) pour le Ndiael. Le taux de pélites atteint 50 % ; les sables très fins sont mal triés avec un enrichissement en fractions grossières en milieu basique.

- un faciés "ogolien" fin, pauvres en pélites (MICHEL, 1973), très bien trié, présentant des courbes symétriques leptocurtiques en milieu légèrement plus acide.

Les fortes variations d'écart-type au sein d'un même milieu suggèrent de fortes variations latérales surtout pour la population sédimentaire de Houro Madyou.

### 3. Variations texturales latérales

- Secteur de Houro Modyou

Le matériel fluviodeltaïque fin semble être assez homogène en profondeur ; les seules différences notables se situent au niveau de l'asymétrie (tabl. 4). En effet, les sables de croûte sont enrichis en éléments grossiers tandis que ceux en profondeur montrent des variations notables dans la teneur en argiles du matériel fluviodeltaïque selon les secteurs.

Les différences notables existent entre le grain moyen du matériel fluviodeltaïque et celui des barkanes.

Tableau 4 : PARAMETRES TEXTURAUX ET TAUX DE PELITES DES DIFFERENTS MILIEUX DU SECTEUR DE HOURO MADIYOU

Matériau	Paramètres	MZ	SI	SKI	KG	< 50 µm
	Milieux					
Fluviodeltaïque	CROUTE SUPERFICIELLE	3,37 NS	0,53 NS	- 0,19 NS	1,13 NS	26,3 NS
	SABLE DE PROFONDEUR	± 3,40 0,05	± 0,54 0,05	± 0,11 0,30	± 0,89 0,17	± 32,23 3,50
	FLANC AU VENT	± 2,81 0,20	± 0,39 0,05	0,13 + 0,31	1,30 + 0,52	2,80 + 0,30
Sable de Barkane	FLANC SOUS LE VENT	± 2,95 0,00	± 0,33 0,04	0,41 ± 0,00	1,30 ± 0,14	2,95 ± 0,05
	FLANC SOUS LE VENT	± 2,95 0,00	± 0,33 0,04	± 0,41 0,00	± 1,30 0,14	± 2,95 0,05
	CORNES	± 2,88 0,01	± 0,35 0,03	± 0,18 0,00	± 1,50 0,30	± 3,40 0,91
	FACE DE REMANIEMENT	3,19 ND	0,38 ND	0,06 ND	0,57 ND	2,60 ND

En effet, le sable de barkane est plus grossier (MZ compris entre 2,81 et 2,95) que le fluviodeltaïque (MZ > 3,37). Ce qui pose le problème de l'origine des sables d'accumulation éolienne en milieu fluviodeltaïque. Cette différence pourrait s'expliquer par un transport éolien hiérarchisé selon le diamètre ; auquel cas les accumulations fines en nebkhas constitueraient la fraction sableuse fine des dépôts fluviodeltaïques.

Les barkanes de Hour<sup>w</sup> Madyou présentent de fortes variations texturales. Ainsi, il existe un gradient sédimentologique entre le flanc au vent (face de glissement) à sable plus grossier que celui des cornes et du flanc sous le vent (face de reptation). Les courbes sont leptocurtiques. Etant donné l'inertie latérale relative développée perpendiculairement aux vents efficaces, les cornes s'enrichissent légèrement en éléments limono-argileux (taux de pélites de l'ordre de 3,40 %).

La face de remaniement mise en place par un vent de vitesse plus faible (secteur Nord-Est : 2,92 m/s en Mai à Podor), est constituée de sables très fins relativement bien triés ( $S_i = 0,38$ ) à courbes platicurtiques.

#### \*\* Secteur de Louga Fouroudou

Les variations texturales des barkanes à sable "ogolien" (tabl. 5) semblent inversées par rapport à celles du secteur fluviodeltaïque. En effet, le sable de la face de glissement est plus fin que celui de la face de reptation qui, avec les cornes, constitue des milieux homogènes.

Le sable est bien trié ( $S_i$  compris entre 0,32 et 0,39). Les courbes sont leptocurtiques ( $K_g > 1$ ) avec un enrichissement en éléments grossiers de la face de reptation et des cornes. Le taux de pélites est légèrement plus faible que dans le secteur fluviodeltaïque. Le matériel de rides assez grossier, constitue un dépôt typique des aires de déflation sur résidu d'altération de cuirasse.

#### \*\*\* Secteur de Ross-Béthio-Ndiael

Le Ndiael appartient au système deltaïque du Sénégal et porte la marque des transgressions marines, survenues sur le littoral atlantique. La couche argilo-sableuse superficielle y repose sur la vase nouakchottienne grise à tâches d'oxydation ocres. Les formes éoliennes y sont essentiellement de deux types :

- les rebdous qui sont des structures striées "sculptées" autour d'un obstacle dans les aires de déflation.

Tableau 5 : PARAMETRES TEXTURAUX ET TAUX DE PELITES DE SABLES DE LOUGA FOURQDOU

Matériel	Paramètres	MZ	SI	SKI	KG	< 50 $\mu$ (%)
	Milieux					
Ogolien	SABLE DE DUNE FIXEE	2,74 ND	0,26 ND	- 0,27 ND	1,36 ND	2 ND
	SABLE DE RIDE	1,86 ND	0,69 ND	0,25 ND	0,53 ND	0,00 ND
	SABLE DE CROUTE	2,73 ND	0,40 ND	- 0,08 ND	1,23 ND	8,5 ND
Barkane	FLANC AU VENT	± 2,81 0,20	± 0,33 0,03	± 0,17 0,24	± 1,43 0,40	± 2,35 0,17
	FLANC SOUS LE VENT	± 2,70 0,06	± 0,32 0,09	± 0,09 0,04	± 1,37 0,02	± 2,30 0,08
	CORNES	± 2,65 0,00	± 0,39 0,05	± 0,04 0,06	± 1,49 0,38	± 1,95 0,51

- les nebkhas ; structures d'accumulation de sable fin autour d'un obstacle. Le matériel semi-stabilisé par la présence de matières organiques peut localement être remanié et édifié en barkane.

Le matériel en place est un sable fin à très fin, mal trié à fort taux de pélites (> 50 %) tandis que le matériel d'accumulation est un sable très fin, assez bien trié avec un excédent en éléments grossiers (Tabl. 6).

La différenciation majeure entre les nebkhas et les rebdous provient des valeurs prises par l'angulosité et la fraction inférieure à 50  $\mu\text{m}$ . Les courbes des sables de nebkhas sont platicurtiques ( $K_G < 1$ ) avec un taux de pélites de l'ordre de 30 % et le matériel de rebdou, plus fin ( $MZ = 3,61$ ), mieux trié présente des courbes leptocurtiques avec un taux de pélites assez élevé de l'ordre de 60 %.

Les sédiments du secteur du Ndiael, en rapport avec les éléments analysés, se présentent comme des dépôts aisément remobilisables par le vent contrairement aux autres secteurs. A cet effet, la dynamique éolienne généralisée s'expliquerait par un accroissement de l'efficacité de l'ablation et du transports éoliens suite à une dégradation du milieu liée à la "découverte végétale" à la dislocation de la croûte superficielle de fixation et aux apports de sels par les eaux de drainage qui y sont déversées par la CSS.

## **B. Modes de transports des sédiments de la Basse Vallée**

Les méthodes de traitement choisis sont les diagrammes de G.M. FRIEDMAN (1961) et de R. PASSEGA (1967).

### **1. Le Diagramme de FRIEDMAN**

La méthode a été exposée par A. THIAM (1985). Le modèle de construction graphique permet de différencier les sables éoliens des sables fluviaux. Son élaboration demande le choix de deux paramètres qu'on dispose l'un en fonction de l'autre ( $MZ - f(S_i)$ ).

A partir de la constatation que les sédiments éoliens sont mieux triés que les sédiments fluviaux, FRIEDMAN propose de choisir les valeurs des moyennes en fonction de celles de l'écart-type, l'ensemble en unités phi ( $\phi$ ).

Tableau 6: PARAMETRES TEXTURAUX DES SEDIMENTS DE ROSS BETHIO-NDIAEL

Matériel	Paramètres	MZ	SI	SKI	KG	∠ 50 μ
	Milieux					
Cuvette de décantation	CROUTES	3,16 ± 0,60	0,77 ± 0,43	- 0,27 ± 0,27	0,81 ± 0,07	54,34 ± 2,74
	PROFONDEUR	2,75 NS	1,15 NS	0,20 NS	0,87 NS	93 NS
Nebkha	ND	3,43 ± 0,12	0,47 ± 0,07	- 0,08 ± 0,10	0,92 ± 0,13	31,84 ± 16,01 ?
Rebdou	ND	3,61 NS	0,41 NS	- 0,09 NS	1,27 NS	61,2 NS



"Le bon ou le mauvais classement des sédiments, donc leurs conditions de mise en place par le vent ou les eaux fluviales est fonction du rapprochement ou de l'éloignement et de la largeur de l'écart-type.

- Des valeurs de l'écart-type rapprochées et faibles traduisent un bon classement des sédiments qui se serrent sur le diagramme.

- Des valeurs éloignées et fortes révèlent un mauvais classement des sédiments. Ceux-ci apparaissent très dispersés sur le diagramme" : A. THIAM (1985).

Le stock sédimentaire de la Basse Vallée du Sénégal, disposé sur un tel diagramme, se répartit en cinq groupes (fig. 5) :

- les sables moyens à grossiers accumulés en rides transversales par le vent sont mal triés et ont la réponse d'un résidu d'altération de cuirasse.

- les sédiments à MZ compris entre 2,32 et 3  $\phi$  se répartissent en deux groupes selon la qualité du triage :

\* un lot très mal trié composé de sables marins associés à la vase nouakchottienne sous-jacente du Ndiael

\* un lot très bien trié composé de sables d'accumulation éolienne en barkane. La distinction entre les sables de barkanes de Houro Madyou à matériel parental fluviodeltaïque plus fin et les sables des barkanes à matériel parental ogolien paraît nette.

