



MERS REGIONALES

PROGRAMME DE NATIONS UNIES POUR L'ENVIRONNEMENT

A. C. Ibé et R. E. Quélenec:
Méthodologie d'inventaire et de contrôle
de l'érosion côtière dans la région
de l'Afrique de l'Ouest et du Centre

PNUE : rapports et études des mers régionales n°107

Prépare avec la collaboration de



PNUE 1989

Note: Ce manuel a été préparé conjointement par l'Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture (Unesco) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) dans le cadre du projet FP/5102-82-03. Il représente une contribution au Plan d'action pour la protection et la mise en valeur du milieu marin et des zones côtières de la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre.

Les appellations employées dans ce manuel et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'Unesco ou du PNUE, aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

A des fins bibliographiques le présent document peut être cité comme suit :

A.C. Ibé et R.E. Quélenec : Méthodologie d'inventaire et de contrôle de l'érosion côtière dans la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre. Rapports et études du PNUE sur les mers régionales No. 107. PNUE, 1989.



MERS REGIONALES

PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR L'ENVIRONNEMENT

A. C. Ibé et R. E. Quélennec:
Méthodologie d'inventaire et de contrôle
de l'érosion côtière dans la région
de l'Afrique de l'Ouest et du Centre

PNUE : rapports et études des mers régionales n°107

Préparé avec la collaboration de



UNESCO

PNUE 1989

PREFACE

La Conférence des Nations Unies sur l'environnement (Stockholm, 5-16 juin 1972) a adopté le Plan d'action pour l'environnement, y compris les Principes généraux pour évaluer et combattre la pollution des mers. C'est sur cette base que l'Assemblée générale des Nations Unies a décidé de créer le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), dont la fonction devait être "d'assurer la coordination des programmes relatifs à l'environnement dans le cadre des organismes des Nations Unies" (Résolution 2997 (XXVII) de l'Assemblée générale en date du 15 décembre 1972). L'Assemblée invitait les organismes des Nations Unies à "adopter les mesures qui pourraient être nécessaires pour mettre en oeuvre des programmes concertés et coordonnés en ce qui concerne les problèmes internationaux d'environnement", et elle invitait également les "organisations intergouvernementales et les organisations non gouvernementales qui s'intéressent à l'environnement à apporter leur appui sans réserve et leur collaboration à l'Organisation des Nations Unies, en vue de réaliser une coopération et une coordination aussi étendues que possible". Par la suite, le Conseil d'Administration du PNUE a choisi les "océans" comme domaine prioritaire dans lequel il concentrerait ses efforts pour s'acquitter de son rôle de catalyseur et de coordonnateur.

Le Programme pour les mers régionales a été inauguré par le PNUE en 1974. Depuis lors, le Conseil d'Administration du PNUE a approuvé à plusieurs reprises une approche régionale pour la lutte contre la pollution marine et pour la gestion des ressources marines et côtières et a demandé la mise au point de plans d'action régionaux.

Le Programme pour les mers régionales porte actuellement sur onze régions 1/, et plus de 120 Etats côtiers y participent. Il est donc comme un programme d'action qui concerne non seulement les conséquences de la dégradation de l'environnement mais aussi ses causes et qui comporte une approche générale de la lutte contre les problèmes de l'environnement au moyen de la gestion du milieu marin et des zones côtières. Chaque plan d'action régional est formulé en fonction des besoins de la région, tels que les conçoivent les gouvernements intéressés. Il doit associer une évaluation de la qualité du milieu marin et des causes de sa dégradation à des activités de gestion et de mise en valeur du milieu marin et des zones côtières. Les plans d'action encouragent la mise au point simultanée d'instruments juridiques régionaux et de programmes d'activités concrètes 2/.

A la troisième session du Conseil d'Administration du PNUE (1975), plusieurs Etats de l'Afrique de l'Ouest et du Centre ont demandé au PNUE d'étudier les problèmes de la pollution de la mer et des côtes de leur région. A la suite de cette demande, le PNUE a envoyé dans la région une mission exploratrice qui s'est rendue dans 14 Etats en 1976. Dans son rapport, la mission a identifié les principaux problèmes de l'environnement de la région et formulé des recommandations concernant l'élaboration d'un plan d'action pour la protection et la mise en valeur du milieu marin et des zones côtières de la région.

1/ Région méditerranéenne, plans d'action sur la région du Koweït, de l'Afrique de l'Ouest et du Centre, des Caraïbes, des mers d'Asie orientale, du Pacifique sud-est, du Pacifique sud-ouest, de la mer Rouge et du Golfe d'Aden, de l'Afrique de l'Est, du sud-ouest Atlantique et des mers de l'Asie du Sud.

2/ PNUE : Réalisations et projets d'extension du programme du PNUE pour les mers régionales et des programmes comparables relevant d'autres organismes. Rapports et études du PNUE sur les mers régionales N° 1. PNUE, 1982.

Après avoir examiné les résultats de la mission exploratrice, la cinquième session du Conseil d'Administration (1977) a demandé que soient prises les dispositions nécessaires pour élaborer un plan d'action et un accord régional pour prévenir et réduire la pollution dans la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre.

Les travaux préparatoires qui ont permis l'élaboration du plan d'action et des accords régionaux comprenaient plusieurs réunions d'experts, des missions et des études 3/. Ces travaux ont culminé par la Conférence de Plénipotentiaires sur la coopération en matière de protection et de mise en valeur du milieu marin et des zones côtières de la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre (UNEP/IG.22/7), convoquée par le PNUE à Abidjan du 16 au 23 mars 1981 en tant qu'étape finale des travaux préparatoires qui ont abouti à l'adoption lors de cette Conférence du plan d'action pour la protection et la mise en valeur du milieu marin et des zones côtières de la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre 3/, de la Convention relative à la coopération en matière de protection et de mise en valeur du milieu marin et des zones côtières de la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre 4/, du protocole relatif à la coopération en matière de lutte contre la pollution en cas de situation critique 4/ et d'un ensemble de résolutions.

Au cours des réunions intergouvernementales ultérieures 5/, 6/ on a reconnu que le problème de l'érosion côtière exigeait des mesures prioritaires. Il a donc été décidé d'entreprendre un projet (WACAF/3) afin d'étudier les causes et l'évolution de ce phénomène et d'examiner des mesures permettant de le combattre. A la suite de ce projet, on a établi un rapport 7/ ainsi qu'une bibliographie 8/ sur les effets de l'érosion côtière dans la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre.

Le présent projet (WACAF/6) prolonge le projet WACAF/3 pour aboutir à l'élaboration d'un manuel présentant des méthodes appropriées de surveillance de l'érosion côtière pour la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre, y compris des procédures normalisées d'étude des zones côtières, qui soient applicables dans cette région.

Le présent manuel, qui est le produit du projet, est destiné principalement à l'usage des spécialistes chargés des opérations d'inventaire et de contrôle de l'érosion côtière dans la

3/ PNUE : Plan d'action pour la protection et la mise en valeur du milieu marin et des zones côtières de la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre. Rapports et études du PNUE sur les mers régionales N° 27. PNUE, 1983.

4/ PNUE : Convention relative à la coopération en matière de protection et de mise en valeur du milieu marin et des zones côtières de la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre. Protocole relatif à la coopération en matière de lutte contre la pollution en cas de situation critique. PNUE, 1981.

5/ Réunion du comité directeur de l'environnement marin de l'Afrique de l'Ouest et du Centre, Abidjan, 20-22 juillet 1981 (UNEP/WG.61/5).

6/ Réunion du comité directeur de l'environnement marin de l'Afrique de l'Ouest et du Centre, Genève, 22-23 juillet 1982 (UNEP/WG.72/3).

7/ PNUE/UNESCO/ONU-DAESI : Erosion côtière en Afrique de l'Ouest et du Centre. Rapports et études du PNUE sur les mers régionales N° 67. PNUE 1985.

8/ PNUE/UNESCO/ONU-DAESI : Bibliography on coastal erosion in West and Central Africa. UNEP Regional Seas directories and bibliographies, 1985.

région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre, a été réalisé par Dr. A.C. IBE (Université de Lagos - Nigéria) et Dr. R.E. QUELENNEC (B.R.G.M. Marseille - France) sous la direction de R.E. QUELENNEC et le contrôle de MM. J.C. SAINLOS et A. SUZYUMOV, respectivement spécialistes du programme du PNUE et de l'UNESCO.

C'est la première fois qu'un manuel de ce genre est conçu pour la communauté des scientifiques, techniciens, décideurs et gestionnaires du domaine littoral de cette région.

Le manuel, qui se veut avant tout didactique, valorise les principaux résultats des importants travaux d'étude obtenus à l'occasion du projet WACAF/3 "Lutte contre l'érosion côtière en Afrique de l'Ouest et du Centre" réalisé par l'UNESCO et l'ONU/DAESI pour le PNUE.

Il vise à la fois à fournir les éléments scientifiques qui permettent de comprendre la formation et le comportement dynamique des structures sédimentaires littorales, et à permettre aux spécialistes de chaque pays de la région d'identifier, d'inventorier et lutter contre les évolutions négatives (érosion) du littoral.

Le manuel est subdivisé en cinq chapitres :

- Principaux aspects de l'évolution géologique, de la géomorphologie, de la sédimentologie et de l'érosion du littoral de la région,
- Géomorphologie et processus côtiers : concepts fondamentaux,
- Facteurs conditionnels de l'érosion côtière en Afrique occidentale et centrale,
- Inventaire du littoral, suivi et contrôle de son évolution,
- Approche rationnelle de la lutte contre l'érosion côtière dans la région.

SOMMAIRE

	Page
CHAPITRE 1 : PRINCIPAUX ASPECTS DE L'EVOLUTION GEOLOGIQUE, DE LA GEOMORPHOLOGIE, DE LA SEDIMENTOLOGIE ET DE L'EROSION DU LITTORAL DE LA REGION	1
1.1. Evolution géologique	1
1.2. Géomorphologie	1
1.3. Plateau continental	5
1.4. Sédimentologie	6
1.5. Etat de l'érosion côtière dans la région	6
1.5. 1. Mauritanie	
1.5. 2. Sénégal	
1.5. 3. Gambie	
1.5. 4. Guinée-Bissau	
1.5. 5. République de Guinée	
1.5. 6. Sierra Leone	
1.5. 7. Libéria	
1.5. 8. Côte d'Ivoire	
1.5. 9. Ghana	
1.5.10. Togo	
1.5.11. Bénin	
1.5.12. Nigéria	
1.5.13. Cameroun	
1.5.14. Sao-Tomé et Principe	
1.5.15. Gabon	
1.5.16. Congo	
1.5.17. Angola	
CHAPITRE 2 : GEOMORPHOLOGIE ET PROCESSUS COTIERS : CONCEPTS FONDAMENTAUX	13
2.1. Typologie des formations littorales	13
2.1. 1. Les formes d'érosion : falaises et côtes rocheuses	
2.1. 2. Les formes d'accumulation : dunes et cordons littoraux, flèches, tombolos, deltas, vasières	
2.2. Quelques caractéristiques des sédiments littoraux	14
2.2. 1. Sédiments meubles	
2.2. 2. Sédiments cohésifs	
2.2. 3. Sédiments consolidés	
2.2.3.1. Beachrock	
2.2.3.2. Coraux	

2.3.	L'érosion côtière : problèmes de terminologie et d'évaluation	19
2.3. 1.	Nomenclature de la plage théorique	
2.3. 2.	Définir l'érosion côtière : un problème de choix de dimensions et de concepts	
2.3.2.1.	Dimension 1 : le trait de côte	
2.3.2.2.	Dimension 2 : le profil de plage	
2.3.2.3.	Dimension 3 : système et budget sédimentaires côtiers	
2.3.2.4.	Dimension 4 : le temps	
2.4.	Transport des sédiments	23
2.4. 1.	Transport éolien	
2.4. 2.	Transport par les courants	
2.4. 3.	Transport sous l'action de la houle	
2.5.	Aléas et risque littoral	28
2.5. 1.	Aléas, vulnérabilité et risques : rappel de quelques définitions	
2.5. 2.	Événements majeurs, causes d'instabilité ou de changement d'état du système littoral	
2.5.2.1.	Actions anthropiques	
2.5.2.2.	Événements naturels majeurs	
2.5. 3.	Variations du niveau marin	
2.5.3.1.	Variations passées	
2.5.3.2.	Variations futures	
2.5. 4.	Subsidence	
2.5. 5.	Tempêtes et surcôtes marines	
2.5.5.1.	Houles et tempêtes	
2.5.5.2.	Surcôtes	
2.5.5.3.	Ondes longues : seiches	
2.5. 6.	Séismes	
2.5.6.1.	Tsunamis	
2.5.6.2.	Mouvements de masse côtiers et glissements sous-marins	
2.5. 7.	Liquéfaction des sédiments sous l'action de la houle	
CHAPITRE 3 : FACTEURS CONDITIONNELS DE L'EROSION COTIERE EN AFRIQUE OCCIDENTALE ET CENTRALE		39
3.1.	Phénomènes hydrodynamiques	39
3.1. 1.	Vent	
3.1. 2.	Vagues et houles	
3.1. 3.	Courants littoraux	

3.1. 4.	Courants de retour	
3.1. 5.	Courants de marée	
3.1. 6.	Élévation eustatique du niveau de la mer	
3.2.	Facteurs géologiques et géomorphologiques	47
3.2. 1.	Relief côtier	
3.2. 2.	Largeur du plateau continental	
3.2. 3.	Canyons sous-marins	
3.2. 4.	Tectonique, subsidence	
3.2. 5.	Caractéristiques des sédiments	
3.3.	Influence de l'homme	50
3.3. 1.	La construction de ports	
3.3. 2.	Construction de barrages sur les fleuves	
3.3. 3.	Extraction de sable et de gravier dans la zone côtière	
3.3. 4.	Constructions sur la plage	
3.3. 5.	Destruction de la couverture végétale	
3.3. 6.	Exploitation du pétrole et du gaz	
CHAPITRE 4 :	INVENTAIRE DU LITTORAL SUIVI ET CONTROLE DE SON EVOLUTION	61
4.1.	Inventaire du littoral	61
4.1. 1.	Objectifs	
4.1. 2.	Identification des segments côtiers	
4.1. 3.	Classification en unités morpho-sédimentologiques	
4.1. 4.	Tendance d'évolution du littoral	
4.1. 5.	Réalisation pratique de l'inventaire	
4.1. 6.	Base de données littorales	
4.2.	Réseaux de mesure de la marée et des houles	65
4.2. 1.	Mesures marégraphiques	
4.2.1.1.	Réseaux de mesure	
4.2.1.2.	Etablissement d'un point de référence pour les jauges de marée	
4.2.1.3.	Extraction des niveaux : statistiques	
4.2.1.4.	Traitement des données marégraphiques	
4.2. 2.	Mesures de houle	
4.2.2.1.	Intérêt de la connaissance de la houle	
4.2.2.2.	Méthodes de mesure de l'état de la mer	
4.2.2.3.	Réseaux de mesure	
4.3.	Programme d'acquisition de données sur les zones littorales sensibles	75
4.3. 1.	Objectifs	
4.3. 2.	Enquêtes préliminaires	
4.3. 3.	Etude de l'évolution historique du rivage	
4.3. 4.	Mesure des profils de plage	

- 4.3.4.1. Objectifs
- 4.3.4.2. Profils de plage aérienne
 - 4.3.4.2.a. Levé des profils à l'aide d'un niveau
 - 4.3.4.2.b. Levé des profils sans niveau
- 4.3.4.3. Calcul des volumes entre profils
- 4.3.4.4. Levé du profil de plage sous-marine

4.3. 5. Evaluation du régime hydrodynamique littoral

CHAPITRE 5 : APPROCHE RATIONNELLE DE LA LUTTE CONTRE L'EROSION COTIERE DANS LA REGION DE L'AFRIQUE DE L'OUEST ET DU CENTRE	91
5.1. Critères de choix des mesures de défense du littoral	91
5.2. Méthodes structurelles de protection côtière	92
5.2. 1. Critères de sélection	
5.2. 2. Méthodes de protection passive	
5.2. 3. Méthodes de protection active	
5.2. 4. Méthodes de restauration	
5.3. Cadre de décision pour la protection et la gestion du littoral	99
5.4. Politique de gestion des zones littorales	99
LISTES DES REFERENCES SELECTIONNEES	103

1. PRINCIPAUX ASPECTS DE L'EVOLUTION GEOLOGIQUE, DE LA GEOMORPHOLOGIE, DE LA SEDIMENTOLOGIE ET DE L'EROSION DU LITTORAL DE LA REGION

Il est important dès le départ d'évoquer en termes généraux l'évolution géologique, la géomorphologie et la sédimentologie actuelles, ainsi que l'état de l'érosion dans la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre, afin de mettre en perspective les exposés des chapitres suivants (fig. 1.1).

1.1. EVOLUTION GEOLOGIQUE

L'évolution de la marge continentale de l'Afrique de l'Ouest et du Centre est en rapport avec la séparation de l'Amérique d'avec l'Afrique. On ne peut dater cette séparation avec précision, car elle a consisté en une succession d'événements dont les limites temporelles se recouvrent.

Selon une étude d'Emery et al. (1974), l'événement le plus ancien de la région a été la formation de bassins et d'auges (bassins du Sénégal, du Libéria, et de Sierra Leone) lors de la séparation de l'Amérique du Nord et de l'Afrique il y a environ 180 millions d'années. L'Amérique du Sud s'est ensuite détachée de l'Afrique, séparation qui s'est probablement amorcée au Sud pour progresser vers le Nord, sur une période de 135 à 165 millions d'années environ. La date approximative de la séparation est indiquée par la continuité des strates et structures précambriennes et paléozoïques en Afrique et en Amérique du Sud, et par le bouleversement des structures jurassiques et plus récentes. Au cours de cette séparation ont été formés les bassins situés plus au Sud (bassins de Mossamedes, Cuanza, Congo-Cabinda, Gabon, Cameroun, Nigeria, Dahomey, Benin et Côte d'Ivoire) (fig. 1.2).

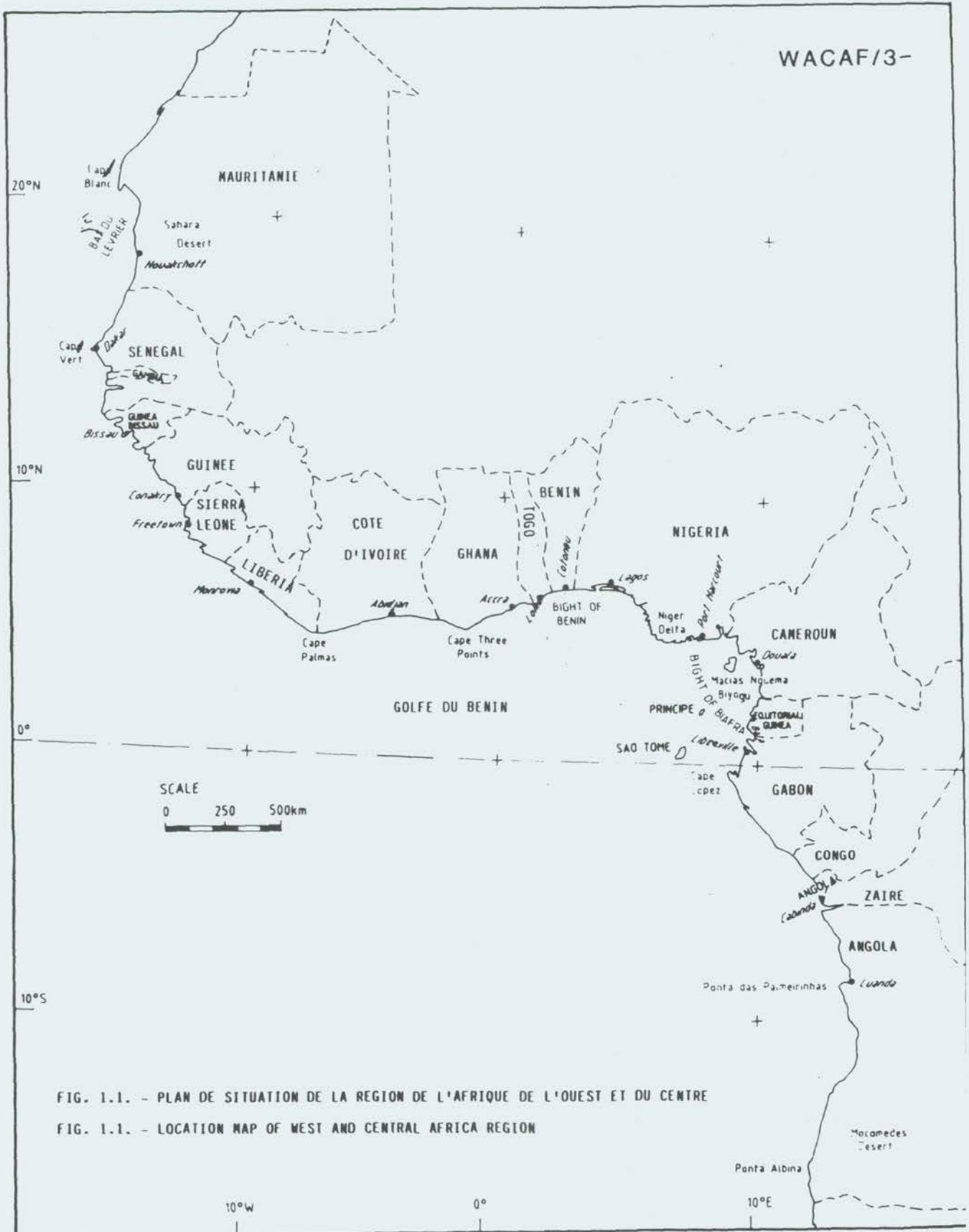
En se poursuivant, la séparation de l'Amérique du Sud et de l'Afrique a donné lieu à des domaines reconnaissables du fond sous-marin. Particulièrement importants sont la marge continentale et l'océan profond, domaine de failles de transformation ou de translation qui est marqué par un grand nombre de zones de fracture allant de la Chaîne mid-atlantique au talus continental et même à l'intérieur des terres. En se fondant sur ces domaines de fracture océaniques, avec les tendances tectoniques terrestres, Lehner et Ruitter ont subdivisé la marge atlantique de l'Afrique en 4 segments à caractère de bassin, dont 3 (A, B et C) sont situés dans la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre, et possèdent leur propre histoire. En résumé, ces segments sont les suivants (fig. 1.3) :

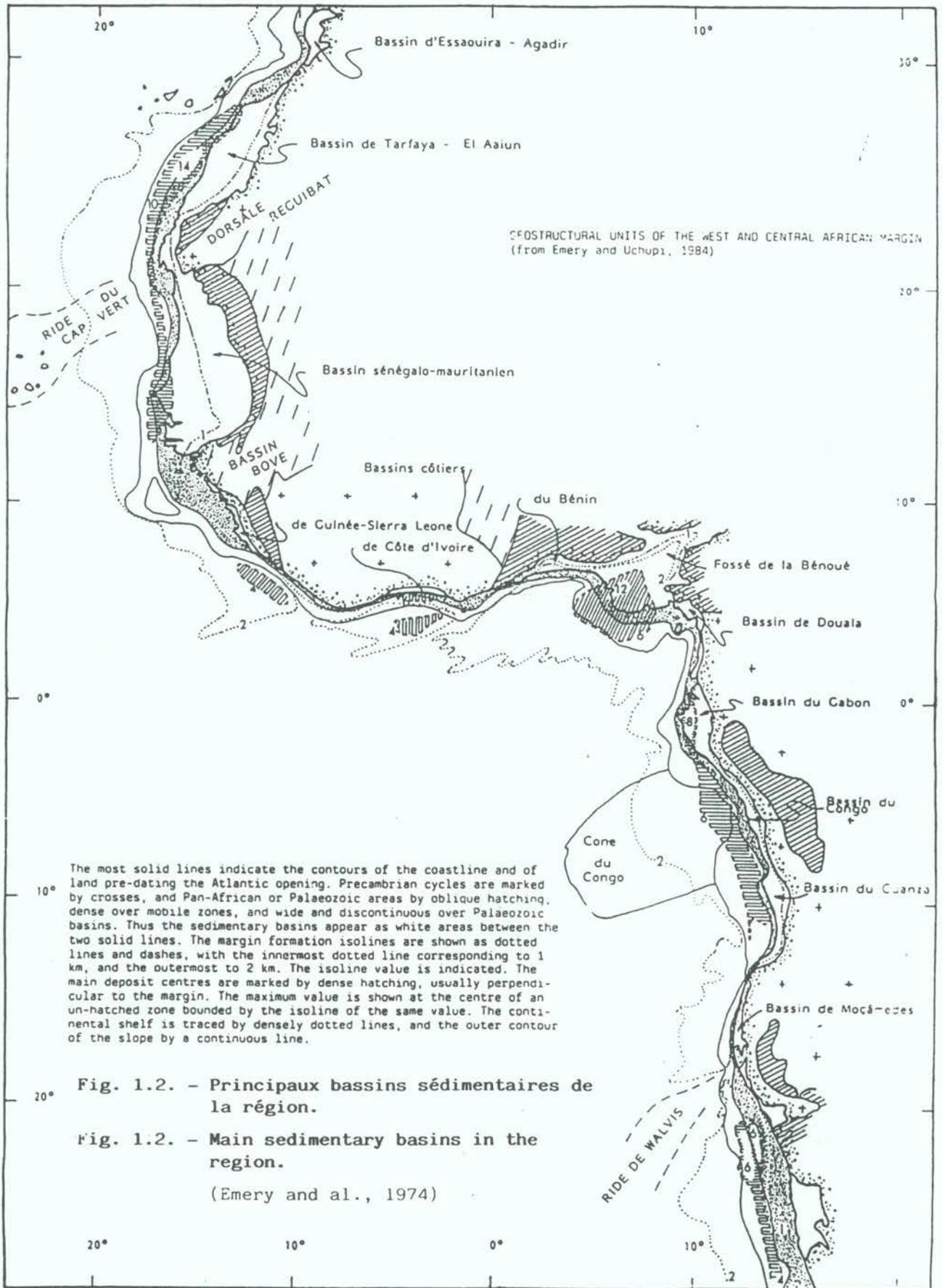
- segment de l'Afrique du Nord Ouest (A)
- segment équatorial (B)
- segment Cameroun-Gabon-Angola (C)

1.2. GEOMORPHOLOGIE

Les côtes de la région d'Afrique de l'Ouest et du Centre consistent principalement en une plaine basse, sableuse et battue par les vagues. On peut y reconnaître quatre types généraux :

- rivages submergés dans les zones du Nord,
- rivages à barre sableuse ou lagune au Nord du Golfe de Guinée,
- deltas à l'embouchure de la plupart des rivières importantes (ex : delta du Niger), comportant en général des marécages et marais de mangroves,
- rivages des baies de la région Sud de l'Angola, comportant des flèches de sable (et des tombolos) formés par l'accumulation de sable transporté par le courant littoral.





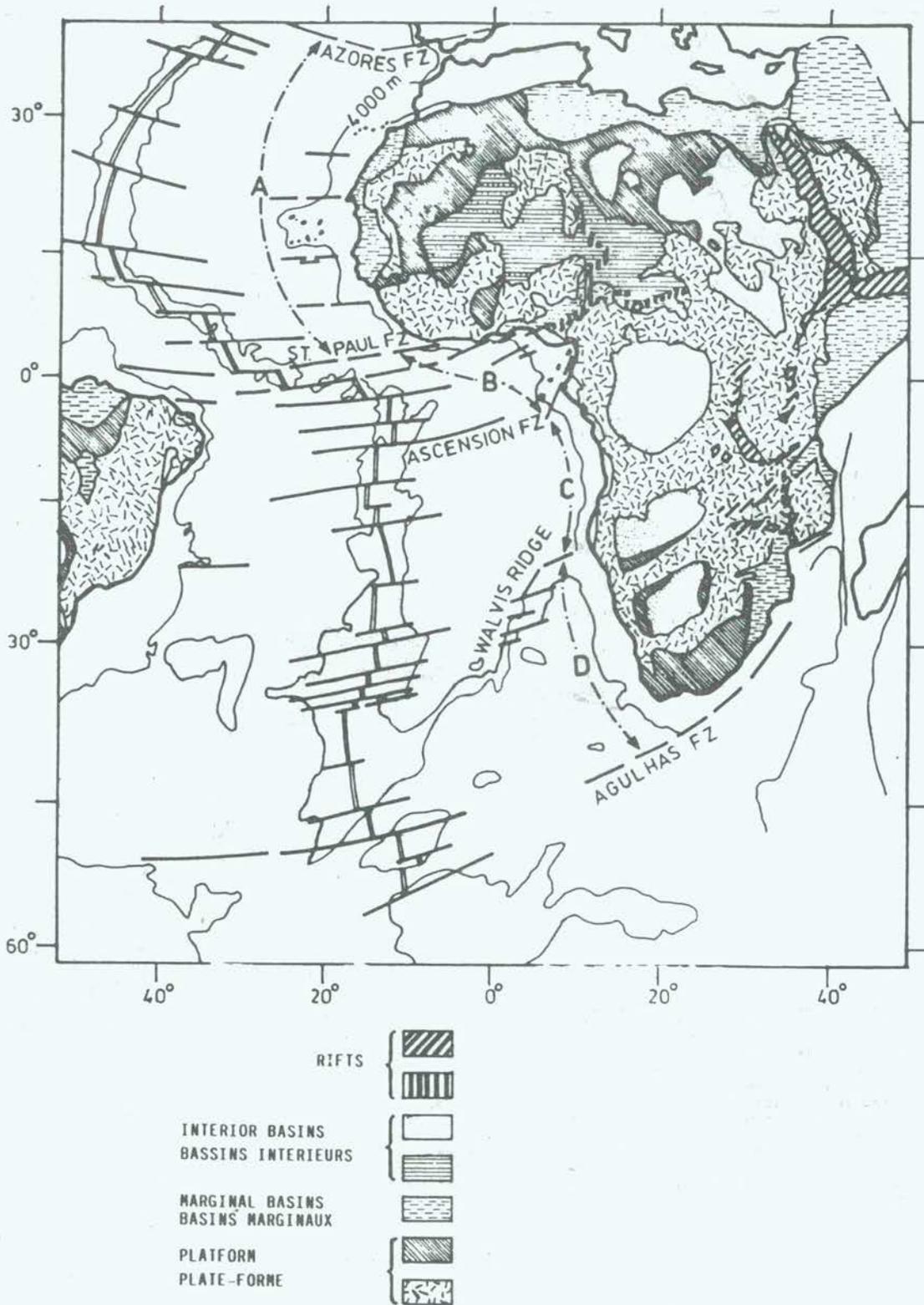


FIG. 1.3. - PRINCIPAUX SEGMENTS DE LA MARGE ATLANTIQUE DE LA REGION.

MAIN SEGMENTS OF THE ATLANTIC MARGIN OF THE REGION.

(LEHNER and DE RUITER, 1977)

Une subdivision plus détaillée (PNUE 1985) reconnaît dans cette région les dix domaines géo-morphologiques suivants :

1. De la péninsule du Cap Blanc au Canyon de Cayar (de la Mauritanie au Nord du Sénégal) : côte sableuse, désertique avec un plateau continental généralement étroit, interrompu et bordé au sud par le canyon de Cayar,
2. Du canyon de Cayar à la Casamance (du Sénégal méridional à la Gambie) : plaine côtière à plateau continental plutôt important, progressivement plus humide et plus marécageuse vers le sud, étant donné la présence des estuaires du Saloum, de Gambie et de Casamance,
3. De la Casamance aux îles Sherbro (Guinée-Bissau, Guinée et Nord de la Sierra-Leone) : plaine côtière humide et étroite, grand plateau continental,
4. Des îles Sherbro au Cap Planas (de la moitié sud de la Sierra-Leone au Libéria) : côte tropicale humide, d'abord rocheuse, puis avec plaine côtière étroite, plateau très étroit,
5. Du cap Planas au Cap Trois Points (Côte d'Ivoire et extrémité ouest du Ghana) : côte équatoriale humide, d'abord rocheuse, puis avec plaine côtière, puis de nouveau rocheuse, avec plateau étroit,
6. Du cap Trois Points à la lagune de Lagos (Ghana, Togo, Bénin, Nigéria occidental) : côte équatoriale humide avec plaine côtière, quelque peu rocheuse vers l'ouest, et plateau de largeur variable; ce segment est caractérisé par la présence du grand delta de la Volta,
7. Delta du Niger (Nigéria) : assez bien individualisé, étant donné l'important apport sédimentaire, plateau de largeur moyenne,
8. Du Ria del Rey au cap Lopez (Cameroun, Guinée Equatoriale, Nord du Gabon) : côte équatoriale humide, tantôt rocheuse, tantôt à plaine côtière, plateau relativement étroit,
9. Du cap Lopez au canyon Congo-Zaïre (Sud du Gabon, Congo, Cabinda, Zaïre) : plaine équatoriale à plateau étroit, bordée abruptement par le début du canyon Congo-Zaïre,
10. Du canyon Congo-Zaïre à la rivière Cunene (Angola) : côte tropicale progressivement aride vers le Sud, morphologique hétérogène avec plateau étroit.

Vers l'intérieur des terres, les plaines côtières s'élèvent en une série de marches constituées essentiellement de surfaces d'érosion, vers les montagnes de l'intérieur. Ces montagnes sont pour la plupart des affleurements du complexe de soubassement, bien que des formations sédimentaires résistantes, pour la plupart des grès, soient également fréquentes.

1.3. PLATEAU CONTINENTAL

Vers l'océan, les côtes descendent vers un plateau continental généralement étroit (100 km), excepté près des limites nord-ouest de la région à 220 km environ au nord-ouest de Monrovia, où le plateau atteint sa plus grande largeur. La rupture du plateau intervient à une profondeur d'eau moyenne de 100 m, excepté au sud-est, au niveau de la dorsale de Walvis, où le plateau atteint une largeur d'environ 400 m.

Le plateau semble plat, sauf au large des falaises côtières du soubassement rocheux et dans les zones où se trouvent des rochers et des récifs de coraux et d'algues. Sept canyons sous-marins au moins creusent le bord extérieur du plateau continental, et l'un d'entre eux, le canyon sous-marin du Congo, traverse le plateau entier depuis un point situé à 25 km à l'intérieur d'un estuaire (Veatch et Smith, 1939; Heezen et al., 1964; Shepard et Emery, 1973).

Le plateau continental descend à travers le talus continental qui est dominé par des diapirs salins (ou schisteux), et découpé en deux par au moins une vingtaine de canyons sous-marins jusqu'aux seuils continentaux et aux plaines abyssales. Au-delà des plaines abyssales se trouvent les montagnes abyssales, la dorsale mid-Atlantique et d'autres dorsales.

1.4. SEDIMENTOLOGIE

Le rivage de l'Afrique de l'Ouest et du Centre est bordé par des terres basses marquant les zones des bassins sous-jacents des grandes vallées fluviales (le Niger-Bénoué) et la zone côtière. Les bassins datent du Mésozoïque et sont donc remplis de sédiments continentaux, lacustres, évaporitiques et marins normaux.

Les recherches de sismologie et les carottages en haute mer révèlent que les bassins sédimentaires de cette région comportent d'immenses accumulations de sédiments, allant de 1 à 1,5 km d'épaisseur ou moins au large de la Sierra-Leone, atteignant 5-6 km dans une grande partie du Golfe de Guinée, pour atteindre plus de 8 km dans le delta du Niger.

Le bassin du Gabon comporte 16 à 18 km de couches de sédiments (Brink, 1974), mais dans la partie la plus méridionale de la région, les couches sédimentaires atteignent à nouveau 3 à 4 km (Litvin, 1980). Les vitesses de sédimentation calculées vont de 30 à 100 mm par mille ans au nord du Congo pour diminuer plus au sud jusqu'à 10 à 30 mm par mille ans.

Le territoire bordant la côte consiste presque entièrement en plages sableuses. Les sédiments du plateau continental comportent principalement du sable, lui-même recouvert de limon et d'argiles récents, avec une adjonction de boulettes fécales. Le talus continental est recouvert de limon (cf. bassins du Gabon et de Cuanza) et de schistes (cf. delta du Niger).

Des carottages faits dans les seuils continentaux et les plaines abyssales montrent qu'ils contiennent des couches de sable de grosseur progressive, alors que les sédiments de la topographie complexe des montages abyssales, de la dorsale mid-atlantique et des dorsales qui séparent ces zones du seuil continental sont très irrégulières (Ewing et al. 1964, 1966 : Emery et al., 1974). Des sédiments volcaniques entourent les îles de St Helena et Ascension, ainsi que les îles volcaniques de Fernando Pô, Principe et Sao Tomé.

1.5. ETAT DE L'EROSION COTIERE DANS LA REGION

L'érosion est un phénomène généralisé le long de la côte atlantique de l'Afrique de l'Ouest et du Centre (fig. 1.4). En beaucoup d'endroits, la vitesse du recul côtier ainsi que la dégradation de l'environnement et les pertes économiques qui en résultent, présentent un caractère alarmant.

On trouvera ci-dessous un examen succinct de la gravité du problème de l'érosion (naturelle ou provoquée par l'homme) dans la région; il est fondé sur plusieurs rapports régionaux et nationaux, ainsi que sur les résultats rapportés par plusieurs missions d'observation. On a adopté, pour plus de clarté, une classification par pays. Qu'il s'agisse des rapports régionaux ou nationaux, ces observations n'ont aucun caractère exhaustif, et il n'est pas possible actuellement de dresser des cartes récapitulatives nationales détaillées des zones littorales sujettes à l'érosion. Le rapport du projet WACAF/3 (PNUE, 1985) contient de nombreuses données sur les problèmes d'érosion du littoral de la région, dont nous ne présentons ci-après que quelques exemples significatifs.

1.5.1. Mauritanie

On trouve dans la région de Nouadhibou une érosion marine localisée des falaises côtières du Pléistocène, en raison probablement de leur constitution : sable dunaire, poussière éolienne et

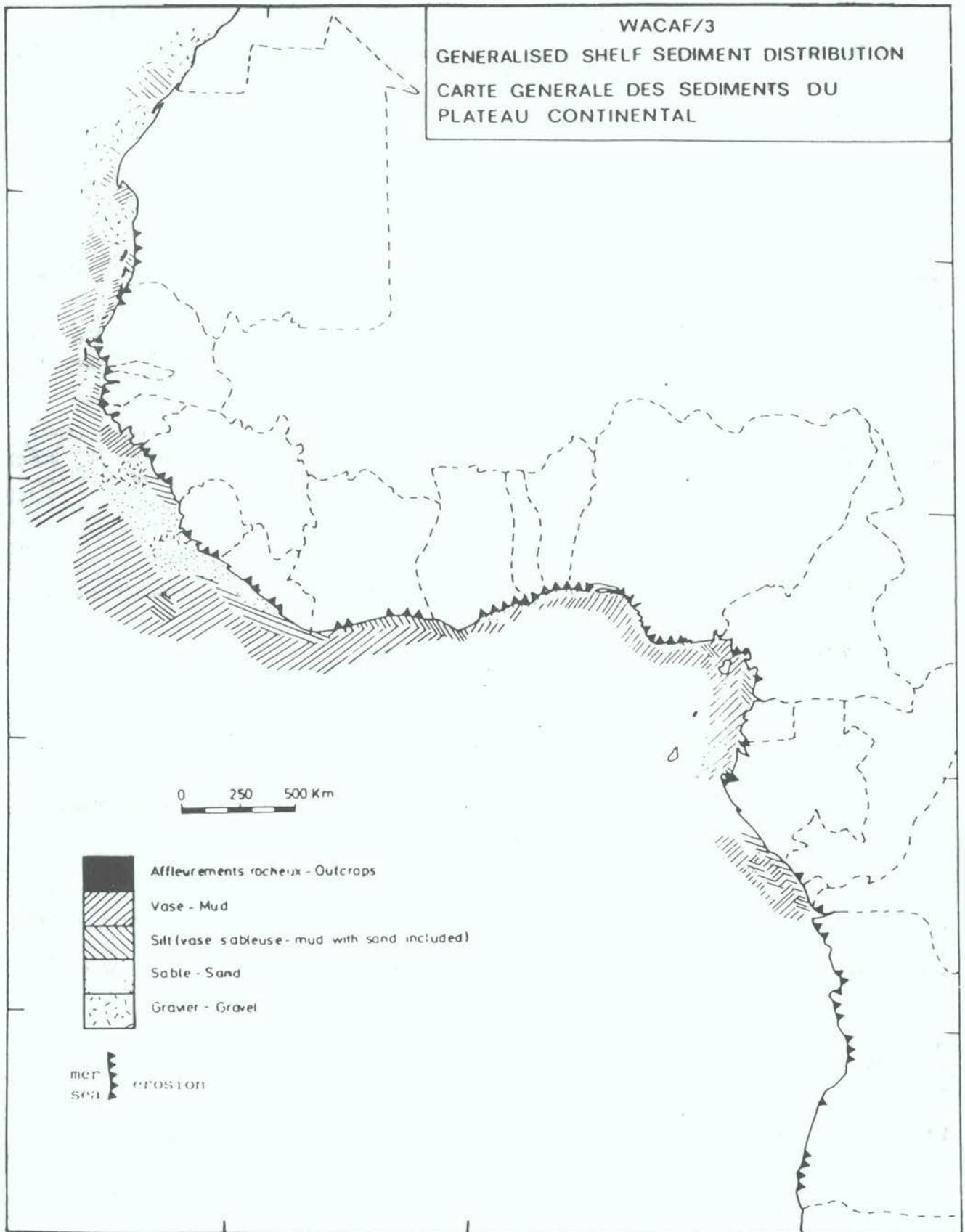


Fig. 1.4. - Carte récapitulative des problèmes d'érosion côtière dans la région (complétée par R.E. Quélenec)

Fig. 1.4. - Synthetic map of coastal erosion problems in the region (completed by R.E. Quélenec)

limons. Devant le cap Timiris, le canyon de Tiouilit sert peut-être de piège à sédiments et pourrait être l'une des causes de l'érosion côtière sur les 30 km de côte au nord de Nouakchott. La région sud de la côte est caractérisée par une érosion qui affecte de toute évidence les formations de dunes de l'Agueitir et de l'Akchar.

1.5.2. Sénégal

Au nord du Sénégal, la ville de Saint-Louis construite sur une flèche sableuse et sur une île dans l'estuaire du fleuve Sénégal (Photo, fig. 1.5), est menacée de submersion lors de fortes tempêtes (surcotes), et en raison de la surélévation du niveau marin.