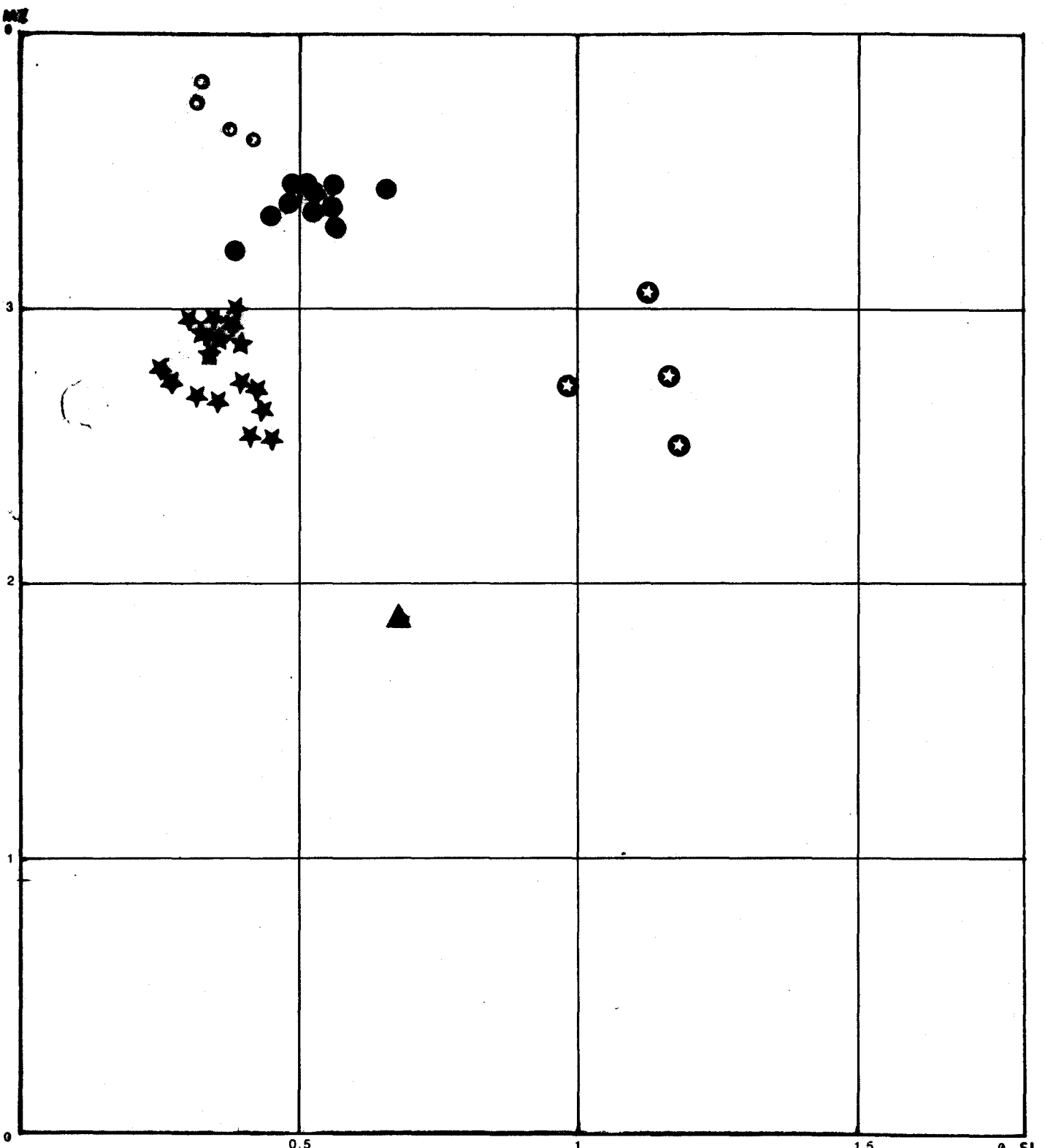
- Pour des valeurs de  $MZ > 3$ , on retrouve le matériel fluviodeltaïque à coefficient de classement très disparate. La position des barkanes à matériel fluviodeltaïque se justifie par une perte en matériel fin liée au diamètre du stock moyen.

- Les structures éoliennes fines s'individualisent bien en haut du diagramme. Cependant le matériel de nebkha est légèrement mieux trié que celui des rebdous.

Les sédiments fluviodeltaïques se trouvent insérés dans la famille sédimentaire éolienne ce qui prouve leur aptitude à la remobilisation par le vent.

## 2. Le diagramme de PASSEGA

"Le diagramme C-M ou "test de PASSEGA" (R. PASSEGA, 1957, 1962, 1963,



- SABLES MARINS
  - --- FLUVIODELTAIQUES
  - ★ --- DE BARKANES
- ▲ RESIDU D'ALTÉRATION DE CUIRASSES
  - MATÉRIEL DE NEBKHA ET DE REBDOU

Fig.5. DIAGRAMME DE FRIEDMAN

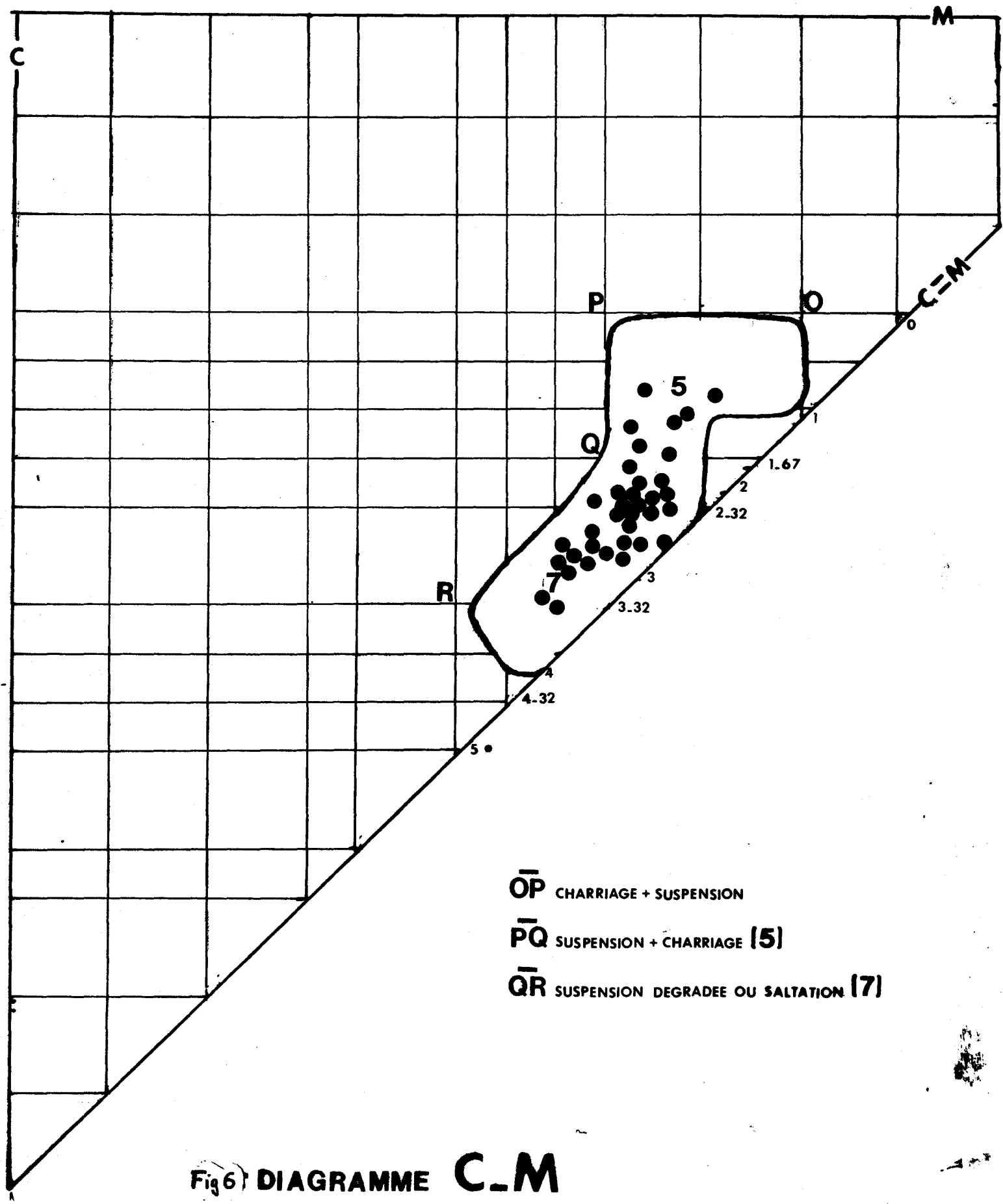


Fig 6) DIAGRAMME C-M

1964, 1969) est une représentation en coordonnées rectangulaires et échelles logarithmiques de deux percentiles où C, généralement le premier centile, approche le diamètre du grain maximum, et est écrit en fonction de M, le diamètre du grain médian. La répartition des nuages de points expérimentaux permet la mise en évidence des "figures C-M". Ces dernières sont un outil précieux pour l'analyse des sédiments clastiques. La confection du diagramme C-M nécessite la détermination du premier centile (C1). Cette dernière est souvent délicate. Certains auteurs ont donc préféré lui substituer le percentile cinq (C5) plus facile à déterminer" (C. BRESSOLIER et al. ; 1983).

L'application du test de PASSEGA aux sédiments de la basse vallée montre la prédominance du transport par les courants tractifs (fig. 6).

Les sections obtenues correspondent aux classes 5,6 et aux segments PQ et QR déterminant principalement deux modes de transport :

- un transport par suspension et charriage correspondant au segment PQ où le point Q caractérise un dépôt de sédiments en suspension. Le charriage est moins important.
- un transport par suspension dégradée (segment QR) qui regroupe la quasi-totalité des sédiments. Ce mode de transport correspond à la saltation caractéristique de la dynamique éolienne.

Cependant le diagramme ne permet pas de dissocier les sédiments éoliens du fluviodeltaïque. Probablement, le matériel fluviodeltaïque serait du matériel dunaire qui a été repris par les eaux fluviales. A ce titre, la recrudescence actuelle des phénomènes éoliens s'intégrerait dans un cycle d'oscillations climatiques récentes dont la tendance actuelle serait à la péjoration (amorce d'une phase sèche).

L'atténuation des effets de ces éléments climatiques passe par la conception d'un modèle d'aménagement qui donnerait la priorité aux efforts de conservation : installation de rideaux brise-vent, recharge des nappes phréatiques, mise en oeuvre de méthodes culturales qui garantiraient une bonne couverture permanente du sol car la tendance actuelle d'édification de systèmes dunaires dynamiques conduirait à une perte considérable de fertilité pour les terres de la basse vallée du Sénégal. Cependant, aucune action de protection ne saurait être efficace sans une connaissance préalable de l'ampleur des phénomènes éoliens.

## C. Dynamique morpho-sédimentaire comparée des zones-tests

### 1. Morphométrie comparée des barkanes

A partir de la configuration de la barkane d'après LEEDER (Fig. 7a et b) nous avons procédé à un essai de calcul de volume de la barkane. Ainsi, elle peut être inscrite dans un parallélogramme dont L est la longueur, F, la

largeur et H la hauteur. Etant donné que la face de reptation constitue l'hypothénuse du triangle de Hauteur H et de base F, le volume (Vm<sup>3</sup>) la barkane est égal à

$$L \times F \times H$$

-----

2

L'indice trouvé n'est quand bien même qu'approximatif.

L'évolution de l'accumulation est du type cumulatif et à ce titre, il, est assez difficile de calculer le tonnage de sable déposé annuellement mais son estimation à partir d'une moyenne constitue un renseignement précieux quant à l'évaluation des transits sédimentaires.

Ainsi l'âge des barkanes étant approximativement de 5 ans pour Louga Fouradou et 3 ans pour Houro Madyou. L'inertie est de 2 ans pour le matériel fluviodeltaïque par rapport au matériel dunaire.

A partir de ces constatations, on peut calculer le volume annuel remanié dans la basse-vallée (tabl. 7).

#### - Secteur de Houro Madyou

Les quantités de sable accumulées en structure barkanoïde sont de l'ordre de 67 à 68 m<sup>3</sup> soit une moyenne annuelle de 13 m<sup>3</sup>, cependant, il existe de très fortes disparités de volume (Ecart-type 18,11) déterminé sur 9 individus. Par contre les tonnages annuels paraissent plus stables. Ces disparités semblent liées à des variations micro-stationnelles de l'efficacité du vent suite à l'action de la végétation du talweg de Houro Madyou comme brise-vent.

- Dans le secteur dunaire de Louga Fouradou, les accumulations sont de loin plus importantes (> 1000 m<sup>3</sup>) soit une progression annuelle de 200 m<sup>3</sup> (soit 16 fois la moyenne du secteur fluviodeltaïque). Ce qui confirme l'aptitude à la déflation des sables dunaires par une destruction de la couverture végétale due à des facteurs climatiques et anthropiques.

Il n'est pas possible de différencier, ici, la dynamique latérale (empaquetement des couloirs interdunaires) de la "barkanisation" du fait de l'aspect général émoussé des systèmes dunaires.

## 2. Faciès sédimentaires et morphologie dunaire

La quantification des dépôts et les résultats sédimentologiques obtenus permettent d'esquisser une dynamique morphosédimentaire comparée des secteurs étudiés.

Tableau 2 : MENSURATIONS, VOLUMES TOTAUX ET ANNUELS DES ACCUMULATIONS  
DE SABLES.  
HOURO MADIYOU

	L (m)	H (m)	F (m)	(V. m <sup>3</sup> ) Total	Van (sur 3 ans)
B <sub>1</sub>	21	1,1	8,7	100,48	33,49
B <sub>2</sub>	17	0,9	9,5	72,67	24,22
B <sub>3</sub>	6,3	ND	ND	-	-
B <sub>4</sub>	20	0,9	6,75	60,75	20,25
B <sub>5</sub>	16,5	0,8	8,5	56,10	18,7
B <sub>6</sub>	15	0,5	13	48,75	16,25
Moyenne	15,96	0,84	9,29	67,75	22,58
So1	4,78	0,19	2,06	18,11	6,74
LOUGA FOURODOU (5 ANS)					
BLF	26	3	27	1053	210,6
BLF Face de rema- niement	6	1,20	Nd	-	-
BD	11	2,5	Nd	-	73,7-32,5
Moyenne	14,33	2,23	-	-	-
So1	8,49	0,75	-	-	-

### 3. Analyse spatio-temporelle de la désertification de la Basse Vallée du Sénégal.

Selon LAKE (1982) "L'exemple des environs de Njaayene permet d'examiner l'évolution de la reprise éolienne qui remanie ponctuellement les cordons dunaires qui surplombent la vallée alluviale du Sénégal". L'appellation de "cordons" pour ces systèmes vraisemblablement ogoliens porte équivoque au vu de l'évolution paléoclimatique proposée par P. MICHEL (1973), car ces cordons correspondent aux systèmes longitudinaux qui ont été entaillés par le fleuve Sénégal lors de sa reprise d'écoulement (vers 13000 B.P) suite au barrage ogolien (19000 B.P).

Les transits sédimentaires dans la basse vallée peuvent être quantifiés soit en considérant les volumes de "matériau parental" nécessaire pour l'édification d'une barkone de volume  $L F H/2$  (m<sup>3</sup>) ceci correspond à l'approche spatiale par rapport à l'approche temporelle qui comptabilise les vitesses d'édification.

#### \* Approche spatiale

Dans l'aire d'accumulation de Houro Madiyou pour 67,75 m<sup>3</sup> de sable accumulés, sachant que le taux de pélites moyen est de 19,20 %, le tonnage accumulé sur 3 ans est de 83,84 m<sup>3</sup>. Pour le secteur continental, il est de 648,86 m<sup>3</sup>.

Le rapport de volume est de l'ordre de huit fois en faveur du secteur dunaire continental qui évolue plus rapidement.

#### \*\* Analyse temporelle

Connaissant les rapports de volume des barkanes des deux secteurs, nous pouvons calculer le temps nécessaire pour l'édification d'une barkane de dimension moyenne caractéristique du secteur continental avec un matériel fluviodeltaïque.

Ainsi, le volume de matériel fluviodeltaïque nécessaire pour l'édification d'une barkane de :

L 26 m  
H 3m  
F 27 m

---

LAKE, L. A. 1982.- Analyses cartographiques de la désertification dans le Nord Sénégal  
(réf.11)

MICHEL, P. 1973.- Op. cit. (réf. 18).

est de:  $84,3 \text{ m}^3 \times 9,32 = 781,84 \text{ m}^3$  sachant que le volume annuel déposé est de  $22,58 \text{ m}^3$ .

Le temps nécessaire pour son édification serait de :

$781,84/22,58 = 35 \text{ ans}$ .

Cependant, ce chiffre ne tient pas compte de l'effet d'accélération du facteur anthropique et des modifications (climatiques) éventuelles. Cependant, il est déjà assez significatif de l'ampleur des phénomènes d'ablation éolienne en zone fluviodeltaïque.

#### CONCLUSION A LA 1ère PARTIE

La menace ne vient pas seulement du nord comme l'affirme A. THIAM 1985 : "Si les conditions climatiques actuelles et les actions anthropiques devaient continuer, l'ensemble des dunes du Trarza occidental seraient ravivées avant un demi-siècle et envahiraient une bonne partie de la vallée". En effet, "au Sud" il y a une dynamique éolienne enclanchée qui nous laisse moins de temps pour la combattre (de l'ordre de 30 à 35 ans). A ce titre, la réalisation des projets de barrages (DIAMA et MANANTALI) apparaîtrait comme une solution salutaire mais si la péjoration climatique actuelle se poursuit, le risque est grand d'avoir des barrages sans eau et à ce propos, les désastres écologiques jusqu'ici évoqués seraient un moindre mal.

Enfin, à propos de la connaissance des milieux Nord-sahéliens voués à une dynamique rapide, la "vérité-terrain" reste un outil essentiel pour la vérification et l'ajustement des données de télédétection.



**DEUXIEME PARTIE : ANALYSE DES SUSCEPTIBILITES  
DYNAMIQUES  
DES DIFFERENTS TAOONS PAYSAGIQUES**

L'analyse se fonde sur les données fournies par le satellite LANDSAT qui permet :

- une observation des secteurs critiques ayant des effets liés à la pollution des eaux
- une meilleure définition des régions à détérioration progressive, notamment en cours de désertification.

## I. Couverture végétale et Paysages

La végétation est entièrement dépendante de la topographie, du régime des crues et de l'action de l'homme. Avant l'intervention de l'homme, la vallée a dû être entièrement boisée entre Woundé et Rosso. Actuellement, la surface occupée par des forêts dignes de ce nom ne représente que 7 pour cent de la superficie totale soit 60.000 ha (Source Rap-FAO-PNUD 1977). L'image satellite ne permet pas de dissocier les taxons mais l'appréhension de la géomorphologie liée à l'observation sur le terrain permet de distinguer les formations ligneuses et les strates herbacées.

### A. Les formations ligneuses

Il est possible de distinguer 5 zones éco-forestières typiques en liaison avec la crue du fleuve et la salure des terrains (tabl. 8).

#### 1. La basse vallée

Les formations situées entre les deux barrages (Diama et Manantali) devront disparaître, les unes par submersion continue et les autres par exondation permanente par réduction des débits de crue et endiguement du lit majeur.

#### 2. Le delta

Les taxons principaux de mangrove prolifèrent généralement sur les vasières alimentées en matériaux limoneux en matières organiques par les eaux du Fleuve. Il va de soi que la fermeture de Diama provoque un affaiblissement sinon une disparition de ces formations ainsi que des schorres à herbacées de la région de Saint-Louis (Mr. SALL, 1984).

### B. La strate herbacée et les cultures de décrue

#### 1. La strate herbacée

ZONE I	Zone inondée chaque année (cuvettes)	<i>Acacia nilotica</i>	<i>Mitragina inermis</i> <i>Mimosa asperata</i> <i>Acacia sieberiana</i> <i>Bauhinia rufescens</i> <i>Ziziphus jujuba</i> <i>Ipsonea supliura</i>
ZONE II	Terres à inondation intermittante (levées basses et fluviodeltâiques)	<i>Bergia suffruticosa</i> <i>Indigofera oblongifolia</i> <i>Bareria verticilata</i>	<i>Acacia stenocarpa</i> <i>Balanites aegyptiaca</i> <i>Bauhinia</i> <i>Ziziphus</i>
ZONE III	Terrains exondés (levées)	<i>Acacia radiana</i> <i>Tamarindus indica</i>	
ZONE IV	Terres salées du Delta (cuvettes du Delta)	<i>Tamarix senegalensis</i> <i>Paspalum vaginatum</i>	<i>Sporobolus robustus</i>
ZONE V	Embouchure et Vasières (zone de Saint-Louis)	Mangrove à <i>Rizophora racemosa</i> <i>Avicenia nitida</i>	

TABLEAU 8 : PRINCIPAUX TAXONS DES ZONES ECO-FORESTIERES DE LA BASSE VALLEE

N.B. : La reconnaissance de ces taxons étant antérieurs à la construction du barrage de Diama, celle-ci devrait être réactualisée.

importance des grands périmètres (SAED, CSS, SOCAS, SONADER et OVSTM) et une disparition d'une certaine proportion des terres "Oualo" par exondation et mobilisation éolienne des matériaux fertilisants.