Dans la péninsule du Cap Vert, on constate une érosion des plages et des falaises côtières entre le cap de Fann et le cap Manuel. L'île de Gorée est également menacée.

Plus au sud, entre le cap des Biches et Rufisque, la côte est sujette à l'érosion avec une régression côtière de 0,33 m de la falaise du cap des Biches entre 1969 et 1978. A Rufisque, le recul de la côte sableuse a été en moyenne de 1,30 m par an entre 1933 et 1980.

Certaines zones de la "Petite Côte" comme Barguy, Cap de Naze, M'Bour et Joal subissent actuellement l'érosion. Devant Sarène, on pense que la côte a reculé de 2 m/an en moyenne au cours des 5 dernières années. De Joal à Sangomar, la régression moyenne annuelle récente du rivage serait de 1,2 m.

1.5.3. Gambie

D'après une mission d'expertise récente du PNUE (Quélenec, 1988), il apparaît que les phénomènes d'érosion sont importants dans les régions suivantes :

- Barra Point près de Fort Bullen au nord de l'estuaire de la Gambie,
- zone des cimetières à l'ouest de Banjul (Photo, fig. 1.6),
- St Mary et falaises de Fajara (Photo, fig. 1.7),
- falaises de Solifor Point et plages entre Bijilo et Fajara, en raison notamment d'extractions massives de sables de plage (Photo, fig. 1.8).

1.5.4. Guinée-Bissau

L'érosion se manifeste en divers endroits du littoral, mais on manque d'informations précises sur la localisation et l'importance des phénomènes actuels.

1.5.5. République de Guinée

Il y a des zones d'érosion dans la région des îles de Conakry-Loos, de Sangreah Bay, du port de Benty, et en général, dans les zones où les mangroves ont été détruites. La partie occidentale de la péninsule de Camayenne montre un recul de la côte d'environ 290 m entre 1947 et 1974. Dans certaines zones localisées, le recul du rivage atteindrait jusqu'à 380 m.

1.5.6. Sierra Leone

L'érosion dégraisse rapidement Lumley Beach, située sur le côté au vent du tombolo qui joint Aberdeen Island au continent de Lumley, au nord de la péninsule de Freetown.

Une érosion estimée à environ 6 m/an menace de rompre la bande étroite du tombolo, séparant ainsi Aberdeen Island du continent.



Fig. 1.5. - Vue aérienne de St. Louis (Sénégal) - (Iris).

Fig. 1.5. - Aerial photograph of St. Louis (Senegal) - (Iris).

Fig. 1.6. - Recul du rivage devant le cimetière musulman de Banjul (Gambie) - (Quélenec, 1988).

Fig. 1.6. - Coastline retreat in front of Muslim Cemetery at Banjul (Gambia) - (Quélenec, 1988).





Fig. 1.7. - Erosion des falaises côtières à Fajara (Gambie)
(Quélenec, 1988).

Fig. 1.7. - Erosion of coastal cliffs at Fajara (Gambia)
(Quélenec, 1988).

Fig. 1.8. - Extraction industrielle de sable sur la plage à
Bijilo (Gambie) - (Quélenec, 1988).

Fig. 1.8. - Industrial sand mining on Bijilo beach (Gambia)
(Quélenec, 1988).



1.5.7. Libéria

La plupart des zones d'érosion se trouvent autour de Monrovia, de Buchanan et de Greenville qui sont situés au nord du port, dont les jetées créent des obstacles au courant littoral. A Monrovia, le recul récent de la côte est de 2 m/an. Le village prestigieux de l'OUA est menacé de destruction par l'érosion.

1.5.8. Côte d'Ivoire

L'érosion côtière affecte une zone restreinte au nord d'Abidjan, dans les zones de San Pedro, Fresco - Grand Lahou. La zone la plus vulnérable est la côte autour de Port-Bouet/Abidjan (Photo, fig. 1.9), où la situation se trouve aggravée par le canal Vridi et le canyon du "Trou sans Fond" (Quélenec, 1984c). A l'est d'Abidjan, la côte présente des problèmes d'érosion, surtout dans les zones urbanisées de Grand Bassam et dans la zone touristique de Assouindé-Assinie.

1.5.9. Ghana

Beaucoup d'endroits sur le littoral du Ghana sont affectés par l'érosion. A Ada, près de l'estuaire de la Volta, le retrait annuel de la plage a été de 2,3 m entre 1939 et 1976. A Labadi, à l'est d'Accra, l'érosion a provoqué un recul côtier de 3 m/an. D'autres villes entre le Cap St Paul et la frontière Ghana-Togo sont également affectées à divers degrés. L'ampleur du problème est considérable devant Keta à Abutiakofe, à l'est de l'église catholique, où la côte a reculé de plus de 60 m en une période de 3 à 4 mois au début de 1975 (Photo fig. 1.10).

1.5.10. Togo

La côte du Togo, longue de 50 km, n'a été que très peu attaquée par l'érosion pendant un siècle, mais depuis les années 60, la situation a été aggravée par l'intervention humaine, particulièrement à cause du développement du port de Lomé, qui a donné lieu à des vitesses de régression côtière particulièrement élevées à l'est des structures portuaires. On a constaté un retrait du rivage de 160 m en 8 ans à l'est du port de Lomé. L'érosion constitue un danger pour la route et les installations côtières d'exploitation du phosphate de Kpémé et la ville d'Aného (Oliveros, Quélenec, 1985) (Photos fig. 1.11 et 1.14). D'importants travaux de protection côtière sont en cours.

1.5.11. Bénin

A l'est du Togo, sur la côte du Bénin, les manifestations de l'érosion initiée au Togo ont été également spectaculaires. La ville de Gran Popo, par exemple, était autrefois un centre commercial prospère, mais au cours des 30 dernières années, la côte a reculé d'environ 200 m, détruisant beaucoup de constructions dans la ville. En conséquence, la population a considérablement diminué et l'endroit est devenu un village presque abandonné.

A Cotonou, la construction d'une jetée dans le port en 1960 a provoqué une érosion spectaculaire à l'est de cette jetée. Au cours de la seule année 1976, on a enregistré un retrait de 20 m environ au niveau de la jetée.

1.5.12. Nigéria

Dans ce pays, l'érosion représente un inconvénient généralisé le long des 800 km de côte. Dans le delta pétrolifère du Niger, en beaucoup d'endroits le recul de la côte atteint quelques dizaines de mètres par an, et les risques de submersion des zones humides côtières sont importants (Photo, fig. 1.12). A Lagos et à Escravos prédomine l'érosion provoquée par l'homme, due au développement du port, et l'on y a relevé des vitesses d'érosion de 20-30 m/an (Photo, fig. 1.13).

1.5.13. Cameroun

La région de Victoria souffre d'une érosion prononcée. Dans la partie sud de l'estuaire du Cameroun, l'extrémité nord-ouest du delta de Sanaga est sujette à l'érosion marine. Celle-ci serait due en partie à la construction en 1965 du barrage d'Edea, 70 km en amont de l'estuaire de la rivière Sanaya.

1.5.14. Sao Tomé-et-Principe

L'érosion marine de la côte déchiquetée de ces îles volcaniques est saisonnière et se concentre principalement dans les périodes de forte tempête.

1.5.15. Gabon

Les plages-barrières basses qui entourent de grandes lagunes (Banio, Ndogu, Fernard-Vazet) entre la frontière du Congo et la côte de la péninsule de Port Gentil sont affectées par une érosion qui est plus prononcée à Port Gentil. Le canyon du Cap Lopez joue le rôle d'un piège à sédiments, provoquant ainsi un déficit en sédiments et une érosion naturelle du rivage.

1.5.16. Congo

L'érosion littorale est particulièrement sensible au nord de Pointe Noire à Loango Bay où l'on a constaté, à l'est de pointe Indienne, que la côte avait reculé de 20 m sur la seule année 1983.

1.5.17. Angola

Dans la région nord, les escarpements côtiers de Barra do Dande à Sea Tiago, jusqu'à Cabo Ledo, et de Porto Ambouim sont soumis à une forte érosion. Sur les flèches sableuses de Ilha de Luanda et de Lobito, il a fallu construire des brise-lames pour arrêter l'érosion de la côte.

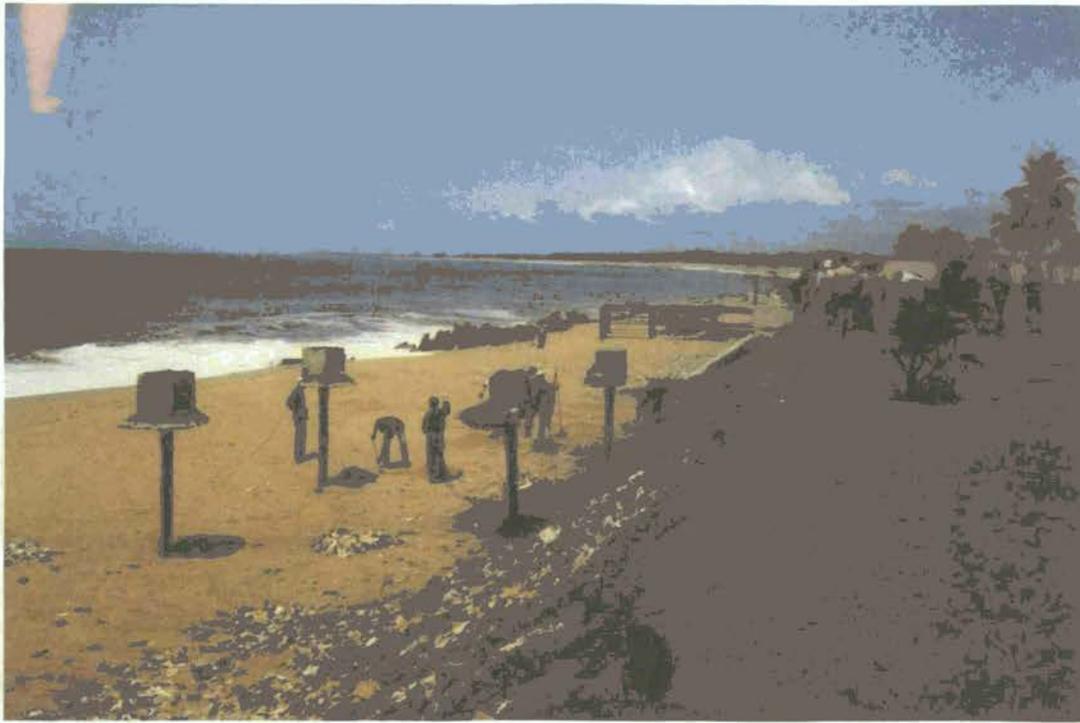


Fig. 1. 9. - Recul brutal du rivage a Port-Bouet (Cote d'Ivoire)
(Queennec, 1984).

Fig. 1. 9. - Brutal shoreline retreat at Port-Bouet (Ivory Coast)
(Queennec, 1984).

Fig. 1.10. - Fragilite du mince cordon littoral dans la region de
Keta - Delta de la Volta (Ghana) - (Queennec, 1986).

Fig. 1.10. - Fragility of the tiny littoral sand strip in the region
of Keta - Volta delta (Ghana) - (Queennec, 1986).





Fig. 1.11. - Recul du rivage avec destruction de la route côtière à l'ouest de Kpémé (Togo) - (Quélenec, 1984).

Fig. 1.11. - Shoreline retreat with destruction of the coastal road west of Kpémé (Togo) - (Quélenec, 1984).

Fig. 1.12. - Recul et submersion du littoral à Molume, partie occidentale du delta du Niger (Nigéria) - (Ibé).

Fig. 1.12. - Retreat and flooding of the littoral zone at Molume, western part of the Niger delta (Nigeria) - (Ibé).



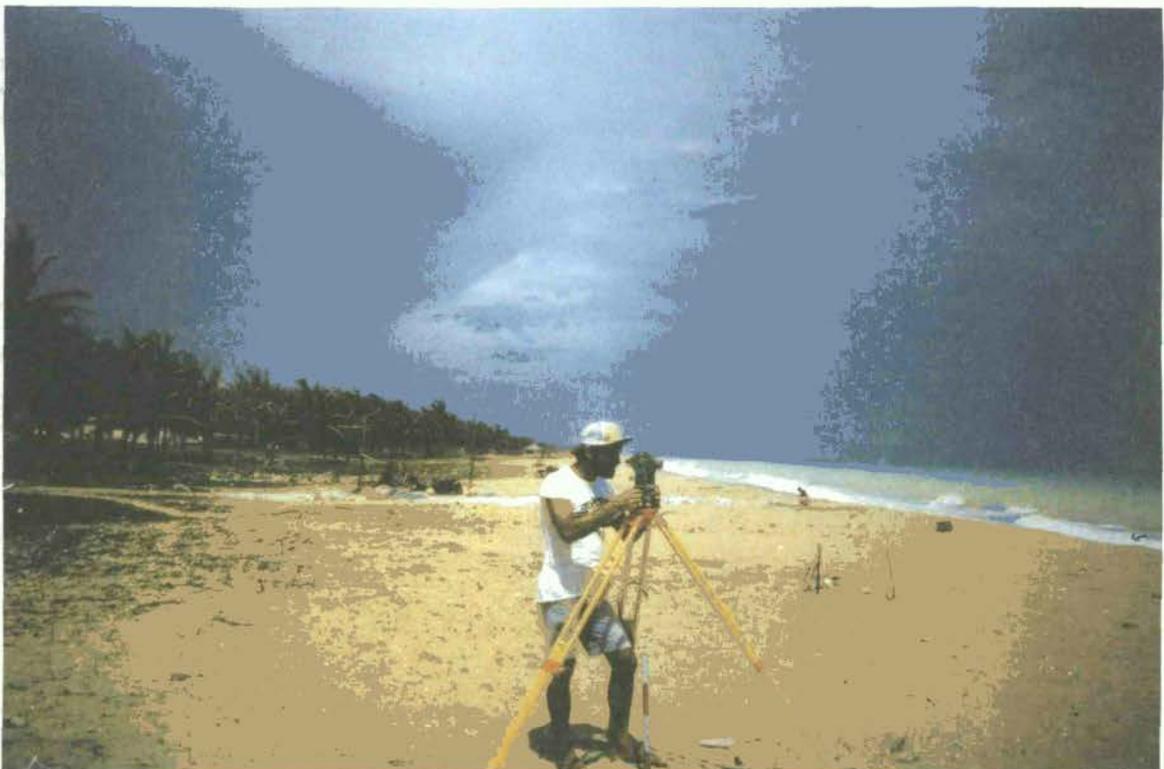


Fig. 1.13. - Erosion côtière catastrophique à Victoria Beach, Lagos (Nigéria) - (Ibé).

Fig. 1.13. - Catastrophic coastal erosion at Victoria Beach, Lagos (Nigeria) - (Ibé).

Fig. 1.14. - Mesures topographiques de contrôle des profils de plage au Togo au moyen d'un théodolite/tachéomètre (Quélenec, 1984).

Fig. 1.14. - Topographic survey for control of beach profiles in Togo, by using a theodolite/tacheometer (Quélenec, 1984).



LISTE DES FIGURES DU CHAPITRE 1

- Fig. 1. 1 - Plan de la situation de la Région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre (WACAF/3).
- Fig. 1. 2 - Principaux bassins sédimentaires de la région. (Emery et al. 1974).
- Fig. 1. 3 - Principaux segments de la marge atlantique de la région.
- Fig. 1. 4 - Carte récapitulative des problèmes d'érosion côtière dans la région (WACAF/3 complétée par R.E. Quélennec).

Planches photographiques

- Fig. 1. 5 - Vue aérienne de Saint-Louis (Sénégal)-(Iris).
- Fig. 1. 6 - Recul du rivage devant le cimetière musulman de Banjul, Gambie (Quélennec, 1988).
- Fig. 1. 7 - Erosion des falaises côtières à Fajara (Gambie)
- Fig. 1. 8 - Extraction industrielle de sable sur la plage à Bijilo (Gambie).
- Fig. 1. 9 - Recul brutal du rivage à Port-Bouet (Côte d'Ivoire) après la tempête de juillet 1984.
- Fig. 1.10 - Fragilité du mince cordon littoral dans la région de Keta (delta de la Volta, Ghana) (Quélennec, 1986)
- Fig. 1.11 - Recul du rivage avec destruction de la route côtière à l'ouest de Kpémé (Togo)
- Fig. 1.12 - Recul et submersion du littoral à Molume, partie occidentale du delta du Niger (Nigéria).
- Fig. 1.13 - Erosion côtière catastrophique à Victoria Beach, Lagos, Nigéria (Ibé).
- Fig. 1.14 - Mesures topographiques de contrôle des profils de plage au Togo au moyen d'un théodolite/tachéomètre (Quélennec, 1984).

2. GEOMORPHOLOGIE ET PROCESSUS COTIERS : CONCEPTS FONDAMENTAUX

Afin de faciliter la compréhension des prochains chapitres, nous rappellerons préalablement quelques définitions de base sur les formations littorales (paragraphe 2.1) et les sédiments (paragraphe 2.2) empruntées à un manuel récent (Quélénnec, 1984b), réalisé pour le projet WACAF/3.

2.1. TYPOLOGIE DES FORMATIONS LITTORALES

En se basant sur des considérations géomorphologiques et sédimentologiques, on peut établir une classification simplifiée des littoraux qui permet de distinguer divers types de formations en fonction des principales formes d'érosion et de dépôt. Ces diverses formations littorales sont les témoins de processus d'érosion-transport-dépôt dont l'occurrence est actuelle ou lointaine. On peut donc assister, dans le temps, à l'érosion de formes d'accumulation anciennes et vice-versa.

2.1.1. Les formes d'érosion : falaises et côtes rocheuses

L'érosion des falaises côtières résulte principalement de l'action mécanique des vagues (impact des vagues et abrasion du pied par des débris rocheux véhiculés par les vagues), ainsi que de celle des éléments météorologiques (infiltration des pluies, mise en pression, dissolution) et biologiques (animaux foreurs). Le recul des falaises par érosion libre des blocs et cailloux qui sont progressivement érodés par la houle et transportés sous forme de galets, graviers et sables sur le platier rocheux qui borde généralement les falaises.

L'érosion des côtes rocheuses dépend, comme pour les falaises, de la dureté, de la tectonique et de la structure des formations géologiques en place et de la puissance des agents hydrodynamiques, facteurs d'érosion. L'érosion des côtes rocheuses est généralement peu sensible à l'échelle humaine. Les formations géologiques les plus résistantes constituent des caps entre lesquels on trouve généralement des baies où peuvent se maintenir des plages constituées de sédiments hérités de l'érosion.

2.1.2. Les formes d'accumulation: dunes et cordons littoraux, flèches, tombolos, deltas, vasières

La plage est un terme générique qui indique une zone littorale, de type "interface", sujette à l'accumulation et au remaniement de sédiments non consolidés (sables, graviers, galets) qui sera caractérisée de façon plus précise au paragraphe 2.3. Les plages sont fréquemment sujettes à des processus alternatifs d'érosion et de dépôt.

Les dunes littorales résultent du transport éolien de sables issus des estrans de plage dans des zones à vents réguliers et forts. Elles peuvent constituer des formations de plusieurs dizaines de mètres de hauteur qui, quand elles sont situées à proximité du rivage, forment un stock sédimentaire tampon qui peut être remanié par la houle et conditionner l'équilibre des plages adjacentes.

Les cordons littoraux sont principalement développés dans des zones littorales où les marées et l'énergie de la houle sont relativement faibles. Leur mode de formation, probablement varié, fait l'objet de débats souvent contradictoires : émergence de barres sous-marines, exposition de dunes continentales après subsidence, extension de flèches littorales. Ces cordons littoraux isolent souvent de la mer des formations de type lagunaire ou étangs côtiers.

Les flèches littorales souvent accrochées à des singularités littorales de type pointes rocheuses ou caps, embouchures de baies et de rivières, ont pour tendance de lisser ces singularités. La progression des flèches se fait dans le sens du transit littoral. L'extrémité est terminée par un crochet dirigé vers l'intérieur de la zone, à l'abri de la houle.

Les tombolos résultent de la diffraction de la houle sur des hauts fonds, sur un îlot rocheux ou une île située à proximité d'un rivage. La rotation des crêtes de vagues aux extrémités de l'îlot et la réduction progressive de l'amplitude de la houle dans la zone à l'abri permettent le transport et l'accumulation de sédiments entre le masque rocheux et la côte.

Les deltas sont des formes d'accumulation sédimentaires complexes qui résultent de l'impossibilité des agents hydrodynamiques (houles, courants) de disperser les flux sédimentaires apportés sur le littoral par les fleuves.

Les vasières se trouvent le plus souvent dans des zones à faible énergie du type estuariennes, et zones abritées des houles du large par des îles ou des baies où se produit une sédimentation de particules fines dont le degré de consolidation augmente progressivement et qui constituent des zones privilégiées pour le développement de mangroves dans les régions tropicales.

2.2. QUELQUES CARACTERISTIQUES DES SEDIMENTS LITTORAUX

Afin de mettre l'accent sur le comportement hydrodynamique des sédiments sous l'action des vents, houles et courants, nous distinguerons entre les sédiments meubles, les sédiments cohésifs et les sédiments consolidés.

2.2.1. Sédiments meubles

Ils comprennent les rudites (diamètre $D > 2$ mm) et les arénites ($0,06 < D < 2$ mm). D'un point de vue pétrographique, la plupart des sédiments littoraux meubles sont généralement constitués, dans les régions tempérées, de grains de quartz et de feldspath issus de l'érosion de formations du type granites, gneiss et schistes, ainsi que de grains calcaires issus de roches sédimentaires et de la décomposition de coquillages dans des zones à haute productivité biologique (Tropiques).

Les paramètres fondamentaux qui interviennent dans la dynamique sont la cohésion, la densité, la dimension, et dans une moindre mesure, la forme des grains; on peut dire, en première approximation, que la cohésion diminue quand le diamètre des grains augmente.

Du point de vue du classement granulométrique des sédiments meubles (Tableau 2.1), il est intéressant de se référer au classement proposé ci-après par l'AIPCN (*) pour le dragage des fonds marins.

La porosité et la densité des sédiments littoraux dépendent des facteurs tels que nature, granulométrie, compaction et état de saturation du matériau. C'est ainsi que, pour des sables bien triés (granulométrie uniforme) la porosité (volume de vides/volume total) passe de 0,46 à 0,34 selon que les sables sont peu compacts ou bien compactés, tandis que dans le même temps, les densités sèches et humides (saturation) varient respectivement de 1,4 à 1,8 et de 1,9 à 2,1.

Les trois facteurs principaux qui contrôlent la granulométrie des sédiments meubles, sur un segment littoral, sont :

- l'origine des sédiments (zones sources),
- l'énergie de la houle (plage abritée ou exposée),
- la pente de la plage sous-marine (fig. 2.1) et du plateau continental.

* AIPCN / PIANC : Association Internationale pour les Congrès de Navigation

TABLEAU 2.1

CLASSEMENT GRANULOMETRIQUE DES SEDIMENTS

Principaux types de sols	Identification de la dimension des grains (D)		Identification
	Echelle des dimensions (mm)	Tamis BS	
Blocs Gailloux	200 mm 200 à 60 mm		Examen et calibrage visuels.
Graviers	Petits Moyens Fins	3" - 3/4" 3/4" - 1/4" 1/4" - No.7	Facilement identifiable par examen visuel.
	Gros Moyens Fins	2,0 à 0,6 mm 0,6 à 0,2 mm 0,2 à 0,06 mm	Tous les grains visibles à l'oeil nu. Très faible cohésion lorsque le sol est sec.
Limons	Gros Moyens Fins	0,06 à 0,02 mm 0,02 à 0,006 mm 0,006 à 0,002 mm	D'habitude, les grains sont invisibles. Seuls les grains grossiers de limon sont encore visibles à l'oeil nu. L'essai de dilatation (*) permet la meilleure détermination possible. Le limon peut être pétrissable mais, séché, il tombe des doigts lorsqu'on secoue les mains : une simple pression des doigts pulvérise les mottes séchées.
	<p>BOUES DE COHESION</p> <p>Au dessous de 0,002 mm, la distinction entre les limons et les argiles ne devrait pas se faire uniquement d'après la dimension des grains puisque les propriétés physiques les plus importantes des limons et des argiles n'ont qu'un rapport indirect avec la dimension des grains.</p>		Les argiles ont une cohésion et une plasticité importantes mais ne réagissent pas au test des secousses. Un échantillon humide colle aux doigts et au toucher, paraît lisse et onctueux. Les fragments secs ne se réduisent pas en poudre, mais au cours du séchage, ils se contractent et se fissurent en acquérant une haute résistance au cisaillement.
Tourbes et terres organiques	P.A.	P.A.	Peuvent être généralement identifiées par leur couleur noire ou brune et souvent par leur forte odeur et par la présence de matières fibreuses ou ligneuses.

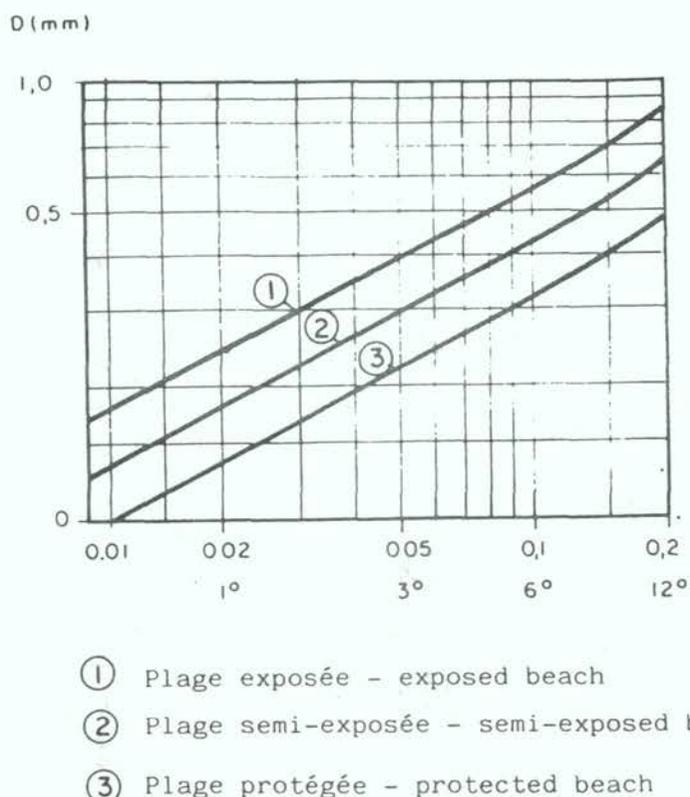


Fig. 2.1. - Pente de la plage $P = f(D, \text{exposition aux houles})$

Fig. 2.1. - Beach slope, $P = f(D, \text{exposure to waves})$
(Wiegell, 1964)

L'action de la houle et des courants sur les sédiments meubles littoraux provoque un triage granulométrique (CNEXO, 1976), voir figure 2.2.

Des études effectuées (Bascom, 1951) ont montré que, pour les plages sableuses :

- les sédiments les plus grossiers se trouvent au niveau de la barre de déferlement (zone de brisants),

- la granulométrie des sédiments diminue au large de cette barre avec la profondeur, ainsi que vers la côte avant d'augmenter à nouveau vers le haut estran.

L'action de la houle et des courants littoraux donne lieu également à un triage granulométrique longitudinal le long du littoral, avec accumulation des sédiments fins dans les zones à faible énergie de la houle, et vice-versa.

L'abrasion des sédiments littoraux sous l'action de la houle est peu sensible pour les sables de petit diamètre ($D < 0,2$ mm) en raison de leur faible inertie. Le taux d'abrasion augmente avec la taille des sédiments; il est important dans le cas de galets transportés par le transit littoral sur des rivages à haute énergie : des expériences ont montré qu'il suffit d'une durée d'action d'une semaine pour que des fragments de 10 cm de côté, de type calcaire ou marne, soient transformés en galets de plage bien arrondis par des houles de 0,5 m d'amplitude. Pour des fragments de type quartzite, ce résultat serait obtenu en un mois.

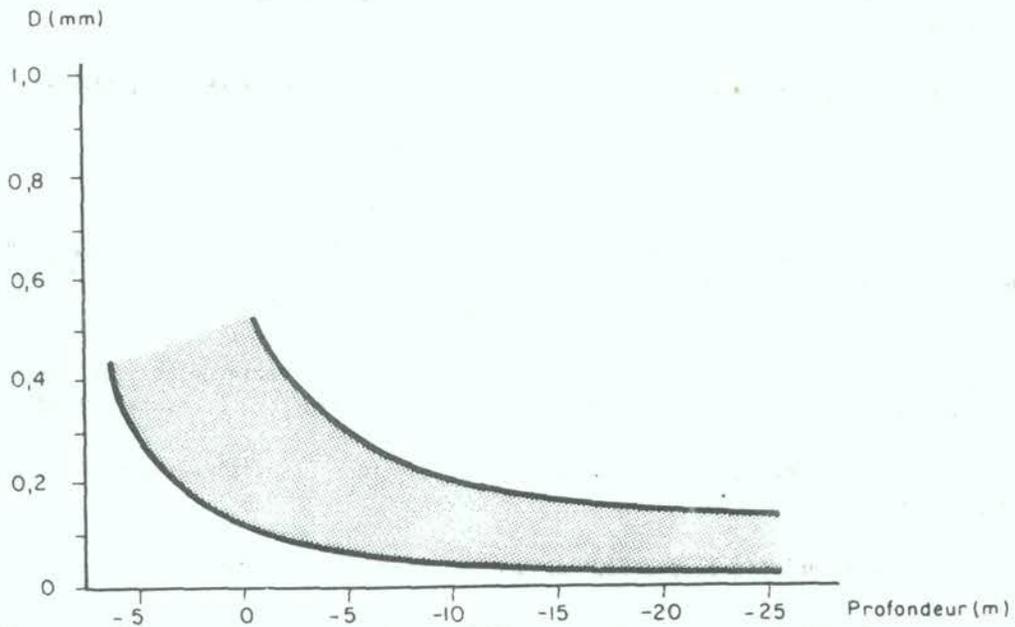


Fig. 2.2. - Diamètre (D) des sédiments de plage en fonction de la profondeur.

Fig. 2.2. - Beach sediment diameter (D) as a function of water depth.

(CNEXO, 1976)

2.2.2. Sédiments cohésifs

Ces sédiments, de type vaseux ou pélitique sont constitués par des éléments de diamètre granulométrique inférieur à 64 microns (lutites). On distingue généralement (Tableau 2) :

	Diamètres (D)	Composition minéralogique
* les sablons	0.02 à 0.064 mm	Quartz
* les poudres	0.001 à 0.02 mm	Quartz Mica Argiles
* les précolloïdes	0.0001 à 0.001 mm	Argiles
* les colloïdes	$D < 0.0001$ mm	Silice Hydroxydes Complexes organiques

Les propriétés physico-chimiques particulières des sédiments cohésifs (floculation, viscosité, consolidation) leur donnent un comportement spécifique assez complexe sous des actions hydrodynamiques (houles, courants) (Migniot, 1982).

La floculation des sédiments pélitiques résulte de l'agrégation en flocons (0,1 à 2 mm) de particules élémentaires de quelques microns. Cette propriété qui influe sur la vitesse de chute, est liée à l'occurrence de potentiel Zéta faible : dans une suspension colloïdale, les particules argileuses qui portent une charge négative auront d'autant plus tendance à se rapprocher et s'agglomérer sous l'effet de forces de Van der Waals, que le potentiel Zéta du milieu aqueux sera faible (présence d'ions H^+ ou de cations Ca^{++} , Na^+ ...).

La floculation et la vitesse de chute (W) des sédiments pélitiques varient principalement en fonction :

- de la nature minéralogique et des caractéristiques des particules élémentaires,
- des caractéristiques du milieu aqueux récepteur : concentration (MES), physico-chimie (salinité, température), degré d'agitation.

On retiendra que, pour une particule élémentaire de diamètre 1 micron, la vitesse de chute W_d de 0,001 mm/s est multipliée par 500 après floculation : $W_f = 0,5$ mm/s, ce qui correspond à la vitesse moyenne des flocons de vase en eau de mer calme (salinité de 2 à 3 %).

La salinité de l'eau des mers tempérées, en surface, varie entre 3,2 et 3,8 %, soit en moyenne 35 g de sels dissous par 1 000 g d'eau, ce qui correspond à une densité de 1,026.

La consolidation des dépôts de sédiments pélitiques (vases) varie dans le temps en fonction principalement :

- des caractéristiques des sédiments et du milieu liquide environnant,
- de la hauteur des dépôts, laquelle favorise le tassement par évacuation de l'eau interstitielle (augmentation de la concentration en éléments solides ou diminution de la porosité).

La pente des dépôts sédimentaires, ainsi que leur facilité à être mis en mouvement par les houles et courants, est fonction notamment de paramètres tels que rigidité et viscosité, lesquels augmentent avec la concentration des dépôts et la salinité de l'eau.

2.2.3. Sédiments consolidés

2.2.3.1. Beachrock

Les types littoraux consolidés plus ou moins friables, de type grès de plage ou "beachrock" sont constitués de sables de plage cimentés notamment par des calcites ou aragonites (carbonates de calcium).

On les trouve principalement dans les régions chaudes à climat actuel de type aride à tropical (Golfe Persique, Golfe du Togo-Bénin, Pacifique, Floride, Amérique du Sud, Méditerranée) où la concentration de sédiments littoraux calcaires de type corallifère, coquillier, ou quartzeux est importante.

Deux hypothèses sont le plus souvent utilisées pour expliquer la formation des beachrocks :

- la dissolution par les précipitations des carbonates de calcium contenus dans les sédiments et sables terrestres, leur transport dans les eaux souterraines, leur migration et leur fixation sous forme de calcite dans les sables de plage à marée basse;
- la précipitation du carbonate de calcium contenu dans les eaux marines (sursaturation) sous l'effet combiné de l'augmentation de température et de l'évaporation de l'eau de mer sur les estrans à faible pente (humides et surchauffés) permet le dépôt d'un ciment intergranulaire de type aragonite.

La position des formations de type beachrock (dont certaines sont en cours de consolidation) par rapport aux lignes de rivage actuelles, dépendent de leur époque de formation, de phénomènes tels que variations du niveau marin, tectonique, recul du rivage, ainsi que de leur capacité à résister à l'érosion ou à la destruction par les houles et organismes marins.

La présence de plusieurs lignes et niveaux de beachrocks à proximité des littoraux actuels est fréquente (Golfe du Bénin), ce qui permet de dater la position d'anciens rivages.

La présence de lignes de beachrocks émergeant sur les fonds littoraux à quelques mètres de profondeur sur la plage sous-marine ou le plateau continental, conduit parfois, comme pour les hauts fonds ou les écueils, à modifier la propagation de la houle vers le rivage (réfraction) ce qui peut créer des zones préférentielles d'accumulation ou d'érosion sur le rivage.

2.2.3.2. Coraux

Les récifs coralliens qui émergent souvent au niveau moyen des marées représentent des structures dissipatrices de l'énergie de la houle, formées dans les mers chaudes par des algues et organismes marins sous forme de concrétion de carbonate de calcium ($CaCO_3$). A l'abri des barrières de récifs coralliens qui entourent les îles du Pacifique et autres mers chaudes, sont constitués des lagons. Des formations coralliennes vivantes et "reliques" peuvent être retrouvées à proximité des rivages actuels en Afrique de l'Ouest et du Centre (Nigéria).

2.3. L'EROSION COTIERE : PROBLEMES DE TERMINOLOGIE ET D'EVALUATION

Le contenu de ce paragraphe reprend quelques uns des thèmes d'un exposé présenté lors du colloque de Biarritz "Mer et Littoral : couple à risque" (Quélénnec, 1987b).

2.3.1. Nomenclature de la plage théorique

Cette nomenclature est représentée sur la figure 2.3.

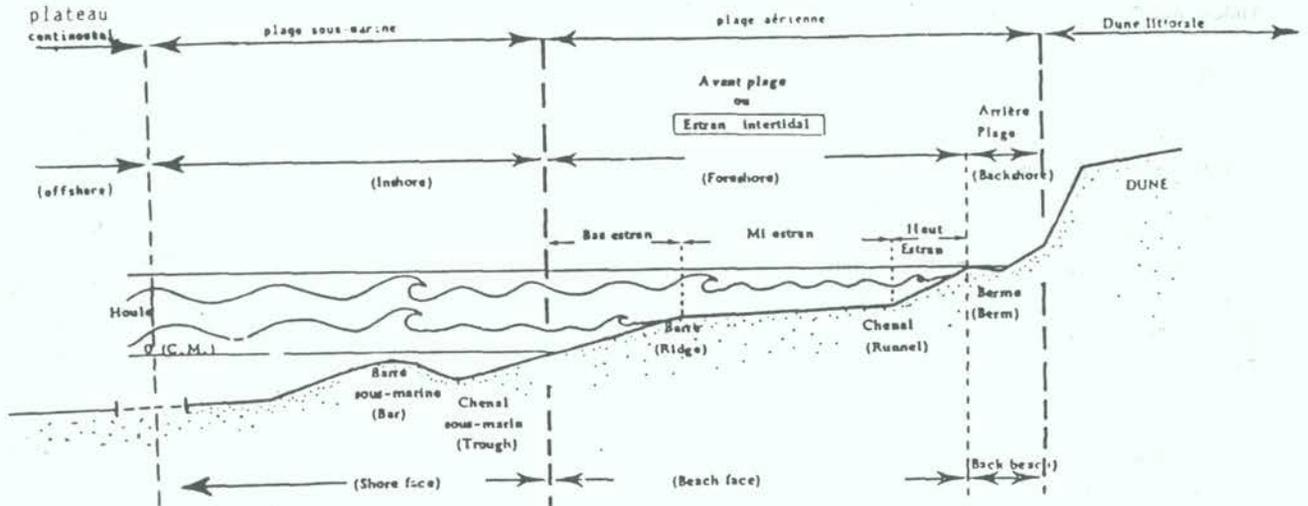


Fig. 2.3. - Nomenclature du profil de plage.

Fig. 2.3. - Terminology used for the beach profile.

La limite théorique entre la plage "sous-marine" et le plateau continental ne peut être définie qu'arbitrairement. Elle peut être choisie comme étant celle qui correspond à la profondeur où les sédiments de fond ne peuvent pas être "remontés" sur la plage sous l'action des houles et des courants et participer à l'alimentation de celle-ci.

Ce faisant, il est possible d'isoler le système "plages" du système "plateau continental" en considérant que les échanges sédimentaires entre ces deux systèmes ne peuvent être qu'uni-directionnels et constitués par des flux de sédiments fins transportés essentiellement en suspension (sauf cas particulier : mouvement de masse) de la plage vers le plateau continental.

D'après des expériences in situ et en laboratoire faites notamment en France, il semblerait que sur les côtes sableuses à forte énergie (type Golfe de Gascogne), cette limite se situerait à des profondeurs de - 20 à - 25 m. Cette profondeur limite (P1) peut s'estimer à l'aide de divers modèles empiriques, dont celui d'Hallermeier (1981), selon :

$$P1 \approx 2 H_s + 11 \sigma$$

où

H_s = hauteur (amplitude) significative de la houle (H 1/3)

σ = écart type

2.3.2. Définir l'érosion côtière : un problème de choix de dimensions et de concepts

2.3.2.1. Dimension 1 : le trait de côte

C'est le choix le plus simple où l'érosion est représentée par le recul (ΔX) de la ligne de rivage, ou trait de côte, au cours d'un intervalle de temps (Δt).

L'érosion côtière est alors exprimée en m/an ($\Delta X / \Delta t$) et ce paramètre est le plus utilisé dans les études et le plus cité dans la littérature internationale.

Ce paramètre unidimensionnel qui a l'avantage de la simplicité, offre l'inconvénient majeur de ne pas renseigner sur l'évolution des plages aériennes et sous-marines, lesquelles peuvent être positives (engraissement) ou négatives (érosion) dans le cas de basculement de la plage, indépendamment de la position du trait de côte.

2.3.2.2. Dimension 2 : le profil de plage

Dans ce cas, l'évolution côtière est représentée par la variation ($\Delta p / \Delta t$) de surface du prisme sédimentaire (p) situé au dessus d'une profondeur de référence sur le profil de la plage.

Le plus souvent, le profil de la plage n'est mesuré qu'à l'aide de moyens topographiques (terrestres) qui ne permettent que la mesure de l'évolution du profil de plage "aérienne". Dans ce cas, même s'il y a progrès par rapport à la seule mesure de la variation du trait de côte, l'information nécessaire à la compréhension des processus sédimentaires littoraux est tronquée, car on ne met en évidence qu'une faible partie des variations "volumétriques" de la morphologie de la plage "active".

C'est cependant sur la base de telles mesures (bien incomplètes) qu'est basée la très grande majorité des études, diagnostics et travaux de protection côtière.

Il est souhaitable que la mesure et le suivi de l'évolution des plages portent sur l'ensemble du profil de la plage aérienne et sous-marine, jusqu'à la profondeur limite (P1) où les variations de la côte des fonds sont inférieures à la précision de mesure par les procédés bathymétriques.

Cette remarque est d'autant plus essentielle que les échanges sédimentaires dans le profil sont importants et que par exemple, comme au Togo, l'érosion côtière fait apparaître sur le bas estran, des structures de type "beachrock" (grès de plage) qui tendent à réduire les échanges sédimentaires de la plage sous-marine vers la plage aérienne (Oliveros, Quélenec, 1985).

Dans d'autres situations observées sur des littoraux en péril, comme celui du delta du Nil, il a été noté que les phénomènes d'érosion apparaissent le plus souvent sur le profil de la plage sous-marine avant d'être sensibles sur la plage aérienne (Manohar, Quélenec, 1976) : les mesures réalisées sur plus de 300 profils de plages (de 0 à - 6 m), sur le delta du Nil (faible marnage) ont permis de différencier les profils en voie d'érosion et d'engraissement, grâce à l'équation suivante (fig.2.4) :

$$Y = aX^b \text{ (Quélenec, 1984a)}$$

où

Y = profondeur et X = distance à la côte.

Cependant, cette étude a permis de montrer que la forme des profils des plages aériennes et sous-marines, varie et s'adapte aux conditions d'érosion (sous-alimentation).

A la notion "statique" de profil d'équilibre, il apparaît donc souhaitable de substituer celle de "profil dynamique" des plages.