## II. Contexte hydrologique de l'activité éolienne en milieu fluviodeltaïque

### 1. Evolution des modules de crue de 1970 à 1986 à Bakel.

Pour toute la période, seule l'année hydrologique 1974-75 dépasse la moyenne établie de 1903 à 1986 qui est de 4400 m<sup>3</sup>/s avec une irrégularité de distribution (courbe en dents de scie) montrant 3 périodes de péjoration hydrologique (Fig. 9a).

- La période 72-73 : elle est de courte durée et le module minimal est de 1400 m<sup>3</sup>/s. Elle est suivie du maximum observé en 1974, de l'ordre de 6000 m<sup>3</sup>/s.
- La période 76-79 : elle voit 2 minima correspondant aux années 1976 et 1980 séparés par l'année humide 1978.
- La 3ème période plus longue commence à partir de 1980 et dure 5 ans et correspond à la reprise d'activité des phénomènes éoliens en milieu fluviodeltaïque car les 2 premières périodes ne sont pas suffisamment longues pour permettre le déclenchement de la "barkanisation".

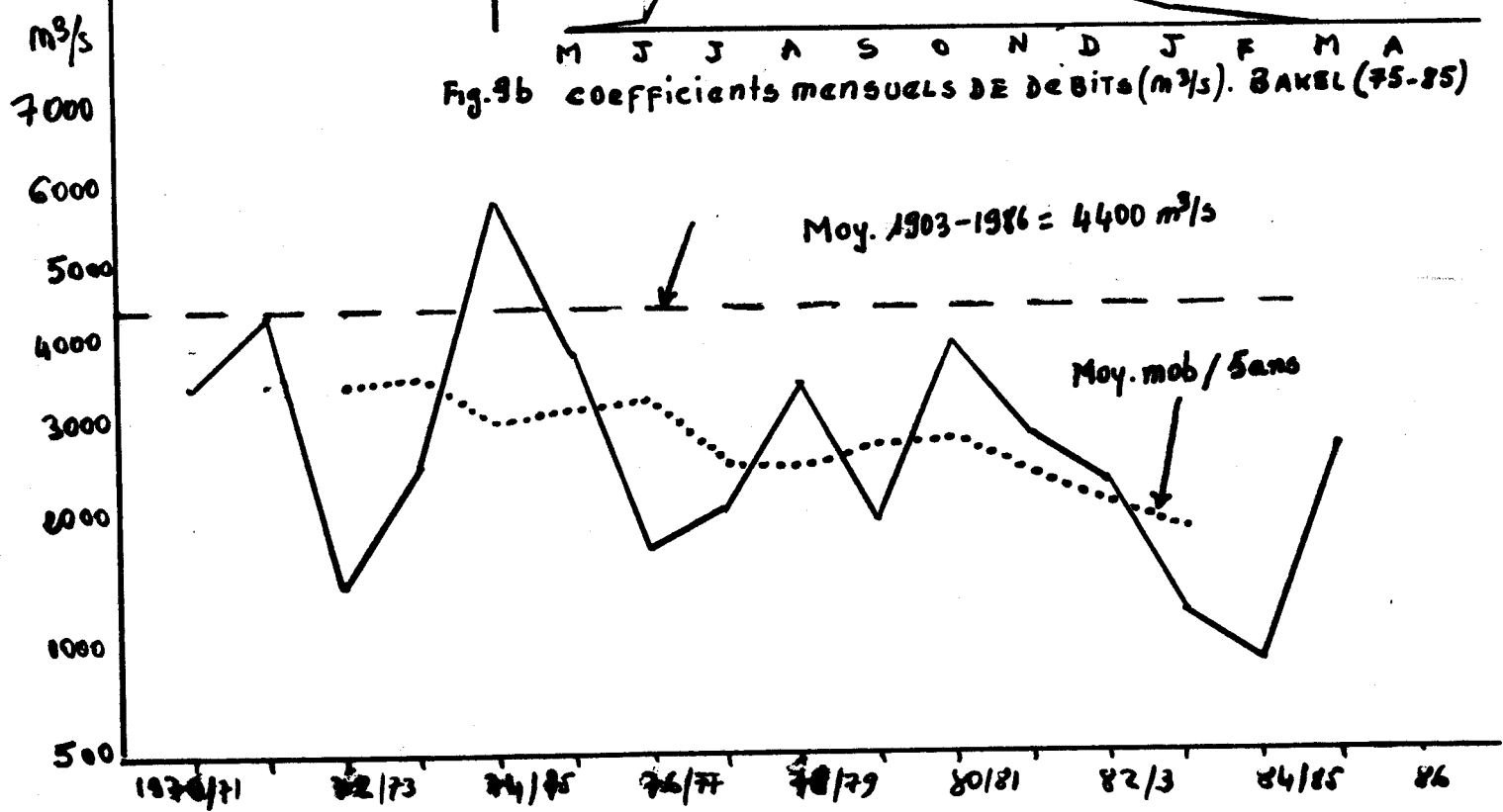
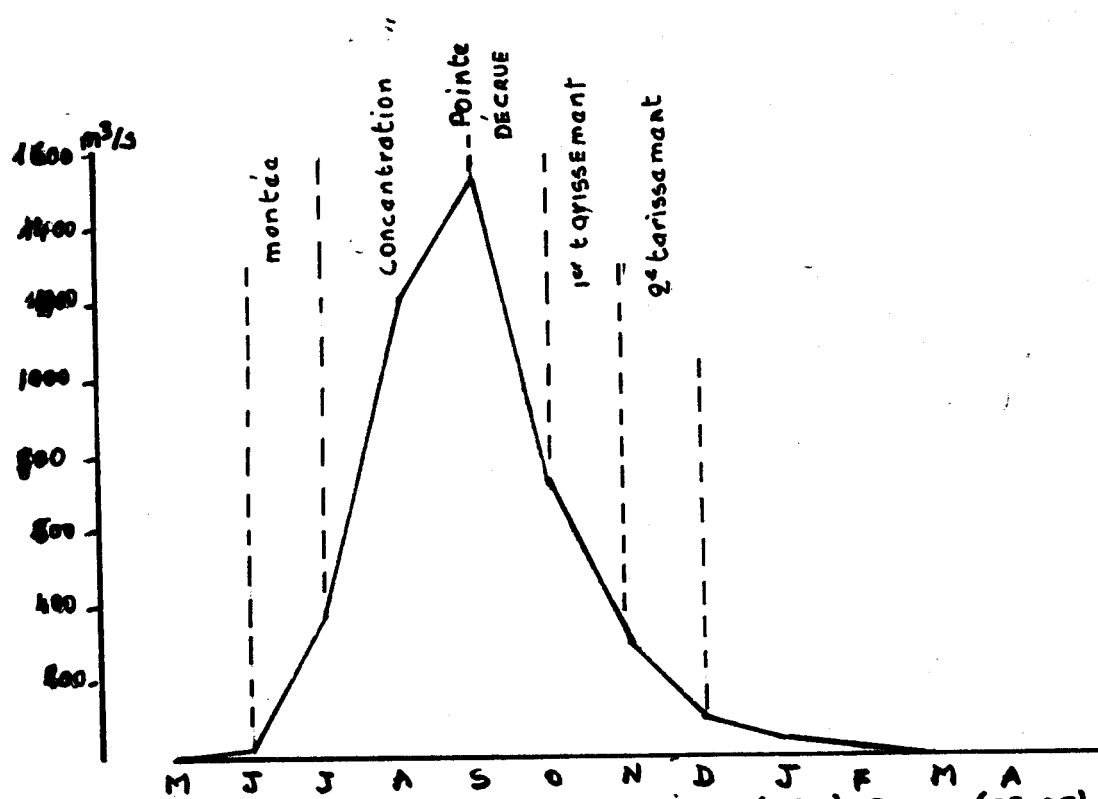
Le minimum minimum intervient en 1984-85.

On observe aussi une tendance évolutive vers la réduction des modules de crue à l'échelle de la période considérée et donc de l'ampleur de la submersion des cuvettes, ce qui favorise l'apparition des sebkhas qui évoluent rapidement en véritables aires de déflation (le sel aidant).

### 2. Les coefficients mensuels de crue

Le découpage de l'année hydrologique à Bakel (station qui contrôle l'entrée de la vallée alluviale) montre 6 phases de Juin à Mars (Fig. 9b).

- 1 phase de montée de 40 à 400 m<sup>3</sup>/s. Elle correspond à l'arrivée de l'onde de crue de Juin à Juillet. Cette phase correspond à un effet morphodynamique superficiel négligeable si ce n'est la recharge des nappes.
- la phase de concentration s'établit de Juillet à Septembre 400 à 1200 m<sup>3</sup>/s. Elle correspond au débordement des eaux de crue du lit mineur vers le lit majeur et au remplissage des cuvettes. Cette concentration s'établit jusqu'à la pointe (1600 m<sup>3</sup>/s) en Septembre. Les dates d'apparition de la pointe de crue en Septembre à Bakel ont pour fréquence :



- ` 49 % pour la 1ère décade \_\_\_\_\_ crue précoce
- ` 25 % pour la 2ème décade \_\_\_\_\_ crue normale
- ` 5 % pour la 3ème décade de Septembre : \_\_\_\_\_ crue tardive.

- A partir de Septembre, la décrue s'amorce et dure jusqu'en octobre.  
- A partir de 700 m<sup>3</sup>/s, le tarissement s'opère en 2 temps jusqu'à 100 m<sup>3</sup>/s. Les 2 phases sont séparées par la valeur 300 m<sup>3</sup>/s.

- La dernière phase est celle de la restitution au fleuve des eaux de nappes qui soutiennent le débit jusqu'en fin Mars.

L'analyse du taux de couverture végétale et de la situation hydrologique permet une approche de la typologie des paysages et de l'état des secteurs face à la dynamique éolienne.

### III. ESSAI DE TYPOLOGIE ET D'IDENTIFICATION DES SECTEURS SUSCEPTIBLES DE REMOBILISATION EOLIENNE EN MILIEU FLUVIODELTAIQUE

La typologie est effectuée par zonage d'une image satellite du 30 Septembre 1979 avec exploitation monocanale (3 Canaux MSS4, 5 et 7) et en Fausse couleur composite (Association des 3 canaux MSS4 + 5 + 7).

Ainsi on a dissocié les zones boisées des zones "non couvertes" c'est-à-dire dont le boisement n'est pas assez important pour inhiber les activités éoliennes.