2.3.2.3. Dimension 3 : système et budget sédimentaires côtiers

Les variations morphologiques du trait de côte et du profil de la plage aérienne et sous-marine ne sont que des paramètres "indicatifs" qui ne représentent qu'une partie, souvent peu "significative", de l'information nécessaire à la compréhension des processus littoraux et des tendances d'évolution morphologique d'une zone côtière donnée.

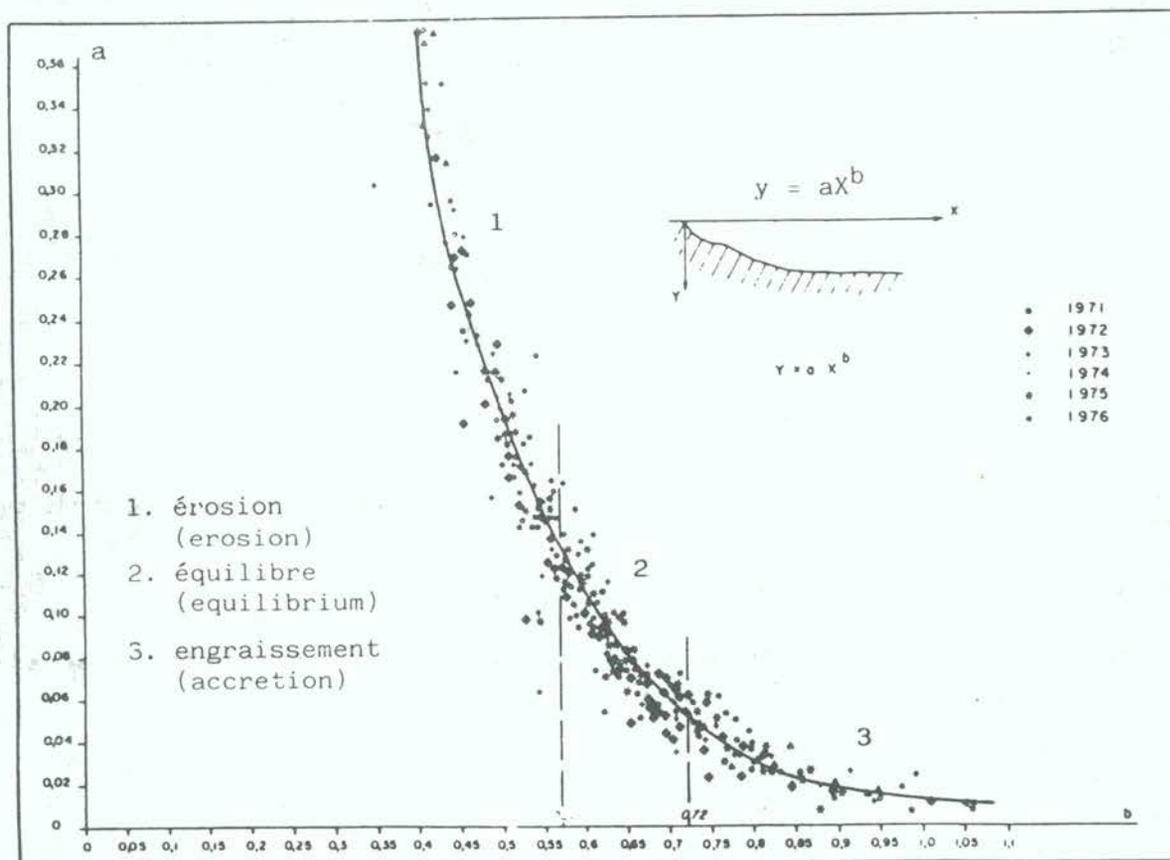


Fig. 2.4.-Discrimination des plages sujettes à l'érosion ou à l'engraissement sur le delta du Nil.

Fig. 2.4.-Discrimination between eroding and accreting beaches on the Nile delta.

(Quélenec, 1984 a)

Prenons le cas d'une zone côtière (segment littoral, plage, baie) dont on veut étudier l'état et l'évolution dans un but de protection ou d'aménagement. Pour ce faire, il est utile, sinon nécessaire, d'isoler la zone étudiée afin de la considérer comme un système sédimentaire (Interface) ayant des caractéristiques sédimentologiques et morphologiques. Ces caractéristiques sont variables, dans le temps et dans l'espace, en fonction des échanges d'énergie (houles, vents, courants) et de matière (sédiments, bioconstruction), à travers les milieux ambiants (eau, air).

La figure 2.5 est une représentation schématique des possibilités d'"échanges sédimentaires" d'un système littoral "ouvert" sur l'extérieur (Quélénnec, 1987b).

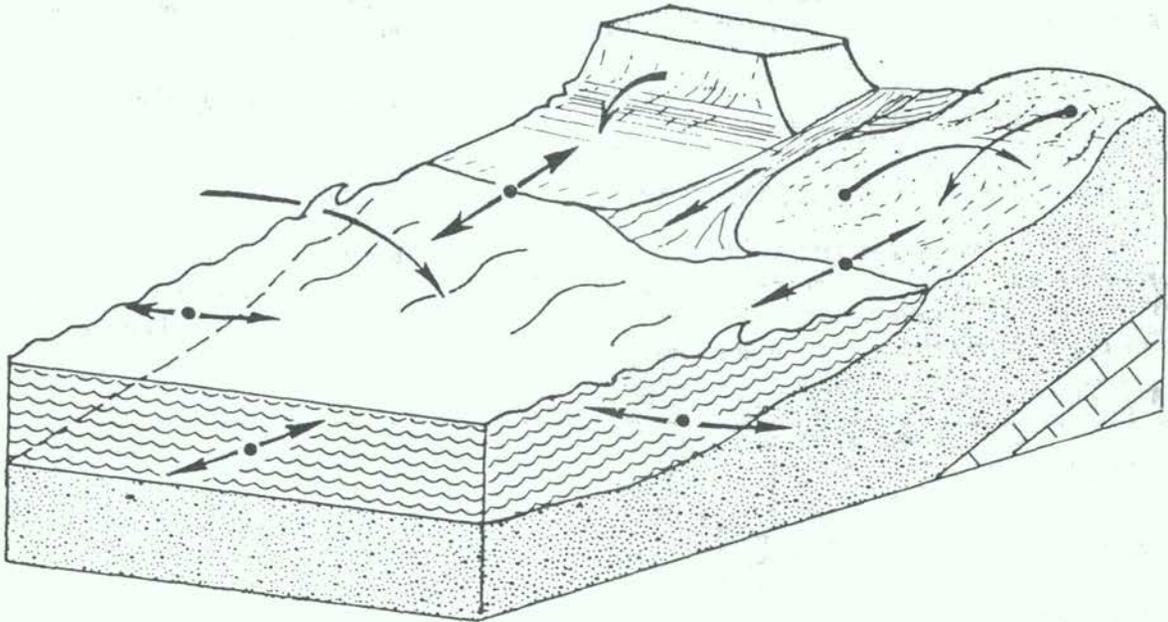


Fig. 2.5. - Budget sédimentaire - Principaux échanges.

Fig. 2.5. - Sedimentary budget - Main sediment transfers.

(Quélénnec, 1987b)

Le budget sédimentaire d'un tel système "naturel" est fonction des échanges/transferts de sédiments :

- latéraux sous l'action des houles (transit littoral) et des courants,
- avec l'arrière-plage : transports éoliens, érosion des falaises, apports fluviaux, stockage dans les dunes, les lagunes et les graus,
- avec le plateau continental : de la plage vers le large, si la limite du système est fixée à la profondeur (P1),
- avec le milieu biologique : bioconstructions récifales, productions de coquillages, bioturbations

Les variations de ces flux sédimentaires, dans le temps (tempêtes, crues) et dans l'espace (à l'intérieur du système) conditionnent l'état du stock sédimentaire mobilisable (SSM) et l'évolution morphologique du système.

Ce type de système est donc, au sens de la thermodynamique, un système "ouvert" qui entretient des échanges constants d'énergie et de matière avec l'extérieur.

2.3.2.4. Dimension 4 : le temps

A la notion d'équilibre de la plage, il semble préférable de substituer celle de stabilité dynamique du "système littoral", laquelle implique l'introduction de la 4e dimension : le temps.

L'unité ou l'intervalle de temps (dt) à utiliser pour évaluer la stabilité d'un système littoral "naturel" (hors actions anthropiques), peut être choisi (2 possibilités) comme étant celui pendant lequel :

- les échanges d'énergie avec l'extérieur peuvent être considérés comme stationnaires,
- les variations du "stock sédimentaire mobilisable" (SSM) sont négligeables.

La première hypothèse impliquerait une unité de temps "annuelle". Pour la deuxième hypothèse, le choix de l'unité de temps doit être variable (une à plusieurs années), en fonction du système littoral considéré : cas des zones littorales sujettes à des apports épisodiques "massifs" de sédiments par les transports solides ou artificiels (rejets miniers), l'érosion des falaises, des bancs migrants.

2.4. TRANSPORT DES SEDIMENTS

Nous rappellerons ci-après quelques principes fondamentaux qui régissent le transport des sédiments littoraux sous l'action directe du vent, des courants et de la houle (Quélénnec, 1988b).

2.4.1. Transport éolien

L'accumulation de stocks sédimentaires sous forme de dunes littorales est la manifestation la plus évidente de la capacité de transport des sédiments littoraux par les vents.

En règle générale, les dunes littorales sont constituées de sables transportés de l'estran vers l'arrière-plage. Les flux de sédiments transportés sont d'autant plus importants que :

- la vitesse du vent est grande,
- les sables sont fins et non cohésifs,
- la largeur de l'estran aérien est importante,
- les sables sont secs et non fixés par la végétation.

Dans certaines régions littorales sèches, bordées de zones désertiques où une composante significative du spectre directionnel du vent est dirigée vers la mer (Mauritanie, Angola), le littoral est alimenté par des sables dunaires d'origine terrestre.

Le débit massique éolien de sable traversant un plan vertical de largeur unitaire perpendiculaire à la direction du vent, peut être évalué d'après les travaux de Bagnold, selon la formule suivante :

$$q = 854 (D/0.25)^{1/2} u_*^3$$

avec

D = diamètre des sédiments en mm,

u_* = vitesse de frottement du vent sur les sédiments en m/s,

q = en kg/m/H

La figure 2.6 permet l'estimation d'un ordre de grandeur de ce débit éolien connaissant la vitesse du vent mesurée au dessus du sol.

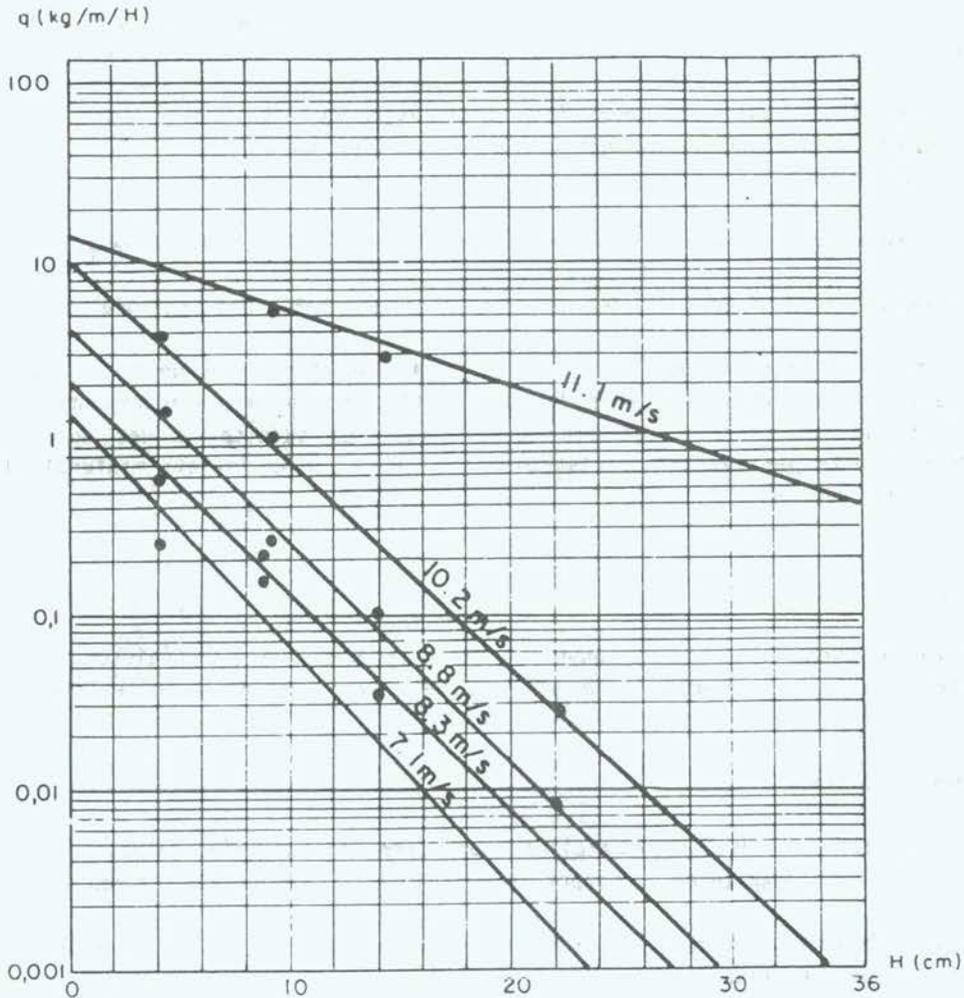


Fig. 2.6. - Débit sédimentaire éolien (q) en fonction de la vitesse du vent et de la hauteur H au-dessus du sol.

Fig. 2.6. - Aeolian sediment discharge (q) as a function of wind speed and elevation H above the ground.

(L.C.H.F.)

2.4.2. Transport par les courants

Les courants qui peuvent induire un transport des sédiments dans le domaine littoral et marin peuvent être classés schématiquement en 4 catégories :

- les courants généraux (ou géostrophiques) issus de la circulation des masses d'eau océaniques dont les vitesses résiduelles près des rivages sont généralement faibles,

- les courants de marée qui peuvent produire des vitesses notables dans les régions où le marnage est important (4 à 5 mètres en Guinée-Bissau) ainsi que dans les estuaires, les détroits, les baies fermées et les graus de lagunes,

- les courants littoraux induits par la houle dont l'influence sera décrite au 2.4.3.

Les processus de transport sédimentaire par les courants obéissent à des lois différentes selon que les sédiments sont transportés par charriage près du fond ou en suspension.

Pour qu'un grain de sédiment soit entraîné par un courant, il doit être soumis à une force tractrice supérieure aux forces qui maintiennent le grain en place. La force tractrice critique (T_c) qui caractérise le début d'entraînement de sédiment peut s'exprimer selon :

$$T_c = K (G_s - G) D$$

avec

- K = coefficient compris entre 0,04 et 0,06
 G_s et G = poids volumique du sédiment et de l'eau
 D = diamètre moyen du sédiment.

Pour des sables de densité 2,6 et T_c exprimé en Newtons/m^2 , on obtient :

$$0,8 D < T_c < 1,0 D$$

Connaissant la force tractrice T_c , on peut en déduire la vitesse de frottement u_* ainsi que la vitesse moyenne ou instantanée du courant nécessaire pour assurer le début d'entraînement des grains.

Pour des sédiments non cohésifs du type sables quartzeux, on peut estimer les valeurs suivantes pour la vitesse moyenne d'entraînement des sédiments de diamètre D par un courant sous une hauteur d'eau donnée (Tableau 3 ci-après) :

Diamètre (mm)	Vitesse moyenne (m/s)	Hauteur d'eau (m)
0,01	0,28	1
0,01	0,4	10
0,1	0,32	1
0,1	0,5	10
1,0	0,4	1
1,0	0,6	10
5,0	0,8	1
5,0	1,3	10

Les estimations précédentes ne sont que des ordres de grandeur obtenus à l'aide d'hypothèses simplificatrices : régime hydrodynamique uniforme et permanent, répartition logarithmique des vitesses sur la hauteur d'eau, granulométrie des sédiments uniformes.

Pour des sédiments cohésifs (limons, vases, argiles), les modèles précédents ne sont plus valables, car les vitesses de frottement critiques qui conditionnent le début d'érosion dépendent des propriétés rhéologiques des sédiments et de leur état de consolidation.

Après avoir été mis en mouvement, les sédiments peuvent être transportés par les courants sous forme de charriage ou de suspension en fonction de leur diamètre, de la vitesse et de la

turbulence du courant. L'estimation des débits solides résultants est généralement faite en utilisant les modèles d'hydrodynamique sédimentaire développés pour l'hydrodynamique fluviale et après adaptation au milieu marin et littoral. Les principales difficultés d'application de ces modèles au domaine littoral tiennent au fait que le régime des courants y est rarement uniforme et permanent et que les caractéristiques des courants varient localement et dans le temps, en fonction notamment des conditions bathymétriques, morphologiques, météorologiques et astronomiques (marée).

2.4.3. Transport sous l'action de la houle

Les processus de transport des sédiments par la houle sont très complexes. La présentation qui suit permet de rappeler les principaux mécanismes mis en jeu.

Au large, la houle agit essentiellement sur les sédiments de fond par l'intermédiaire des mouvements orbitaux qu'elle engendre dans la masse d'eau.

En fonction des caractéristiques de la houle (amplitude H, période T, longueur d'onde L) et la profondeur d'eau (d), les sédiments de fond peuvent être soumis à des oscillation, puis être mis en suspension et être transportés par les courants.

Avec les notations précédentes, la vitesse orbitale maximale (U max) sur le fond s'exprime par :

$$U \text{ max} = \pi H / T \operatorname{sh} (2\pi d / L)$$

Pour une houle de période T = 10 s et d'amplitude H = 4, U max atteint environ 1,8 m/s pour des profondeurs d = 10 m.

Dans sa propagation vers le rivage, la houle engendre un courant de masse avec une composante dirigée vers le rivage en surface et au fond, et une composante opposée, dirigée vers le large à mi-profondeur (fig. 2.7).

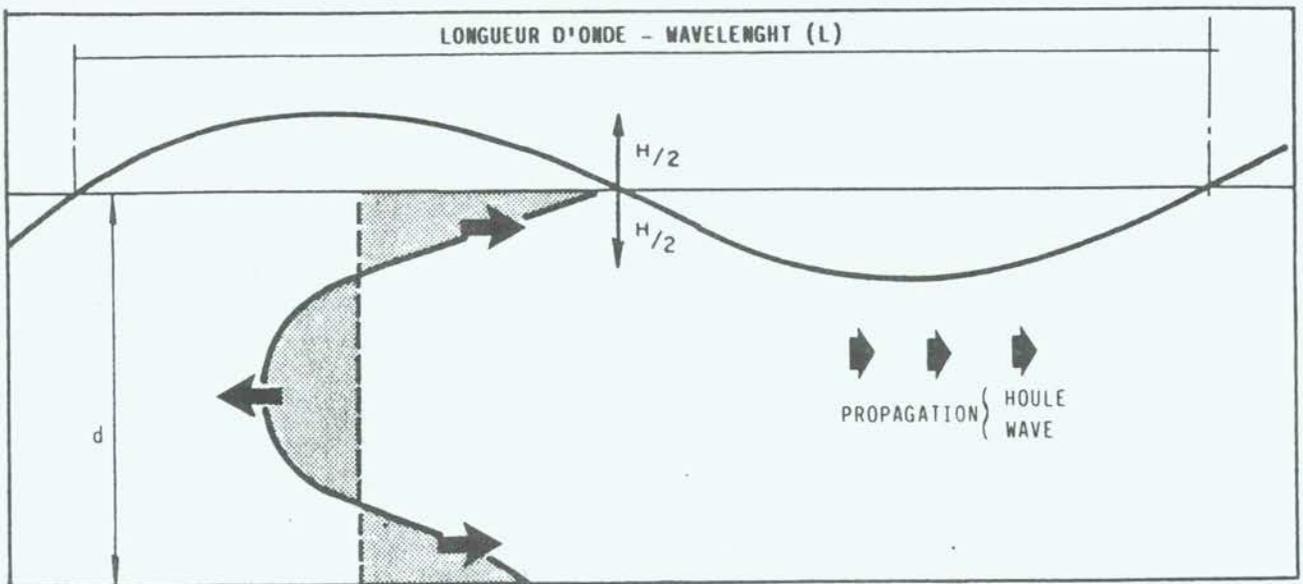


Fig. 2.7. - Courants induits par la houle.

Fig. 2.7. - Wave induced currents.

C'est grâce, notamment, à cette dernière composante, que se réalise le transfert en suspension vers le large des sédiments littoraux les plus fins, ce qui se traduit par le triage granulométrique transversal que l'on observe sur la majorité des littoraux sableux : diminution du diamètre moyen des sédiments au fur et à mesure que l'on s'éloigne du rivage.

La propagation des houles du large vers le rivage donne lieu au phénomène de réfraction : en raison du fait que la vitesse de propagation (c) de la houle est fonction de la profondeur ($c = gT/2\pi th(2\pi d/L)$), les crêtes de houles tendent à se rapprocher de la direction des courbes bathymétriques.

A proximité du rivage, la houle déferle en libérant une partie importante de son énergie à une profondeur (db) comprise entre 1 et 1,3 fois son amplitude (H_b) au moment du déferlement, selon la pente de la plage.

La dissipation brutale de l'énergie de la houle lors du déferlement se traduit par un remaniement important de la couche sédimentaire, avec mise en suspension des sédiments dans la zone d'impact et formation de barres qui peuvent présenter un caractère quasi-permanent sur les littoraux à forte énergie de houle et à faible marée.

Après avoir déferlé, les trains de houle s'épanchent sur l'estran de plage et achèvent de libérer leur énergie à la suite de mouvements alternatifs de flux et de reflux qui donnent lieu à un transport sédimentaire en "dents de scie" (fig. 2.8.).

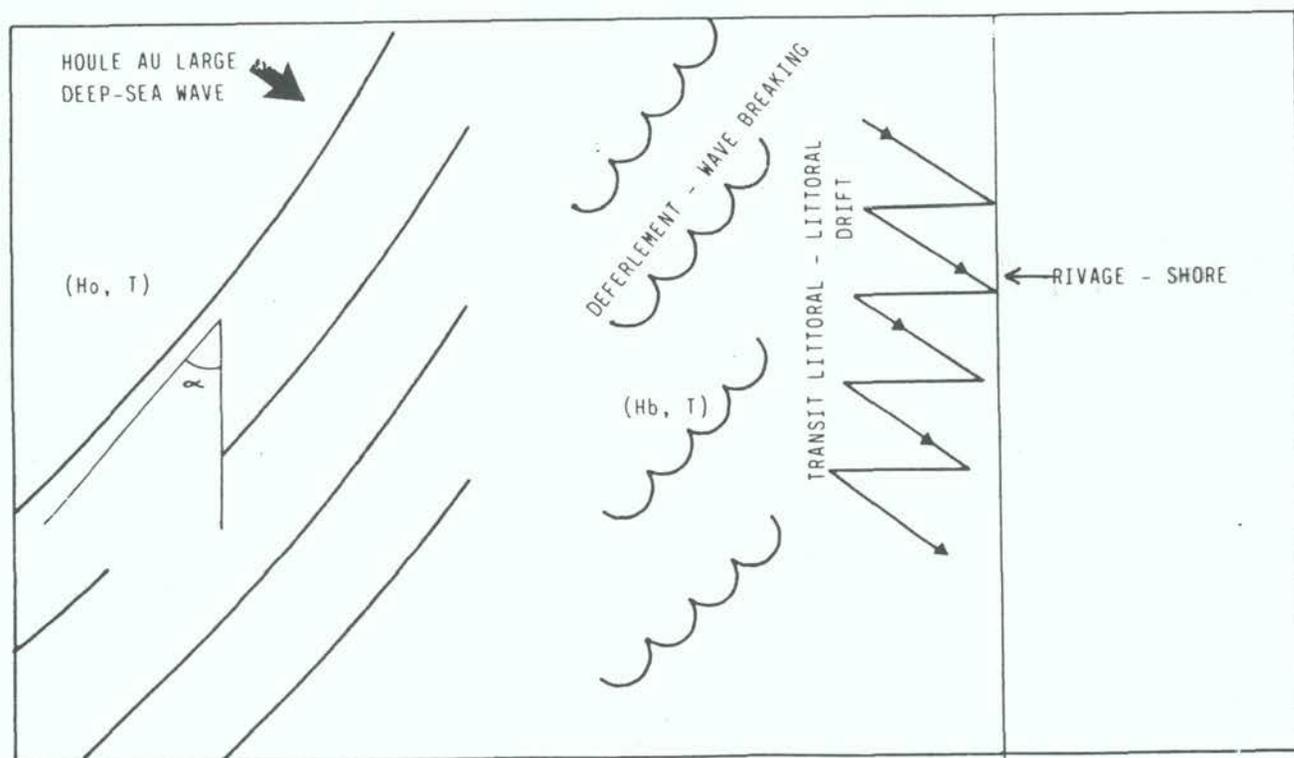


Fig. 2.8. - Transport sédimentaire littoral.

Fig. 2.8. - Littoral sediment drift.

Quand la houle se présente, après réfraction, parallèlement au rivage, l'essentiel des mouvements et échanges sédimentaires entre les plages aériennes et sous-marines se fait transversalement, c'est-à-dire dans le profil. Par contre, quand la houle se présente obliquement par rapport au rivage, l'essentiel du transport des sédiments se fait longitudinalement, en raison

de la formation, entre la zone du déferlement et le rivage, d'un courant parallèle à la côte et à forte capacité de transport solide par charriage et suspension lors des tempêtes.

Les fluctuations de niveau et les transferts de masse liés à la propagation de la houle et au déferlement occasionnent des phénomènes de vidange des masses d'eau accumulées au rivage. Les courants de vidange transversaux (rip-currents) qui sont ainsi créés permettent l'évacuation vers le large d'eaux fortement chargées en sédiments en suspension.

Le transport longitudinal des sédiments après le déferlement est appelé "transit littoral". De nombreuses formules empiriques, basées sur des expériences en laboratoire et des mesures in situ, sont disponibles dans la littérature scientifique pour évaluer le transit littoral. Parmi les formules les plus couramment utilisées, on peut citer les suivantes, exprimées en unités métriques :

$$Q = (H^3/T) \cdot K_1(H/L, D) \cdot f(\alpha) \quad : \text{Laboratoire national d'hydraulique, France, (L.N.H.)}$$

$$Q = K_2 g(H/L) \cdot H^2 \cdot T \cdot f(\alpha) \quad : \text{Laboratoire central d'hydraulique de France (L.C.H.F.)}$$

$$Q = K_3 H^2 C_0 \sin \alpha b \cdot \cos \alpha b \quad : \text{Coastal engineering research center (C.E.R.C.) - U.S.A.}$$

avec

Q	=	débit solide (transit littoral) en m ³ /s
K ₁ , K ₂ , K ₃	=	coefficients empiriques
f(α)	=	fonction de l'angle d'incidence de la houle avec le rivage
C	=	célérité de la houle au large
αb	=	angle d'incidence de la houle, au déferlement, avec le rivage

L'application de ces formules empiriques à un segment côtier nécessite la connaissance précise du régime et des caractéristiques (H, T, α) de la houle au large ou au voisinage du déferlement, des durées d'action de la houle pour les diverses combinaisons des paramètres (H, T, α), de la granulométrie des sédiments de plage, de la morphologie de la côte et de la bathymétrie des fonds marins.

Ces formules ne peuvent donner qu'un ordre de grandeur ou une première approximation du transit littoral de sédiments non cohésifs, qu'il est préférable de vérifier par des mesures in situ et/ou des simulations en laboratoire (modèles réduits) avant de réaliser des aménagements portuaires ou des travaux importants de défense côtière.

Il est à noter que les estimations données par ces formules ne permettent pas de prendre en compte les échanges sédimentaires transversaux, dans le profil de la plage, ni les transports sédimentaires résultant de l'action combinée de la houle et des courants induits par le vent et la marée.

2.5. ALEAS ET RISQUE LITTORAL

Les thèmes présentés ci-après sont également issus et adaptés d'un exposé présenté lors du colloque de Biarritz "Mer et Littoral : couple à risque" (Quélenec, 1987b).

2.5.1. Aléas, vulnérabilité et risques : rappel de quelques définitions

En se basant sur les concepts préconisés par l'UNDRO et l'UNESCO pour les "risques naturels", on peut proposer les définitions suivantes :

- aléa (A) : il est défini, en un site côtier donné, par la probabilité d'occurrence ($p(E(i)) = A$), sur une période de référence donnée, d'un événement E (i), d'intensité donnée (i), générateur de processus d'érosion littorale,

- vulnérabilité (V (i)) : rapport au coût des dommages au coût global (C) de remplacement (ouvrages, habitations) et de perte d'usage ou de restauration. La vulnérabilité d'un "ouvrage" dépend à la fois de l'intensité (i) de l'événement générateur d'érosion, de sa situation par rapport au littoral et des ses caractéristiques : modes de construction, systèmes de protection,

- risque d'érosion littorale (R) : il peut se définir par analogie avec le risque sismique, comme l'espérance mathématique des dommages liés à l'érosion du littoral sur un site donné et durant une période de référence. Pour un événement donné (E) dont l'intensité est comprise entre i et i + di, R peut s'écrire :

$$dR = C.V(i).A$$

ou

$$R = \int_0^{\infty} V(i).A$$

Quand plusieurs événements indépendants (E1, E2, E3) concourent à générer des processus d'érosion (exemple : tempête sur marée de vive eau en période de séismes), l'aléa se définit comme :

$$A = (E1) \times p(E2) \times p(E3)$$

2.5.2. Evénements majeurs, causes d'instabilité ou de changement d'état du système littoral

2.5.2.1. Actions anthropiques

On les rappellera, pour mémoire, en les classant en fonction de leurs interactions avec le système littoral (Quélenec, 1981) :

- modification des échanges avec l'arrière-plage : artificialisation du rivage, dégradation des dunes, extraction de sables et galets, aménagement des graus, des embouchures, barrages en rivière, rejets miniers, poldérisation,

- modification des échanges latéraux : construction de digues et jetées portuaires, d'épis, de brise-lames, creusement et dragage de chenaux d'accès, protection des zones-sources (falaises, cordons et dunes), réduction des apports fluviatiles,

- modification des conditions d'action de la houle et des courants : destruction des herbiers, champs d'algues et mangroves, réduction des volumes oscillants dans les estuaires et les golfes,

- modification de la topographie sous-marine : extraction de sédiments, dragages, dépôts sous-marins, rejets miniers.

2.5.2.2. Evénements naturels majeurs

Comme la majorité des systèmes "naturels", le système littoral doit tendre vers l'équilibre, c'est-à-dire un fonctionnement "stable" en moyenne, dans l'hypothèse où les échanges avec le milieu ambiant sont "stationnaires" (Quélenec, 1987b).

Le basculement saisonnier d'une plage, le recul ou l'avancée annuelle du trait de côte sont des manifestations "normales" du fonctionnement du système, tant qu'elles sont réversibles. Dans ces conditions, le bilan sédimentaire du système s'équilibre sur une période de référence donnée.

Deux types d'événements "naturels" sont susceptibles d'altérer la stabilité du système littoral et de créer des modifications irréversibles de l'état du système :

- les phénomènes de variation lente, subsidence et surélévation du niveau marin,
- les événements paroxysmiques ou brutaux : tempêtes et surcotes, séismes, mouvements de masse.

2.5.3. Variations du niveau marin

2.5.3.1. Variations passées

Les nombreux épisodes de glaciation et de réchauffement accompagné de déglaciation que la Terre a connus, ont engendré des variations importantes du niveau marin, avec des phases régressives qui ont atteint -110 m à -120 m au Quaternaire (Ogolien), vers -18 000 ans, sur la plupart des côtes (fig. 2.9).

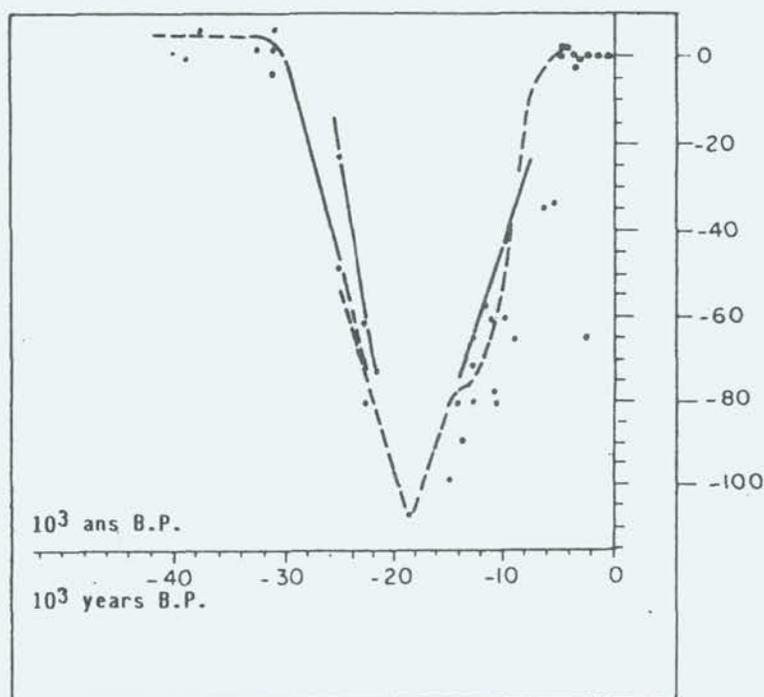


Fig. 2.9. - Variations du niveau de la mer au Quaternaire sur les côtes africaines.

Fig. 2.9. - Quaternary sea level variations on Africa coasts.

(Chateauneuf, 1986)

Depuis -16 000 ans environ, la tendance climatique est au réchauffement, avec surélévation progressive "rapide" (8 mm/an) du niveau marin, lequel a atteint ou dépassé (de +2 à +4m), selon les régions du Monde, le niveau actuel vers -5 000 ans environ, pour redescendre ensuite au niveau présent.

Depuis la fin du siècle dernier, on assiste à une nouvelle phase de réchauffement (+0,4°C en moyenne depuis 1880) et à une nouvelle phase de transgression marine.

Les variations récentes du niveau marin, estimées grâce à l'analyse et au filtrage des observations marégraphiques, sont variables selon les continents. Pour les pays du Nord de l'Europe, du Danemark à la péninsule scandinave, on assiste à une surrection (glacio-isostasie) du continent, et donc à une baisse "relative" du niveau marin de -1 à -9 mm/an (golfe de Botnie). Pour les côtes occidentales européennes, on a pu estimer la surélévation relative du niveau marin à +2 mm/an, grâce à la bonne concordance des tendances entre les relevés marégraphiques de Brest, France (2,1 mm/an), de Newlyn (Angleterre) et de postes situés sur la côte hollandaise (1,5 à 2,5 mm/an). Sur les côtes américaines du golfe de Mexico, la surélévation est de +2,0 à +2,5 mm/an, avec des valeurs de +9,0 mm/an dans la zone du delta du Mississippi, en raison des phénomènes naturels et artificiels de subsidence. Pour les côtes d'Afrique de l'Ouest et du Centre, les données marégraphiques disponibles à Santa Cruz de Tenerife, Dakar et Takoradi, depuis 30 à 40 ans, indiquent une surélévation moyenne de l'ordre de 2,0 mm/an (fig. 2.10).

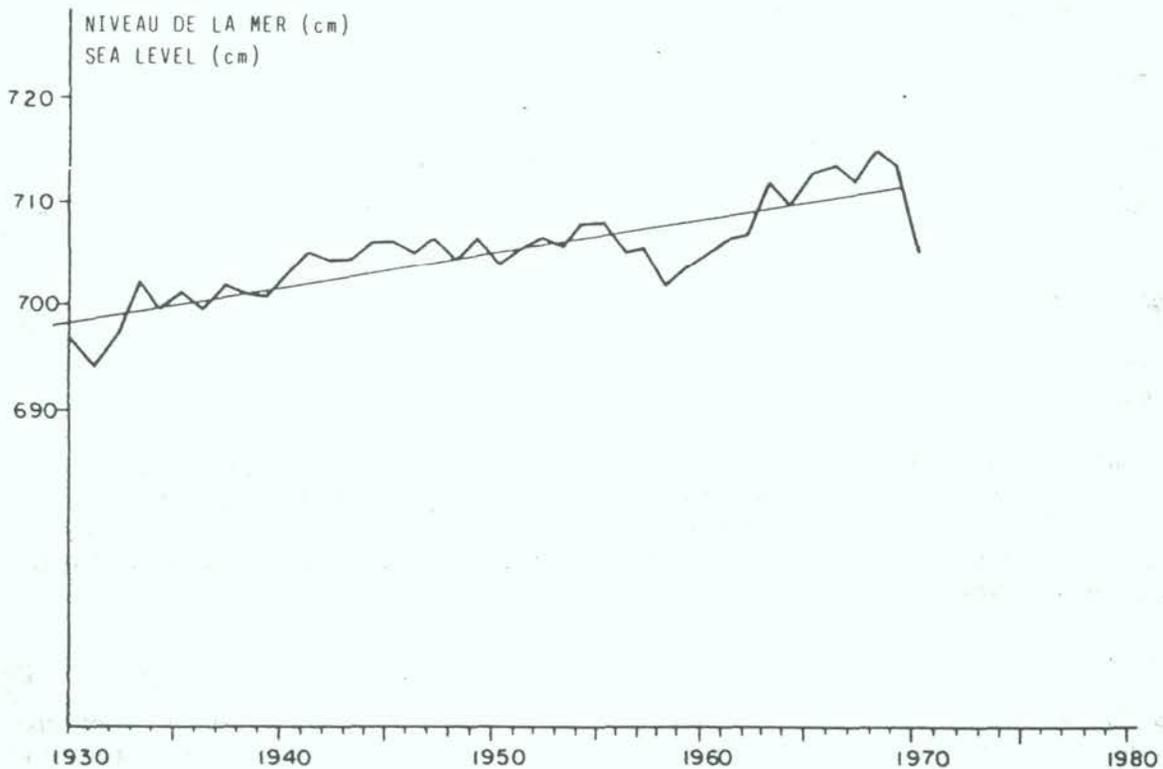


Fig. 2.10. - Variations récentes du niveau de la mer à Takoradi (Ghana)

Fig. 2.10. - Recent sea-level variations at Takoradi (Ghana).

2.5.3.2. Variations futures

Elles font l'objet de nombreux travaux internationaux de recherche, liés notamment à l'étude des conséquences d'un réchauffement de l'atmosphère terrestre induit par les émissions de CO₂ et de gaz traces : "effet de serre" (greenhouse effect).

Les physiciens et climatologues considèrent qu'un doublement de l'émission de ces gaz pourrait conduire à une élévation de la température moyenne de l'atmosphère de +1,5°C à +4,5°C, et qu'en raison de phénomènes d'inertie (thermique, océanique, sociale), le phénomène d'accélération de la remontée du niveau marin à court et moyen termes est "inévitable".

C'est une conclusion "forte". Les divers scénarios les plus récents développés à l'initiative de l'U.S. EPA (Environmental Protection Agency), de l'U.S. NAS (National Academy of Sciences) et du PNUE, concluent aux fourchettes de prévisions suivantes, pour la surélévation

moyenne additionnelle (entre 1980 et 2025 ou 2100) du niveau marin comme conséquence du réchauffement atmosphérique :

	Année 2025	Année 2100
Hypothèse basse	+13 à +26 cm	+ 56 à +144 cm
Hypothèse haute	+21 à +55 cm	+345 à +368 cm

Ces estimations prospectives sont lourdes de conséquence pour l'évolution du milieu littoral, et il apparaît essentiel d'en tenir compte dans tout schéma d'aménagement et de protection côtière.

Les conséquences probables les plus significatives liées à une telle évolution régressive, qui tendra à accentuer le risque littoral, sont de types suivants (Quélenec, 1987b) :

- érosion et modification de la morphologie côtière avec recul du trait de côte,
- inondations des zones humides côtières,
- réduction de l'efficacité des structures de défense côtière et risques de ruine des ouvrages,
- dépôts sédimentaires fluviaux au niveau des embouchures actuelles,
- dommages aux réseaux littoraux de subsurface, pour le drainage, l'évacuation des eaux, les services.

Il apparaît donc nécessaire de prendre en compte, dès aujourd'hui, le facteur prospectif "surélévation du niveau marin" dans toute étude de protection, d'aménagement et de planification des zones littorales, sans attendre que des progrès significatifs dans les modèles et scénarios prévisionnels permettent de réduire les fourchettes de valeurs actuellement disponibles sur la remontée moyenne du niveau marin.

2.5.4. Subsidence

Les phénomènes de subsidence, naturels ou induits par l'Homme, affectent de nombreux littoraux, notamment dans les zones d'accumulation sédimentaire (deltas, estuaires et marais), au voisinage de failles actives ou en bordure des zones en surrection.

Les zones deltaïques sont spécialement sujettes à des phénomènes de subsidence, par tassement des dépôts sédimentaires et réajustements isostatiques : 0,6 mm/an depuis 2000 ans sur la partie orientale du delta du Rhône (France), 0,3 à 1,0 mm/an au large du delta du Mississippi (U.S.A.).

Dans le secteur oriental du lac de Macaraïbo, au Venezuela, la subsidence des rivages, sous l'effet des extractions pétrolières, a atteint 4 m en 50 ans d'exploitation, soit une moyenne de 80 mm/an dans un secteur donné. Les champs pétroliers de la Mer du Nord et du delta du Niger sont sujets aux mêmes problèmes de subsidence : des valeurs de 25 mm/an sont citées pour le delta du Niger (Ibé, 1987).

Les phénomènes conjugués de surélévation du niveau marin et de subsidence ont des impacts très significatifs dans les zones côtières humides : environ 1/2 million d'hectares a été envahi par la mer ou érodé sur les côtes de Louisiane (U.S.A.) depuis le début du siècle, soit environ 130 km²/an, sous les effets conjugués des facteurs précédents.

2.5.5. Tempêtes et surcotes marines

2.5.5.1. Houles et tempêtes

Les vagues et houles générées par le vent constituent le vecteur principal d'échange d'énergie du "système littoral" avec le milieu extérieur. Cette énergie peut être représentée, en un point et sur une période de temps donnés, par un spectre directionnel qui tient compte de l'origine et de la direction de propagation de la houle.

L'énergie totale transmise par la houle, par unité de longueur de crête "au large" d'un site côtier donné, est proportionnelle à (H^2T) . Le flux d'énergie transmis par la houle au large des côtes varie régionalement et saisonnièrement.