#### 1. Les boisements de type galerie ou pseudo-galerie

L'action très ancienne de l'homme sur le milieu a conduit à des transformations (voulues ou inconscientes) qui souvent exacerbent les contraintes d'ordre morphoclimatique. Cependant, ces contraintes s'exercent de manière différenciée sur le lit mineur et les zones d'inondation (lit majeur).

En effet, les formations végétales (de l'embouchure à la hauteur de Bakel) gagnent le lit mineur au niveau des levées subactuelles et nouackchottiennes. La dynamique actuelle faite de sapements latéraux (qui sont accélérés en période de déficit hydrologique, l'écoulement étant canalisé dans le lit mineur. L'érosion peut provoquer un recul des berges de l'ordre de 1,22 m exceptionnellement.

Le lit mineur est gainé de nombreuses forêts classées qui atténuent les actions érosives par l'intermédiaire des appareils racinaires qui maintiennent une certaine cohésion du matériel. Cette végétation s'est dégradée depuis 7500 B.P car nous passons d'une forêt galerie à parfois une simple saulaie ripicole des pseudo-galeries ou de simples tailles arbustifs.

De même le peuplement des *Accacia* a regressé fortement par abattage ou réduction de la durée et de l'ampleur de la submersion consécutifs aux aménagements de la SAED qui exigent un planage systématique et une maîtrise de l'eau.

De même la mangrove sur vasières (actuelles ou anciennes) du domaine fluvio-marin de Saint-Louis semble avoir évolué vers une disparition complète et l'occupation des lieux par des sebkhas ou des tannes se poursuit. On estime à 250000 m<sup>3</sup>/an le matériel remis en suspension dans le fleuve par les sapements latéraux. Il ressort de cela la nécessité de protéger les espaces boisés qui sont en contact direct avec le lit mineur.

## 2. Les boisements de cuvettes

Le schéma d'aménagement qui repose sur l'exploitation rizicole des cuvettes fait peser une lourde menace sur ces formations végétales. Si bien que même pour les cuvettes non aménagées, par le simple fait de l'endiguement la mortalité des acacia atteint 30 % du peuplement dans certains secteurs tels que la zone de Podor (Forêts de Niaoulé).

La solution à ce problème passerait par le maintien à l'état "naturel" de certaines cuvettes préalablement choisies.

Dans le cas du Djoudj maintenu en eau par pompage, on assiste à une régénération de la végétation et son extension. Des zones en eau sont peuplées par de belles typhaies surtout depuis la fermeture du barrage de Diama.

## 3. Les zones non "couvertes"

Leur dynamique a été précisée dans la première partie et nous nous limiterons à analyser l'impact du barrage de Diama sur ces zones. En effet Diama introduit une différenciation zonale qualitative sur les eaux.

Le secteur de Saint-Louis fonctionnera comme un estuaire typique et ses unités géomorphologiques ne seront soumises qu'à une dynamique liée à la marée dont la montée ne pourra maintenir les vasières en eau que très modestement. Et les zones asséchées s'accroîtront et se transformeront en sebkha puis en tannes nus hypersalés où les phénomènes éoliens pourront s'exercer en continu.

Vers l'amont du barrage l'éolisation se traduira par l'apparition sinon la généralisation des champs de barkanes observés dans le secteur de Hourou-Madiyou. Elle sera exacerbée par les remontées salines dues aux fluctuations du niveau de la nappe.

## Conclusion à la 2ème Partie

D'après J. Y. LOYER et al. 1986 le système "fluvial" évoluera peu et probablement dans le bon sens au niveau des eaux de surface. Par contre, la salure des sols et des eaux de nappe ne pourra être réellement éliminée du delta que par la réalisation d'un émissaire général de drainage naturel ou artificiel, rejoignant le fleuve en aval du barrage.

Certes un drainage général permettrait d'atténuer la salinité mais les actions de surface n'en demeureraient pas moins efficaces.



## CONCLUSION GENERALE

Nous nous permettrons de conclure cette ébauche de connaissance de l'environnement dans lequel les aménagements actuels et ceux prévus risquent de plonger le secteur de la vallée du Fleuve Sénégal en citant ces réflexions contenues dans la Revue Europe Information Développement de Septembre 82 : "Si le Programme de l'OMVS parvient à débarasser la région des risques de famine causés par l'insuffisance ou l'absence des pluies, à accroître la production agricole, à rendre possible en toutes saisons la navigation sur le fleuve, à favoriser la création d'énergie électrique, et à la mettre au service d'industries nouvelles, à éliminer de la zone du bassin les endemies les plus graves et à veiller à ce que soient respectés les équilibres écologiques menacés ou partiellement détruits, l'OMVS aura atteint ses objectifs qui sont la sécurité, le bien-être économique et social des habitants de la région".

Nul doute que de tous ces objectifs, le respect et le maintien des équilibres écologiques resteront les tâches les plus hardies et qui conditionneront la réussite de tous les autres projets. Et ce à qui les chercheurs devront s'atteler dès aujourd'hui est la collecte de mesures systématiques (hydrologiques, physico-chimiques, inventaire des formations végétales et réponses morphologiques) en vue de consigner les processus de modifications morphogéométriques afin de pouvoir les confronter à l'inventaire "après barrage".

## BIBLIOGRAPHIE

- 1.-ANN. 1977.- Etude hydro-agricole du bassin du Fleuve Sénégal - AG : DP/RAF/65/061 - 319 p. Rome 77.
- 2.-ASEQUA-INQUA. 1986.- Changements globaux en Afrique durant le quaternaire. Coll. Dakar, Actes ed. ORSTOM 509 p.
- 3.-BRESSOLIER, C. 1974.- Processus d'actions dynamiques et réponses sédimentaires à la Pointe de la Courbe (charente Maritime - FRANCE) - Mém. EPHE n° 27, 157 p.
- 4.-BRESSOLIER, C., THOMAS, Y.F. 1983.- Méthodes pour l'étude d'une plage : Le Port-Blanc Sédimentologie et géomorphologie. Mém. EPHE Dinard n° 39, 89 p. 21 fig., 17 tabl.
- 5.-BRIGAUD, F. 1965.- Climat, Sol, Végétation du Sénégal : connaissance du Sénégal. CRD - Saint-Louis Fasc. 1, 2 et 3.
- 6.-CHATELIN, Y. 1979.- Une épistémologie des Sciences du sol. Mém. ORSTOM n° 88. 151 p. 17 tabl. PARIS.
- 7.-DIAW, A. T. 1982.- Régime des vents et sédiments du Sénégal Nord-Occidental. Ann. Fac. Lettres et Sc. Humaines - Dakar n° 12 pp. 243-259.
- 8.-DIOP, Mb. 1984.- Le Delta sous-lacustre du Guiers : Etude géomorphologique. Mém. de Maîtrise - Dépt. de Géographie, Fac. Lettres et Sc. Humaines - Dakar, 94 p. 30 fig. 4 tabl. 4 pl. photos.
- 9.-DIOP, Mb. 1985.- Régimes sédimentaires de la basse vallée et le delta du Sénégal. - Mém. DEA Géographie - Fac. Lettres et Sc. Humaines - Dakar p. 7 fig., 8 tabl. -
- 10.-KANE, A. 1985.- Le bassin du fleuve Sénégal à l'embouchure : Flux continentaux dissous et particuliers, invasion mariné dans la vallée du fleuve (contribution à l'hydrologie fluviale en milieu continental humide et à la dynamique estuarienne en domaine sahélien). - Thèse Doct. de 3ème cycle de Géo-physique. - Univ. Nancy II. Centre ORSTOM de Dakar - 196 p. 52 tabl. 75 fig.

11.-LAKE, L.A. 1982.- Analyses cartographiques de la désertification dans le Nord-Sénégal. - Thèse Doc. 3ème cycle Géo-Fac. Lettres et Sc. Humaines - Dakar, 236 p, 67 fig. 14 photos + App.

12.-LEEDER, M. R. sd.- Sedimentology : Process and Product. Dep. of Earth Sciences, Univ. of Leeds.

13.-LEROUX, M. 1976.- La circulation atmosphérique générale et les oscillations climatiques tropicales in "La désertification au Sud du Sahara : Actes du Colloque de Nouakchott. Déc. 73. Ed. NEA p. 82-86, 7 fig.

14.-MICHEL, P. 1963.- Les cartes géomorphologiques levées dans les bassins du Sénégal et de la Gambie (Afrique Occidentale) in Problems of Geomorphological mapping. Géographical studies n° 46 p. 73-81. 1 carte couleur, 3 cartes NB Polish Academy of Sciences - Varsovie.

15.-MICHEL, P. 1967.- Les dépôts du Quaternaire récent dans la basse vallée du Sénégal. - Bul. IFAN, Série A n° 2.

16.-MICHEL, P. ; ELDUARD, P. ; FAÛRE, H. 1968.- Nouvelles recherches sur le Quaternaire récent de la région de Saint-Louis. - Bul. IFAN t.XXX, Série A n° 1. Janvier 1968.

17.-MICHEL, P. 1970.- Chronologie du quaternaire des bassins des fleuve Sénégal et Gambie. Essai de Synthèse - Bul. ASEQUA, n° 25 - pp. 53-64 - 3fig. ; n° 26 pp. 25-37, 2 fig.

18.-MICHEL, P. 1973.- Les bassins des Fleuves Sénégal et Gambie : Etude géomorphologique - ORSTOM, Paris, 2 vol, 752 p, 170 fig., 37 tabl. 91 pl. h. t., Biblio. Mém. n° 63.

19.-MICHEL, P. ; SALL, M. 1984.- Dynamique des paysages et aménagement de la vallée alluviale du Sénégal - In "le Développement rural en question : Paysages, Espaces ruraux, Maghreb, Afrique Noire, Mélanésie - Editions ORSTOM, Mém. n° 106 - Paris 1984.

20.-N.A.S. (National Academy of Sciences). 1977.- L'espace et les ressources terrestres : Perspectives de la télédétection pour les pays en voie de Développement - 226 p. 10 fig., 9 tabl.

21.-SALL, M. 1981.- Régimes sédimentaires du delta et du Lac de Guiers et

modèles d'interprétation des données multispectrales appliquées à la qualité des eaux. - Revue télédétection et Cartographie Thématique : Nord-Sénégal et Basse-Gambie - pp. 49-60.

22.-SALL, M. 1979.- Hydrologie et Géomorphologie du delta du Sénégal et de ses bordures (Aftou-es-Sahéli et Ferlo Nord-occidental) d'après les images LANDSAT du 30 Septembre 1972. - Revue Photo-interprétation 79-5 pp. 28-38.

23.-SALL, M. 1982.- Dynamique et morphogénèse actuelle au Sénégal Occidental. Thèse Doc. d'Etat - Strasbourg - 2 tomes, 604 p. 138 fig. 21 pl. h.t.

24.-THIAM, A. K. 1985.- Les ensembles dunaires du Sud-Ouest de la Mauritanie, Trarza Sud-Occidental : Approche par la Télédétection et la sédimentologie. - Thèse de Doct. 3ème cycle - Géo. Fac. Lettres et Sc. Humaines - Dakar, 158 p. 39 fig., 23 tabl. 8 photos, BBL.

25.-TRICART, J. 1956.- Aspects géomorphologiques du delta du Sénégal - Revue de Géom. Dyn. n°s 5,6 p. 65-86.

26.-TRICART, J. 1961.- Notice explicative de la carte géomorphologique du delta du Sénégal. Mém. BRGM n° 8 - Ed. Techniq. 173 p. 6 ann., 3 cart. couleurs au 1/100000.

27.-VERGER, F. ; AUPHAN, E ; MONIOT, Cl. 1971.- La carte géomorphologique conçue comme un modèle dynamique - Mém. et Doc. vol. XII. Nlle Série RCP. 77-CNRS France - P;P; 223-264 - 13 pl h't.

## LISTE DES FIGURES

1. Croquis de situation.
2. Coupe schématique de la basse vallée du Sénégal dans la région de Podor (P. MICHEL).
3. Bassin du Fleuve Sénégal : l'évolution géomorphologique au Quaternaire récent selon les fluctuations du climat et du niveau marin.
4. Bakel : Modules moyens mensuels du Sénégal.
5. Diagramme de FRIEDMAN appliqué aux sédiments de la basse vallée du Sénégal.
6. Diagramme C-M (test de PASSEGA) appliqué aux sédiments de la basse vallée du Sénégal.
- 7a. Structure d'une barkane.
- 7b. Critères de mensuration d'une barkane.
8. Carte de couverture végétale.
9. Coefficients mensuels de crue à Bakel et Evolution des Débits 79-85 à Bakel.

## LISTE DES TABLEAUX

1. Vitesses moyennes mensuelles (en m/s/ et directions prédominantes des vents au sol (période 1971-80) (données ASECNA et CSS).
2. Tableau de conversion des diamètres exprimés en mm en unités très phi ( $\phi$ ).
3. Distribution des paramètres différents milieux de la basse vallée.
4. Paramètres texturaux et taux de pélites du secteur de Houro Madiyou.
5. Paramètres texturaux et taux de pélites des sables de Louga Fouroudou.
6. Paramètres texturaux et taux de pélites des sables du secteur de ROSS-BETHIO-NDIAEL.
7. Mensurations, volumes totaux et annuels des accumulations de sables.
8. Zones éco-forestières de la vallée du Sénégal.

## LISTES DES ANNEXES

1. Paramètres texturaux des échantillons analysés.
2. Photocopie de l'image LANDSAT du 30.09.79 utilisé pour la différenciation des milieux.
3. Programmes de traitement des données.
4. Illustration de l'ampleur des actions éoliennes.
5. Eléments de télédétection (Principes des prises de vue).
6. Carte physiographique de la basse vallée.

## ANNEXE 1 :

PARAMETRES TEXTURAUX (FOLK et WARD) : TAUX DE PELITES ( 50um) et MILIEUX D'ECHANTILLONNAGE

Ech	MZ	Si	SKi	Kg	% 50 u	Milieus
BK <sub>1</sub>	3,01	0,38	0,37	0,97	2,4	FV
BK <sub>2</sub>	2,53	0,45	-0,22	1,04	3	FV
BK <sub>3</sub>	2,95	0,30	0,48	1,40	3	SV
BK <sub>4</sub>	2,89	0,33	0,27	1,66	3,3	COR
BK <sub>5</sub>	2,89	0,37	0,27	1,69	4,8	COR
BK <sub>6</sub>	2,96	0,37	0,34	1,20	2,9	SV
BK <sub>7</sub>	2,91	0,34	0,24	1,90	3	AV
BK <sub>8</sub>	2,87	0,33	0,00	1,04	2,5	COR
BK <sub>9</sub>	2,87	0,39	0,19	1,61	3	COR
BK <sub>10</sub>	3,19	0,38	0,06	0,87	2,6	REM
Moy.	2,90	0,36	0,20	1,33	3,05	
E.T.	0,16	0,04	0,20	0,36	0,65	
Nd <sub>1</sub>	2,96	0,36	0,34	1,72	2,2	AV
Nd <sub>2</sub>	2,66	0,39	-0,12	1,35	3	SV
Nd <sub>3</sub>	2,65	0,43	0,00	1,76	2,4	COR
Nd <sub>4</sub>	2,74	0,26	-0,27	1,36	2	OG
Nd <sub>5</sub>	1,86	0,69	0,25	0,53	0	RID
Nd <sub>6</sub>	2,73	0,40	-0,08	1,23	8,5	CROU
Nd <sub>7</sub>	2,66	0,35	-0,09	1,22	1,5	COR
Nd <sub>8</sub>	2,75	0,26	-0,06	1,39	1,6	SV
Nd <sub>9</sub>	2,67	0,31	0,00	1,15	2,5	AV
Moy.	2,63	0,38	0,00	1,30	2,63	
E.T.	0,30	0,12	0,18	0,35	2,28	



## ANNEXE 1 : SUITE

Ech	MZ	Si	SKi	Kg	% 50u	Milieux
RB <sub>1</sub>	3,38	0,47	-0,09	0,83	19,6	N
RB <sub>2</sub>	3,33	0,45	-0,10	0,90	21,2	N. rem
RB <sub>3</sub>	3,44	0,55	-0,09	0,83	31	REU.N
RB <sub>4</sub>	3,77	0,31	0,06	0,74	57	CROU
RB <sub>5</sub>	3,82	0,31	-0,06	0,78	51,6	S.CROU
RB <sub>6</sub>	3,65	0,37	0,09	1,16	24,5	N.SEM.S
RB <sub>7</sub>	2,49	1,17	-0,56	0,91	52,8	CROU
RB <sub>8</sub>	2,75	1,15	-0,20	0,87	93	PROF
RB <sub>9</sub>	3,61	0,41	-0,09	1,27	61,2	REB
RB <sub>10</sub>	3,36	0,55	-0,21	0,90	62,9	N. rem
RB <sub>11</sub>	3,04	1,12	-0,51	0,78	58	CROU
RB <sub>12</sub>	2,71	0,97	-0,30	0,87	52,3	S. CROU
Moy.	3,27	0,65	-0,17	0,90	48,75	
E.T.	0,43	0,34	0,20	0,15	20,44	
FD <sub>0</sub>	3,37	0,53	-0,19	1,13	26,3	
FD <sub>1</sub>	3,45	0,50	-0,09	0,98	37,2	
FD <sub>2</sub>	3,45	0,51	-0,05	0,83	34	
FD <sub>3</sub>	3,45	0,65	0,55	0,64	31,2	
FD <sub>4</sub>	3,40	0,52	0,02	0,77	33,7	
FD <sub>5</sub>	3,30	0,56	0,43	1,01	31	
Moy.	3,40	0,545	0,11	0,89	32,23	
E.T.	0,05	0,05	0,30	0,17	3,50	
TOTAL	3,05	0,41	0,07	1,03	28,01	
E.T.	±0,35	0,23	0,11	0,23	0,19	

## ANNEXE 1 (suite)

Paramètres texturaux des échantillons analysés.

Annotations des différents milieux :

- A.V. = Flanc au vent
- S.V. = Flanc sous le vent
- COR = Cornes
- OG = Sable ogolien
- RID = Rides transversales
- CROU = Croûte superficielle
- REM = Face de remobilisation
- ET = Ecart-type
- ECH = Echantillons.

Annotations complémentaires :

- OMVS = Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal
- SONADER = Société Nationale de Développement Rural (RIM)
- CSS = Compagnie Sucrière Sénégalaise
- SAED = Société d'Aménagement et d'Exploitation des terres du Delta.

### Paramètres DE FOLK et WARD

$$\text{Grain moyen: } MZ = \frac{\phi 16 + \phi 50 + \phi 84}{3}$$

$$\text{Ecart-type: } S_i = \left( \frac{\phi 84 - \phi 16}{4} \right) + \left( \frac{\phi 95 - \phi 5}{6,6} \right)$$

$$\text{Asymétrie: } S_{ki} = \frac{\phi 16 + \phi 84 - 2 \cdot \phi 50}{2(\phi 84 - \phi 16)} + \frac{\phi 5 + \phi 95 - 2 \cdot \phi 50}{2(\phi 95 - \phi 5)}$$

$$\text{Angulosité: } K_G = \frac{\phi 95 - \phi 5}{2,44(\phi 75 - \phi 25)}$$

MOY, VAR, ET  
LIST

5 PRT "MOY, VAR, ET"

10 IMP "N=", N  
20 R=0  
30 M=0  
40 P=0  
50 IF K=1 THEN 150  
60 FOR I=1 TO N  
70 IMP A  
80 R=R+B\*A  
90 P=P+B  
100 M=M+B\*A\*2  
110 NEXT I  
120 R=R/P  
130 V=(M-P\*R\*2)/(P-S)  
140 GOTO 220  
150 FOR I=1 TO N  
160 IMP D  
170 P=P+D  
180 M=M+D\*2  
190 NEXT I  
200 R=P/N  
210 V=(M-N\*R\*2)/(N-S)  
220 PRT  
230 PRT "MOY="; R, "V  
AR="; V, "ET="; SQ  
R (V)  
250 PRT "AUTRES DON  
NEES (1=OUI, 0=N  
ON)";  
260 IMP "S="; S  
270 IF S=1 THEN 10  
280 IF S=0 THEN 290  
290 PRT "AUREVOIR"