De plus, la répartition de l'énergie de la houle lors de son transfert du large à un secteur côtier donné (réfraction) est fonction de la topographie sous-marine, qui favorise la concentration et l'épanchement de cette énergie sur des "segments côtiers" donnés.

On peut donc considérer que la morphologie côtière résulte d'une évolution progressive qui tient compte, notamment, de l'histoire géologique et sédimentaire, et de la répartition de cette énergie dans l'espace et le temps. Un secteur littoral "isolé" (ex. : plage séparée par des caps rocheux) est composé de segments côtiers dont la morphologie (orientation, profil) et la granulométrie sont des caractéristiques variables en "équilibre", à un moment donné, avec les conditions de houle.

Un des problèmes que l'on est amené à se poser est celui de savoir si les fortes houles de tempêtes peuvent "déstabiliser" un secteur littoral (système) de façon "irréversible". Pour tenter d'apporter des éléments de réponse à cette question, nous considérerons les facteurs principaux suivants : énergie transmise, répartition dans le temps et l'espace, et phénomènes induits (Quélenec, 1987b).

Energie transmise

Entre une houle "annuelle" et une houle "centennale" de même période, le rapport des énergies transmises n'est que de 3,2, ce qui signifie que ce rapport ne varie que de 1 à 10 selon la période (T) considérée.

Répartition de l'énergie de la houle

La propagation de la houle à la côte, après réfraction, a pour effet d'amplifier le rapport précédent dans le cas de convergence des orthogonales : le rapport précédent peut alors théoriquement être multiplié par un facteur de 1 à 10 pour certains segments côtiers, alors que d'autres segments voisins sont plus protégés du fait que la houle s'y épanche (Fig 2.11).

Dans ce cas, on comprend que, du fait notamment du transit littoral, les échanges sédimentaires de ces segments voisins s'intensifient lors des fortes tempêtes. Ces variations brutales de flux peuvent induire des variations de stocks sédimentaires (dSSM), cause éventuelle d'instabilité localisée du système littoral.

Phénomènes induits

La surélévation transitoire moyenne du niveau de la mer due au déferlement de la houle lors des tempêtes, sur une plage, peut s'exprimer en première approximation par $R \simeq 0,19 H_b$, où H_b est la hauteur de la houle au déferlement. Pour une plage de pente 5%, une houle caractérisée par $H_0 = 3$ m et $T = 10$ s, et un coefficient de réfraction égal à 1, $R \simeq 0,8$ m. Cela indique que cette surélévation (wave run-up) "active" une nouvelle tranche de la plage aérienne d'environ 16 m de largeur, rarement soumise à l'action directe de la houle. Ce phénomène est encore amplifié par la "surcote" barométrique.

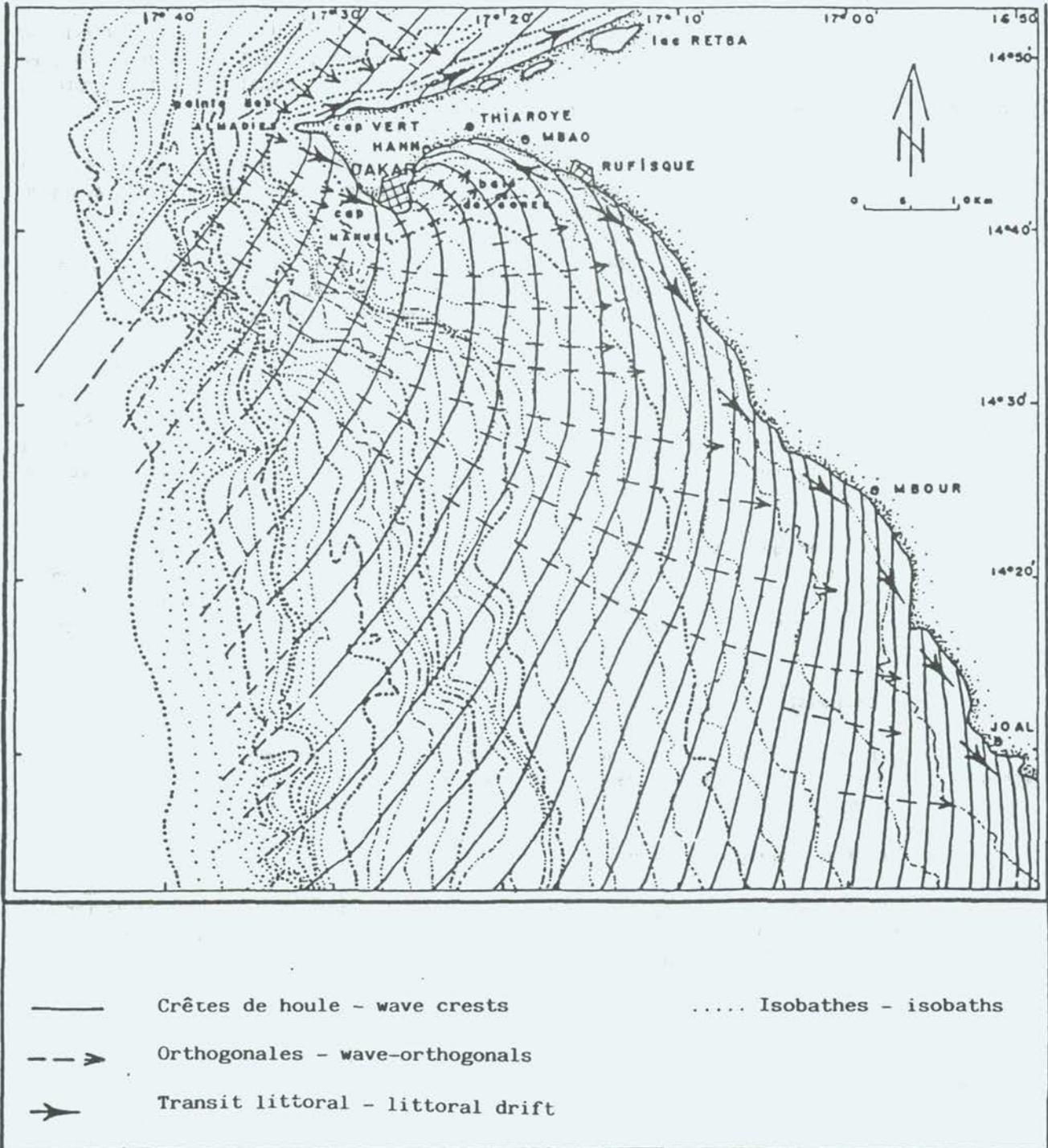


Fig. 2.11. - Réfraction de la houle sur la côte au Sud de Dakar (Sénégal).

Fig. 2.11. - Wave refraction on the coast south of Dakar (Senegal).

(Riffault, 1980)

2.5.5.2. Surcotes

La surcote est définie comme la différence d'amplitude entre la marée théorique et la marée observée. Elle est fonction, notamment, des conditions barométriques et morphologiques des sites côtiers.

Les surcotes dues aux dépressions barométriques et à l'afflux d'eau au rivage sous l'effet des transferts de masses, sont d'autant plus importantes que la profondeur des fonds marins est faible. Elles peuvent atteindre des valeurs de 1 à 2 mètres sur les côtes européennes (fig. 2.12), avec des valeurs exceptionnelles supérieures à 2,5 m. Pour la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre, les données statistiques sur les surcotes font défaut.

On constate donc que la surcote totale (surcote barométrique et surélévation due à la houle) lors des tempêtes, est un des facteurs de risque les plus importants pour l'érosion littorale. En effet, l'occurrence de surcote facilite l'action brutale des houles de tempête sur des portions de plage "aérienne" (ou sur l'arrière-plage) qui ne possèdent pas une morphologie "d'équilibre" initiale leur permettant de "résister" à l'action de la houle. La conséquence de cette action est la déstabilisation et/ou l'érosion des structures sédimentaires de haut et d'arrière plages, qui sont des phénomènes "quasi irréversibles" à court et moyen termes (Quélenec, 1987b).

2.5.5.3. Ondes longues : seiches

Les lacs, les baies fermées, rades, goulets, lagunes littorales et les ports peuvent, sous certaines conditions, être le siège d'ondes oscillatoires longues (influences barométriques, vents, glissements sous-marins) ou seiches.

De telles oscillations des plans d'eau peuvent être la cause de dégâts importants dans les ports, ainsi que sur les littoraux.

2.5.6. Séismes

2.5.6.1. Tsunamis

Les tsunamis sont des ondes de gravité de grande période qui se forment dans les océans, à la suite de séismes ou de glissements sous-marins, se propageant rapidement en eau profonde, à la vitesse $V = (gZ)^{1/2}$ où Z = profondeur. Pour $Z = 200$ m :

$$V = 45 \text{ m/s ou } 162 \text{ km/h.}$$

L'amplitude des tsunamis en eau profonde est faible (H de 0,1 à 1 m), mais leur période et leur longueur d'onde (L) sont très longues : L peut varier de 50 à 150 km sur le plateau continental.

Malgré l'activité sismique relativement forte qui règne dans certaines régions d'Afrique de l'Ouest et du Centre (Guinée, Ghana), la littérature disponible ne mentionne pas l'existence de dégâts associés à des tsunamis.

2.5.6.2. Mouvements de masse côtiers et glissements sous-marins

Outre l'impact des tsunamis, les événements sismiques introduisent directement ou indirectement des modifications de la morphologie du système littoral (Quélenec, 1987b) :

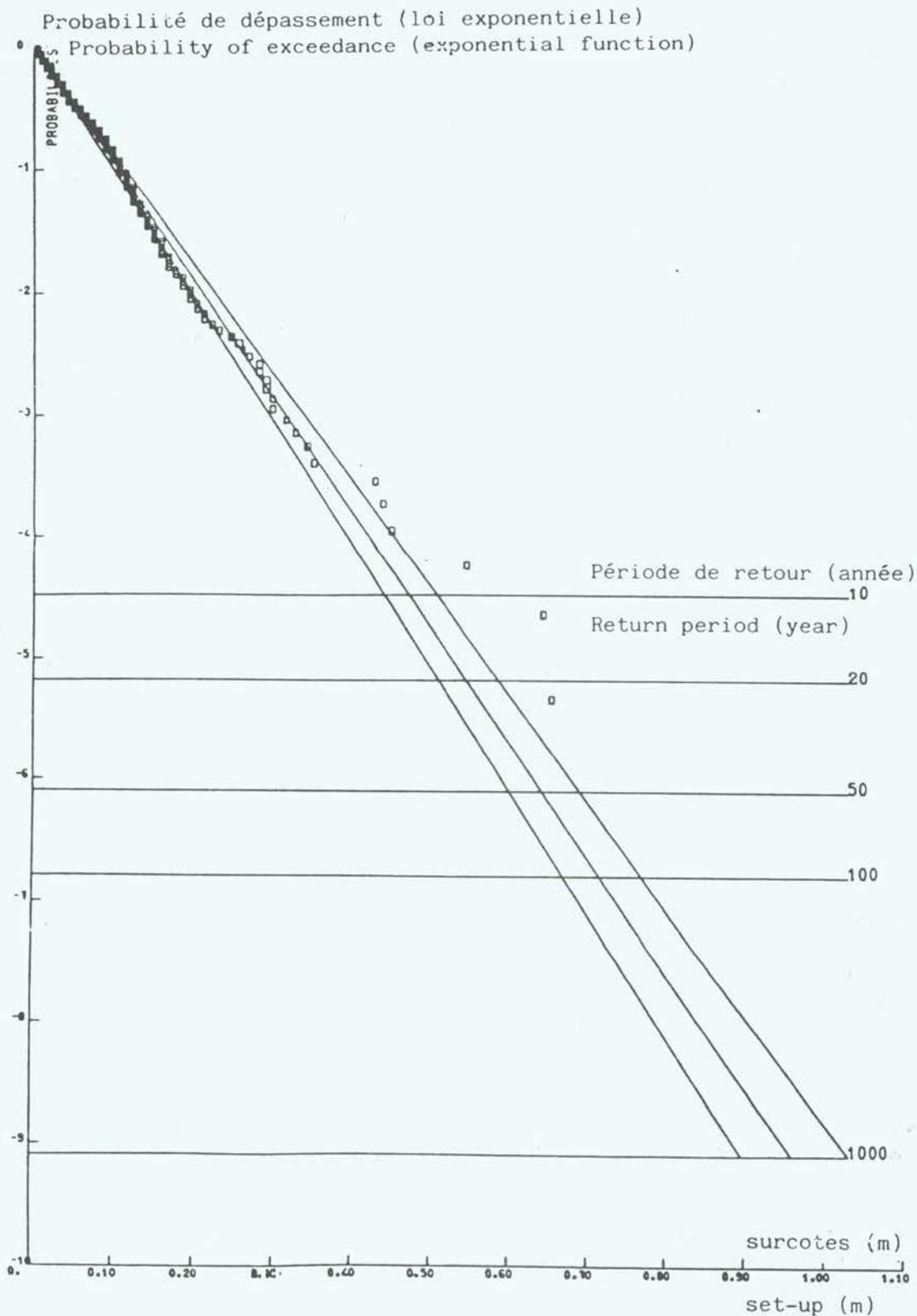


Fig. 2.12 - Estimation statistique des surcotes marines à Granville, France (E.D.F./L.N.H.)

Fig. 2.12 - Statistical estimates of sea-level set-up at Granville, France (E.D.F./L.N.H.)

- effondrements et mouvements de masse côtiers : comme exemple récent fameux, on peut citer ceux du séisme d'Alaska, en mars 1964, notamment à Valdez (75 Mm³), à Seward et à Anchorage (3 km de long sur 200 à 400 m de large), mais aussi de soulèvements de terrasses marines et côtières ayant atteint 4 à 8 mètres sur l'île de Middleton, dans le golfe d'Alaska. De nombreux autres exemples de tels phénomènes sont rapportés dans les régions côtières de forte à moyenne activité sismique, comme le Japon, les U.S.A., le Chili, la Méditerranée et la Manche,

- glissements sous-marins : en Afrique de l'Ouest, la forte activité sismique quasi-permanente et centrée à proximité de l'accident tectonique majeur de l'"Akwapin fault" et de la faille côtière "coastal boundary fault" (5 000 m de rejet), au Ghana (Bellion, 1984), semble bien être la cause d'effondrements de la marge côtière et de glissements sous-marins qui ont affecté la zone deltaïque de la Volta, ainsi que les côtes des pays voisins : Côte d'Ivoire et Togo (Quélenec, 1987b). Les secousses sismiques induisent des phénomènes de liquéfaction des sédiments fluviaux ou marins saturés et instables, accumulés sur des pentes littorales et sous-marines (deltas) et en rebord des canyons sous-marins.

2.5.7. Liquéfaction des sédiments sous l'action de la houle

Sous l'effet combiné de surcotes et de contraintes de chargement cycliques dues à des houles de forte amplitude, les masses sédimentaires stockées sur les pentes sous-marines (deltas, rebords de canyons) peuvent perdre leur résistance au cisaillement et produire des écoulements de densité. Ce risque de glissement ou de liquéfaction peut être augmenté quand les sédiments marins emprisonnent des poches de gaz ou quand ils sont soumis à des charges supplémentaires dues, notamment, à des constructions artificielles de remblais côtiers insuffisamment drainés (Quélenec, 1987b).

De telles possibilités de glissements permettent de donner une explication aux reculs brutaux du littoral, observés à Port Bouet en Côte d'Ivoire, face au canyon du "Trou sans Fond" en 1905, 1959 et 1984 (Quélenec, 1984c) et à Cap Lopez au Gabon, en juillet 1971 (PNUE, 1985).

LISTE DES FIGURES DU CHAPITRE 2

- Fig. 2. 1 - Pente de la plage en fonction du diamètre médian (D) des sédiments et de l'exposition aux houles (Wiegel, 1964)
- Fig. 2. 2 - Diamètre médian (D) des sédiments en fonction de la profondeur (CNEXO, 1976)
- Fig. 2. 3 - Nomenclature de la plage théorique
- Fig. 2. 4 - Discrimination des plages sujettes à l'érosion ou à l'engraissement des plages du delta du Nil (Quélenec, 1984a)
- Fig. 2. 5 - Budget sédimentaire : principaux échanges (Quélenec, 1987b)
- Fig. 2. 6 - Débit solide éolien en fonction de la distance au dessus du sol (H) et de la vitesse du vent (LCHF)
- Fig. 2. 7 - Courants induits par la houle
- Fig. 2. 8 - Transport sédimentaire littoral
- Fig. 2. 9 - Variations du niveau de la mer au Quaternaire sur les côtes africaines (Chateaneuf, 1986)
- Fig. 2.10 - Variations récentes du niveau de la mer à Takoradi - période 1929-1978.
- Fig. 2.11 - Réfraction de la houle sur la côte au sud de Dakar, Sénégal (Riffault, 1980)
- Fig. 2.12 - Estimation statistique des surcotes marines à Granville, France (EDF/LNH)

TABLEAUX

- Tableau 2.1. Classement granulométrique des sédiments (AIPCN)
- Tableau 2.2. Diamètre granulométrique des sédiments cohésifs
- Tableau 2.3. Vitesse moyenne d'entraînement des sédiments par un courant sous une hauteur d'eau donnée.

3. FACTEURS CONDITIONNELS DE L'EROSION COTIERE EN AFRIQUE OCCIDENTALE ET CENTRALE

Parmi les facteurs qui affectent la nature du littoral de la région, on distingue les facteurs naturels et anthropiques (action de l'homme).

Parmi les facteurs naturels, on peut ranger l'action des différents facteurs hydrodynamiques (vents, vagues, marées, courants, modification du niveau de la mer), la nature géologique du trait de côte, ainsi que la nature du rivage (bas ou élevé, stable ou mobile), la largeur du plateau continental, la présence de canyons et de ravins sous-marins.

Les phénomènes dus à l'intervention de l'homme dans l'environnement naturel sont la conséquence des travaux de génie civil, de la destruction de la couverture végétale, de dragage et rejets miniers.

3.1. PHENOMENES HYDRODYNAMIQUES

3.1.1. Vent

Dans l'érosion des plages, le vent intervient directement, via la déflation éolienne, et indirectement en créant et propageant dans la mer des houles et des vagues, dont les effets sont décrits dans les chapitres 2 et 3.

Le phénomène de création et de migration des dunes littorales est particulièrement marqué à l'extrême nord et à l'extrême sud de la région où les déserts du Sahara et de Kalahari constituent respectivement des réserves de sédiments sableux et meubles. Lepple (1975) a estimé que 600 000 à 2 500 000 m³ par km de côte africaine de poussière éolienne venant du Sahara sont transportés annuellement vers la mer. La figure 3.1. montre des concentrations de poussière éolienne dans des sédiments marins au large des côtes de Mauritanie, du Sénégal et de la Guinée, mais les chiffres manquent pour la région du Sud de l'Angola.

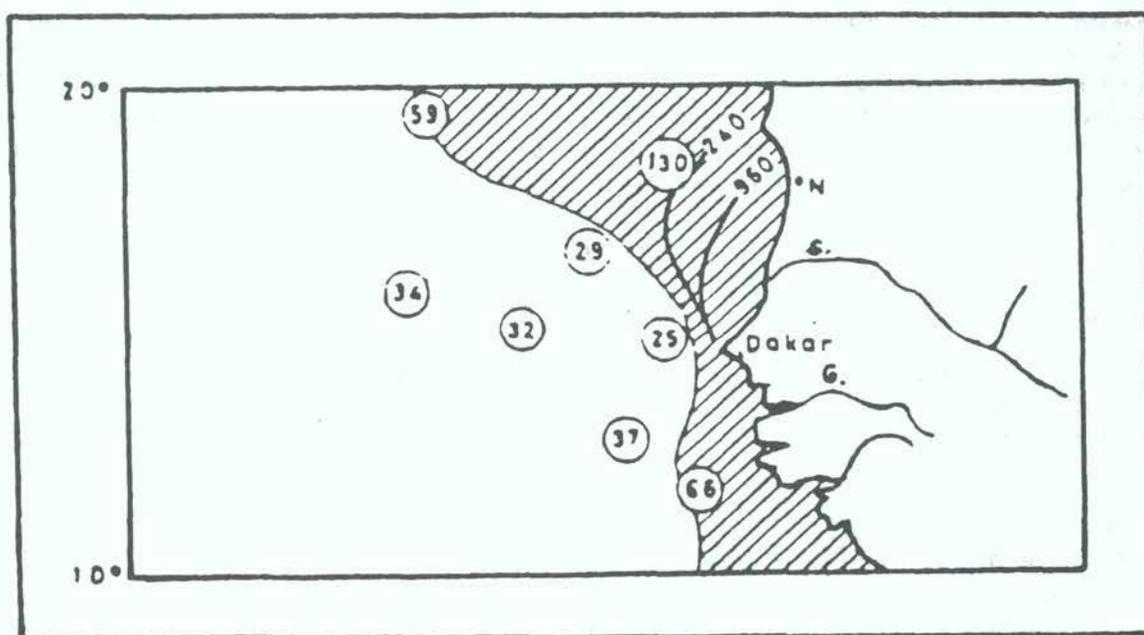


Fig. 3.1. - Concentration de poussières éoliennes (μ/m^3) en suspension sur le plateau continental sénégalais.
In Sall, 1982.

Fig. 3.1. - Eolian dust content (μ/m^3) over the Senegal continental platform.
In Sall, 1982

Il a été avancé (Pugh, 1954; Allen, 1965) que l'action du vent dans le reste de la région, et en particulier le long des littoraux humides tropicaux, ne se fait pratiquement pas sentir étant donné que la forte pluviosité et humidité de cette sous-région favorise la cohésion du sable des estrans de plage et leur fixation rapide par la végétation.

La présence de systèmes de dunes côtières plus ou moins végétalisées en arrière de nombreux secteurs du littoral et de la région (Gambie, Bénin, Côte d'Ivoire, Cameroun atteste cependant la présence de transports éoliens passés et actuels, en raison de la forte insolation qui y règne (Ibé et al., 1984, 1985).

Une érosion spectaculaire de la côte, accompagnée de changements significatifs et brutaux de la morphologie du littoral peut être provoquée par les tempêtes créées dans cette région par les perturbations météorologiques tropicales. Leur effet se trouve renforcé lorsqu'elles coïncident avec des marées exceptionnelles (marées de printemps, dépressions atmosphériques).

Ibé et al. (1984) décrivent une situation en octobre 1983 où des vents anormalement forts coïncidant avec de fortes marées de printemps, ont provoqué une importante accumulation d'eaux côtières, à 1 m au dessus de leur niveau habituel, qui ont inondé de vastes régions tout au long du littoral bas du Nigéria. A Victoria Island, la plage a reculé de 3 mètres en 3 jours (Photo fig. 3.2). A Escravos, sur le delta du Niger, une brèche a été ouverte dans une flèche de formation ancienne et très solide près du siège de la Compagnie Gulf Oil à Escravos, et depuis lors, l'érosion attaque aussi bien l'îlot ainsi formé que la flèche (Photo fig. 3.3).

De même, Quélenec (1984c) fait état d'une tempête survenue à la mi-juillet 1984 en Côte d'Ivoire, qui a provoqué des retraits de 10 à 20 mètres sur la côte de Port Bouet, et la destruction de certaines maisons. Les tempêtes de l'été 1984 qui ont sévi sur le littoral ivoirien ont laissé des microfalaises d'érosion de Noumouzou à Grand Jacques, particulièrement autour de Toukouzou et de Addah. Ces tempêtes ont également ravagé la zone de Gbamble-Azuretti-Grand Bassam. A cet endroit, l'étroite barre côtière est immergée ou provisoirement interrompue lors des tempêtes qui se produisent à marée haute. Au cours d'une tempête de l'été 1965, la côte a été submergée ou interrompue en plusieurs endroits, ce qui a provoqué un retrait de la plage de 10-15 mètres au Grand Bassam, à 3 km du restaurant "Taverne Bassamoise", ainsi qu'à l'est du quartier France. Les habitations côtières (Apatams), ainsi que sept rangées de la palmeraie de cocotiers au voisinage de la Taverne ont été détruites, et la mairie de Grand Bassam et le quartier sud ont été inondés. L'impact des tempêtes saisonnières n'a pas été moins grave dans la zone côtière entre Assouinde et Assinie, où se trouvent deux complexes hôteliers de renommée mondiale (Quélenec, 1984c).

En Angola, de fortes tempêtes ont provoqué une nouvelle brèche dans la partie sud de l'Ilha de Luanda, isolant ainsi une flèche sableuse de 1,5 km de long, qui subit depuis lors une érosion rapide (Guilcher et al. 1974).

Selon un rapport du PNUE (1985), la flèche sableuse de Sangomar au Sénégal subit des retraits catastrophiques pendant les tempêtes, mais les attaques demeurent peu fréquentes et le retour à des conditions météorologiques calmes favoriserait la reconstitution progressive de cette flèche.

Sur la côte togolaise, les tempêtes ont fait reculer la plage de 25 mètres en une semaine entre PK 29 et 31, le recul atteignant 15 m sur deux jours en mai 1984 (Wharf de Kpeme). Cette tempête a provoqué un retrait côtier qui a dénudé partiellement les piles du wharf et qui s'est étendu jusqu'à Aneho (Oliveros, Quélenec, 1985).

La ville de Grand Popo au Bénin, située sur une barre de sable basse et très longue, a été soumise aux assauts de la mer, et a été inondée pendant les tempêtes d'août-septembre 1984.

L'érosion observée en général dans les îles de Sao Tomé ou de Principe se produit pendant les périodes de fortes tempêtes.



Fig. 3.2. - Erosion côtière à Victoria Island (Nigéria) après 3 jours de tempête (Ibé).

Fig. 3.2. - Coastal erosion at Victoria Island (Nigeria) after a 3 days storm (Ibé).

Fig. 3.3. - Flèche sableuse à Escravos (Nigéria) coupée par la tempête de 1983 (Ibé).

Fig. 3.3. - Sand spit cut at Escravos (Nigeria) by the 1983 storm (Ibé).



Le vent peut également provoquer des phénomènes comme le transport direct du sable au-delà de la zone de déferlement.

3.1.2. Vagues et houles

Les vagues et les houles générées par le vent, et les courants induits par les vagues, sont les deux forces les plus importantes qui influencent et déterminent le comportement dynamique des plages. Les vagues sont le résultat d'un transfert d'énergie cinétique du vent à la mer. Le mécanisme de ce transfert d'énergie, qui dépasse le cadre de ce manuel, a été décrit par Jeffreys (1923), Sverdrup et Munk (1947), Philips (1957) et Miles (1965-67) entre autres. Les caractéristiques (H,T) des vagues sont déterminées principalement par la vitesse du vent et sa durée, ainsi que par l'étendue d'eau sur lequel il souffle, que l'on appelle "fetch" (fig. 3.4).

Les vagues jouent un double rôle dans le transport sédimentaire sur les plages : oscillation et suspension des sédiments de la plage, et génération de courants qui transportent et provoquent la dispersion de ces sédiments.

Le transit littoral des sédiments sous l'action de la houle (paragraphe 3.4.3) est directement proportionnel à l'énergie de la houle (H^2T) et à sa cambrure (H/L).

La majorité des plages de la région d'Afrique de l'Ouest et du Centre sont fortement battues par des houles de grande énergie, générées par des vents provenant de noyaux de tempête situés dans l'Atlantique, et qui peuvent souffler sur de longs "fetchs". La figure 3.5. résume les principales caractéristiques des houles que l'on rencontre sur les côtes atlantiques de l'Afrique. On observe deux systèmes dominants : au nord de la région, de la Mauritanie à la Casamance, la houle vient du nord ou du nord-est, alors que dans la partie centrale et vers le sud, de la Guinée-Bissau à l'Angola, la houle prédominante est de provenance sud/sud-est. Selon Ibé et al. (1984), l'énergie des vagues le long de la côte du Nigéria atteint parfois 80 kilojoules par mètre de crête, tandis que la cambrure des houles (H/L) varie de 0,023 à 0,070.

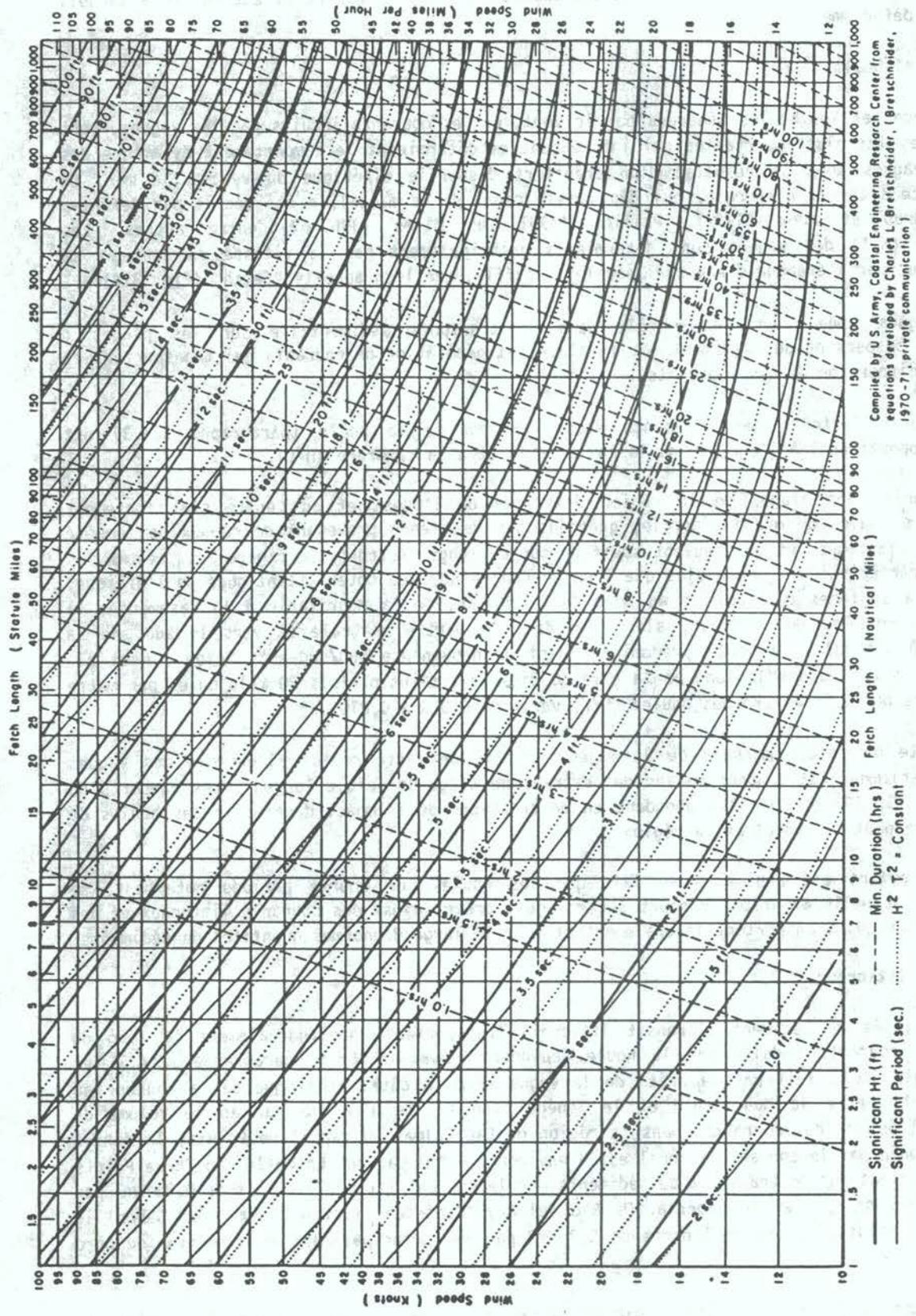
Par suite du faible marnage de la majeure partie de cette région, l'énergie des vagues libérée au déferlement est concentrée sur des estrans de plage de faible largeur. Les rapports du PNUÉ (1985, pp 79, 103 et 113-117) abondent en descriptions de l'impact destructif des houles de tempêtes qui frappent les côtes de la région.

Plus important est peut-être le fait que les houles, de courte période notamment, se présentent souvent obliquement par rapport aux rivages, créant ainsi des courants littoraux et des courants de retour qui transportent latéralement et vers le large d'énormes quantités de sédiments.

3.1.3. Courants littoraux

Les quantités de sédiments (transit littoral) transportées longitudinalement le long du rivage par les courants induits par la houle dépendent notamment (voir paragraphe 2.4.3. et 4.3.5) de l'angle (α) fait par la crête de la vague avec la côte, ainsi que de la hauteur au déferlement (Hb). Entre la Mauritanie et le Sénégal, on estime à 1 Mm³ par an le volume de sédiments entraînés par ces courants. Dans la région du Cap Palmas au cap Three Points, la dérive littorale provoquée par le courant littoral est d'environ 0,8 Mm³ par an. Entre le cap Three Points et Lagos, les estimations de transport de sédiments par le courant littoral varient de 0,25 Mm³ par an au Ghana à 1,5 Mm³ par an au Nigéria. De Rio del Rey (Cameroun) au Cap Lopez (Nord Gabon) le transit littoral n'est plus que de l'ordre de 0,2 Mm³ par an, principalement en direction du nord (fig. 3.6).

L'interruption du transit littoral par les graus, estuaires, canyons sous marins ou par des structures artificielles (digues, épis) implantées sur les estrans de plage, joue un rôle important dans le budget et l'équilibre sédimentaire des unités littorales (paragraphe 2.3.2.3).



Compiled by U.S. Army, Coastal Engineering Research Center from equations developed by Charles L. Bretschneider, (Bretschneider, 1970-71, private communication)

Fig. 3.4. - Estimation des caractéristiques des houles au large en fonction de la vitesse du vent, de la longueur du fetch et de la durée d'action du vent (pour des fetchs de 1 à 1000 miles)

Fig. 3.4. - Deepwater wave forecasting curves as a function of wind speed, fetch length and wind duration (for fetches 1 to 1,000 miles)

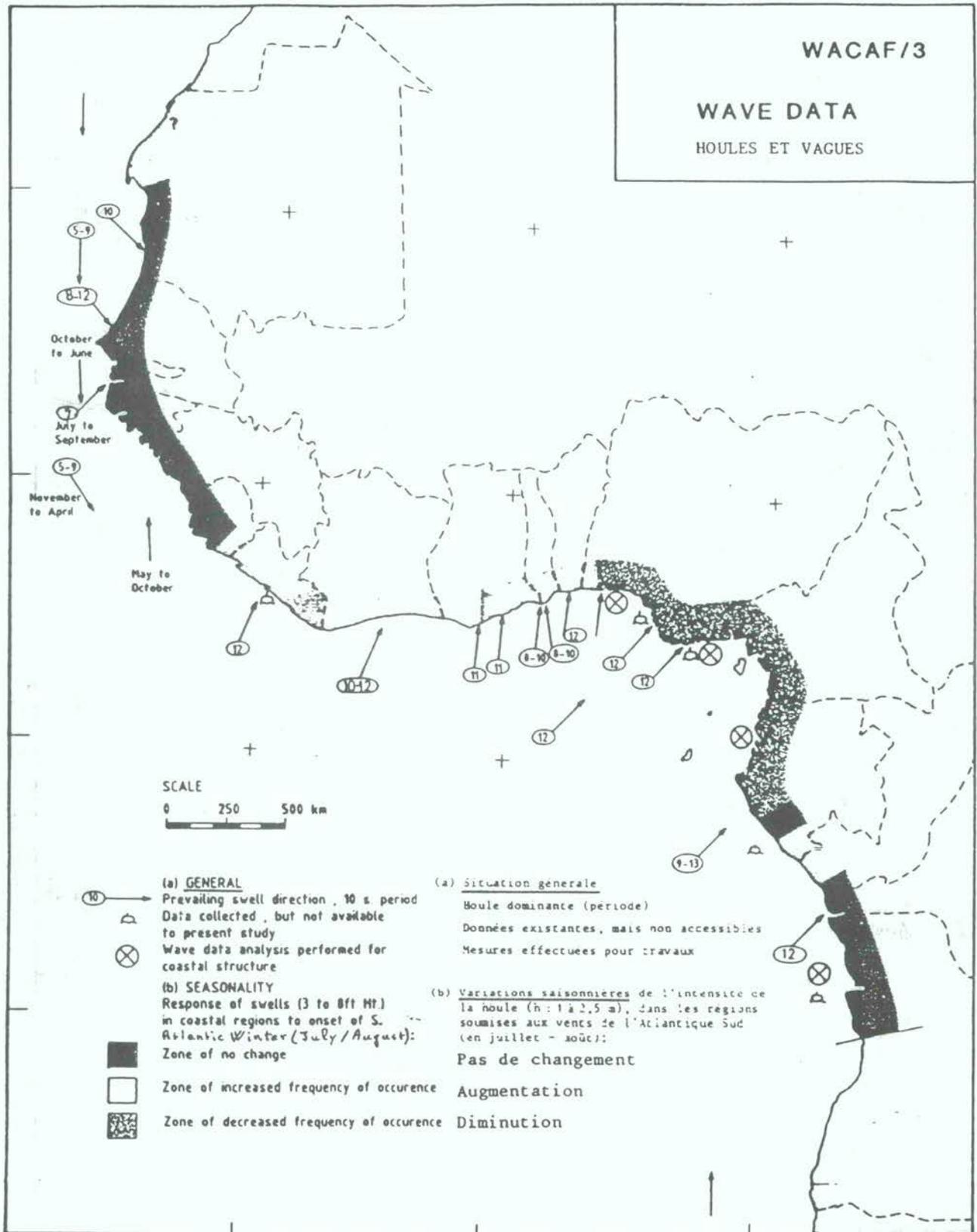


Fig. 3.5. - Caractéristiques des vagues dans la région.

Fig. 3.5. - Wave characteristics in the region.

(PNU/UNEP, 1985)

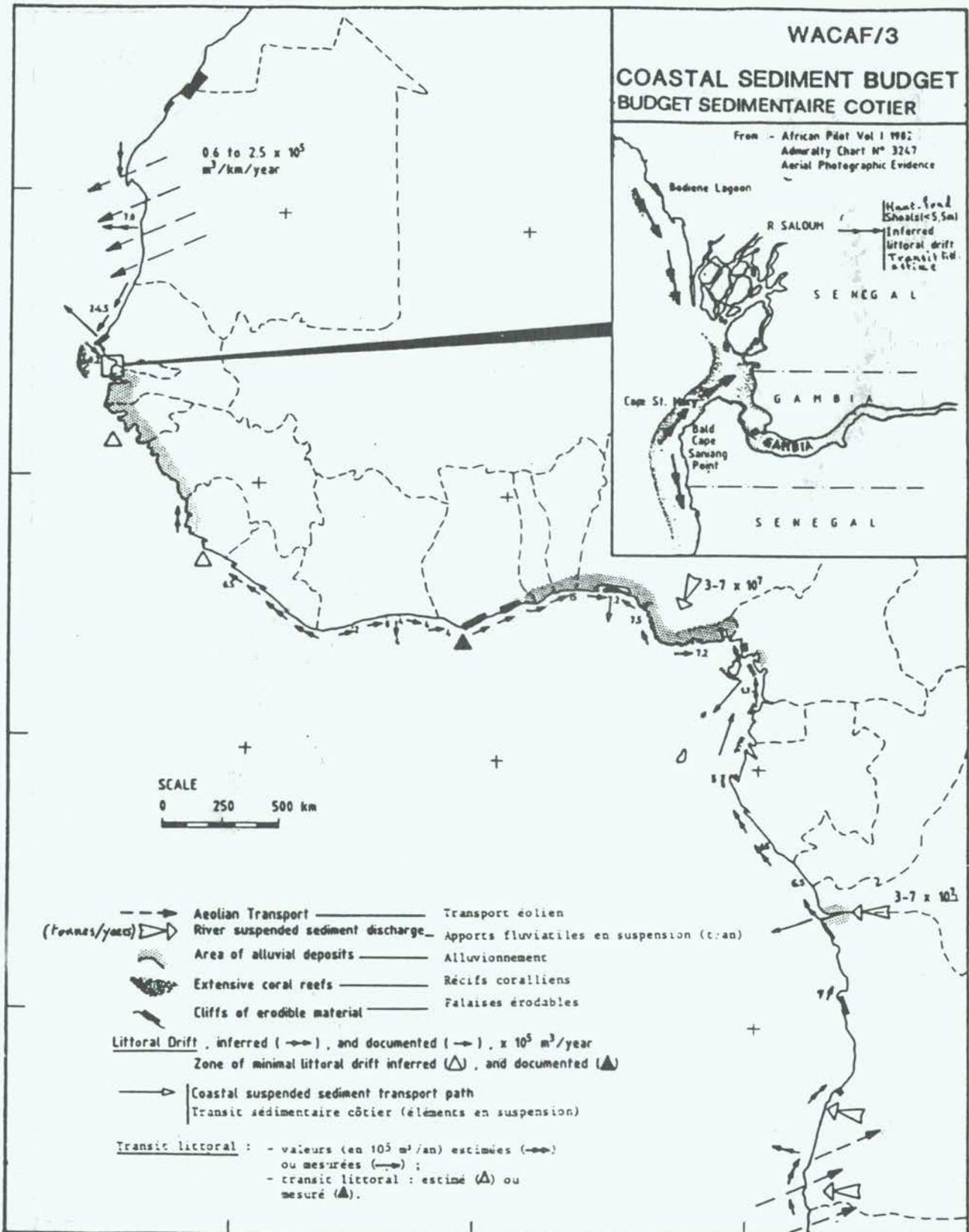


Fig. 3.6. - Elements du budget sédimentaire côtier dans la région.

Fig. 3.6. - Elements of the coastal sediment budget in the region.

(PNUE/UNEP, 1985)

3.1.4. Courants de retour

Les vagues déferlantes au voisinage des côtes produisent également un autre effet : il se forme des courants de retour, où l'eau accumulée au rivage retransverse la zone de déferlement dans des secteurs pouvant avoir jusqu'à 30 m de large, à des vitesses allant jusqu'à 2 m/s, avant de se disperser vers le large. Ces nappes d'eau en forme de chou-fleur peuvent transporter vers le large d'énormes quantités de sédiments, et jouer un rôle très important dans les phénomènes de transfert des sédiments vers le large, et d'érosion littorale.

Selon des expériences préliminaires effectuées par Ibé (1985) le long des côtes du Nigéria avec des colorants, des vitesses atteignant 1 m/s ont été mesurées dans des courants de retour.

On ne dispose que de très peu d'informations sur la capacité de transport sédimentaire des courants de retour dans d'autres endroits de la région.