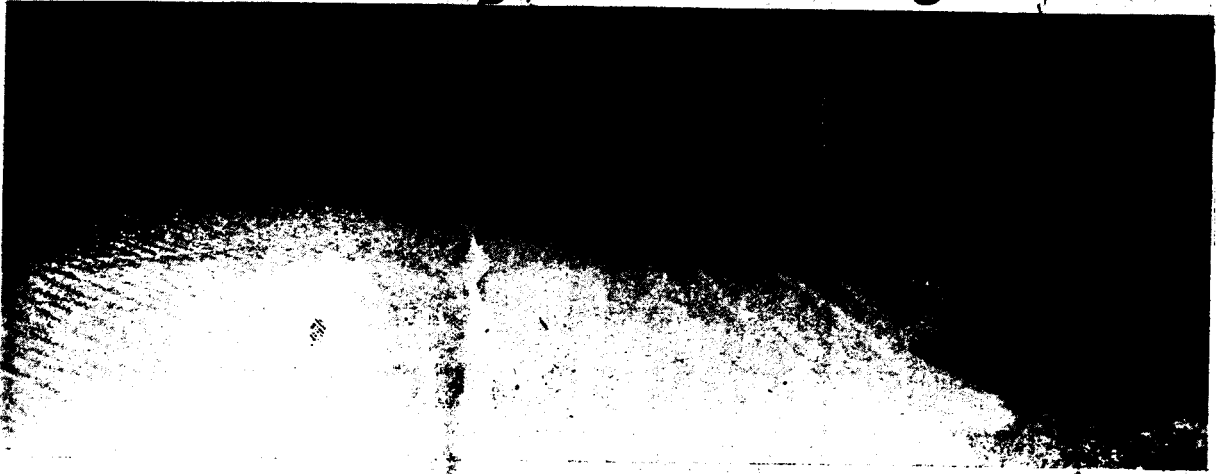
SEDIMENTOLOGIE  
LIST

10 PRT "SEDIMENTOL  
GIE"  
15 IMP "F="; F  
20 IMP A, B, C, D, E, F  
G  
30 M=(B+D+F)/3  
40 S=(F-B)/4+(G-A)  
/6.6  
50 D=(B+F)-(2\*D)  
51 P=2\*(F-B)  
52 N=0/P  
53 Q=(A+G)-(2\*D)  
54 R=2\*(G-A)  
55 L=Q/R  
56 K=N+L  
71 T=G-A  
72 W=2.44\*(E-C)  
73 Z=T/W  
80 PRT "M =" ; M  
90 PRT "S =" ; S  
100 PRT " K =" ; K  
110 PRT "Z =" ; Z  
120 GOTO 15

10 INPUT "nombre...", N  
15 INPUT "5 premieres valeurs ???", U1, U2, U3, U4, U5  
20 S=U1+U2+U3+U4+U5  
30 M=S/5 : LPRINT "MB(1972)=" ; M  
50 FOR I=6 TO N  
60 INPUT NOUVAL  
65 S=S-U1+NOUVAL  
70 M=S/5  
75 LPRINT "MB(" ; 1967+I ; ")=" ; M  
80 U1=U2; U2=U3; U3=U4; U4=U5; U5=NOUVAL  
85 NEXT I  
90 PRINT "travail termine !!!"

Annexe III: PROGRAMMES DE TRAITEMENT DES DONNÉES  
UTILISÉS

## La mort guette à ce virage



La mort guette à ce virage, situé à quelques kilomètres de Ndianga-Diéry, dans le département de Podor.

Notre photo a été prise vers 21 heures, le samedi 29 juin. Elle montre l'avancée du désert qui, à présent, discute la route aux véhicules.

A ce virage, le macadam est pratiquement devenu la proie du sable et les voitures venant de St-Louis vers Matam, ou vice-versa, ne peuvent guère voir un éventuel obstacle à moins de quelques mètres. Là tout est affaire de chance. Il est temps d'enlever ces dunes de sable sur la chaussée, pour éviter des drames et surtout des morts, disons-le, stupides.

Photo : Jules SARR

Soleil du 5 Juillet 1985

Plutôt parler d'installation du désert que d'avancée pour montrer le caractère autochtone du phénomène lié à l'intensification de la dynamique éolienne suite aux conditions éco-climatiques péjoratives et aux actions anthropiques des tabilisatrices

Beaucoup plus que les accidents, "la mort du milieu représente un danger imminent.

# Annexe V: Principes de TÉLÉ DÉTECTION

## I : Généralités sur la télédétection

---

### 1. DEFINITION

---

\* La télédétection (en anglais : remote sensing) peut être définie de plusieurs façons :

- Science et techniques de la détection à distance
- Détection à distance des caractères de notre planète en utilisant le rayonnement électromagnétique comme porteur d'information.
- Acquisition d'information au sujet des objets, des matériaux et des phénomènes à la surface de la terre, ou dans les niveaux immédiatement en dessous (eau, terre), et dans l'atmosphère, en utilisant des capteurs embarqués sur des plates-formes situées à distance de la surface, conçus pour réaliser des mesures de l'interaction entre ce qui est observé et le rayonnement électromagnétique.

\* On observe donc des objets, des matériaux ou des phénomènes. En général, ceci est possible grâce aux radiations électromagnétiques émises, diffusées ou réfléchies par ce qu'on observe.

Ceci fournit des informations sur les caractéristiques de la cible :

- les couleurs
- les formes
- les textures (arrangement, disposition des éléments d'une matière)
- la composition des cibles (terre, eau, végétation ...)
- la rugosité
- les propriétés thermiques
- les propriétés diélectriques

\* Ceci va donc permettre :

- la reconnaissance des formes
- le classement des cibles
- la reconnaissance et la mesure de phénomènes qui influencent l'interaction cible-rayonnement électro-magnétique.

La télédétection peut être comparée aux campagnes de mesures au sol, et aux campagnes de mesures en avion. Les principaux avantages de la télédétection sont la couverture spatiale, la disponibilité permanente, la meilleure vue d'ensemble des phénomènes.

La terre constitue un système fermé, avec des problèmes de démographie, d'alimentation, d'énergie, de chômage, etc ... Il est donc important de contrôler au mieux les ressources et les phénomènes dans les domaines suivants : géologie, récoltes agricoles, hydrologie, exploitation des forêts, pollution, climatologie, météorologie, couverture des glaces ...

Une planification sérieuse est nécessaire. La télédétection constitue l'une des sources d'information. Ceci implique :

- il faut définir des objectifs clairs
- il faut définir des structures adaptées
- il faut organiser la collecte et le stockage des données
- il faut traiter les données

## 2. Système de télédétection

---

Les composantes d'un système de télédétection sont :

- a) le secteur espace. Il est constitué d'un ou plusieurs satellites. Il s'agit d'une plate-forme, avec des capteurs, un sous-système de communication et un sous-système de contrôle d'orbite et d'attitude.
- b) le secteur terrien. Il est constitué de stations de réception (lien montant et lien descendant), d'un sous-système d'enregistrement, d'un sous-système de traitement, d'archives et de produits.

## 3. Notion d'image

---

Une image est une représentation enregistrée d'un objet. L'image peut être obtenue par des méthodes optiques, électro-optiques, optico-mécaniques ou électroniques.

Une image numérique (digital image) est une image représentée sous une forme numérique. L'image est représentée par un tableau à deux dimensions ; chaque élément d'image (pixel) se voit attribuer un niveau de gris ou un comptage (c'est à dire une valeur dans une fourchette donnée).

## II : les lanceurs

---

### 1. Principe

---

Considérons une fusée de masse  $m$  à l'instant  $t$  (la masse varie au cours du temps puisque la fusée consomme du combustible et éjecte des gaz). A cet instant  $t$ , sa quantité de mouvement est  $m\vec{v}$ .

Cette fusée éjecte, dans la direction de son mouvement et dans le sens opposé à celui de sa vitesse, un gaz qui sort de la tuyère avec une vitesse  $\vec{v}_e$  relative à la fusée ;  $\vec{v}_e$  est appelée vitesse d'éjection et nous supposons que cette vitesse d'éjection est constante.

Entre les instants  $t$  et  $t + dt$ , la fusée a éjecté une masse  $-dm$  de gaz ( $dm$  étant l'accroissement de masse de la fusée,  $dm$  est négatif). Cette masse est animée d'une vitesse absolue  $\vec{v} - \vec{v}_e$  et possède la quantité de mouvement :  $-dm (\vec{v} - \vec{v}_e)$ .

Quant à la fusée, sa masse est devenue  $m + dm$ , sa vitesse  $\vec{v} + d\vec{v}$  et sa quantité de mouvement  $(m + dm) (\vec{v} + d\vec{v})$ .

Ecrivons qu'il y a conservation de la quantité de mouvement totale :

$$m\vec{v} = (m + dm) (\vec{v} + d\vec{v}) + (-dm) (\vec{v} - \vec{v}_e)$$

Toutes les vitesses étant colinéaires, on peut ne considérer que leurs modules et après réduction, en négligeant l'infiniment petit du second ordre  $dm dv$ , on obtient :

$$m dv = - v_e dm \quad \text{ou} \quad dv = - v_e \frac{dm}{m}$$

Si  $m_0$  est la masse de la fusée au départ et  $m$  sa masse à l'instant considéré, sa vitesse est donnée par :

$$v = v_e \int_{m_0}^m - \frac{dm}{m}$$

ou

$$v = v_e \text{ Log } \frac{m_0}{m}$$

Cette formule montre que :

- 1° La vitesse acquise par la fusée est proportionnelle à la vitesse d'éjection. Celle-ci dépend de nombreux facteurs, en particulier de la température maximale que peuvent supporter les matériaux de la tuyère et de la différence de pression en amont et en aval de la tuyère.

Ces facteurs étant fixés, la vitesse d'éjection est encore proportionnelle à l'inverse de la racine carrée de la masse molaire du gaz éjecté ; on a donc intérêt à utiliser un propergol riche en hydrogène.

- 2° La vitesse de la fusée peut être très supérieure à la vitesse d'éjection.



3° Il y a intérêt à réaliser un rapport masse initiale sur masse restante aussi élevé que possible. Dans la masse restante, il faut distinguer la masse utile et la masse des réservoirs à propergol, vides.

Avec une vitesse d'éjection de 2 400 m/s et pour une perte de masse de 86,5 % de la masse initiale (ce qu'il est difficile de beaucoup dépasser), la vitesse atteinte par la fusée est de 4,8 km/s. C'est une vitesse très insuffisante pour la satellisation de la fusée et a fortiori pour des missions spatiales.

Aussi a-t-on recours au dispositif de la fusée à plusieurs étages, ce qui permet de se débarrasser des masses des propulseurs et réservoirs dès que ceux-ci sont vides. Le propulseur de l'étage suivant n'ayant plus à les accélérer, il s'en suit un gain de vitesse par rapport à la fusée à un seul étage.

Considérons maintenant l'**accélération** du mouvement de la fusée.

C'est :

$$\gamma = \frac{dv}{dt} = -v_e \frac{1}{m} \frac{dm}{dt}$$

Cette accélération est la même que celle qui serait due à une force

$$f = m\gamma = -v_e \frac{dm}{dt} .$$

Cette force  $f$  est appelée **poussée** du moteur

fusée.