3.1.5. Courants de marée

Au large de la côte de l'Afrique de l'Ouest et du Centre, la marée est principalement de type semi-diurne, avec deux hauteurs maximales et minimales par jour.

Le marnage varie à l'intérieur de la région (voir tableau 3.1), mais il reste généralement inférieur à 2 mètres, à l'exception des régions de Guinée-Bissau et de Gambie, où l'on trouve des marnages de 3,2 et 5,1 m respectivement. Par suite de ce faible marnage, on pense que les courants de marée sont en général faibles (PNUE, 1985). Ceci se vérifie en général pour les littoraux rectilignes faiblement indentés, mais la situation est différente pour des zones littorales avec présence de baies profondes, d'estuaires, et chenaux de marée.

Des études faites par exemple le long du Delta du Niger (Nigéria), ont montré que les marées semi-diurnes qui arrivent sur la côte en provenance du sud-ouest provoquent la formation de courants réversibles semi-permanents formant un angle important avec la côte. Ces courants transportent ainsi des sédiments vers le large en panaches bordés d'écume d'eau turbulente que l'on aperçoit au large jusqu'à des distances de 15 km (Nedeco, 1961 ; Allen, 1965 ; Ibé et al., 1984).

Les marées génèrent dans les graus et estuaires de forts courants de 0,6 à 1,8 m/s qui sont assez puissants pour déplacer le sable et même les graviers (Nedeco, 1961), mais les vitesses maximales allant de 0,6 à 2,8 m/s sont atteintes dans la barre des estuaires à marée descendante. Les marées montantes, de plus courte durée, ont des vitesses allant de 0,3 à 1,5 m/s. Selon Allen (1964), les vitesses maximales de courant calculées par la formule de Fleming (1938) et qui diminuent progressivement au fur et à mesure qu'augmentent la profondeur et la distance au rivage, sont capables d'éroder et de transporter les limons les plus grossiers et les sables les plus fins sur d'importantes zones du plateau continental. Au Cameroun, les courants de marée atteignent dans les estuaires des vitesses de 1,25 à 1,4 m/s, et dans l'estuaire du Gabon immédiatement au nord de Libreville, les courants de marée de 2 - 2,5 m/s jouent un rôle significatif dans la dynamique sédimentaire littorale.

3.1.6. Elevation eustatique du niveau de la mer

S'il est un phénomène à long terme qui possède son importance dans l'érosion du littoral, c'est l'élévation eustatique post-glaciaire du niveau marin, accélérée aujourd'hui par un effet de serre qui ne cesse de s'intensifier (paragraphe 2.5.3.). Cette hausse globale du niveau marin a déclenché une transgression lente mais continue de la mer, dont les effets sont très nets sur l'érosion du littoral de l'Afrique de l'Ouest et du Centre (fig. 3.7).

Tableau 3.1.

<u>COUNTRY</u> - PAYS	<u>PORT</u>	<u>TIDAL RANGE</u> (m) MARNAGE
Mauritania	Bahia de Villa Cisneros	1.9
	Nouadhibou	1.8
Senegal	St. Louis	1.2
	Dakar	1.3
Gambia	Banjul	1.6
Guinea Bissau	Bissau	5.1
Guinea	Conakry	3.2
Sierra Leone	Pepal	2.9
	Freetown	2.6
Liberia	Monrovia	1.1
Côte d'Ivoire Ivory Coast	Buchanan	1.0
	Abidjan	1.0
Ghana	Takoradi	1.3
	Accra	1.3
Togo	Lome	1.4
Benin	Cotonou	1.2
Nigeria	Lagos (Bar)	1.0
	Forcados Bar	1.2
	Bonny Bar	1.8
	Calabar Bar	2.0
Cameroon - Cameroun	Douala	2.0
Equatorial Guinea	Bata	1.6
Gabon	Libreville	1.6
	Cap Lopez	2.0
Congo	Pointe Noire	1.3
Zaire	Banana	1.3
Angola	Cabinda	1.8
	Luanda	1.2
	Lobito	1.2
	Mocamedes	1.2

- Tableau des marées (vive-eau) dans les principaux ports de l'Afrique de l'Ouest et du Centre

- *Western and Central African coastline tidal ranges*
(PNUE/UNEP, 1985)

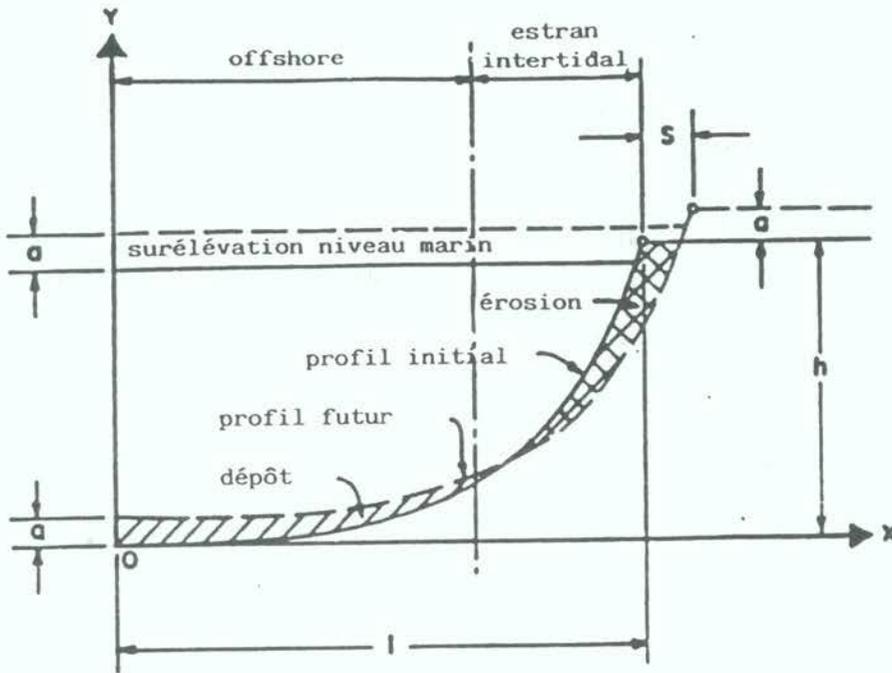


Fig. 3.7. - Evolution du profil de plage sous l'effet de la surélévation du niveau marin.

Fig. 3.7. - Beach profile evolution due to sea-level rise.

(Bruun, 1979)

Les conséquences graves qu'entraîne pour l'érosion cette hausse du niveau de la mer peuvent être déduites des travaux de Bruun (1977) qui ont montré qu'une élévation de 0,3 m peut entraîner des reculs côtiers de plus de 33 mètres, avec des possibilités de recul encore plus important (allant quelquefois jusqu'à des centaines et même des milliers de fois la distance verticale) dans les zones marécageuses à faible pente qui sont fréquentes dans la région. D'après la figure 2.10 (Verstraete et Picaut, 1983) l'élévation récente des niveaux marins à Tokoradi au Ghana s'accorde avec les tendances générales.

On trouve également des données spécifiques relatives à l'élévation du niveau marin dans des études faites sur la côte du Nigéria. Allen et Wells (1962b), par exemple, ont utilisé une série de bancs de coraux morts sur des hauts-fonds au large de la côte du Nigéria pour indiquer les étapes de la subsidence au cours des quatre mille dernières années. Selon Burke (1972), la subsidence observée (environ 80 m tous les 15 000 ans) dans le delta du Niger est provoquée par l'élévation eustatique du niveau de la mer et par les adaptations isostatiques correspondantes de la charge liquide.

3.2. FACTEURS GEOLOGIQUES ET GEOMORPHOLOGIQUES

Certaines caractéristiques géologiques et morphologiques à grande échelle comme le relief côtier, les dimensions du plateau continental, la présence de canyons sous-marins, ainsi que les possibilités de subsidence et de remaniement des stocks sédimentaires, jouent un rôle important dans l'occurrence des risques littoraux (paragraphe 2.5).

3.2.1. Relief côtier

On trouve des falaises côtières notamment sur certaines parties des côtes du Sénégal et de la Gambie, de l'ouest de la Côte d'Ivoire, du Ghana, du Cameroun et de l'Angola. Le reste du littoral de l'Afrique de l'Ouest et Centrale est caractérisé par des plages de plaine basse sableuses quelquefois adossées à des mangroves.

Les photos de la figure 3.8 (A et B) montrent deux plages typiques, l'une limono-vaseuse, l'autre sableuse le long du littoral du Nigéria, qui illustrent bien le caractère de plaine basse de la majorité des plages de la région. Ibé et al. (1985) font état de hauteurs topographiques de 0,8 et 1,8 m au dessus du niveau de la mer, dans la zone Awoye/Molome de la figure 3.8/A. Avec un marnage de 1,5 m environ, cela signifie que même lors de marées hautes normales, une grande partie des zones humides côtières est inondée par l'eau de mer. Selon Ibé et al. (1984), la pente des hauts estrans de plages dans le delta du Niger (Nigéria) est généralement de 1:15 à 1:20.

Par suite du relief peu élevé de cette région, toute élévation de la surface de la mer près de la côte provoque un transfert de l'eau vers la terre, transfert qui résulte en des submersions d'autant plus importantes que la pente et l'altitude des reliefs côtiers sont faibles.

3.2.2. Largeur du plateau continental

La côte de l'Afrique de l'Ouest et du Centre est bordée par un étroit plateau continental qui n'a que quelque 10 km de largeur au large de la péninsule du Cap Vert (Sénégal) et du Cap Lopez. Bien qu'il existe des secteurs isolés d'une grande largeur (200 km au large de la Guinée-Bissau et 100 km au large de la Mauritanie et du Ghana central), il est établi qu'en général, le plateau continental au large de l'Afrique de l'Ouest et du Centre est relativement étroit en comparaison avec d'autres plateaux continentaux du monde. Dans la région, la largeur du plateau atteint rarement les 80 km, et se situe le plus souvent entre 30 et 40 km.

Un plateau continental étroit fait que les crêtes des houles générées en haute mer peuvent se présenter très obliquement par rapport au rivage lors du déferlement, du fait qu'elles sont moins réfractées en passant sur les hauts-fonds, ce qui augmente leur capacité de transport sédimentaire (transit littoral).

Une autre conséquence de l'étroitesse du plateau continental est que les sédiments arrachés au rivage sont transférés plus facilement par les courants dans les eaux plus profondes, principalement dans les périodes de tempête.

3.2.3. Canyons sous-marins

Le plateau et le talus continental de la région sont souvent entaillés par des vallées ou des canyons sous-marins. Quelques-uns des canyons les plus connus sont les suivants :

- le Cayar (Sénégal),
- le Trou sans Fond (Côte d'Ivoire),
- le Congo-Zaïre (Congo-Zaïre),
- l'Avon, le Mahin, le Calabar (Nigéria).

On sait que la plupart de ces canyons, ou les vallées qui y mènent, débutent au voisinage du littoral et agissent donc comme des drains dans lesquels s'engouffrent les sédiments entraînés par les courants littoraux ou les courants de retour pour être définitivement amenés vers les grands fonds.

La tête du Canyon Congo-Zaïre, par exemple, s'étend même sur plusieurs douzaines de kilomètres à l'intérieur des terres vers la partie intérieure de l'estuaire, et une grande quantité de sédiments côtiers vont s'y perdre.

En Côte d'Ivoire, le canyon du Trou sans Fond au large du canal de Vridi agit comme un piège à sédiments. Sur la base des évaluations faites par Varlet en 1958 (dans Hinschberger, 1979) on sait qu'environ 800 000 m³ de sable passent annuellement devant Vridi, ce qui veut dire que sur 35 ans, 30 millions environ de matériaux ont été détournés par le canyon au lieu de continuer leur route le long des plages vers Port Bouet et les plages Est.

Au Nigéria, plus d'un million de m³ de sable transporté annuellement par le courant littoral à partir de deux directions différentes vers la côte vaseuse se perdent en tombant respectivement dans les canyons Avon et Mahin (fig. 3.9) et ce phénomène est considéré comme responsable du déficit en sable et du caractère vaseux du littoral dans ce secteur de la côte du Nigéria (Burke, 1972; Ibé et al. 1984). De même, les vases qui caractérisent le littoral de Calabar et l'érosion patente de l'extrémité est du littoral du Nigéria ont été attribués au fait que le sable transporté par le courant littoral est drainé par le canyon du Calabar au large de cette côte (Ibé, 1987).

En Mauritanie, la tête du canyon du Tiouillit au large du cap Timiris se trouve près de la côte (Einsele et al., 1977), et sert donc également de piège à sédiments: Chen et al. (1983) voient dans l'existence de ce canyon la cause de l'érosion côtière observée à 30 km au nord de Nouakchott.

Le canyon de Cayar, au large du Sénégal, représente une caractéristique majeure influençant la sédimentation de la région, car il interrompt brusquement les phénomènes de transit sédimentaires sur la marge Mauritanie - Nord Sénégal en piégeant la majeure partie du transit littoral sableux (Horn et al., 1974; Ruffman et al., 1977; Diets et al., 1968)

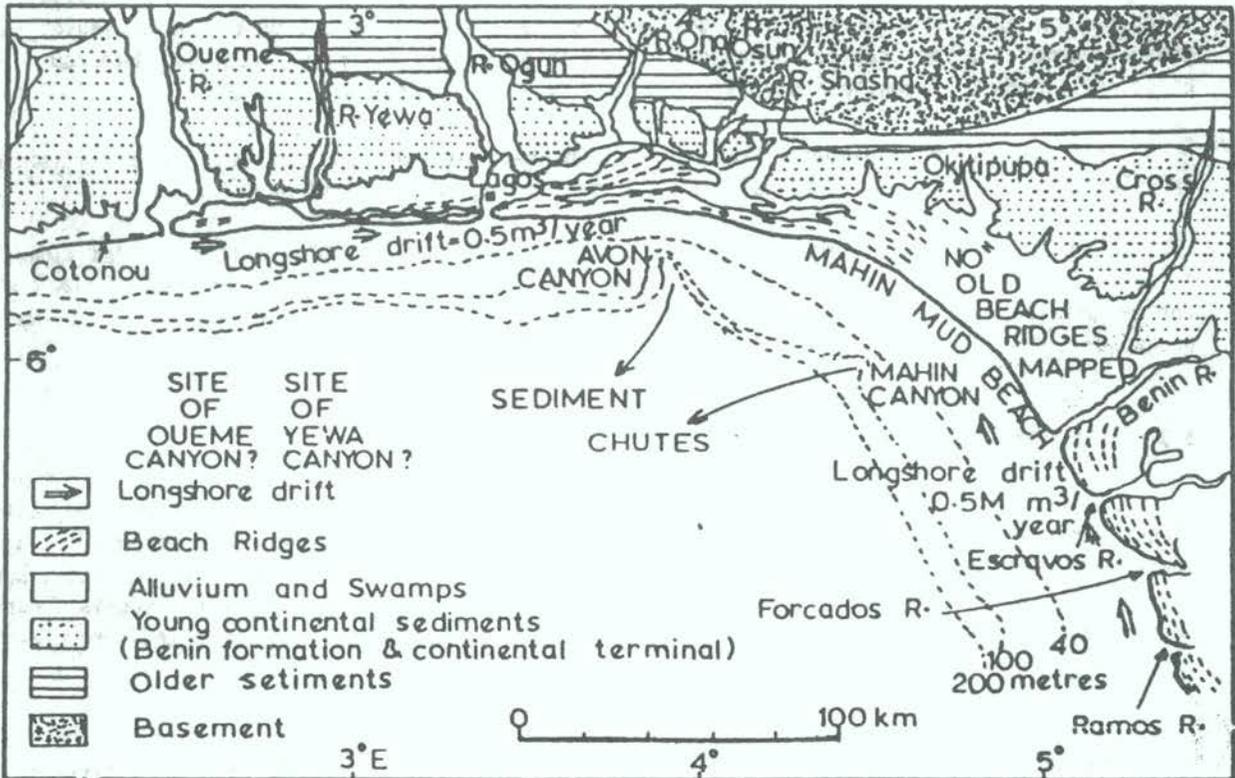


Fig. 3.9. - Transit littoral et canyons sur la côte du Nigéria.

Fig. 3.9. - Littoral drift and canyons on the Nigerian coast.

(Burke, 1972)

3.2.4. Tectonique, subsidence

La région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre est caractérisée par la formation de bassins sédimentaires. Dans tous les cas, le contour du soubassement de ces bassins est concave et leur axe principal coïncide toujours avec la présence d'une rivière importante, ce qui provoque souvent la formation de deltas, dont certains, comme celui du Niger et de la Volta, sont très développés.

Le géosynclinal côtier s'affaisse dans la plupart de ces deltas, non seulement parce qu'ils ont été formés dans un milieu tectonique, mais à cause de phénomènes naturels d'élimination de l'eau interstitielle et de tassements des sédiments. Cette tendance est caractéristique de la plupart des grands deltas qui se sont formés rapidement dans un cadre tectonique.

Dans le bassin de la Côte d'Ivoire, on a constaté une subsidence de la partie est du bassin (PNUE, 1985). Dans les bassins sédimentaires du Gabon, du Congo, du Zaïre et de l'Angola se produisent d'importants phénomènes de subsidence. Dans le géosynclinal côtier du Nigéria, un ensemble de bancs de coraux morts sur des hauts-fonds près de la côte donne une indication des étapes de subsidence et/ou de surélévation du niveau des eaux pendant les quatre derniers millénaires (Allen et Wells, 1962). Les mesures faites actuellement dans le delta du Niger montrent que cette subsidence peut atteindre 2,5 cm par an. Ibé (1984) suggère qu'aujourd'hui l'extraction de gaz et de pétrole dans les réservoirs poreux du delta du Niger accélère peut-être cette subsidence.

3.2.5. Caractéristiques des sédiments

A l'exception des côtes à falaises du Sénégal, de la partie occidentale de la Côte d'Ivoire, du Cameroun, et de l'Angola, les principaux secteurs du littoral de l'Afrique de l'Ouest et du Centre sont faits de sables et de limon meuble. Un grand nombre de plages sableuses sont en général composées de sables quartzeux bien triés à grains fins avec des minéraux lourds caractéristiques : zircon, épidote, sillimanite, kyanite, hornblende, etc.

Les plages de sédiments fins ont des pentes plus douces que les plages de sédiments grossiers, ce qui permet une ascension plus grande du ressac sur l'estran.

Les plages de vases non consolidées sont encore plus vulnérables à l'action des vagues et à l'inondation par la marée, par suite des faibles propriétés mécaniques des vases, liées à leur forte humidité, leur faible densité, leur grande plasticité et leur teneur élevée en matières organiques.

3.3. INFLUENCE DE L'HOMME

L'intervention de l'homme sur l'environnement naturel peut générer des impacts négatifs sur l'équilibre du littoral dans la région. Parmi ces actions anthropiques, on peut citer la construction de ports, l'extraction de sables et de graviers, la construction des barrages sur les rivières, les aménagements de la zone littorale, la destruction de la couverture végétale dans les bassins versants et sur le littoral (mangroves), les dragages, l'exploitation pétrolière off-shore.

3.3.1. La construction de ports

La construction de ports sur le littoral est une cause majeure d'érosion en divers endroits de la côte de l'Afrique de l'Ouest et du Centre. Selon une étude faite par le PNUE (1985), il y a 84 ports, y compris les débarcadères et les appontements (wharfs) des exploitations minières.

La plupart des structures portuaires sont quasi-perpendiculaires au littoral, et jouent donc le rôle de barrières littorales pour la dérive longitudinale des sédiments, qui est comprise entre 0,2 et 1,5 Mm³ dans les directions indiquées à la figure 3.6.

Fig. 3.8. (A - B) - Plages vaseuses (A) et sableuses (B) à faibles pentes sur les côtes du Nigéria et du Cameroun.

Muddy (A) and sandy (B) beaches, with small slopes, on the Nigerian and Cameroon coastlines.



Delta du Niger
(Nigéria) - (Ibé)

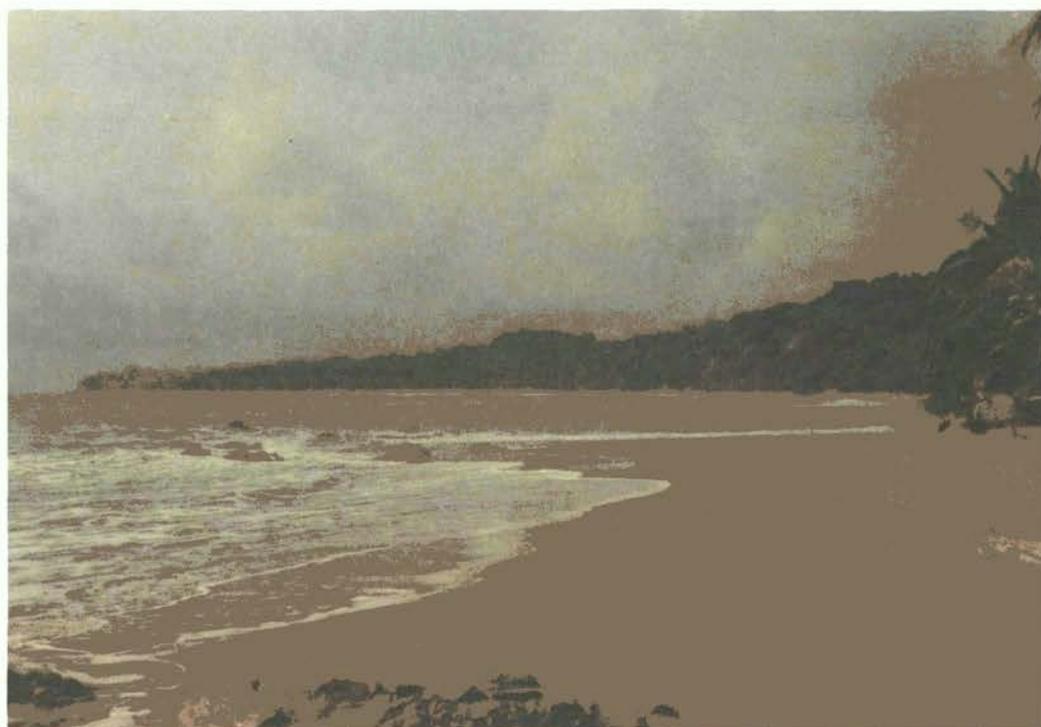
A

Niger delta
(Nigeria) - (Ibé)

Côte sud du Cameroun
près de Campo
(Quélenec).

B

Southern Cameroon
coastline near Campo
(Quélenec).



Ainsi se produit une sédimentation en amont des ouvrages par rapport au transit littoral, alors qu'en aval se produit une érosion spectaculaire. C'est là une situation classique. Partout dans le monde où ont été construits des brise-lames, des épis ou autres structures artificielles sur une plage sableuse pour réduire ou interrompre le courant littoral comme par exemple à Newhaven (Angleterre), Campoloro (Corse, France), South Lake Inlet (Floride), Durban (Afrique du Sud), Madras (Inde), Santa Barbara (Californie) et Salina Cruz (Mexique), il s'est produit une érosion en aval du courant littoral (Bird, 1967; Quélenec 1981, 1987). L'érosion à l'est des ports de Lomé, Cotonou et Lagos est due à ce phénomène.

La construction de brise-lames pour le port de Lomé a commencé en 1964, et même pendant la construction, la sédimentation a commencé à se manifester à l'ouest du port, alors que l'érosion s'attaquait au côté est. Selon Nedeco (1975, 1978), l'avancée du rivage à 2 km de la jetée était de 60 m/an de 1964 à 1969, 28 m/an de 1969 à 1973 et 18 m/an de 1973 à 1975. En revanche, toute la partie Est du port de Lomé est érodée sur une longueur de plus de 15 km, les vitesses d'érosion diminuant à mesure que l'on s'éloigne du port. A 5 km à l'est du port, le recul moyen de la plage est de 20 m/an près de l'Hôtel Tropicana (Oliveros et Quélenec, PNUÉ 1985).

A Cotonou, la jetée du port, construite en 1960, a créé une zone d'accumulation sableuse à l'ouest du port avec une croissance de 700 m en 1976 (Sireyjol, 1977) et une zone d'érosion à l'est. En 1976, un recul du rivage d'environ 250 m a été mesuré en aval de la jetée.

A Lagos, la construction des brise-lames entre 1907 et 1912 a, depuis 1913, provoqué une sédimentation sur la plage du phare, ainsi qu'un retrait considérable de Victoria Beach du côté de l'aval (fig. 3.10 d'après Webb, 1960). La vitesse actuelle de l'érosion à Victoria Beach se situe entre 20 et 30 m/an (Ibé, 1985).

On constate aussi une érosion importante à Keta (Ghana) en aval du port de Tema ainsi qu'à l'est du canal de Vridi, à l'entrée du port d'Abidjan (Côte d'Ivoire).

Un autre effet de la construction des ports le long de la côte provient du dragage des chenaux d'accès de ces ports entre le rivage et la pleine mer. Le creusement des chenaux permet aux vagues de pénétrer plus loin dans les graus, ce qui accroît le risque d'érosion. Pour le sable entraîné par les courants littoraux, l'approfondissement des chenaux a le même effet hydro-sédimentologique que les structures perpendiculaires au rivage : la modification du schéma de réfraction des vagues, et reconcentration de l'énergie qui accélère par endroits le processus d'érosion.

3.3.2. Construction de barrages sur les fleuves

L'apport sédimentaire des fleuves constitue pour les plages l'une des principales sources d'alimentation naturelle en sable. Il s'ensuit que si l'on modifie les caractéristiques hydrologiques d'un fleuve, notamment par la construction de barrages, le volume de sédiments terrigènes atteignant la côte peut se trouver notablement réduit.

La figure 3.11 montre que la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre est dotée de nombreux cours d'eau par ces grands systèmes de drainage. Cependant, la plupart des cours d'eau importants ainsi que leurs principaux affluents, sont équipés de barrages pour l'hydro-électricité, l'irrigation nécessaire à l'agriculture et les pêcheries. (Tableau 3.2. et fig. 3.11). Ni la liste ni la figure ne sont exhaustives. Certains des fleuves comportent plusieurs barrages sur leur parcours (plus de 20 par exemple sur le fleuve Congo-Zaïre). On sait en fait qu'avec l'accent mis actuellement sur la reprise de la production agricole, de nombreux barrages sont en construction ou prévus.

On estime (PNUÉ, 1985) que la construction de barrages dans cette région de l'Afrique a drastiquement réduit le rôle que jouent les bassins hydrographiques en tant que sources d'apport de sédiments; une quantité appréciable de sédiments fluviaux qui autrement, aurait été

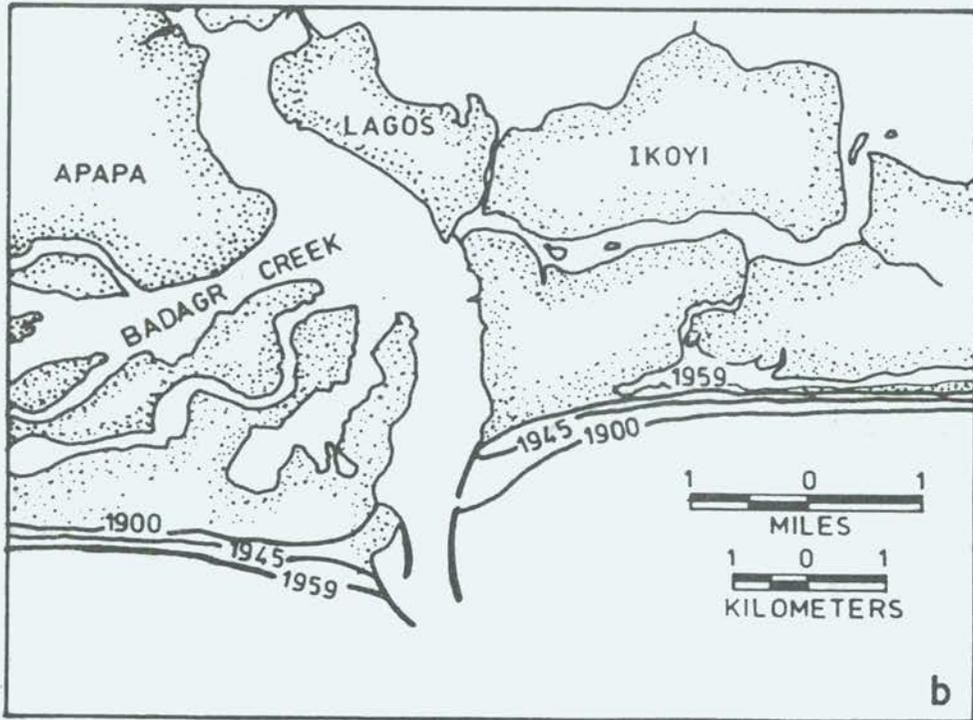
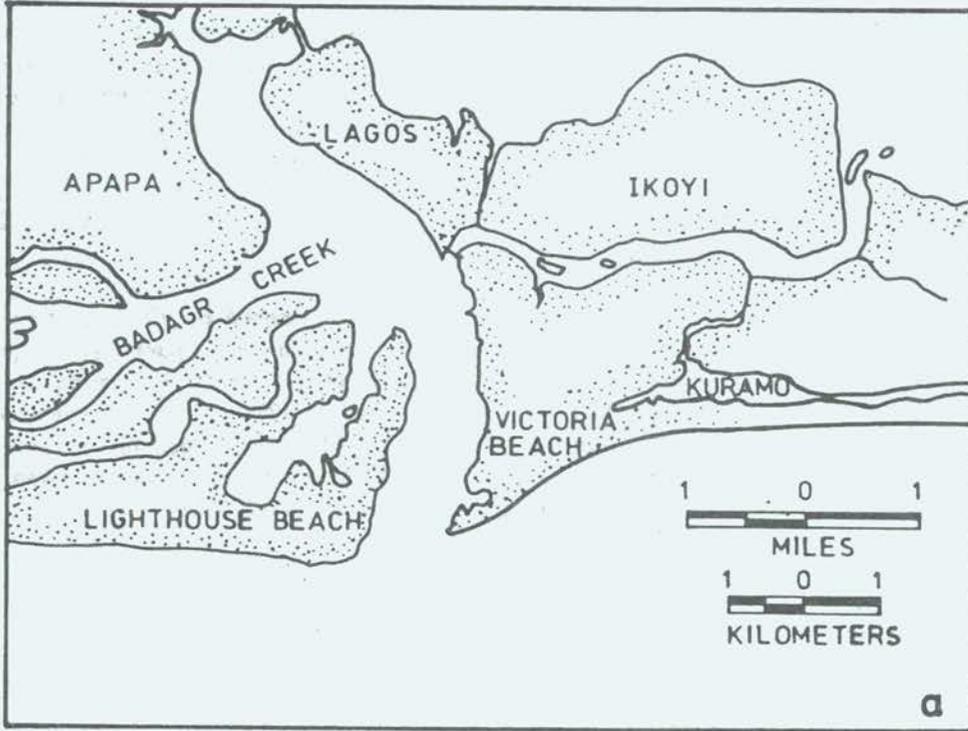


Fig. 3.10. - Le littoral de Lagos (Nigeria) avant (a) et après (b) la construction des jetties à l'estuaire.

Fig. 3.10. - The Lagos (Nigeria) coastline before (a) and after (b) the construction of jetties on the estuary.

(Webb, 1960)

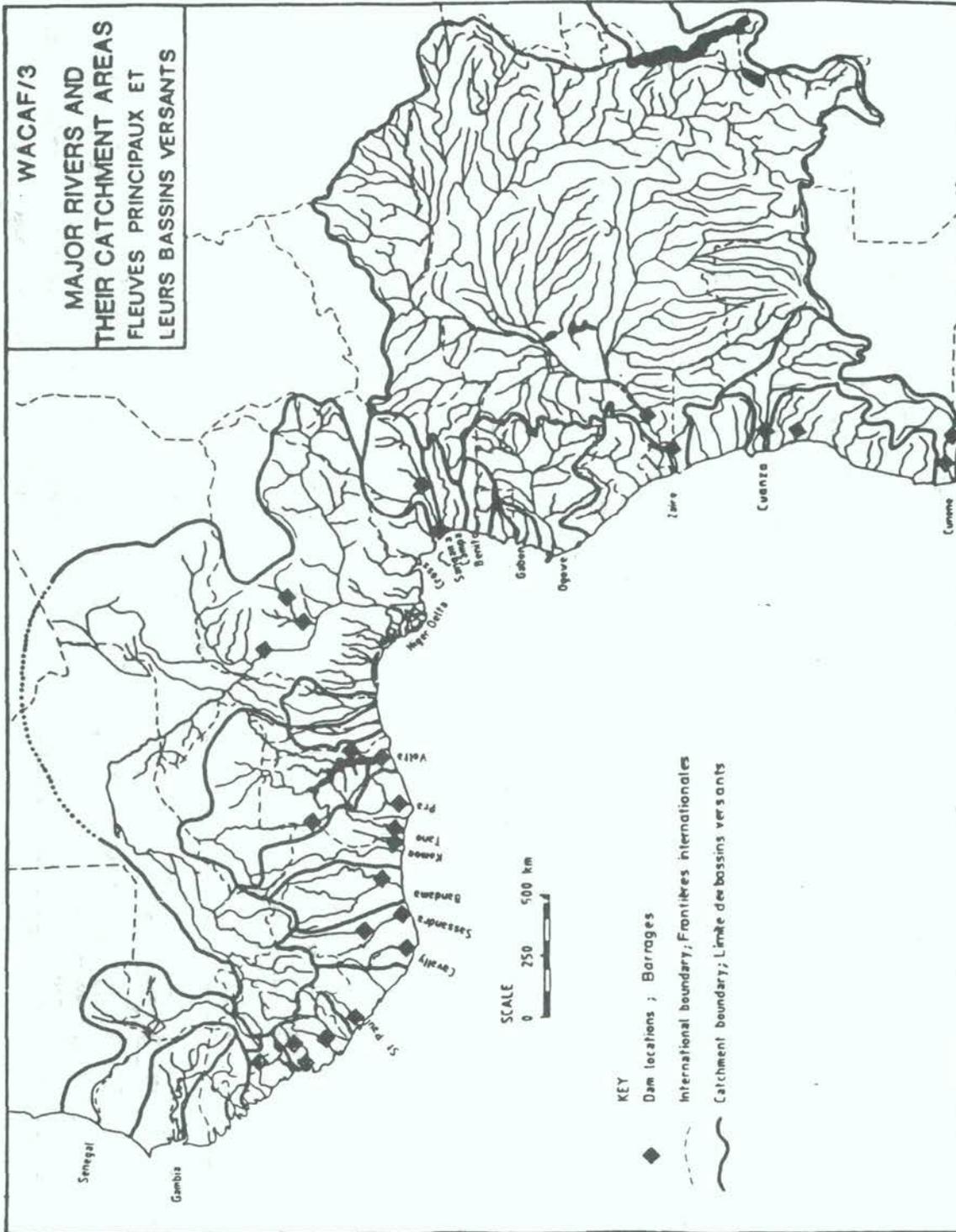


Fig. 3.11. - Principaux barrages sur les fleuves de la région.

Fig. 3.11. - Main dams on major rivers of the region.

(PNUE/UNEP, 1985)

Tableau 3.2.

PAYS COUNTRY	N°	NOM NAME	ANNEE YEAR	FLEUVE RIVER	SOURCE REFERENCE	PAYS COUNTRY	N°	NOM NAME	ANNEE YEAR	FLEUVE RIVER	SOURCE REFERENCE
Angola	9	Cambambe Gove Metala Queve	1962 1970 1969 1968	Cuanze Cunene* Cunene* Queve	A, Sarmiento and Alfonso (1962) B B B	Nigeria (cont'd)	18	Igbaja Kishi Kainji Shizoro Kangimi Birnin Kudu Baganda Karage Keffin Guna Tiga Ikega George Jebba Dadin Kowa	1968 1977 1970 1971 1974 1982 1982 198(?) 1982	Osin Soro Niger* Kaluna Kangimi Kangimi Kangimi Kangimi Oyan Niger Gangola	A A McDowell et al. (1983) Baylis (1972), Rubin (1968) B B B B B B B B B
Cameroun Cameroun	4	Sangana Mbakou Bamendjin Edéa III	1965 1971 1971 1971	Sangana* Sangana Hbim Sangana	B, Rubin (1968) A A B	Senegal	4(?)	Bekel Manantili Diama Kekriti(?)	1965 1980 1981 1975	Senegal* Senegal* Senegal* Senegal*	Rubin (1968) B ; Sali (1982) B B B
Congo	3	Inga I Shongo	1973 1970 1983	Congo Congo Le Fini R	B B B	Sierra Leone	4(?)	Mange Bumbana Guma	1961 1960 1966	Rokel Mano	A, Rubin (1968) Rubin (1968) B B
Eq. Guinea	07					Togo	2	Kpime Koza	1968 1975	Koza	A, Rubin (1968) Sargent (1979)
Gabon	0				A	Zaire**	15	Inga I Inga II Kolwezi Lubumbashi Kinshasha Kisangani Ulindi Lova Luvua	1973 1982	Congo* Congo* Labudi Lufira Congo* Congo* Ulindi Lova Luvua	
Ghana	9	Nauronga Hemang Acosombo Kpong	1978 1967 1961 1981	Tano* Pra* Volta* Volta	B B Mackintosh (1965), Ly (1980) Quarthey and Allen (1981)						
Guinea	2	Grandes Chito	1982	Konkoure	Rubin (1968)						
Ivory Coast Côte d'Ivoire	11	Kolotali Bouake Ayame I Ayame II Kosson Tabbo Buyo Soubre Bandama Cavally Ticobson	1959 1964 1972 1975 1972 1965(?)	Nzi (Bandama) Kan* Bia* Bia* Bandama* Bandama* Sassandra* Sassandra* Bandama Cavally Kan*	Rai (1974) Rai (1974) A A B B A A Rubin (1973) Rubin (1968) Rai (1974)						
Liberia	1	Mt. Coffee	1966	St. Paul.	A						
Mauritania	1	Foum el Gaïta	198(?)	Gorgol	B						
Nigeria	18	Bakolori Ejigb Gusau Ikere	1975	Niger* Aro Sokoto Ogan	A, B Sargent (1979) A A A						

A = World register of dams (1977)

B = Water power (1966-1983)

x = Fleuves possédant plusieurs barrages

xx = Tous les barrages ne concernent que le fleuve Congo-Zaire et ses affluents

All dams concerned were constructed on the Zaïre (Congo) and its tributaries

Barrages de l'Afrique de l'Ouest et du Centre
West and Central African dams

(PNUE/UNEP, 1985)

transportée vers les zones côtières se trouve maintenant piégée derrière les barrages, ce qui provoque un déficit sédimentaire du littoral et favorise l'érosion côtière.

Bien qu'il soit difficile de trouver une information quantitative sur l'effet des barrages dans la région, l'ampleur des modifications fluviales provoquées par les barrages dans cette région est indiquée par les données de Olofin (1985) d'après une étude faite au Nigéria. Cet auteur indique que le débit moyen de la rivière Kano depuis 1974-1975 après la construction du barrage de Tiga diminuait pendant les mois humides pour passer de $101,9 \text{ m}^3/\text{sec.}$ en amont du barrage à $14,3 \text{ m}^3/\text{sec.}$ en aval, pour remonter à $25,4 \text{ m}^3/\text{sec.}$ après 1980. Le débit moyen d'inondation du fleuve a également diminué pour passer de $383 \text{ m}^3/\text{sec.}$ en amont à $56 \text{ m}^3/\text{sec.}$ en aval, pour atteindre quelques années plus tard $76,9 \text{ m}^3/\text{sec.}$

Ibé et Antia (1983) et Mac Dowell et al. (1983) ont fait état d'une érosion côtière due à la construction de barrages dans le delta du Niger au Nigéria. Ibé (1985) a également indiqué que le problème croissant de l'érosion sur la côte à cordon littoral et lagunes du Nigéria occidental était dû en partie à la construction de barrages agricoles sur des rivières comme l'Ogun et l'Oshun qui précédemment apportaient du sable à la côte. Ly (1980) a également précisé que le barrage d'Akosombo sur la Volta au Ghana provoque ou accélère l'érosion générale du Ghana du Centre et de l'Est, à l'est de l'embouchure du fleuve.

En Mauritanie, le barrage-réservoir qui est prévu sur le site de Fomel-Geita empêchera en partie les sédiments de la rivière Gorgol d'atteindre la côte (Water Power, 1981). Le barrage de Diama, en construction dans le delta intérieur du fleuve Sénégal a déjà provoqué la diminution de l'apport sédimentaire à la côte. Au Togo, le projet de barrage de Nangbeto sur la rivière Mono risque de produire le même effet (PNUE, 1985). Au Cameroun, l'extrémité nord-ouest du delta de Sanaga est sujette à un processus d'érosion attribuable à la construction du barrage d'Edea (1965), à 70 km en amont de l'embouchure du fleuve Sanaga. En Sierra Leone, la construction de nombreux barrages dans les années 1960 a provoqué une réduction significative de l'apport solide au littoral des rivières concernées, et a accru la sensibilité à l'érosion des littoraux associés aux rivières.

3.3.3. Extraction de sable et de gravier dans la zone côtière

Dans la zone côtière, l'extraction de sable et de gravier pour la construction est une pratique courante. Ces matériaux de construction proviennent soit des estuaires, soit de la plage elle-même, soit du plateau continental proche de la côte.

L'extraction de sable et de gravier dans les rivières côtières et particulièrement dans les estuaires tend à réduire considérablement la quantité de sédiments fluviaux apportés sur la côte, ce qui accélère le recul de la plage. Une légère tendance à l'érosion de la côte de l'estuaire du Gabon, au nord immédiat de Libreville, s'explique par les dragages de sable non autorisés qui y sont effectués (PNUE, 1985). Au Nigéria, le dragage de sable dans les rivières côtières et les estuaires est tenu pour un des facteurs responsables de l'érosion des rivages de l'estuaire (Ibé, 1986).

L'extraction de sable faite directement sur la plage entame sérieusement la réserve de sédiments qui s'y trouve, et provoque ou accélère le recul de la plage. Au Libéria, le développement industriel a intensifié l'extraction du sable de plage, et l'érosion qui en résulte a commencé de se manifester autour des grandes villes industrielles comme Monrovia et Buchanan.