L'impulsion  $I$  reçue par la fusée est donnée par :

$$I = \int_0^t f \cdot dt = -v_e \int_{m_0}^m dm = v_e (m_0 - m) = v_e m_p$$

$m_p$  étant la masse de propergol utilisée.

On appelle **impulsion spécifique**  $I_s$  l'impulsion obtenue par unité de poids au sol de propergol. Dans l'hypothèse faite d'une vitesse d'éjection constante, on a tout simplement :

$$I_s = \frac{I}{m_p g_0} = \frac{v_e}{g_0} : \text{l'impulsion spécifique est}$$

égale à la vitesse d'éjection divisée par l'intensité du champ de pesanteur au niveau du sol. On la mesure en secondes.

### 3 : Les orbites circulaires

---

#### 1. Généralités et définitions

---

Les satellites artificiels sont soumis aux forces de gravitation et aux forces d'inertie. En l'absence de perturbation, les orbites des satellites suivent les lois de Képler.

L'orbite circulaire est un cas particulier de trajectoire possible. Elle présente l'avantage que le satellite est situé à une altitude constante, et donc la surface visible est constante.

Voici quelques définitions :

Orbite : trajectoire du satellite

Révolution : rotation complète du satellite sur son orbite

Période : durée d'une révolution

Inclinaison : angle formé par le plan de l'orbite et le plan de l'équation terrestre

Noeud : point d'intersection de l'orbite et de l'équation terrestre.

Le noeud ascendant correspond au passage du satellite du sud vers le nord. Il est descendant dans le cas contraire.

#### Equations de l'orbite circulaire :

On appelle  $R$  le rayon de la terre,  $H$  l'altitude du satellite,  $r$  la distance  $R+h$ ,  $m$  la masse du satellite,  $M$  la masse de la terre,  $w$  la vitesse angulaire,  $K$  la constante de gravitation et  $g$  l'accélération de la pesanteur à la surface de la terre.

L'équation du mouvement du satellite est caractérisé par :

$$m \omega^2 r = K \frac{mM}{r^2}$$

(inertie)      (gravitation)

A la surface de la terre, on a la relation :  $mg = K \frac{mM}{R^2}$

On en déduit donc la relation :  $\omega^2 r^3 = gR^2$

En appelant T la période du satellite, on peut déduire

$$h = R (c_1 \cdot T^{2/3} - 1) \quad \text{avec } c_1 = 0.052 \text{ min}^{3/2}$$

$$T = c_2 \left(1 + \frac{h}{R}\right)^{3/2} \quad \text{avec } c_2 = 84.4 \text{ min}$$

En conséquence, si l'orbite est circulaire, l'altitude est une fonction de la période, et la période est une fonction de l'altitude.

On distingue deux catégories de satellites en fonction de leurs orbites : les satellites géostationnaires et les satellites à défilement.

## 2. L'orbite géostationnaire

---

La vitesse angulaire du satellite est égale à celle de la rotation de la terre. L'orbite est circulaire, et située dans le plan équatorial. Il apparaît donc comme immobile au dessus d'un point de la terre.

Les caractéristiques sont les suivantes :

$r = 42164,5 \text{ km}$

$h = 35786,4 \text{ km}$

$T = 23 \text{ heures } 56 \text{ minutes}$

inclinaison :  $0^\circ$

Dans un repère lié à la terre, la vitesse du satellite est de  $3,075 \text{ km/s}$  ; l'accélération subie est de  $0,224 \text{ m/s}^2$ .

L'orbite géostationnaire est très utilisée pour l'observation de la terre et les télécommunications. En outre, cela simplifie les opérations du secteur terrien.

## 3. L'orbite polaire (satellite à défilement)

---

Sur une orbite polaire, le satellite se déplace par rapport à la surface de la terre. La terre "défile" sous le satellite.

Pour la télédétection, on choisit en général des orbites circulaires, avec des altitudes inférieures à  $2000 \text{ km}$  (ce qui correspond à des périodes inférieures à 2 heures).

Selon l'inclinaison choisie, la surface survolée est plus ou moins grande. si l'inclinaison  $i$  est inférieure à  $90^\circ$ , seules les zones comprises entre les latitudes  $\pm i$  seront visibles.

En outre, la terre n'étant pas une sphère parfaite, le plan de l'orbite tourne autour du centre de la terre, tout en conservant la même inclinaison. Cette précession des noeuds est déterminée par l'inclinaison et l'altitude du satellite.

La "précession apparente" du soleil étant de  $0.986$  degrés/jour vers l'est, on peut imposer la même précession pour un satellite. On a alors les propriétés suivantes :

- Le plan de l'orbite conserve un angle constant par rapport à la direction Terre-Soleil.
- A chaque noeud ascendant, l'heure solaire est toujours la même.
- Cette orbite est dite "à précession héliosynchrone", ou plus simplement héliosynchrone.

Le cycle au terme duquel le satellite se retrouve dans une position identique par rapport à la terre s'appelle cycle orbital.

#### 4. L'aire apparente

---

L'aire apparente est la surface instantanément visible d'un satellite. Elle dépend donc de l'altitude du satellite.

Pour un satellite géostationnaire, la terre est vue sous un angle de  $17^\circ$ . La surface visible est de 42%.

Pour un satellite à orbite basse, le domaine est beaucoup plus petit. Ainsi, si l'altitude est de 900 km et si le balayage optique est de  $\pm 45^\circ$ , on ne voit que 0.5% de la surface.

## RAPPELS DE MECANIQUE

---

### 1. Cinématique du point

---

Soit un repère d'origine 0, et une échelle de temps t. Un point mobile M est repéré par ses trois coordonnées x, y et z qui sont trois fonction du temps, continues et deux fois dérivables.

La vitesse du point est le vecteur  $\vec{v} = \frac{d}{dt} \vec{OM}$  dont les composantes sont les dérivées par rapport au temps  $\frac{dx}{dt}$ ,  $\frac{dy}{dt}$  et  $\frac{dz}{dt}$

L'accélération du point est le vecteur  $\vec{\gamma} = \frac{d}{dt} \vec{v}$  dont les composantes sont les dérivées secondes  $\frac{d^2x}{dt^2}$ ,  $\frac{d^2y}{dt^2}$  et  $\frac{d^2z}{dt^2}$

L'ensemble des positions du point mobile M constitue sa trajectoire.

### 2. Principes fondamentaux

---

\* Principe fondamental : l'action subie par un point matériel résulte d'une force f telle que :

$$\vec{f} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m \vec{\gamma}$$

- \* Le mouvement du centre d'inertie G est le même que celui d'un point matériel G ayant pour masse la masse totale du système, et auquel seraient appliquées toutes les forces extérieures s'exerçant aux différents points du système.
- \* Si la résultante des forces extérieures appliquées au système est nulle (c'est le cas d'un système isolé), la quantité de mouvement totale du système est invariante.
- \* Loi de gravitation : deux corps de masse  $m_1$  et  $m_2$ , et séparés d'une distance  $r$ , subissent l'attraction d'une force  $f$  telle que

$$f = K \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad \text{avec } K = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg} \cdot \text{sec}^2$$

### 3. Lois de Képler

---

- a) Les orbites des planètes sont planes. Ce sont des ellipses dont le soleil est un foyer.
- b) Le rayon vecteur d'une planète balaie des aires égales en des temps égaux (loi des aires).
- c) les carrés des durées de révolution sont proportionnels aux cubes des grands axes. ( $T^2$  proportionnel à  $a^3$ ).

Ces trois lois permettent de montrer que les planètes sont soumises à une force centrale. De plus, on montre que cette force est la force de gravitation.

D'autre part, les lois de Képler peuvent se déduire de la loi de la gravitation.

La troisième loi correspond à l'égalité :  $KMT^2 = 4\pi^2 a^3$   
avec  $K$  constante de gravitation et  $M$  masse du soleil.



#### 4. Conséquences pour le lancement d'un satellite

---

##### a - Vitesse de satellisation

Le lanceur doit donner au satellite une vitesse horizontale suffisante pour la mise en orbite. Cette vitesse est appelée vitesse de satellisation. Elle est fonction de l'altitude.

A 400 km d'altitude, la vitesse de satellisation est de 7,66 km/s.

##### b - Vitesse de libération

On appelle vitesse de libération la vitesse au-dessus de laquelle un engin lancé de la terre s'en éloigne indéfiniment. Cette vitesse est aussi une fonction de l'altitude.

A 400 km d'altitude, la vitesse de libération est de 10,86 km/s.

##### c - Phases de lancement d'un satellite

- . Phase balistique : le satellite est placé à une certaine altitude.
- . Phase de satellisation : le satellite reçoit une accélération supplémentaire pour obtenir une vitesse suffisante ; cette vitesse doit être inférieure à la vitesse de libération.
- . Phase de mise en orbite géostationnaire : le satellite reçoit une accélération supplémentaire quand il est à l'apogée de son orbite elliptique.

##### d - Contrôle d'un satellite en orbite

Comme un satellite est toujours soumis à des petites perturbations qui modifient son orbite, il faut recourir périodiquement à des corrections de trajectoire. Pour cela, on utilise de petits dispositifs capables de ralentir ou d'accélérer le satellite.

*Source : Séminaire de Mars 86 tenu à DAKAR sur La Télé-détection*

E R R A T A

- PAGE 4 alinéa 11. Lire "adaptée" au lieu de "adoptée"  
alinéa 23 Lire "paysages" au lieu de "Paysages"
- PAGE 11 alinéa 4 Lire "autorisent" au lieu de "autorise"  
alinéa 17 Lire "Est-Nord-Est" au lieu de "Est-Nord-Nord-Est"
- PAGE 15 alinéa 7 Lire "Logarithme" au lieu de "Lagarithme"
- PAGE 22 alinéa 17 Lire "transport éolien" au lieu de "transports éoliens"
- PAGE 32 alinéa 13 Lire "'barkane" au lieu de "barkone"
- PAGE 42 alinéa 25 Lire "de simples taillis arbusifs" au lieu de " de sim-  
ples tailles arbusifs"  
alinéa 27 Lire "acacias" au lieu de "Accacie"
- PAGE 44 alinéa 16 Lire "Les tâches les plus hardies" au lieu de "les  
tâches les plus hardies"  
alinéa 17 Lire "Et ce à quoi..." au lieu de "ce à qui..."
- PAGE 47 alinéa 21 Lire "morphologiques" au lieu de "morphogéométriques"  
alinéa 8 Lire "actuelles" au lieu de "actuelle ".