En Sierra Leone, un tonnage important de sable est extrait des côtes de la péninsule de Freetown, ce qui provoque une érosion destructrice sur la côte (PNUE, 1985). Des observations faites près de Cotonou ont permis d'estimer les quantités de sable extraites à $150\,000 \text{ m}^3$ par an en un endroit, et cette activité, si on la compare au transit littoral annuel de sable de 1 million m^3 , pourrait provoquer le recul de la plage (Nedeco, 1984). Ibé et al. (1984) ont fait état d'opérations d'extraction de sable sur diverses plages le long de la côte du Nigéria,

particulièrement à Brass, Forcados et Ibéno-Eket. En Côte d'Ivoire, on pense que l'érosion à l'est du village de Jacksonville est en rapport direct avec l'extraction de sable sur la plage. Également en Côte d'Ivoire les extractions intensives de sable sur la plage et sur la barre côtière dans la région de Janfoli-Gonzagueville-Dieudonné pendant plusieurs années ont provoqué un important recul de la plage (Quélenec, 1984c). L'extraction de sable de la plage a depuis été interdite dans cette zone.

Le dragage du sable sur le plateau continental près du rivage est une cause évidente d'érosion des plages dans la région. Les gigantesques chantiers de construction, comportant des programmes de récupération des terres, qui ont été entrepris au Nigéria, particulièrement autour de Lagos dans l'ivresse du boom pétrolier des années 1970, auraient été presque impossibles sans les quantités colossales de sable (et même de gravier) provenant des dragages de la zone du plateau proche de la côte (Ibé, 1982). Ces dragages seraient en partie responsables de l'accélération de l'érosion (25-30 m/an) sur les plages de la région de Lagos (Ibé, 1987).

Les responsables de ces travaux de dragage ont commis la grave erreur de ne pas considérer le système littoral dans son contexte régional. Sur un rivage de plaine côtière comme celui qui caractérise cette région, la plage et le plateau continental se trouvent en situation d'équilibre. Il s'ensuit que le fait de prélever du sable sur les estrans de plage ou à tout autre endroit du système dynamique (paragraphe 2.3.2.3.) affecte inévitablement cet équilibre et intensifie le recul côtier (Quélenec, 1981; Ibé et Antia, 1983; PMUE, 1985).

3.3.4. Construction sur la plage

Le trait de côte est soumis à des fluctuations naturelles provenant des variations du transport sédimentaire en quantité et en direction.

Si des routes, des immeubles ou des installations diverses sont implantés très près du trait de côte, les variations naturelles se trouvent perturbées, particulièrement dans les zones des parties arides du nord-ouest et du sud de la région où normalement se forment des dunes mobiles. Ces interventions peuvent réduire le rôle tampon des stocks sédimentaires mobilisables présents sur le rivage, et provoquer ou accélérer des phénomènes d'érosion littorale.

Dans la région toute entière, les villes côtières sont les plus développées par suite de l'ancienneté des contacts historiques avec les Arabes et les Européens, et l'accès relativement plus facile que donne leur situation géographique.

Dans ces villes côtières on trouve ainsi de nombreux immeubles résidentiels et commerciaux, des établissements d'enseignement, des bâtiments ou des installations militaires en bordure de plage ou à proximité immédiate de celle-ci : cas de Dakar et Rufisque (Sénégal) (Photo, fig. 3.12), Monrovia (Libéria), de Banjul (Gambie), de Port-Bouet (Côte d'Ivoire), de Lagos (Nigéria), de Lomé (Togo), de Keta (Ghana).

Dans les pays producteurs de pétrole comme le Nigéria, le Cameroun, le Gabon et l'Angola, la plupart des installations d'exportation du pétrole (réservoirs, oléoducs) ont été construites sur la côte et représentent des perturbations artificielles dans un système naturel dynamique. Dans ces pays existe également sur la côte ou à proximité un réseau de canaux côtiers pour l'exploitation et le transport des hydrocarbures, ce qui constitue une véritable modification de structure de la zone côtière, aux effets négatifs sur la migration du trait de côte (Ibé, sous presse).

L'une des conséquences de l'érosion engendrée par ces constructions côtières est la tentative faite pour les protéger par un ensemble de défenses côtières comme des défenses longitudinales de pierre ou de béton, des épis (Photo, fig. 3.13). Très souvent, ces structures protectrices longitudinales augmentent la réflexion des vagues et leur effet décapant, et, au lieu d'y remédier, ne font qu'aggraver le problème d'érosion qu'elles étaient censées résoudre.



Fig. 3.12. - Constructions sur le haut estran à Rufisque (Sénégal)
(Quélenec, 1984).

Fig. 3.12. - Constructions on the beach-shore at Rufisque (Senegal)
(Quélenec, 1984).

Fig. 3.13. - Revêtement en gabion d'un haut estran de plage au Libéria
(Ibé).

Fig. 3.13. - Revetment with gabions on the upper beach face in Liberia
(Ibé).



3.3.5. Destruction de la couverture végétale

La couverture végétale joue un rôle important dans la protection des sédiments côtiers, en les colonisant et en les fixant. La suppression accélérée de cette végétation côtière, poursuivie pour faire place à des constructions, des exploitations minières, des immeubles ou des entreprises agricoles, intensifie le ruissellement de surface et rend la zone ainsi dénudée plus vulnérable à l'infiltration et aux glissements de terrain, ainsi qu'à l'action des vagues, des vents et des courants.

Dans leur étude de ce phénomène dans les régions Awoye et Molume du delta du Niger, Ibé et al. (1985) rapportent que la décimation progressive de la forêt vierge de mangroves le long des côtes, ainsi que le surpâturage des prairies qui l'avaient remplacée, a accéléré l'érosion dans ces régions. En Guinée, l'érosion grignote les régions littorales où se poursuit la destruction des mangroves (PNUE, 1985a).

L'extraction de sel marin dans les zones de mangroves a provoqué l'érosion, car elle a pour conséquence une destruction à grande échelle de la couverture végétale. Selon Paradis (1979), cette extraction de sel a commencé dans la partie Est du Ghana au 17^e siècle, et se poursuit aujourd'hui. Dans la végétation côtière, la mangrove fournit une protection très efficace contre l'érosion des sédiments dans lesquels elle pousse. La raison en est que la mangrove se fabrique un radeau de stabilisation, pour s'adapter à la faiblesse mécanique du limon dans lequel elle se trouve. Le réseau de racines aériennes est particulièrement efficace pour stabiliser les sédiments non consolidés, pour amortir les courants de marée et les courants littoraux, et retenir les sédiments en les empêchant ainsi d'être entraînés vers le large.

Cependant, la forêt de mangroves est mise à contribution. Les arbres sont abattus pour le bois de construction et divers autres usages : construction de repères pour les nasses des pêcheurs, bois de chauffage pour la cuisine, construction de fours traditionnels. C'est pourquoi l'érosion littorale sévit partout où les mangroves ont été décimées.

En Mauritanie, en Guinée, au Sierra Leone, au Libéria, au Togo, en Angola, les exploitations de tourbes littorales à ciel ouvert contribuent également à la destruction de la végétation et à l'érosion côtière qui l'accompagne.

3.3.6. Exploitation du pétrole et du gaz

L'exploitation du pétrole devient un facteur de plus en plus important dans les problèmes d'érosion de certains pays de la région. L'effet se fait davantage sentir dans les pays qui produisent déjà du pétrole depuis un certain temps.

Le Nigéria, le Cameroun, le Gabon et l'Angola sont des producteurs de pétrole reconnus. D'autres pays comme le Ghana, la Côte d'Ivoire, le Bénin se sont mis également à produire, et les données géophysiques de la région indiquent que d'autres pays encore deviendront producteurs. La plus grande partie de la production actuelle est extraite dans des gisements de pétrole qui se trouvent sur la côte ou très près de celle-ci, ainsi que sur le plateau continental, toutes zones très fragiles.

L'extraction du pétrole provoque l'amorce ou l'accélération de la subsidence dans une zone fragile du système sédimentaire côtier. Les phénomènes de subsidence qui accompagnent l'extraction de fluides dans le sol a été décrite entre autres par Cooke et Doornkamp (1974, pp.170-171). L'effet principal de l'extraction des fluides est la réduction de la pression dans le gisement, ce qui amène immédiatement une augmentation de la contrainte effective (ou contrainte grain à grain) du système.

Un tassement se produit et le bassin sédimentaire s'affaisse. Il s'ensuit une submersion progressive des zones côtières avec accroissement des risques d'érosion littorale.

Dans une étude faite sur cet impact au Nigéria (Ibé, 1985, 1986 et Ebisemiju, 1985) les auteurs considèrent que l'extraction de gaz et de pétrole dans les gisements poreux et faiblement consolidés du delta du Niger est en partie responsable de l'accélération de la subsidence naturelle de ce delta et des phénomènes significatifs d'érosion côtière que l'on y constate.

LISTE DES FIGURES DU CHAPITRE 3

- Fig. 3. 1 - Concentration de poussières éoliennes ($\mu/g/m^3$) en suspension sur le plateau continental du Sénégal (In Sall, 1982)
- Fig. 3. 2 - Photographie de la plage de Victoria Island après 3 jours de tempête (Ibé, 1984)
- Fig. 3. 3 - Flèche sableuse à Escravos (Nigéria) coupée lors de la tempête de 1983.
- Fig. 3. 4 - Diagramme d'estimation des caractéristiques des vagues (CERC Manual)
- Fig. 3. 5 - Caractéristiques des vagues dans la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre (PNUE, 1985)
- Fig. 3. 6 - Eléments du budget sédimentaire côtier dans la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre (PNUE, 1985)
- Fig. 3. 7 - Erosion du profil de plage sous l'effet de la surélévation du niveau marin (Bruun, 1979)
- Fig. 3. 8 - Plages vaseuses (A) et sableuses (B) à faibles pentes sur les côtes du Nigéria et du Cameroun. (Quélénnec).
- Fig. 3. 9 - Transit littoral et canyons sur la côte du Nigéria (Burke, 1972).
- Fig. 3.10 - Le littoral de Lagos avant (A) et après (B) la construction des jetées à l'estuaire (Webb, 1960).
- Fig. 3.11 - Principaux barrages sur les fleuves de la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre (PNUE, 1985)
- Fig. 3.12 - Constructions sur le haut estran à Rufisque (Sénégal) (Quélénnec, 1984).
- Fig. 3.13 - Revêtement en gabion d'un haut estran de plage au Libéria (Ibé).

TABLEAUX

- Tableau 3.1. Marées (vive-eau) dans les principaux ports de l'Afrique de l'Ouest et du Centre.
- Tableau 3.2. Barrages de l'Afrique de l'Ouest et du Centre.

4. INVENTAIRE DU LITTORAL, SUIVI ET CONTROLE DE SON EVOLUTION

La très grande diversité des paysages morphologiques que l'on rencontre sur le littoral de l'Afrique de l'Ouest et du Centre, ainsi que la variété des paramètres naturels et anthropiques qui conditionnent l'évolution littorale à l'échelle locale, font qu'il est quasiment impossible de proposer une liste d'opérations détaillées qui puisse s'appliquer directement à l'étude d'une portion spécifique de littoral.

C'est pourquoi l'exposé ci-après ne constitue qu'un guide général pour des actions prioritaires dont certaines devront être adaptées pour tenir compte des conditions locales d'environnement et de développement.

La méthodologie proposée (Quélenec, 1988b) doit permettre la constitution progressive d'une base de données sur le littoral et son évolution, d'acquérir les données de base nécessaires à la compréhension des processus en cours, et de préparer les décisions sur les aménagements de protection côtière dans les secteurs côtiers les plus sensibles.

4.1. INVENTAIRE DU LITTORAL

4.1.1. Objectifs

Le projet WACAF/3 a permis de faire un inventaire des problèmes d'érosion côtière en Afrique de l'Ouest et du Centre. Les phénomènes identifiés concernent surtout les zones côtières d'intérêt socio-économique majeur où les données étaient disponibles et où des mesures de protection immédiates semblaient nécessaires (PNUE, 1985).

D'autres secteurs littoraux non identifiés de la région sont ou seront sujets à l'érosion côtière. La préparation des politiques d'aménagement du territoire et de programmation des investissements incite à poursuivre l'effort entrepris par des équipes nationales et internationales à l'occasion du projet WACAF/3.

Une suite logique à cet effort serait la réalisation, au niveau de chaque pays, d'un inventaire du littoral. Cet inventaire aurait pour objectifs principaux :

- La description de l'environnement sédimentaire (morphologie, sédimentologie) du littoral et de son évolution;
- L'identification des zones sensibles et l'évaluation des conséquences de l'érosion,
- La préparation de décisions d'aménagement et de protection du littoral.

La dynamique créée à l'occasion du projet WACAF/3 milite en faveur du choix d'une méthodologie d'inventaire commune aux pays de la Région.

Une telle approche régionale a fait l'objet d'un consensus au niveau des pays de la Communauté Européenne : à l'occasion du projet "CORINE érosion côtière", dont l'objectif est de fournir une base scientifique d'information pour apprécier les problèmes liés au risque d'érosion du littoral, les 11 pays de la Communauté Européenne (du Danemark à la Grèce) ont décidé d'adopter une méthodologie commune basée sur les principes suivants (Quélenec, 1987a) :

- découpage du littoral en segments côtiers,

- caractérisation des segments côtiers selon deux groupes de critères : morphologie/sédimentologie et tendance d'évolution,

- caractérisation plus détaillée de l'environnement des segments côtiers sujets à l'érosion et évaluation des causes et des conséquences de l'évolution régressive.

L'application de cette méthodologie aux pays d'Afrique de l'Ouest et du Centre suppose un certain nombre d'adaptations qui sont suggérées ci-après (R.E. Quélenec, 1988b).

4.1.2. Identification des segments côtiers

Cette première phase consiste à découper le littoral de chaque pays en une succession continue de segments littoraux contigus et homogènes, selon une classification morpho-sédimentologique (paragraphe 4.1.3).

Pour les pays de la Communauté Européenne, ce travail, réalisé après une compilation de données et d'informations disponibles (photos aériennes, cartes interprétées, thèses, rapports) et complété par des enquêtes de terrain, donne lieu au report des extrémités des segments côtiers sur des cartes topographiques à l'échelle du 1/25 000 à 1/100 000.

En Afrique de l'Ouest et du Centre, compte-tenu des disparités existantes dans les échelles des cartes topographiques disponibles dans les divers pays, il serait très probablement impossible d'adopter la même échelle cartographique pour tous les pays de la Région : le choix devra être fait, pays par pays, en fonction de l'échelle des cartes existantes pour les zones littorales : 1/50.000 à 1/200.000.

4.1.3. Classification en unités morpho-sédimentologiques

La classification suivante, qui s'inspire de celle utilisée par les pays de la Communauté Européenne, permet l'identification rapide, sans mesure, et la codification du type d'environnement littoral, segment par segment.

Faciès

- (A) Rochers et/ou falaises vives constitués de matériaux peu érodables.
- (B) Conglomérats et/ou falaises vives constitués de matériaux érodables.
- (C) Plages de poches séparées par des caps rocheux.
- (D) à (F) Plages développées, avec estrans constitués en majorité :
 - (D) de sédiments grossiers : graviers à galets,
 - (E) de sédiments sableux : sables fins à grossiers,
 - (F) de sédiments cohésifs : limons et vases.
- (G) Structures sédimentaires sableuses de type cordon littoral, flèche sableuse.
- (H) Tombolo.
- (I, J...) A définir.

Estrans

- (a) Présence d'un platier rocheux sur l'estran intertidal
- (b) Présence de beachrock sur l'estran intertidal
- (c) Présence de mangrove sur l'estran intertidal
- (d) Présence de végétation dense sur le haut estran

(e,f...) A définir

Intervention humaine

- (0) Segment côtier naturel non aménagé
- (1) Segment côtier protégé par des ouvrages de défense longitudinaux (digues, murs, pierres)
- (2) Segment côtier protégé par des ouvrages de défense transversaux (épis) ou des brise-lames
- (3) Plage artificielle
- (4) Remblai littoral
- (5) Polder

(6,7...) A définir

Chaque segment côtier peut ainsi être caractérisé grâce à la combinaison des trois codes précédents. Ainsi un segment codé E/a/0 signifie : plage sableuse développée avec présence d'un platier rocheux sur l'estran intertidal, sans ouvrage de protection côtière (plage naturelle).

4.1.4. Tendances d'évolution du littoral

La tendance d'évolution constitue une quatrième famille de codes qui vient compléter la codification de chaque segment côtier selon :

- (1) Absence d'information sur l'évolution du segment côtier

Stabilité

- (2) Evolution peu sensible à l'échelle humaine
- (3) Faibles variations occasionnelles autour d'une position d'équilibre

Erosion

- (4) Probable mais non documentée : données non disponibles
- (5) Confirmée : données disponibles

Engraisement

(6) Probable mais non documenté : données non disponibles

(7) Confirmé : données disponibles

Ainsi, un segment codé Ea0/5 signifie : plage sableuse développée, non aménagée (absence d'ouvrages de protection) avec présence d'un platier rocheux sur l'estran intertidal et sujette à l'érosion (données disponibles).

4.1.5. Réalisation pratique de l'inventaire

Le littoral est découpé en segments côtiers homogènes vis-à-vis de la classification des unités morpho-sédimentologiques (paragraphe 4.1.3). Chaque segment côtier est repéré sur la carte topographique de référence par un numéro. La numérotation des segments est continue et progressive, le sens de numérotation allant de la droite vers la gauche lorsqu'on regarde la mer.

Le repérage d'un segment côtier se fait sur la carte de référence (ex : 1/100.000) en positionnant les extrémités du segment sur le figuré du trait de côte. Ce positionnement peut être réalisé, au moins de façon provisoire, grâce à l'interprétation de photos aériennes et de cartes (topographiques, géologiques) et autres documents disponibles.

Le positionnement définitif des limites des segments côtiers est obtenu après visite de terrain qui permet de définir le code morpho-sédimentologique à attribuer à chaque segment côtier. Les deux premiers éléments de ce code (faciès, estran) sont quasi-définitifs à court terme pour un segment donné. Seul le troisième élément de codification (intervention humaine) est susceptible d'évoluer dans le temps, en fonction des travaux d'aménagement et de protection.

La codification de la tendance d'évolution d'un segment côtier est fonction de la disponibilité des données :

- dans une première étape d'identification, c'est uniquement le jugement de l'expert après visite et enquête du terrain, qui permettra de définir le code "évolution" d'un segment non étudié au préalable;
- dans le cas de zones littorales inhabitées et/ou difficilement accessibles, il sera nécessaire de recourir à la comparaison de photos aériennes prises à des dates différentes;
- l'étude préalable de tels documents photographiques, quand ils sont disponibles, permet de mieux préparer les visites et enquêtes de terrain et de les concentrer sur les zones les plus sensibles;
- ce n'est que dans une étape ultérieure (paragraphe 4.3) que seront réalisées les opérations complémentaires d'enquête et de mesures qui permettront de comprendre les processus, d'évaluer leurs causes et leurs conséquences, et de proposer les travaux de protection et d'aménagement.

4.1.6. Base de données littorales

La méthodologie présentée ci-dessus permet la constitution progressive d'une base de données littorales qui peut être implantée et gérée sur micro-ordinateur, comme la base de données informatisée "CORINE érosion côtière" réalisée pour la Communauté Européenne par le BRGM (*).

(*) BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières (France)

En effet, chaque segment côtier :

- porte un numéro d'identification unique (ex : 034) ;
- est repéré sur une carte topographique de référence : ses extrémités sont donc connues en coordonnées (X,Y)
- est caractérisé par deux attributs (ex : Ea0/5).

La digitalisation du trait de côte préalablement découpé en segments côtiers permet d'associer à chaque segment côtier :

- une représentation cartographique du linéaire côtier;
- les attributs définis précédemment : code morpho-sédimentologique et code tendance d'évolution;
- des attributs complémentaires à définir ultérieurement.

L'intérêt d'une telle base de données littorales informatisée est multiple :

- elle peut être visualisée et mise à jour facilement;
- elle peut être complétée progressivement par l'adjonction de nouveaux attributs caractéristiques des segments côtiers et de leur environnement : données numériques sur la pente de la plage, la granulométrie des sédiments, l'évolution des profils de plage, données factuelles sur l'occupation du sol dans la zone de l'arrière-plage, sur les dégâts liés aux tempêtes;
- elle simplifie, grâce à des logiciels appropriés, la réalisation de cartes thématiques et le calcul de données statistiques : longueur des côtes, pourcentage de littoraux rocheux, sableux, en voie d'érosion.

Par ailleurs, la base de données littorales constitue un outil d'incitation pour les équipes chargées de l'inventaire du littoral, et de gestion pour les aménageurs et les décideurs : pour bien remplir ce double rôle, il est souhaitable que la base de données soit à la fois disponible au niveau des structures nationales de gestion et de décision (ministères) et décentralisée au niveau des régions administratives.

Lors de l'établissement de la base de données, il est souhaitable que soit réalisé, simultanément à l'inventaire du littoral, un inventaire national des sources de données et d'information permettant de caractériser le littoral et son évolution : photographies aériennes, cartes, campagnes de mesures, documents d'urbanisme, rapports d'études, thèses, publications scientifiques. Cet inventaire doit permettre de décrire le contenu sommaire des documents référencés, leur localisation, ainsi que l'identification des segments côtiers concernés par les documents.

4.2. RESEAUX DE MESURE DE LA MAREE ET DES HOULES

La connaissance des variations du niveau et de l'état de la mer est un élément essentiel pour la gestion et l'aménagement du domaine littoral.

Les informations recueillies à l'occasion du projet WACAF/3 ont montré que les données marégraphiques et houlographiques étaient insuffisantes pour la connaissance du régime de la mer sur les côtes de l'Afrique de l'Ouest et du Centre, et que les données mesurées étaient souvent difficilement accessibles.

Il est donc souhaitable d'améliorer les réseaux de mesure ainsi que les procédures de stockage et de traitement des données.

4.2.1. Mesures marégraphiques

4.2.1.1. Réseaux de mesure

En Afrique de l'Ouest et du Centre, on recense une trentaine de ports principaux.

Dans ces ports, la mesure de la marée a été réalisée depuis le début des observations par des moyens divers : échelles à marée, marégraphes à flotteur, à bulle ou à pression.

De nombreuses séries ont été interrompues pendant plusieurs années consécutives, en raison d'absence d'observateurs, de pannes mécaniques des enregistreurs, de transformation et d'agrandissement des zones portuaires conduisant à déplacer les enregistreurs.

Ces différentes raisons font qu'il existe un certain désintérêt des autorités portuaires pour la poursuite des mesures marégraphiques, dès que l'analyse des enregistrements du niveau de la mer sur quelques mois ou années a permis l'estimation des constantes harmoniques de la marée, nécessaires à la prévision de la marée astronomique et à la publication des annuaires de marée.

Il en résulte que les séries marégraphiques disponibles dans la région ne permettent pas l'analyse statistique régionale des variations séculaires du niveau moyen de la mer, ni celle des surélévations occasionnées par les facteurs atmosphériques (pression et vent), lesquelles sont des éléments essentiels qu'il faut prendre en compte dans les projets d'aménagement et de protection du littoral.

La station marégraphique de Takoradi (Ghana) est la seule dans la région où l'on peut disposer de longues séries de données : mesures régulières depuis 1929, avec quelques interruptions (fig. 2.10).

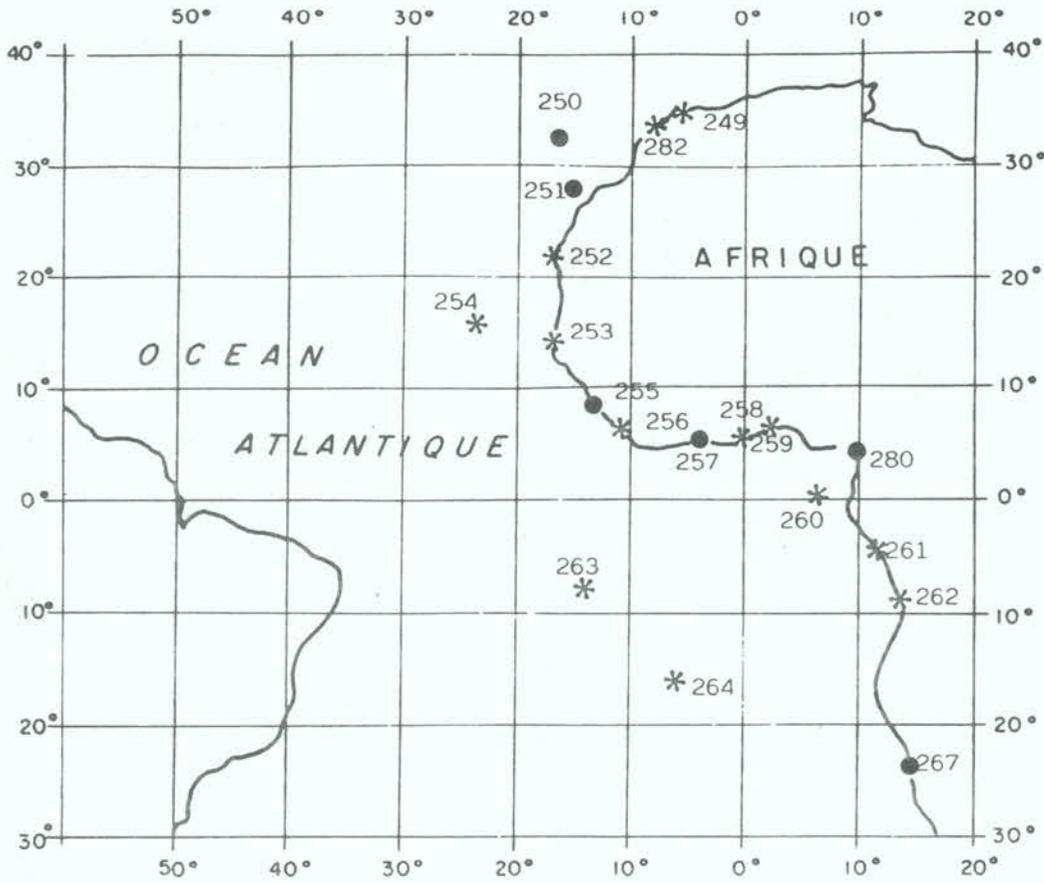
Il est donc souhaitable que soit garantie, dans chacun des grands ports de la région, la pérennité des enregistrements marégraphiques, à l'aide d'équipements fiables et modernes comportant si possible un stockage sur mémoire. Le projet GLOSS (global sea level observing system) de la Commission océanographique intergouvernementale (COI/IOC) a proposé récemment (UNESCO, 1987) la constitution d'un réseau permanent de stations marégraphiques dans la région (fig. 4.1).

En complément de ce réseau de base quasi-permanent destiné notamment à l'étude des composantes longue période, il serait intéressant de constituer et de maintenir un réseau de stations marégraphiques implanté en des points stables dans les ports secondaires, les lagunes littorales et les estuaires. Ce réseau de 2e ordre serait destiné à permettre l'extrapolation régionale des données du réseau de base et l'estimation locale des composantes de courte période dues aux facteurs atmosphériques et océanographiques : à défaut d'enregistreurs marégraphiques, la marée peut être observée visuellement sur des échelles de marée pour ce réseau de 2e ordre.

4.2.1.2. Etablissement d'un point de référence pour les jauges de marée

Pour bien tirer parti des observations de marée, il est nécessaire de les comparer à un point de référence fixe. A cet effet, on utilise une borne de repère comme point de référence principal. Considérons par exemple le type le plus simple de jauge de marée, la perche graduée :

Suivant l'emplacement de la borne de repère (BR) on peut déterminer le nombre de stations de mesure : si la BR se trouve loin, il est nécessaire d'avoir un plus grand nombre de stations.



* stations proposées - proposed stations
 o stations en opération - stations in operation

<u>GLOSS n°</u>	<u>GLOSS station</u>	<u>Données marégraphiques disponibles</u> <u>Sea-level data holdings</u>
249	Ceuta (Espagne)	1944-1964
282	Tan Tan (Maroc)	1957-1959
250	Funchal (Portugal)	1093-64 1976-78 1981-82
251	Las Palmas (Espagne)	
252	Nouakchott	
253	Dakar (Sénégal)	1942-45 1952-53 1958-66
254	Porto Grande (Cape Verde)	1947-1950
255	Conakry (Guinée)	
256	Aberdeen Point (Sierra Leone)	Freetown 1926 (new gauge expected soon)
257	Abidjan (Côte d'Ivoire)	1971 1974-76
258	Tema (Ghana)	Takoradi 1929-1985
259	Lagos (Nigéria)	
260	Sao Tome (Sao Tome and Principe)	
261	Pointe Noire (Congo)	1959-60 1977-79
262	Luanda (Angola)	
263	Açension (U.K.)	
264	St Helena (U.K.)	
280	Douala (Cameroun)	

Fig. 4.1. - Stations marégraphiques proposées pour le projet GLOSS

Fig. 4.1. - Proposed gloss sea-level stations

(UNESCO, 1987)

Les instruments requis sont les suivants : un niveau de géomètre et son trépied, une chaîne d'acier et deux mires.

Lorsque la BR est très près de la perche, comme le montre la figure 4.2.a., il convient d'observer les étapes suivantes pour niveler la perche.

- 1 - Installer et niveler l'instrument près de la BR,
- 2 - Mettre des mires sur la BR ainsi que sur la perche,
- 3 - Faire une lecture de la mire sur BR, soit $a = \dots$,
- 4 - Faire une lecture de la mire sur la perche, soit $b = \dots$,

La procédure de calcul indiquée à la figure 4.2.a. est la suivante :

- 1 - Elévation de la partie supérieure de la perche (à partir du haut de la BR)
 $= a - b$
- 2 - Elévation de la BR par rapport au point fixe de la carte d'état-major
 $= x$
- 3 - Elévation de la BR par rapport au point fixe de la carte marine :
 $= x + y$
- 4 - Hauteur de la perche par rapport au point fixe de la carte d'état-major :
 $= x + y + (a-b)$
- 5 - Zéro de la perche $(x + y + (a+b)) - \text{longueur de la perche}$

Le résultat (5) doit être soustrait des lectures obtenues sur la perche. Si la BR se trouve à une distance importante de la perche, le nivellement entre les deux points devra être fait en plusieurs étapes (fig. 4.2.b). La procédure est la suivante :

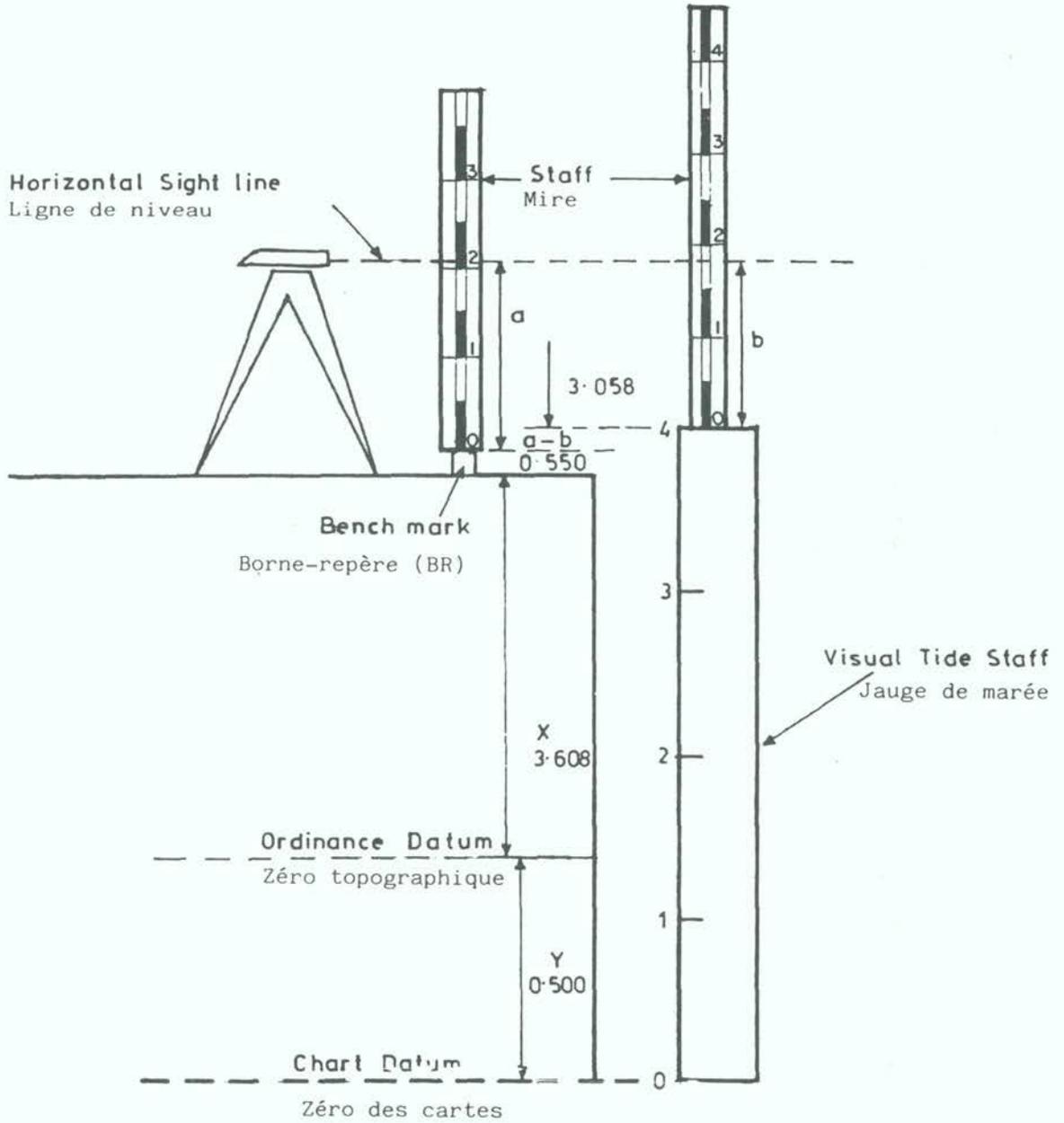
- 1 - Installer et niveler l'instrument entre la BR et le premier point (position 1)
- 2 - Mettre des mires sur la BR ainsi que sur la position 1
- 3 - Lire la mire de la BR comme visée inverse, soit a
- 4 - Lire la mire de la position 1 comme visée directe, soit b
- 5 - Déplacer l'instrument sur une nouvelle position vers l'avant (comme le montre la figure)
- 6 - Choisir un nouveau point (position 2) devant l'instrument
- 7 - Répéter les étapes (3) et (4) ci-dessus
- 8 - Les étapes qui précèdent sont répétées sur le chemin qui sépare la BR de la perche, jusqu'à ce que la mire de visée avant se trouve sur la perche.

L'élévation de la perche par rapport à la BR est :
 $= (a-b) + (c-d) + (e-f)$

Le reste de la procédure est le même que dans la figure 4.2.a.

Pour d'autres types de jauges de marée, la procédure est la même, mais il convient d'effectuer des observations supplémentaires, par exemple pour les jauges de marée flottantes; il est nécessaire de déterminer de manière précise le niveau de l'eau dans le puits de jauge par rapport à la BR et de régler la jauge sur cette lecture.

(a)



(b)

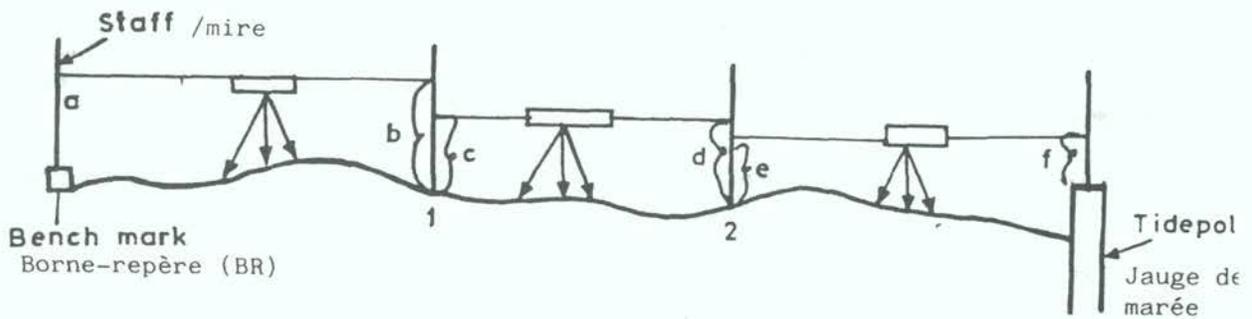


Fig. 4.2. - Détermination de l'altitude d'une jauge de marée
 a/ quand la BR est à proximité
 b/ quand la BR est éloignée

Fig. 4.2. - Determining the altitude of a visual tide pole
 a/ when BR is close
 b/ when BR is far away

4.2.1.3. Extraction des niveaux : statistiques

La figure 4.3. montre une bande indiquant les enregistrements sur rouleau papier d'une jauge, effectués pendant 7 jours à une station marégraphique.

En effectuant chaque jour l'extraction des hauteurs de marée basse et de marée haute, et le moyennage des résultats sur un mois et sur une année (en s'assurant d'un nombre égal de mesures mensuelles et de mesures annuelles), on obtient des niveaux moyens de marée (UNESCO, 1985).

L'extraction des hauteurs horaires et le moyennage des résultats sur des périodes d'un mois et d'une année permet d'obtenir les valeurs moyennes du niveau marin.

L'extraction sur une longue période des hauteurs horaires corrigées pour les erreurs de jauge portant sur le temps et la hauteur, peut être utilisée pour :

- une analyse marégraphique complète,
- des statistiques du niveau marin moyen,
- des études du régime marégraphique.

Une autre méthode donnant un résultat identique consiste à effectuer une moyenne filtrée de lectures faites toutes les 3 heures (filtre Z0) ou une moyenne filtrée de lectures horaires (filtre X0).

Pour être d'un emploi facile, ces diverses solutions destinées à obtenir les statistiques de niveau marin impliquent l'utilisation d'un traitement informatique. Le filtre utilisé le plus couramment pour calculer le niveau marin moyen est le filtre Doodson X0. Le lecteur intéressé par ces techniques se reportera au Manual on Sea Level Measurement and Interpretation (UNESCO, 1985).

4.2.1.4. Traitement des données marégraphiques

Parmi les principaux facteurs responsables des variations du niveau marin à une station donnée, on peut citer, par ordre d'importance :

- la marée astronomique : composantes périodiques,
- les effets atmosphériques : pression, vent,
- les effets océanographiques : courants, température, salinité,
- les effets eustatiques : variation du volume des mers et des océans,
- les effets tectoniques : surrection, subsidence.

Les effets eustatiques et tectoniques conduisent à des variations de petite amplitude (quelques 1/10 mm à quelques mm/an) qui ne peuvent être mis en évidence qu'à partir de l'analyse de longues séries de données marégraphiques disponibles sur plusieurs dizaines d'années, après filtrage des composantes de courte période et de grande amplitude.

Parmi ces dernières composantes, les surélévations dues aux effets atmosphériques (surcotes) sont d'un intérêt primordial pour le concepteur d'ouvrages côtiers.

Sur un enregistrement marégraphique, la surcote à un instant (t) peut être estimée en première approximation, par la différence positive entre l'amplitude de la marée observée et celle de la marée astronomique théorique.

L'analyse d'une longue série de données marégraphiques par cette méthode permet d'obtenir un échantillon de surcotes estimées. Par sélection des surcotes supérieures à un seuil donné, on extrait de ces échantillons un sous-ensemble de valeurs de surcotes indépendantes (non auto-corrélées). On cherche ensuite la loi statistique qui s'ajuste le mieux à ces valeurs, afin d'en déduire des estimations statistiques pour les surcotes annuelles, décennales, centennales (fig. 2.12).

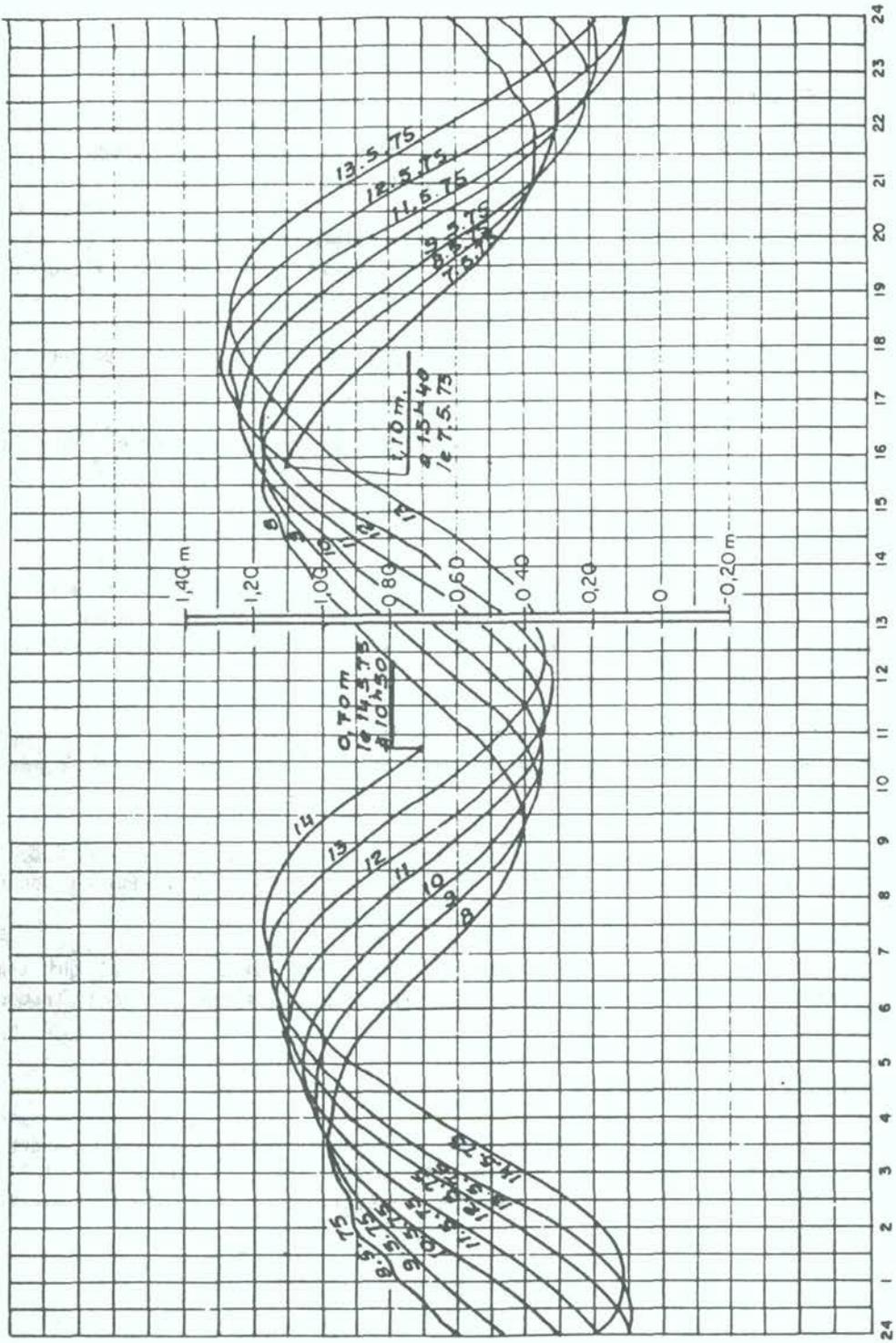


Fig. 4.3. - Enregistrement marégraphiques journaliers pendant 7 jours (7-14/5/75) à Signal Station, Lagos (Nigeria)

Fig. 4.3. - 24 hour gauge drum recording for 7 days (7-14/5/75) at Signal Station, Lagos (Nigeria)

Comme les amplitudes des surcotes atmosphériques varient de façon significative d'un site côtier à un autre en fonction de la morphologie et de la bathymétrie du site, on comprend qu'il soit nécessaire de multiplier les observations marégraphiques sur le littoral.

4.2.2. Mesures de houle

4.2.2.1. Intérêt de la connaissance de la houle

La houle au large est caractérisée par 4 paramètres fondamentaux : l'amplitude (H), la période (T), la longueur d'onde (L) et la direction de propagation (α).

Comme la houle naturelle est souvent complexe et constituée par des trains de vagues successives de période et d'amplitude différente, on la caractérise généralement à l'aide des paramètres suivants, estimés à partir d'enregistrements houlographiques :

- H 1/3, ou Hs : amplitude (ou hauteur) significative : moyenne du tiers supérieur des hauteurs enregistrées;
- T 1/3 ou Ts : période significative : moyenne des périodes du tiers supérieur des plus fortes amplitudes enregistrées;
- Hmax, Tmax : amplitude et période maximale enregistrées.

Le transfert des caractéristiques de l'énergie de la houle du large à la côte se fait à partir de modèles de réfraction. Ce transfert ne peut être réalisé qu'en connaissant la répartition directionnelle de l'énergie au large, ce qui implique de connaître la répartition fréquentielle des amplitudes et des périodes par direction de propagation.

La conception et le dimensionnement des ouvrages de protection côtière et des ouvrages portuaires suppose que l'on connaisse les caractéristiques de la houle définies précédemment (H, T, α).

Les risques de ruine d'un ouvrage sont fonction des caractéristiques maximales de la houle (Hmax, Tmax), mais aussi de la durée d'action des houles maximales pour une direction donnée (Quélenec, 1976).

C'est le plus souvent ces deux derniers paramètres (direction, durée d'action) qui sont les plus mal connus, car non disponibles à partir des systèmes classiques d'enregistrement houlographiques.

4.2.2.2. Méthodes de mesure de l'état de la mer

Les observations visuelles de l'état de la mer sont généralement faites à partir de phares, de sémaphores, de capitaineries de port ou de navires sélectionnés. L'intérêt de telles observations réside notamment dans l'indication de la direction de la houle. Parmi les inconvénients, on peut citer :

- estimations approximatives pour l'amplitude et la période de la houle;
- observations nocturnes rarement réalisées;
- fiabilité des observations, fonction du site d'observation et de l'observateur;
- sous-estimation des fortes houles en utilisant les statistiques issues des observations faites par les navires sélectionnés car ceux-ci cherchent souvent un abri lors des fortes tempêtes.

Parmi les instruments enregistreurs utilisés pour la mesure de la houle (H, T), on trouve principalement :

- des perches à houle installées généralement à proximité du rivage ou dans les ports, et utilisant le principe de l'effet résistif ou capacitif;
- des houlographes à ultra sons posés sur le fond de la mer et qui déterminent la hauteur d'eau grâce à la mesure du temps de propagation d'une onde entre la surface et le son;
- des houlographes à pression posés sur le fond de la mer et qui permettent d'estimer les variations de pression dues à la houle;
- des bouées flottantes, type DATAWELL, ENDECO, NBA, NEREIDES, qui permettent d'estimer les caractéristiques de la houle à partir des accélérations induites par les mouvements oscillatoires de la surface.

Les houlographes à pression ou à ultra sons, posés au fond de la mer, ont l'avantage de n'être pas visibles, ce qui réduit les actes de vandalisme, et d'être peu influencés par les tempêtes. Par contre, étant généralement implantés à des profondeurs de 10 à 20 m et reliés par câble à terre pour la transmission des informations, ils risquent d'être dragués par les filets des pêcheurs.

Les bouées flottantes pour la mesure de la houle sont, par contre, sujettes à l'action des fortes tempêtes et au vandalisme. La transmission des informations sur une centrale de réception à terre peut être faite par liaison radio ou par l'intermédiaire de liaison satellite ARGOS ou METEOSAT (Quélenec, 1984).

4.2.2.3. Réseaux de mesure

La plupart des projets portuaires réalisés en Afrique de l'Ouest et du Centre ont été l'occasion de campagnes de mesure de houles à l'aide de méthodes et d'équipements divers. Le plus souvent, la durée de ces campagnes n'a pas excédé quelques mois à un an : voir, par exemple, la figure 4.4. qui présente les résultats de mesure à RIO NUNEZ (Guinée) à l'aide d'un houlographe à pression.

Les principaux inconvénients de ces campagnes de mesure sont :

- faible durée des périodes d'observation, ce qui n'autorise pas une estimation précise des caractéristiques (H, T) de la houle pour des durées de retour longues : 20, 50, 100 ans;
- non observation des directions de propagation de la houle, ce qui conduit à des imprécisions notables dans le résultat des simulations de l'énergie de la houle transmise à la côte.

L'intérêt de la constitution progressive de tels réseaux de mesure ne doit pas faire oublier l'utilité des campagnes visuelles d'observation de la houle à partir du rivage (paragraphe 4.3) : de telles campagnes constituent, quand les enregistreurs de houle font défaut, le seul moyen d'acquérir des données sur le régime des houles à la côte et de préparer les premières esquisses des projets de protection côtière.

Il apparaît donc nécessaire d'inciter et d'aider les autorités maritimes de chaque pays à s'équiper, notamment à l'occasion de travaux d'aménagement et de rénovation portuaires, de houlographes non directionnels à implanter pendant 3 à 4 ans au large des diverses zones littorales sensibles, de façon à compléter la connaissance régionale du régime et des caractéristiques (H, T) de la houle.

PERIODE DU 13-10-56 AU 24-10-57
 80 JOURS D OBSERVATION - 0 JOURS DE CALME PLAT ($H_{max} < 0,25m$)
 PERIODES ANALYSEES

13-10-56 AU 16-10-56	25- 8-51 AU 12- 9-51
1- 7-51 AU 16- 7-51	18- 9-51 AU 19- 9-51
19- 7-51 AU 30- 7-51	11-10-51 AU 24-10-51
30- 7-51 AU 23- 8-51	

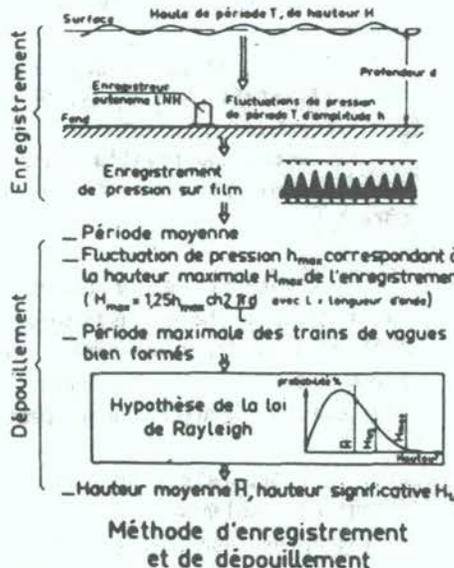
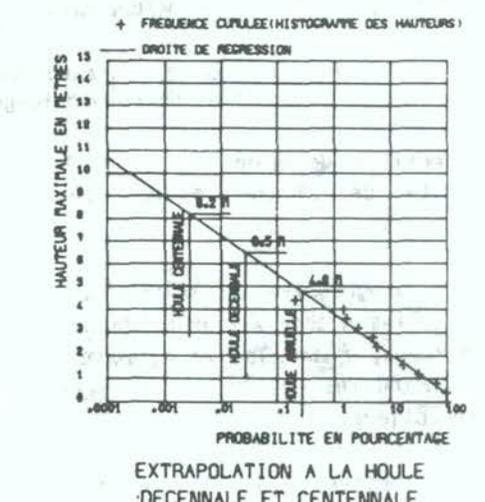
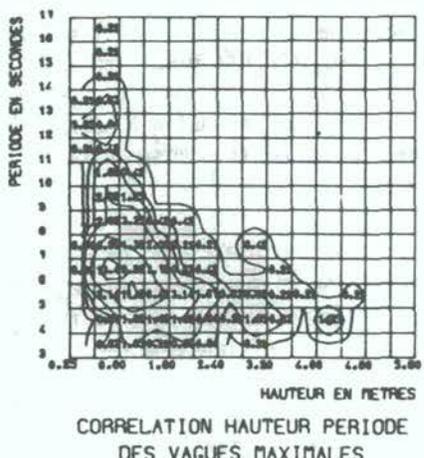
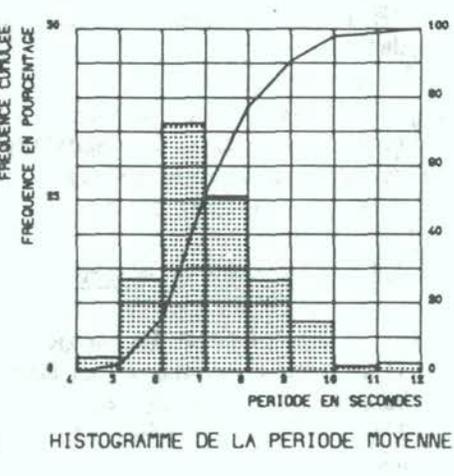
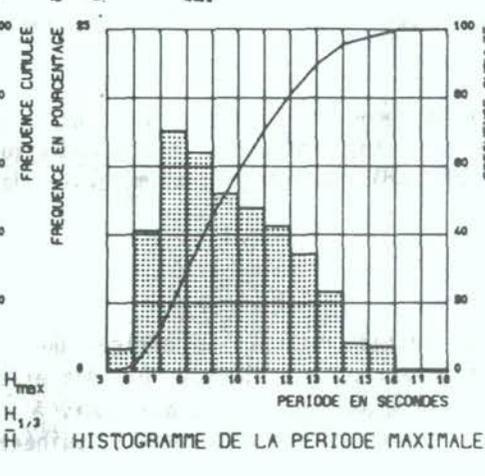
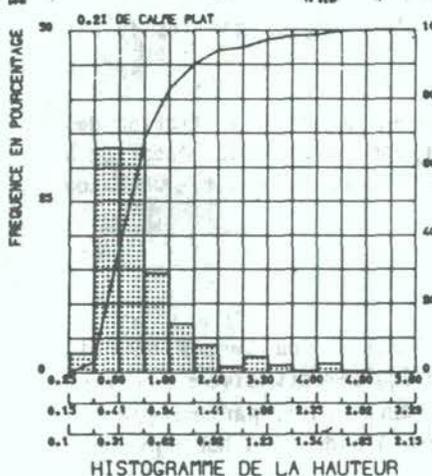
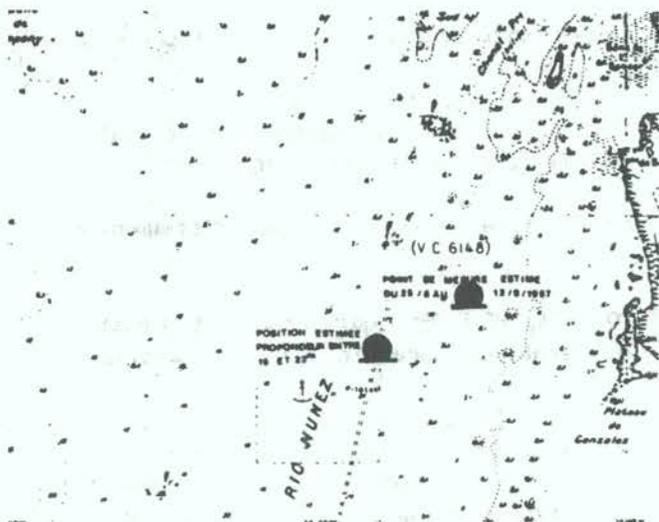


Fig. 4.4. - Statistiques de la houle mesurée à Rio Nunez (Guinée)
 Fig. 4.4. - Wave statistic at Rio Nunez (Guinea)

4.3. PROGRAMME D'ACQUISITION DE DONNEES SUR LES ZONES LITTORALES SENSIBLES

4.3.1. Objectifs

Les opérations d'inventaire du littoral décrites au paragraphe 4.1. permettent d'identifier un ensemble de segments côtiers considérés, en première analyse, comme sujets à l'érosion et constituant des zones littorales sensibles.

La décision d'investir pour protéger ces zones de l'action de la mer ou pour les aménager, n'est généralement prise qu'après l'obtention des données de base permettant d'identifier les causes, les caractéristiques et les conséquences des processus en cours, et d'imaginer des solutions et projets d'aménagement adaptés à chaque zone littorale.

Le programme de surveillance proposé ci-après a pour objectif de mettre à la disposition des concepteurs d'ouvrages de génie côtier et des décideurs, une base de données et d'informations de première nécessité, pour leur permettre d'apprécier le degré de sensibilité à l'érosion des zones littorales et de faire choix d'une politique et des travaux éventuels de protection côtière.

Ce programme porte en priorité sur des techniques simples et adaptées à la surveillance des zones littorales sujettes à l'érosion, dans la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre. Il est évident qu'il devra être adapté pour tenir compte des caractéristiques spécifiques de chaque site littoral et des moyens humains et techniques disponibles pour les études.

La conception et le dimensionnement détaillé des ouvrages de protection côtière pourront, selon les cas, nécessiter l'acquisition de données complémentaires (géotechniques, hydrodynamiques, bathymétriques, sismiques) en fonction de la complexité des processus identifiés, du type et de l'importance des ouvrages à réaliser.

4.3.2. Enquêtes préliminaires

Elles ont pour objectif d'identifier, en l'absence de données de mesure préalables, les segments littoraux les plus sensibles à l'érosion : ce sont sur ces segments côtiers que seront réalisés, en priorité, les campagnes de mesure proposées dans les paragraphes suivants.

Pour ce faire, on cherchera à obtenir auprès des usagers du littoral, de la population et des autorités locales, des informations sur les causes, l'importance et les conséquences des processus d'érosion côtière identifiés sur un segment de littoral donné.

Lors des enquêtes de terrain, on cherchera notamment à obtenir auprès de divers interlocuteurs, des réponses aux questions suivantes :

- depuis quand se manifeste l'érosion côtière?
- quelles sont les données objectives (faits) qui permettent de juger de l'occurrence et de l'importance des phénomènes d'érosion?
- l'évolution régressive du rivage est-elle lente et progressive ou se manifeste-t-elle de façon brutale, à l'occasion par exemple de fortes tempêtes?
- dates et caractéristiques connues des plus fortes tempêtes récentes observées et dommages constatés?
- existence de phases cycliques d'avancée et de recul du rivage?
- ordre de grandeur (m/an) du recul moyen du rivage?

- informations disponibles sur les interventions humaines réalisées sur le segment côtier étudié et sur les segments voisins : extraction de sable marin, constructions sur le littoral, ouverture/fermeture de graus?

Les informations recueillies à l'occasion de ces enquêtes seront consignées sur des fiches relatives à chaque segment côtier sensible. L'expert y consignera également ses observations de terrain. Les photographies de phénomènes et de sites remarquables identifiés sur le segment côtier étudié seront jointes afin de servir de documents de référence pour des comparaisons ultérieures.

A partir de ces informations préliminaires très variables en quantité et qualité d'un segment côtier à un autre, l'expert tentera de répondre aux questions suivantes :

- la tendance régressive pour l'évolution du segment littoral risque-t-elle de se poursuivre dans le futur? Réponses possibles : peu probable, probable, impossible de juger sans données complémentaires;

- dans le cas où la tendance régressive se poursuivrait avec le même ordre de grandeur pour le recul moyen du rivage (m/an), quelles en seraient les possibles conséquences socio-économiques, (estimation du coût des dommages) dans 1 an, 5 ans, 10 ans?

Ces nouvelles informations doivent permettre de classer les segments littoraux sensibles à l'érosion en 3 catégories principales selon les priorités d'intervention suivantes :

Priorité 1 : segments côtiers où des travaux de défense côtière doivent être réalisés rapidement pour protéger des biens socio-économiques jugés importants et menacés à court terme;

Priorité 2 : segments côtiers dont l'évolution doit être mieux comprise afin de prendre une décision sur la politique de protection car les risques d'occurrence de dommages significatifs dus à l'érosion sont jugés faibles ou acceptables à court terme;

Priorité 3 : segments côtiers où l'évolution régressive du rivage est réversible ou lente, et où des dommages significatifs ne sont à craindre qu'à moyen ou long terme.

Ce classement provisoire des segments côtiers sensibles permet de mieux répartir, à l'échelle d'une région administrative ou d'un pays, les efforts nécessaires à la réalisation des programmes d'acquisition de données et de surveillance du littoral.

4.3.3. Etude de l'évolution historique du rivage

La comparaison de certaines cartes anciennes et récentes des régions littorales permet, quand ces documents sont disponibles, d'estimer les tendances historiques d'évolution du rivage.

Cette évolution peut être évaluée, pour la période historique récente, grâce à l'étude comparative des photographies aériennes des mêmes zones littorales prises à plusieurs années ou décennies d'intervalle.

De tels documents photographiques sont généralement disponibles pour la majorité des zones côtières de la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre (PNUE, 1985).

Un moyen commode pour évaluer l'évolution d'une ligne de rivage à partir d'une séquence temporelle de photographies aériennes de la même zone littorale est de travailler sur des tirages papier préalablement agrandis et mis à la même échelle. Le facteur d'agrandissement possible, qui dépend de la qualité des prises de vues aériennes originales, varie entre 3 et 5, ce qui permet généralement de travailler sur des documents photographiques agrandis à l'échelle du 1/5.000 ou du 1/10.000.

Dans les zones littorales où le marnage dû à la marée est significatif, et où la pente des plages est faible, il est recommandé de suivre l'évolution d'un des traits morphologiques caractéristiques de l'arrière-plage (berme, limite de végétation) plutôt que celle de l'interface mer-estran qui varie en fonction de la marée et de l'état de la mer.

Le report de ces traits morphologiques d'un document sur l'autre permet, après correction d'éventuels facteurs résiduels de distorsion des photos agrandies, de disposer d'éléments objectifs pour estimer l'évolution du rivage d'un segment côtier, dans le temps, ce qui complète les informations obtenues lors des enquêtes de terrain.

4.3.4. Mesure des profils de plage

4.3.4.1. Objectifs

La mesure régulière d'une série de profils (transversaux) de plage sur un segment côtier permet d'évaluer le comportement de ce segment sous l'effet des agents hydrodynamiques (vagues, courants, marée, vents).

Si ces mesures sont poursuivies sur une durée suffisamment longue (une à plusieurs années) et si les agents hydrodynamiques font l'objet d'un programme de mesures réalisées conjointement (paragraphe 4.3.5), on dispose des éléments fondamentaux nécessaires à la simulation sur modèles (mathématiques ou physiques), des processus d'échanges sédimentaires, et à la définition des ouvrages de protection appropriés.

Pour bien apprécier les échanges sédimentaires longitudinaux et transversaux sur un segment côtier, il est souhaitable :

- que la mesure des profils porte simultanément sur l'ensemble des parties aériennes et sous-marines de la plage (paragraphe 2.3);
- que les distances entre profils soient aussi réduites que possible;
- que la fréquence des mesures soit grande;
- que le segment côtier soit défini de telle façon que les échanges sédimentaires latéraux aux extrémités du segment soient connus ou nuls.

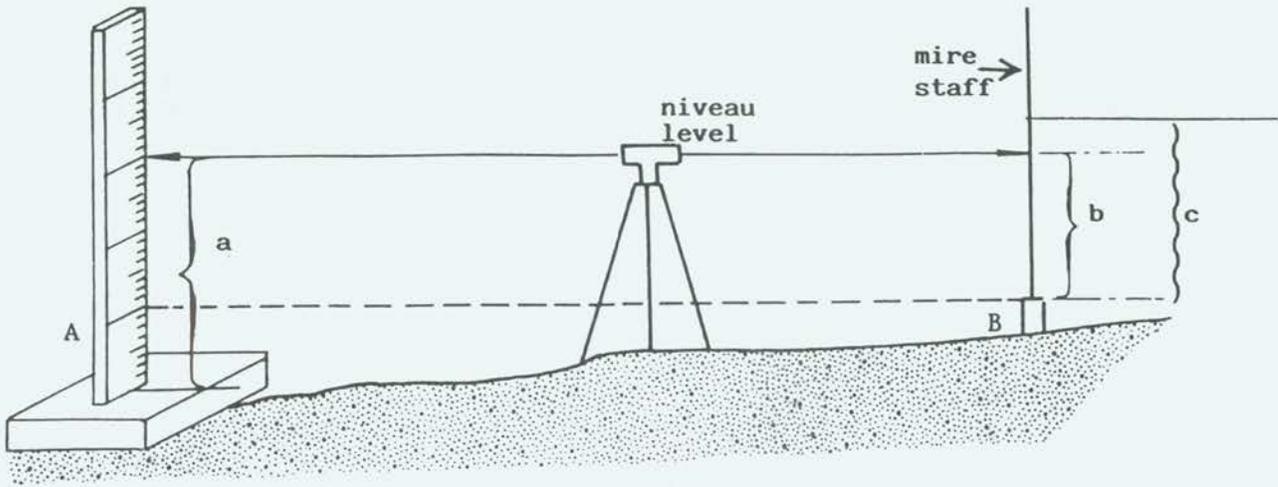
4.3.4.2. Profils de plage aérienne

Chaque profil de plage, orienté perpendiculairement au rivage doit être balisé par deux bornes ou piquets de référence stables (fig. 4.5), rattachés (coordonnées X, Y et altitude Z) si possible au système géodésique et topographique local.

L'écartement entre les profils peut varier, selon l'extension latérale des segments et leur morphologie, de quelques dizaines à quelques centaines de mètres.

La fréquence des mesures est généralement hebdomadaire ou mensuelle, avec si possible dans ce dernier cas, des mesures complémentaires après chaque tempête.

Dans la mesure du possible, les campagnes de mesure des profils de plage sont réalisées à l'aide d'instruments topographiques de type distance mètre, théodolite ou niveau, qui permettront des mesures rapides et précises par une équipe de deux personnes : un profil de plage peut ainsi être mesuré en moins d'une demi-heure.



borne repère
bench mark

Fig. 4.5. - Mesure du profil de plage à l'aide d'un niveau

Fig. 4.5. - Beach profiling with the aid of a level

4.3.4.2.a. Levé des profils de plage à l'aide d'un niveau

Pour effectuer le levé topographique d'un profil au moyen d'un niveau, les instruments suivants sont nécessaires :

- un niveau de géomètre,
- une mire,
- un ruban gradué en acier de 100 m.

Le levé est effectué le long d'une ligne de profil. Cette ligne de profil doit être une ligne droite, à angle droit avec le rivage et doit être contrôlée à partir d'une station fixe (borne repère) dont l'altitude a été prédéterminée. La procédure de levé de niveau pour la ligne de profil est la suivante :

- 1 - Placer le niveau approximativement à mi-chemin entre la mire de visée arrière (qui se trouve sur la borne) et la mire de visée avant (devant le niveau);
- 2 - Nivelier l'instrument grâce aux vis de réglage;
- 3 - Faire une lecture de la mire de visée arrière (visée inverse = a sur la figure 4.5);
- 4 - Retourner le niveau et effectuer la visée avant (visée directe = b sur la figure 4.5);
- 5 - Mesurer la distance entre A et B en utilisant le ruban gradué;

6 - Tout en gardant la mire de visée avant dans la même position, placer l'instrument devant celle-ci de façon à ce que la position B devienne maintenant la visée arrière alors qu'une nouvelle position de visée avant est établie;

7 - Répéter les étapes 2 à 4;

8 - Répéter cette procédure sur la même ligne droite jusqu'à ce que le dernier point de profil soit atteint, en général à une certaine distance dans l'eau (profondeur de 1 à 1,50 m).

Il convient de noter les points suivants quand on utilise des anciens modèles de niveaux :

- De façon à éliminer les erreurs de collimation, le niveau doit être approximativement à distance égale de la mire avant et de la mire arrière;

- L'instrument doit toujours être nivelé (calé) sur la ligne de profil avant toute lecture;

- les caractéristiques des points stationnés le long de la ligne de profil doivent être notées dans le carnet de terrain, par exemple : replat, laisse de haute mer, laisse de basse mer.

Il y a deux méthodes principales d'inscription et de calcul, à savoir : la méthode "monter et descendre" ou "arrière-avant", et la méthode par hauteur de collimation, la plus simple étant la méthode "arrière-avant" décrite ci-dessous :

Points	Visée arrière	Visée avant	Altitude points visés	Remarques
A	a		Ha	Borne
B	c	b	Ha + (a-b)	Replat
C	e	d	Hb + (c-d)	Rocher

L'altitude connue (à savoir la borne-repère fixe qui est le point de contrôle du profil) = Ha.

Pour déterminer l'altitude de B, C..., la règle générale est de soustraire la lecture de la visée avant de celle de la visée arrière et d'ajouter le résultat à l'altitude de la station de visée arrière. Dans la figure 4.5. :

$$\text{Altitude de B (Hb)} = \text{Ha} + a - b$$

où

Ha = Altitude de a

a = lecture de visée arrière de la mire à la station A

b = lecture de visée avant de la mire à la station B

La procédure ci-dessus sera suivie pour les autres points du profil dont les altitudes seront à déterminer.

4.3.4.2.b. Levé des profils de plage sans niveau

Quand les instruments topographiques font défaut, la mesure des profils peut être réalisée à l'aide de l'une ou l'autre des méthodes suivantes :

- Le niveau est remplacé par un jalon de 1,50 m environ posé verticalement sur la borne BZ. L'observateur placé en arrière du jalon vise l'horizon. La ligne de visée intercepte une hauteur H

sur une mire qui est déplacée sur le profil de plage, comme pour un nivellement classique (fig. 4.6). La distance de la mire à l'observateur est mesurée à l'aide d'un ruban gradué. Cette méthode simple de nivellement est relativement précise ± 10 cm pour les ΔH , quand les distances de mesure et la pente de la plage n'obligent pas l'observateur à changer plusieurs fois de station sur un même profil, afin de pouvoir estimer la hauteur interceptée sur une mire de 4 à 6 m de longueur, graduée tous les 20 ou 50 cm.

- Comme autre solution, on peut matérialiser le profil de plage par une rangée de tubes d'acier galvanisé enfoncés verticalement de 2 à 3 m dans le sable, espacés de 5 à 10 m et dépassant du sable de 2 m. Les tubes peuvent être enfoncés à l'aide d'un marteau pneumatique sur la plage aérienne ou à l'aide d'une lance pneumatique sur la plage sous-marine. La mesure des variations topographiques se fait ensuite par lecture directe entre le niveau du sable et le sommet du tube. Cette lecture peut être faite régulièrement par un observateur non qualifié pour la plage aérienne, alors qu'elle nécessite un plongeur équipé pour les lectures sous-marines. L'inconvénient majeur de ce système simple d'observation réside dans les risques d'accident occasionnés par les tubes métalliques pour les usagers de la plage, les pêcheurs et les plaisanciers : il ne peut être utilisé sans un accord du public ni un sérieux balisage.

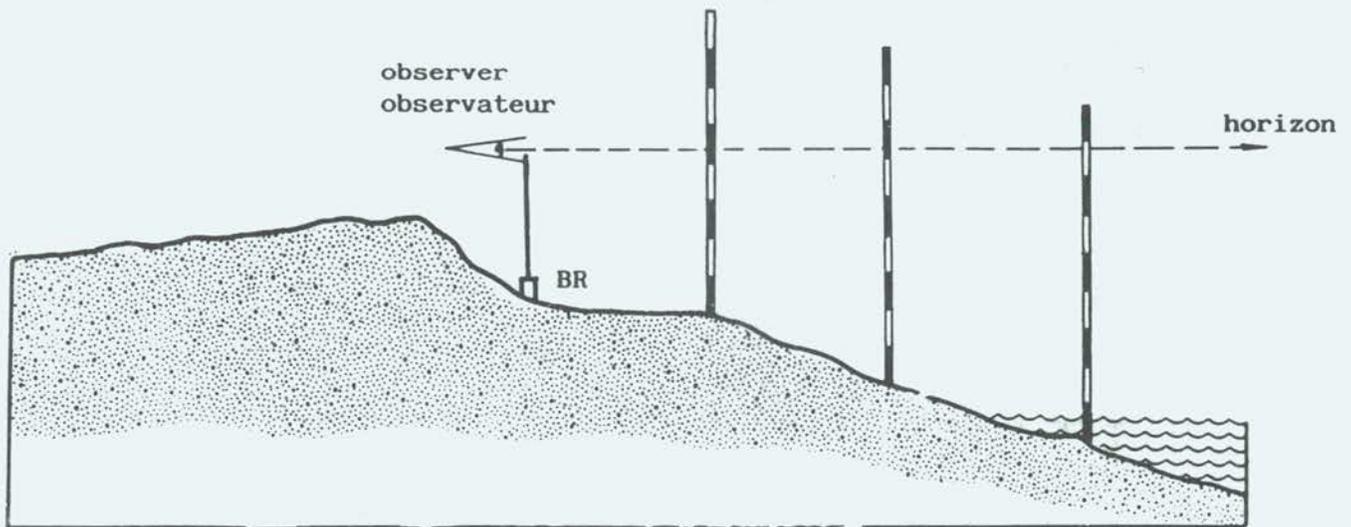


Fig. 4.6. - Mesure du profil de plage par visée sur l'horizon à partir d'un point fixe

Fig. 4.6. - Beach profiling by sighting the horizon from a fixed point

4.3.4.3. Calcul des volumes entre profils

L'objectif du levé de profil d'une plage est de permettre le calcul du volume de sédiments de plage perdu ou gagné sur une certaine période de temps. Pour le calcul des volumes, on établit un graphique de l'élévation (hauteur réduite) en fonction de la distance, pour chaque jour d'observation et pour le nombre total d'observations (profils). On exagère en général l'échelle verticale (Z).

La méthode des surfaces d'extrémités (End areas method) (Garner et al., 1976) peut être utilisée pour le calcul des volumes de sable entre des profils adjacents, et progressivement pour la plage toute entière, soit :

Détermination par exemple, par la méthode d'interpolation des trapèzes ou celle de Simpson (Pelletier, 1971)

$$V = D (A1 + A2) / 2$$

où

V = Volume

D = Distance entre profils adjacents

A1 et A2 = sections des 2 profils adjacents 1 et 2.

4.3.4.4. Levé du profil de la plage sous-marine

Afin de comprendre la dynamique des zones littorales (estran aérien et sous-marin), il est nécessaire de continuer le levé du profil de plage sous l'eau jusqu'à la zone du déferlement au moins, et plus loin encore si possible. Pour ce faire, on fixe un écho-sondeur portable sur un petit bateau ou dinghy (de préférence en caoutchouc), avec un transducteur monté en dessous ou sur le côté du bateau. Un écho-sondeur est un simple système sonar utilisé pour enregistrer les profondeurs des rivières ou étendues d'eau. L'écho-sondeur envoie une impulsion dans l'eau, vers le fond de mer. Cette impulsion est renvoyée au récepteur, qui effectue une conversion de la vitesse et du temps de propagation émetteur/récepteur (aller et retour), ce qui donne un résultat appelé "profondeur", selon la formule suivante :

$$D = 1/2 VT$$

où

V = vitesse de l'impulsion (valeur connue ≈ 1500 m)

T = temps de parcours de l'impulsion (valeur mesurée)

Un écho-sondeur portable peut donner ses résultats sous forme d'affichage numérique, ou sous forme d'enregistrement graphique sur un rouleau enroulé sur un cylindre.

Lorsque l'écho-sondeur est monté et prêt à l'emploi, il est nécessaire d'effectuer les essais suivants :

- erreur de transmission pour l'écho-sondeur graphique;
- vérification au moyen de la barre de calibrage.

Afin de vérifier les erreurs de transmission, mettre en route l'écho-sondeur et surveiller le stylet qui doit juste effleurer l'ergot de réglage du stylet sur la plaque du cylindre. A ce moment précis, les impulsions ont déjà été transmises au fond marin, et sont revenues au récepteur : les conversions ont été faites et imprimées sous forme d'une indication de profondeur sur le rouleau.

Les indications imprimées sur le rouleau, à savoir la profondeur, doivent commencer à la ligne zéro (verticale) appelée aussi ligne de transmission. On vérifie ainsi que le rouleau est correctement fixé. L'enregistrement imprimé sur le rouleau doit être bien marqué. Par un réglage du bouton, on peut obtenir que le stylet trace une ligne droite le long du rouleau.

Vérification au moyen de la barre de calibrage : pour vérifier que l'écho-sondeur enregistre la bonne profondeur, une longue barre de fer de 1 à 2 m et 5 cm environ de diamètre, et portant à chaque extrémité des longueurs de corde graduée, est placée sous le transducteur à une profondeur déterminée, un mètre par exemple. L'on branche alors l'écho-sondeur et l'on vérifie les résultats imprimés sur le rouleau. Répéter l'essai pour différentes profondeurs jusqu'à deux mètres. Si les profondeurs mesurées par la barre s'accordent avec les résultats imprimés sur le rouleau, l'écho-sondeur est prêt à l'emploi.

L'écho-sondeur numérique peut également être étalonné avec une vérification par barre. Que l'écho-sondeur soit ou non utilisé pour les sondages, l'utilisateur doit savoir :

- qu'une véritable profondeur est toujours imprimée de manière claire;
- qu'une fausse profondeur s'imprime toujours de façon floue.

Les fausses profondeurs (échos parasites) sont en général provoquées par des bancs de poissons, des plantes marines, des bulles d'eau, le bruit du tuyau d'échappement du bateau si les transducteurs de l'écho-sondeur se trouvent à proximité, et dans certains cas, par le blocage partiel d'un transducteur. Quelquefois, rien ne s'imprime sur le rouleau si les profondeurs de la zone examinée sont plus profondes que ne le prévoit le réglage de l'écho-sondeur. Dans ce cas, il convient de choisir une nouvelle gamme de profondeurs pour s'adapter à la profondeur accrue.

Enfin, lorsque l'on est sûr que l'écho-sondeur est prêt à l'emploi, on amène le bateau le long de la ligne de sondage, ajustée en ligne ("Amer") avec la borne de repère ou le repère qui se trouve sur le rivage ou en prenant un cap au moyen du compas, tandis que l'écho-sondeur mesure les profondeurs et les imprime. Notez qu'il faut toujours maintenir le bateau à une vitesse constante et que le transducteur doit toujours rester immergé, même lorsque le bateau est soumis au roulis ou au tangage, ou qu'il se cabre par suite d'une grande vitesse.

La ligne de sondage doit se trouver dans le prolongement de la ligne de profil sur la plage découverte. Les systèmes de communication bi-directionnels simples comme les walkie-talkies, ou plus évolués comme un télémètre électronique positionné sur la plage avec prisme de réflexion monté sur le bateau, sont également utiles pour maintenir le bateau sur une ligne de profil déterminée. Ce dernier appareillage est capable en outre d'indiquer instantanément à des intervalles réguliers la distance du bateau à la côte.

L'observateur peut choisir de faire un point sur la position du bateau à des intervalles de 2 minutes : dans ce cas le bouton de mesure de distance est actionné toutes les 2 minutes, et le stylet imprime une ligne droite sur le rouleau, marquant ainsi la position du bateau au moment de la mesure de distance, et l'on peut également ajouter des commentaires sur cette ligne. Cette procédure donne à l'observateur des points de contrôle supplémentaires pour le tracé graphique des résultats.

Grâce à l'opération ci-dessus, on obtient un échogramme comme celui de la figure 4.7. qui concerne une traversée faite de Badagry Creek jusqu'à la lagune de Yelwa, à l'extrémité ouest du Nigéria (Ibe et al. 1987, Ibe et al., sous presse). L'enregistrement consiste en une série de lignes de balayage verticales, une ligne pour chaque transmission. Chaque ligne représente un instantané de ce qui s'est passé sous le bateau. Les instantanés sont enregistrés côte à côte sur le papier et le profil des fonds marins est ainsi enregistré.

La profondeur lue dépend du réglage de la gamme de profondeur choisi au départ. Par exemple, le rouleau de la figure 4.7. prévoit des lectures sur 4 gammes (correspondant aux réglages) à savoir : 1-16 m, 16-31 m, 31-46 m, 46-61 m, gammes qui peuvent être adaptées suivant la capacité de l'appareil. La sélection des gammes de distance est basée sur des sondages exploratoires préliminaires ou une connaissance des profondeurs qui seront rencontrées au cours de l'exploration.

Comme complément aux campagnes de mesure bathymétrique, il est souhaitable de réaliser des reconnaissances de la nature et de l'épaisseur des sédiments sous-marins : celles-ci sont réalisées (Lenôtre, 1984) à partir d'équipements spécifiques de sismique-réflexion installés sur le bateau utilisé pour la bathymétrie (fig. 4.8).

Quand les instruments d'écho-sondage ne sont pas disponibles, le levé des profils bathymétriques se fait point par point en mesurant, à partir d'une embarcation, la profondeur des fonds sous marins, à l'aide d'une simple sonde constituée d'une corde ou d'un ruban gradué et d'un lest.

Ces méthodes utilisant la surface de la mer comme niveau de référence, il est nécessaire que l'observation de la marée soit faite simultanément aux mesures sur une échelle marégraphique

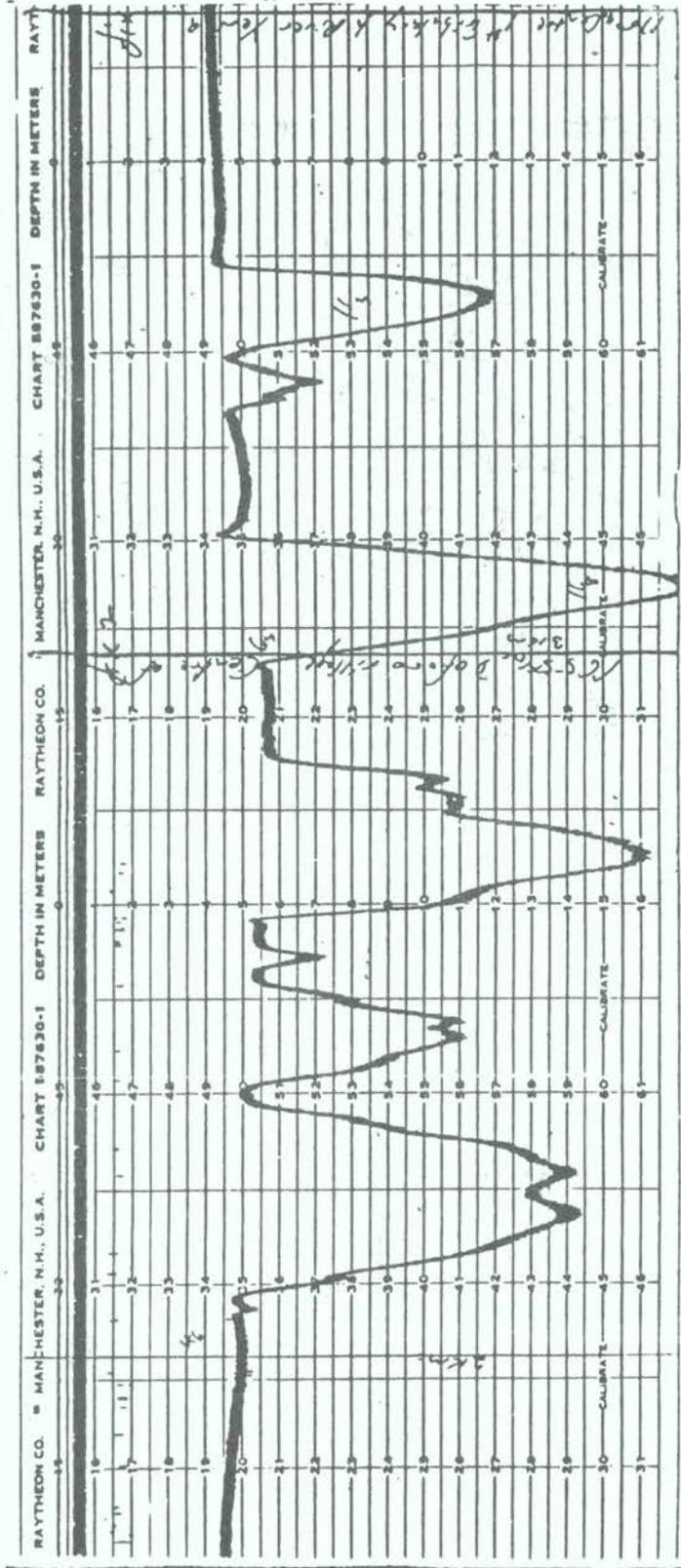


Fig. 4.7. - Diagramme d'échosondage entre Badagry Creek et Yelwa Lagoon (Nigeria).

Fig. 4.7. - Echogram of sounding across Badagry Creek and Yelwa Lagoon (Nigeria).
(Ibe and al.)

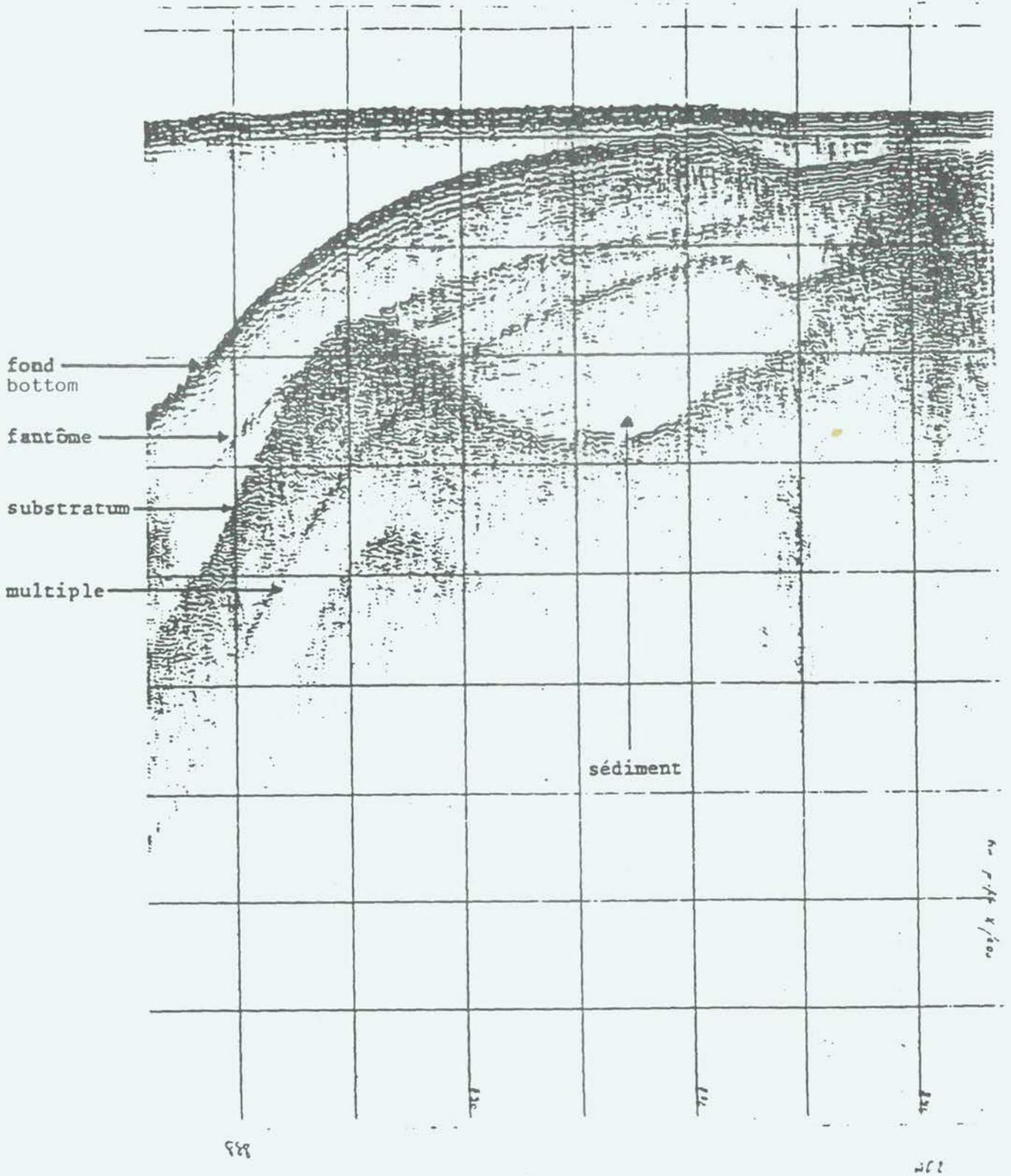


Fig. 4.8. - Exemple de coupe sismique réflexion

Fig. 4.8. - Seismic reflection diagram

implantée sur le site de mesure, et que les campagnes de mesures soient réalisées en période de mer calme de préférence.

La précision de levé des profils bathymétriques à l'aide de ces méthodes dépend à la fois de l'état de la mer et de la précision de positionnement du bateau sur le profil : elle est généralement de l'ordre de ± 10 à ± 20 cm.

Le système de mesure à l'aide de tuyaux enfoncés dans la plage sous-marine (paragraphe 4.3.4.2) permet une meilleure précision ponctuelle à l'aide d'un seul observateur.

4.3.5. Evaluation du régime hydrodynamique littoral

L'estimation de ces caractéristiques des houles au rivage et du transit sédimentaire littoral peut être réalisée à partir de mesures des houles au large et après utilisation de modèles mathématiques ou physiques. Ces modèles de transfert de l'énergie des houles à la côte supposent, notamment, que la cartographie des fonds sous-marins et la direction de propagation des houles au large, soient connues.

En l'absence de ces données, il est possible de réaliser sur un segment côtier à étudier, un programme de mesures visuelles des principales caractéristiques hydrodynamiques littorales à l'aide de moyens simples et peu coûteux mis en oeuvre par un observateur entraîné.

De tels programmes, variables dans leur contenu, sont mis en oeuvre dans divers pays, dont les U.S.A. où ils sont appelés "OEL" (Observations sur l'Environnement Littoral) (Bruno, 1973).

Un formulaire souvent utilisé pour l'enregistrement des données d'observation de l'environnement littoral est représenté dans la figure 4.9. Ce type de format permet le stockage des données et l'analyse des effets à long terme.

Ces programmes d'observations sont généralement accompagnés de campagnes de prélèvement et d'analyse d'échantillons de sédiments des plages aériennes et sous-marines qui ont pour objectif la détermination des caractéristiques granulométriques, minéralogiques et physico-chimiques dans le cas de sédiments cohésifs. Cinq à six échantillons de sédiments sont nécessaires pour définir la variation granulométrique transversale dans un profil de plage. L'échantillonnage de plusieurs profils permet d'établir la carte sédimentologique de la zone littorale étudiée, avec la représentation des iso-valeurs des diamètres granulométriques moyens des sédiments. Cette carte n'est généralement établie qu'une seule fois par site étudié.

Les principales variables hydrodynamiques qui sont mesurées sur un segment côtier à l'occasion des programmes d'observation du type "OEL" sont les suivantes :

- caractéristiques des vagues au déferlement : amplitude, période, direction, type de vague déferlante;
- vitesse et direction du courant littoral;
- largeur de la zone de déferlement;
- niveau de la mer.

Comme paramètres complémentaires, on peut aussi observer :

- la vitesse et la direction du vent;
- la pente moyenne de l'estran intertidal;
- la position des courants de retour (rip currents);
- les dimensions des croissants de plage.

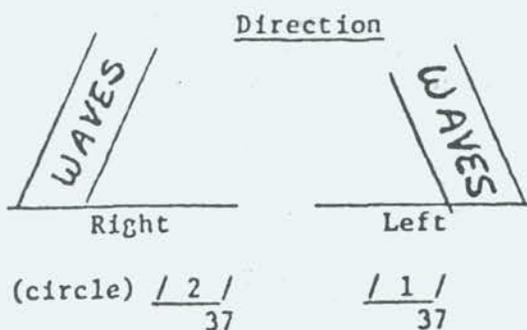
BEACH DATA

Observer's Initials: _____

<u>Station</u> / / /	<u>Time</u> (24-hour system) / / / / / 3 4 5 6	<u>Date</u> (day/mo./year) / / / / / / / 8 9 10 11 12 13	<u>Tide</u> (for office entry) _____ 15
-------------------------	---	---	---

<u>Spill</u> (percent spilling waves) / / / / / 17 18 19	<u>Plunge</u> (percent plunging waves) / / / / / 21 22 23	<u>Period of Waves</u> (for "significant" or highest one-third of waves) / / / . / / / 25 26 27 28
---	--	---

<u>Height</u> (of breaker) / / / / / 30 31 32	<u>Angle</u> (of breakercrest with shore) / / / / / 34 35
--	--



<u>Depth</u> (depth of water in which wave breaks) / / / / / 39 40 41	<u>Time (seconds)</u>	<u>Distance (meters)</u>	<u>Velocity</u> Velocity (cm/sec)	<u>Dir (N/S)</u>
	1. _____		/ / / . /	
	2. _____		/ / / . /	
	3. _____		/ / / . /	
			43 44 45 46 47	49

<u>Wind</u> (velocity, mph) / / / / / 51 52	<u>Wind Direction</u> (0° - 360° bearing) / / / / / 54 55 56	<u>A. Temp</u> (air temp. °C) / / / / / 58 59	<u>W. Temp</u> (water temp. °C) / / / / / 61 62
--	---	--	--

NOTES: (describe general weather conditions)

Fig. 4.9. - Formulaire OEL (observations sur l'environnement littoral).
 Fig. 4.9. - Littoral environment observation form (after RPI)

La fréquence généralement adoptée pour la réalisation de ces mesures varie selon la disponibilité des observateurs, de deux fois par jour à une fois par semaine. La durée d'un programme d'observation sur un segment côtier doit être au moins égale à une année, afin de pouvoir disposer de séries chronologiques significatives.

L'estimation des caractéristiques des variables hydrodynamiques sélectionnées est habituellement faite selon les méthodes suivantes :

- amplitude des vagues au déferlement (H_b) = moyenne de 10 à 20 estimations visuelles de l'amplitude des vagues successives en s'aidant, si nécessaire, d'une perche à houle graduée tous les 0,5 m et implantée en permanence dans la zone de déferlement : un observateur entraîné peut estimer les amplitudes des vagues à ± 10 cm près;

- période des vagues (T) : elle est déduite du temps séparant le déferlement de 10 vagues successives (utilisation d'un chronomètre ou d'une montre indiquant les secondes);

- direction des vagues au déferlement (α_b) : elle peut être estimée visuellement en utilisant un simple rapporteur angulaire fixé horizontalement sur un piquet et dont la base est orientée parallèlement au rivage (fig. 4.10). La moyenne de 10 estimations visuelles successives permet l'obtention de la direction de propagation à quelques degrés près;

- type de déferlement : on distingue généralement trois types principaux : déferlement plongeant (plunging), gonflant (surging) ou déversant (spilling) (fig. 4.11);

- courant littoral : pour la direction du courant longitudinal qui prend naissance entre le déferlement et le rivage, il suffit de noter si ce courant se dirige à droite ou à gauche quand on regarde la mer. La vitesse moyenne (V) est estimée en mesurant le déplacement de flotteurs ou d'une tache colorée, après injection de colorant (rhodamine, fluorescéine) sur une durée d'une minute;

- largeur de la zone de déferlement (W) : elle est mesurée et estimée visuellement comme étant la distance entre la ligne de déferlement et le rivage ;

- niveau de la mer : il s'observe par estimation visuelle du niveau moyen sur une perche graduée implantée en mer à proximité du rivage : cette perche peut également servir à l'estimation des caractéristiques de la houle.

Les paramètres mesurés sont notés pour chaque journée d'observation sur le formulaire d'observation de l'environnement littoral, tel que celui représenté dans la figure 4.9.

A partir de ces estimations des caractéristiques hydrodynamiques, on peut déduire une estimation du flux d'énergie longitudinal (Pls) transmis par les vagues après déferlement, et du transit littoral (Q), d'après les formules empiriques suivantes (Vitale, 1980), exprimées en unités S.I. :

$$\begin{aligned} \text{Pls} &= f (H_b)^{5/2} \sin 2\alpha_b \\ Q &= 12.6 \cdot 10^3 \text{ Pls} \end{aligned}$$

avec

H_b , en m
 Pls , en kg/s par mètre de largeur de plage
 Q en m^3/an

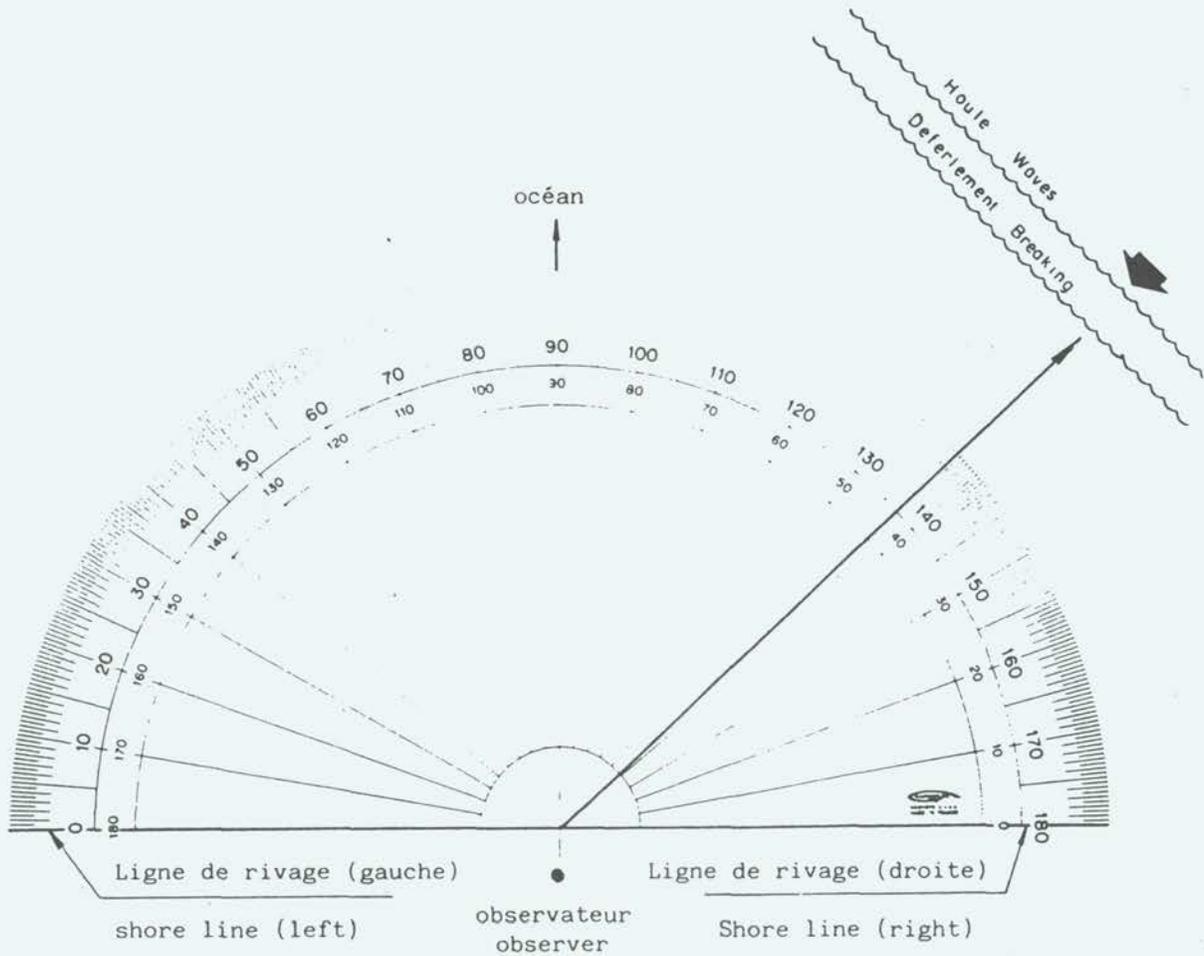


Fig. 4.10. - Détermination visuelle simple de la direction de propagation de la houle à l'aide d'un rapporteur

Fig. 4.10. - Simple visual estimation of the direction of the wave propagation by using a protractor

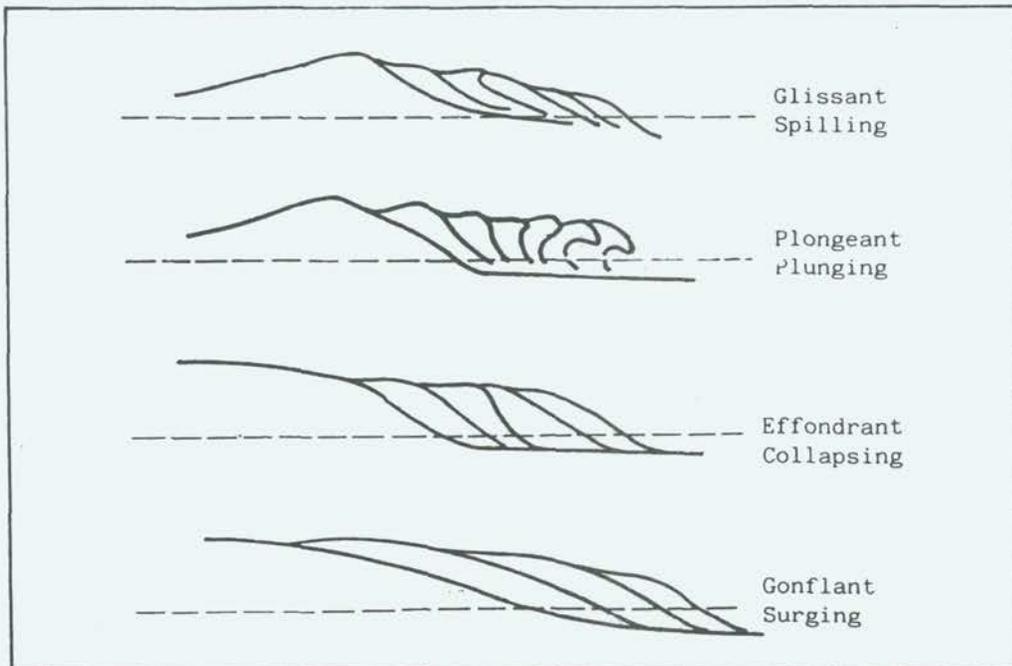


Fig. 4.11. - Différents types de vagues déferlantes

Fig. 4.11. - Different types of breaking waves

Une seconde estimation du flux d'énergie longitudinal P_{ls} peut être obtenue à partir des données de mesure du courant littoral (V) et de la largeur de la zone de déferlement, selon (Walton, 1980) :

$$P_{ls} \approx 1.28 H_b.W.V / (V/V_o) \text{ en kg/s}$$

avec

$$V/V_o = 0.2 (X/W) - 0.714 (X/W)\ln(X/W)$$

X = distance par rapport au rivage où a été effectuée la mesure du courant littoral.

Ces formules empiriques ne sont valables que pour des plages développées composées de sédiments de type sableux. Les estimations du transit littoral obtenues à partir de ces formules dépendent de la durée du programme d'observation, de la fréquence et de la précision des mesures effectuées. Elles sont largement tributaires de l'observateur et ne doivent donc être considérées que comme des ordres de grandeur des capacités de transit sédimentaire littoral pour le segment côtier étudié.

LISTE DES FIGURES DU CHAPITRE 4

- Fig. 4.1 - Stations marégraphiques proposées pour le projet "GLOSS" (UNESCO, 1987)
- Fig. 4.2 - Détermination de l'altitude d'une jauge de marée
 - a) quand la BR est à proximité
 - b) quand la BR est éloignée
- Fig. 4.3 - Enregistrement marégraphique journalier pendant 7 jours (7-14/5/75) à Signal Station, Lagos, Nigéria.
- Fig. 4.4 - Statistiques de la houle mesurée à Rio Nunez (Guinée)
- Fig. 4.5 - Mesure du profil de plage à l'aide d'un niveau
- Fig. 4.6 - Mesure du profil de plage par visée sur l'horizon à partir d'un point fixe
- Fig. 4.7 - Diagramme d'échosondage entre Badagry Creek et Yelwa (Nigéria)
- Fig. 4.8 - Exemple de coupe de sismique-réflexion
- Fig. 4.9 - Formulaire "OEL" (observation de l'environnement littoral)-(d'après RPI)
- Fig. 4.10 - Détermination visuelle simple de la direction de propagation de la houle à l'aide d'un rapporteur
- Fig. 4.11 - Différents types de vagues déferlantes.

5. APPROCHE RATIONNELLE DE LA LUTTE CONTRE L'ÉROSION CÔTIÈRE DANS LA RÉGION DE L'AFRIQUE DE L'OUEST ET DU CENTRE

5.1. CRITERES DE CHOIX DES MESURES DE DEFENSE DU LITTORAL

L'érosion côtière constitue un problème important en Afrique de l'Ouest et du Centre. La gravité du problème varie selon les régions, ainsi que les efforts faits pour en atténuer les effets et les conséquences économiques négatives. A certains endroits, le problème a pris des proportions inquiétantes. Le recul côtier et les submersions qui l'accompagnent constituent un facteur de risque : il déstabilise les villages, détruit les zones d'agriculture ou de loisirs, bouleverse les structures portuaires et navales, déloge les installations industrielles ou commerciales situées dans les villes côtières.

Les facteurs naturels provoquant l'érosion sont nombreux : régime de tempêtes avec surcotes, orientation et nature de la côte, bas relief de la plaine côtière, vulnérabilité du budget sédimentaire, étroitesse du plateau continental, présence de canyons et de drains sous-marins, élévation eustatique générale du niveau marin.

Dans beaucoup de cas, l'homme intervient sur l'environnement naturel : la construction de structures artificielles sur le rivage, l'extraction de sable sur les plages, la construction de barrages sur les rivières qui assuraient auparavant l'approvisionnement sédimentaire du littoral, l'extraction anarchique de fluides dans les gisements et les réservoirs côtiers, la destruction des mangroves, sont quelques uns des facteurs qui ont renforcé l'impact des forces naturelles.

Un examen général de certains des facteurs ci-dessus montre que certains processus générateurs d'érosion sont inévitables et qu'ils s'intensifieront même dans certains cas. Des projections récentes faites par les Nations Unies, par exemple sur la surélévation future du niveau marin global, nous indiquent que l'accroissement annuel risque de passer de 1-2 mm à 3-5 mm/an au cours du siècle prochain, par suite du réchauffement de l'atmosphère, qui accentuera la fonte des grandes calottes glaciaires.

Sur les côtes à falaise présentant des barrières verticales ou quasi-verticales, le triplement de la vitesse actuelle de l'élévation du niveau marin n'aura pas de conséquences dramatiques, tandis que, selon le principe de Bruun, sur les côtes sableuses basses, largement représentées dans la région, une élévation du niveau de la mer de quelques millimètres seulement se traduirait par un recul du trait de côte qui dépasserait de 10 à 1000 fois (selon la pente des plages) l'élévation verticale. En conséquence, les phénomènes d'érosion côtière que connaît actuellement cette région d'Afrique risquent d'être fortement amplifiés à moyen et long terme.

La prise de conscience provoquée récemment par la réalisation du programme régional du PNUE sur la lutte contre l'érosion côtière en Afrique de l'Ouest et du Centre (WACAF/3) a souligné encore davantage la nécessité de réagir en temps voulu, et de manière appropriée aux problèmes posés par l'érosion littorale.

Le chapitre 5.2. résume différentes options fondamentales qui s'offrent aux décideurs confrontés aux problèmes d'érosion côtière. Les solutions applicables à un problème d'érosion d'un segment littoral donné sont directement liées aux causes et conséquences de l'érosion et à l'environnement socio-économique du secteur côtier considéré.

Il ne suffit pas de se référer à des mesures de défense dont le succès s'est avéré ailleurs, particulièrement en Europe, au Japon et aux U.S.A. et d'essayer de transplanter ces solutions dans la région. En effet, les côtes sont de morphologie et de nature différentes, et l'intensité des forces hydrodynamiques qui s'y exercent n'est pas partout la même. Les mesures de lutte contre l'érosion qui conviennent dans un endroit peuvent devenir un échec retentissant dans

un autre. Aux U.S.A. par exemple, les mesures appliquées aux problèmes d'érosion sur la côte à falaises du Pacifique sont différentes de celles appliquées dans le golfe du Mexique ou sur la côte est. Même sur la seule côte Atlantique des U.S.A., les moyens de lutte contre l'érosion appliqués à une île développée comme le New-Jersey seraient différents de ceux employés pour une île barrière primitive au Texas ou à Miami (Pilkey et al., 1981).

L'expérience acquise dans diverses parties du monde où ont été appliquées des mesures de stabilisation du littoral sans une bonne compréhension initiale des processus sédimentaires côtiers montre que ces mesures n'ont que médiocrement réussi à protéger le littoral à court terme. Dans de nombreux cas, les structures construites ont servi à aggraver les problèmes qu'elles étaient censé résoudre, en entraînant une réduction de la largeur de la plage et une augmentation de la pente de l'estran. Les nombreuses jetées submergées et ensablées, les digues et épis maintenant détachés du rivage sont les témoins visibles de l'échec des programmes de défense côtière appliqués sans une connaissance suffisante de l'environnement et des techniques du génie côtier.

Toute tentative de modification des phénomènes côtiers destinée à lutter contre l'érosion demande que soient identifiés et évalués les facteurs qui interviennent dans le système morphogénique côtier, les sources et les flux de sédiments, ainsi que les impacts locaux possibles des interventions envisagées.

Dans la région d'Afrique de l'Ouest et du Centre, la connaissance actuelle des phénomènes et de la dynamique côtière est souvent si rudimentaire qu'il serait peu opportun et fort hasardeux de fonder la conception et la réalisation de coûteux travaux de protection côtière sans mise en oeuvre préalable des programmes d'acquisition de données et de surveillance du littoral tels que ceux décrits au chapitre 4.

Le projet entrepris sous les auspices du PNUE et de l'UNESCO sur la lutte contre l'érosion côtière en Afrique de l'Ouest et du Centre (WACAF/3) a été conçu pour combler cette importante lacune dans nos connaissances aux niveaux nationaux et régionaux.

Si ce projet privilégie l'aspect régional, c'est notamment en raison du caractère "régional" de certains processus côtiers. Par exemple, les houles puissantes qui déferlent sur une grande partie du littoral de la Région prennent leur origine dans les mêmes noyaux de tempête situés dans l'Océan Atlantique. Par ailleurs, les sédiments transportés par le transit littoral sur la côte du Bénin occidental viennent en partie de la côte togolaise. Une partie des sédiments transportés le long des côtes togolaises étaient, avant la construction du barrage d'Akosombo amenés sur le littoral par le fleuve Volta.

L'objectif général du projet de lutte contre l'érosion côtière dans la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre (WACAF/3) est d'apporter une contribution aux efforts nécessaires de planification et de gestion de la zone côtière. L'objectif est de mettre au point progressivement une base de données fiable, contenant des indications fondamentales comme la force et la direction des houles et des vents dominants par rapport à l'orientation de la côte, les caractéristiques des situations génératrices de tempêtes, le régime marégraphique, les sédiments, la topographie du littoral et du plateau continental. Ce sont là des renseignements préliminaires absolument nécessaires aux études de protection du littoral. D'autres facteurs naturels méritant d'être étudiés sont les modifications régionales du niveau marin moyen, les subsidences locales et les caractéristiques géomorphologiques.

5.2. METHODES STRUCTURELLES DE PROTECTION COTIERE : CRITERES DE SELECTION ET FONCTIONS

Ces méthodes sont une alternative aux méthodes non structurelles qui consistent essentiellement en des décisions :

- de non action : les risques d'érosion et leurs conséquences sont jugés acceptables à court et moyen terme;

- de démantèlement et de reconstruction des ouvrages en danger sur une ligne de repli;
- de gestion : règlement de construction et d'urbanisme, d'extraction de sable sur le littoral.

5.2.1. Critères de sélection

Les méthodes structurelles peuvent être classées en trois catégories principales :

- méthodes de protection passives,
- méthodes de protection actives,
- méthodes de restauration.

Chacune de ces méthodes donne lieu à des travaux et ouvrages de prévention contre les risques d'érosion ou de protection côtière, dont les caractéristiques techniques sont très variées et qui ne peuvent pas être présentées en détail dans ce manuel (Fig. 5.1).

Face à une situation où un risque d'érosion du littoral est identifié, les responsables de la gestion et de la protection du littoral doivent pouvoir sélectionner, parmi les méthodes structurelles disponibles, celles qui sont adaptées à la solution du problème posé, afin de pouvoir comparer les coûts et avantages des solutions alternatives possibles.

Les critères de sélection de ces méthodes dépendent, notamment, des réponses aux questions suivantes :

- caractéristiques morphologiques et sédimentologiques du site à protéger?
- régime hydrodynamique?
- type de processus d'érosion?
- urgence de réalisation des travaux?
- objectifs assignés aux ouvrages de défense?
- durée de vie des ouvrages et facilités de maintenance?
- moyens techniques (matériaux, équipements) et ressources financières possibles ?

5.2.2. Méthodes de protection passives

Ces méthodes conduisent à des ouvrages construits longitudinalement sur le rivage : l'objectif recherché est de fixer le rivage dans la position qu'il occupe, en le protégeant de l'action directe des houles de tempête par des structures artificielles implantées en haut de plage, sans chercher à maintenir ou à agrandir la plage en agissant sur les processus sédimentaires.

Les ouvrages longitudinaux de défense côtière les plus couramment utilisés sont de trois types : murs de front de mer, revêtements et digues.

Les murs de front de mer sont généralement réalisés en maçonnerie ou en béton (murs épais), ou constitués par l'assemblage d'éléments en bois, en tôle d'acier ou en béton préfabriqué, maintenus par des piliers verticaux (murs minces). Ces ouvrages doivent être solidement ancrés pour éviter d'être déchaussés. Les murs de soutènement minces sont généralement quasi-verticaux, ce qui a souvent pour effet d'accélérer les phénomènes d'érosion au pied des ouvrages sous l'effet de la réflexion des vagues.

Les revêtements permettent également de fixer la partie supérieure des estrans de plage, préalablement reprofilés. Ces revêtements sont généralement constitués de plaques préfabriquées en de la plage.

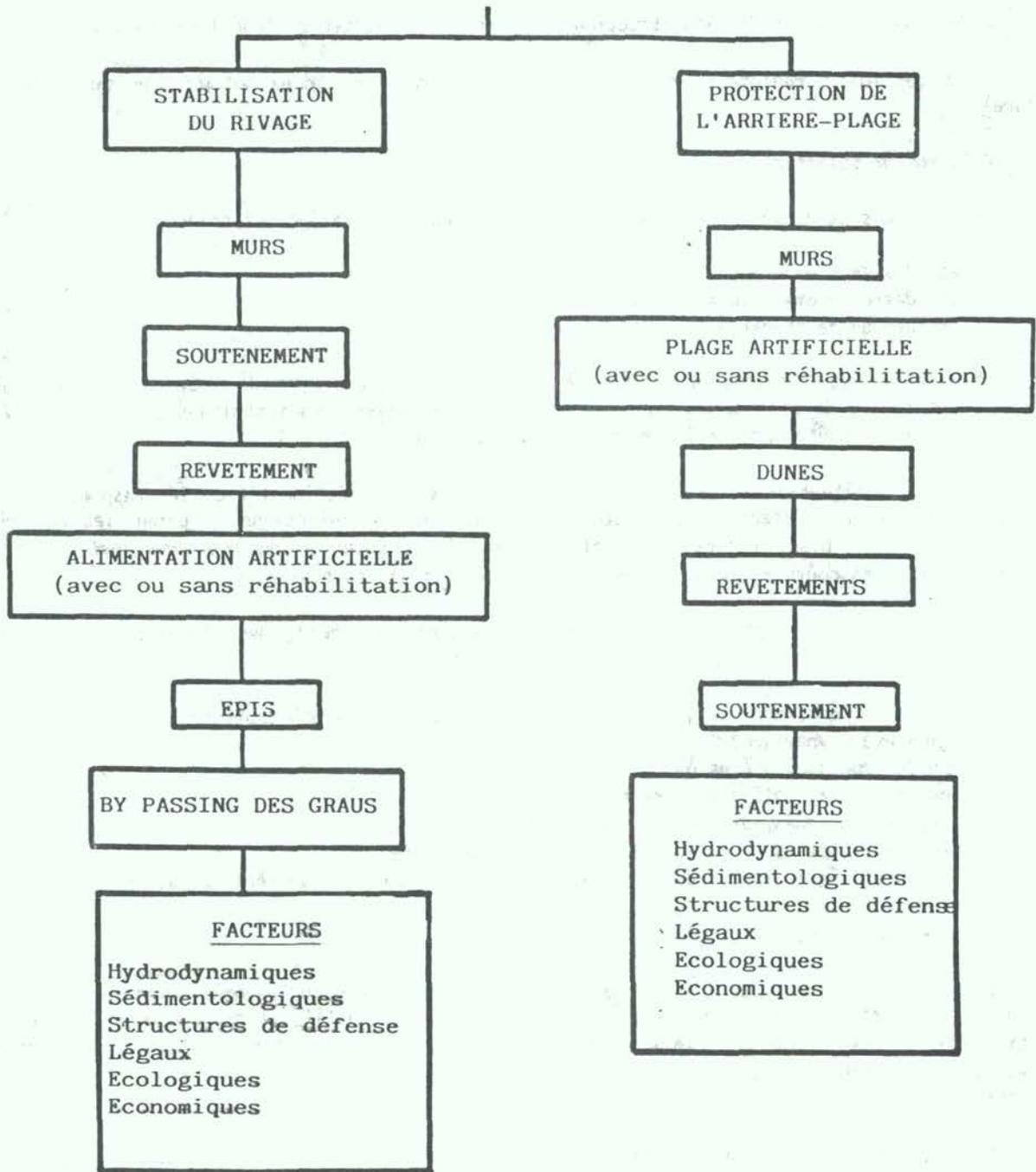


Fig. 5.1.

METHODS COURAMMENT UTILISEES
POUR CONTROLER L'EROSION COTIERE

(ADAPTÉ DU MANUEL C.E.R.C.)

béton, d'enrochements ou de gabions, posés et ancrés sur un talus reprofilé de pente variable (Photo, fig. 5.2). La rugosité et la souplesse des revêtements en enrochements ou en gabions permettent de limiter le risque de ruine de l'ouvrage lors d'un abaissement occasionnel du profil. Les digues longitudinales sont des ouvrages importants de forme trapézoïdale, constitués d'un noyau (terre, sable, tout venant) recouvert de plusieurs couches de blocs. Ces ouvrages coûteux, en raison du volume de matériaux à mettre en oeuvre, ne sont généralement utilisés que pour protéger des zones côtières basses des risques de submersion dus à la mer.

Les murs de soutènement et les digues en enrochements permettent également de protéger le pied des falaises érodables contre l'attaque directe de la houle.

En résumé, les ouvrages de protection longitudinale sont à déconseiller pour des littoraux meubles, en déséquilibre sédimentaire, sujets à un recul rapide du rivage, car l'abaissement progressif de l'estran de plage tendra à déchausser les ouvrages.

Les ouvrages longitudinaux peuvent favoriser l'érosion du littoral adjacent dans le cas où ils protègent des secteurs qui constituaient des zones sources de sédiments.

5.2.3. Méthodes de protection active

Contrairement aux ouvrages de protection passives qui ne protègent que la portion de rivage où ils sont construits, les ouvrages de protection active (épis, brise-lames) agissent sur les caractéristiques de la houle et des transports sédimentaires littoraux pour capter et retenir des stocks mobiles de sédiments sur le littoral.

Les épis sont des ouvrages construits perpendiculairement au rivage, dans la zone de déferlement de la houle. Ils sont généralement construits en série : leur écartement varie entre 2 à 3 fois leur longueur. Leurs dimensions et leur degré de perméabilité varient selon le mode de construction et l'efficacité souhaitée pour le piégeage des sédiments transportés par le transit littoral. Ce piégeage s'effectue sur la face amont de l'épi par rapport à la direction du transit littoral, ce qui occasionne un engraissement du rivage, tandis que ce dernier recule sur la face aval non alimentée en sédiments et tend à s'orienter parallèlement aux crêtes des houles dominantes entre deux épis consécutifs. Les épis peuvent être constitués de différents matériaux : enrochement, blocs de béton préfabriqués, pieux et planches en bois traité (Photo, fig. 5.3), palplanches en acier, gabions.

Le choix des caractéristiques et du mode de construction est fonction, notamment, de l'énergie de la houle et de la durée de vie de l'ouvrage.

Les épis ne peuvent fonctionner correctement que s'il existe un transit sédimentaire littoral significatif (Fig. 5.4). La conception d'un système d'épis est une opération qui ne peut être improvisée : elle doit notamment prévoir les moyens de réduire l'érosion induite par le déficit d'alimentation en sédiments du rivage adjacent, du fait du piégeage de tout ou partie du transit littoral par les épis. Les épis sont inefficaces quand l'essentiel des transports sédimentaires a lieu, soit transversalement dans le profil de plage (houles frontales dominantes), soit en suspension : littoraux limoneux ou vaseux.

Les brise-lames sont des ouvrages émergés, submersibles ou flottants, construits au large du rivage dans une direction généralement parallèle aux courbes bathymétriques. L'objectif recherché est la dissipation de l'énergie de la houle et donc de son amplitude lors de son transport au rivage, ce qui réduit le transit littoral et les échanges sédimentaires transversaux dans le profil de plage de la zone littorale abritée par le brise-lame. Il se crée ainsi une accumulation de sédiments dans cette zone, sous forme d'une amorce de tombolo (fig. 5.5).

Ce tombolo joue le rôle d'un épi vis-à-vis du transit littoral, ce qui tend à favoriser le déficit d'alimentation en sédiments et donc l'érosion de la zone littorale située en aval de l'ouvrage par rapport à la direction du transit littoral.



Fig. 5.2. - Revêtement en gabions du haut estran d'une plage en recul près d'Accra (Ghana) - (Ibé).

Fig. 5.2. - Gabion revetment of the foreshore face of a retreating beach near Accra (Ghana) - (Ibé).

Fig. 5.3. - Protection de la plage de Cape St. Mary (Gambie) par des épis en bois (Quélenec, 1988).

Fig. 5.3. - Beach protection at Cape St. Mary (Gambia) by using wooden groins. (Quélenec, 1988).



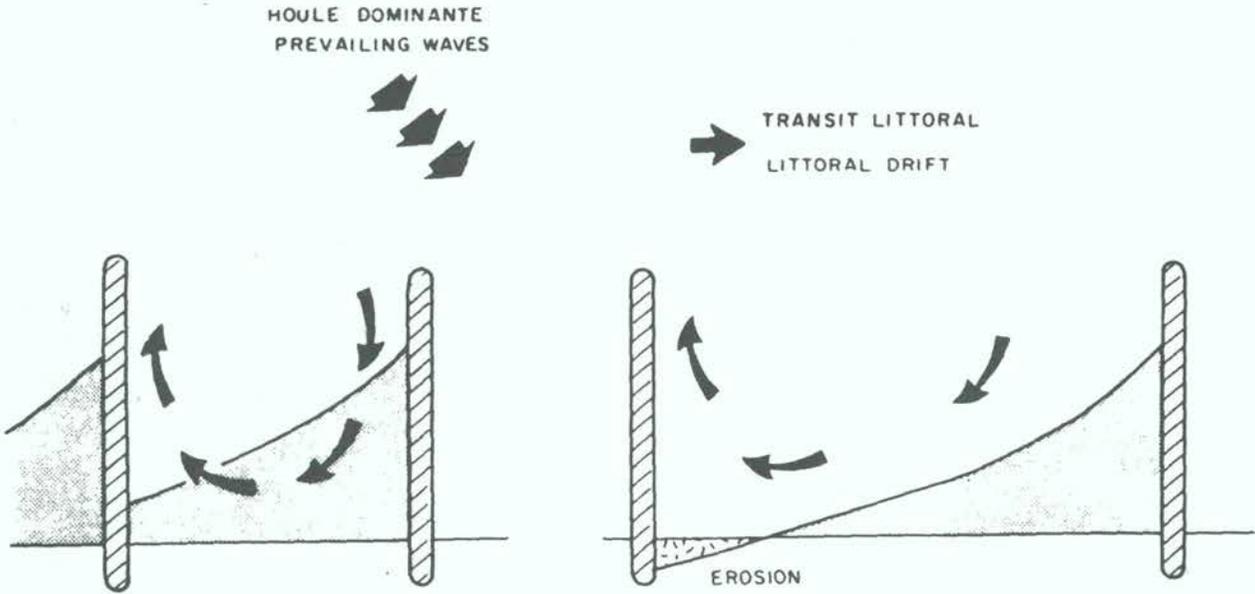


Fig. 5.4. - Principe de fonctionnement des épis

Fig. 5.4. - Principle underlying groynes

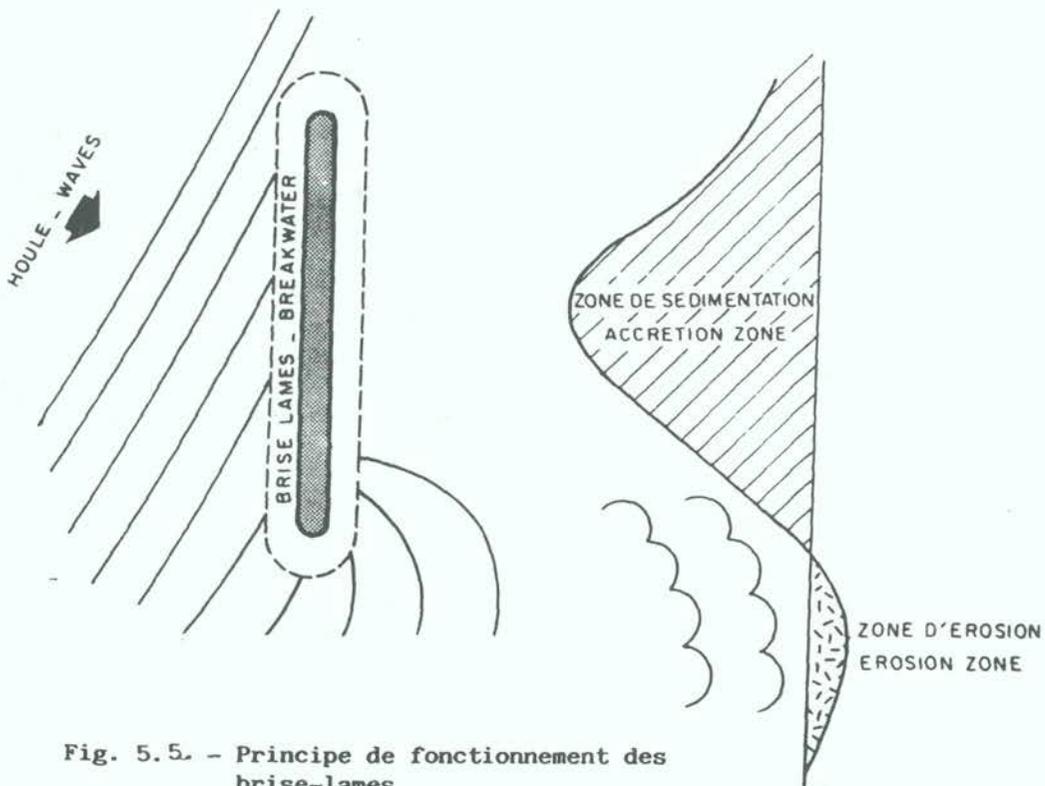


Fig. 5.5. - Principe de fonctionnement des brise-lames

Fig. 5.5. - Principle underlying breakwaters

La conception et le dimensionnement des brise-lames sont délicats et relèvent de l'expertise en génie côtier. Dans les zones où l'énergie de la houle est forte, les brise-lames sont construits à base d'enrochements, de blocs ou de caissons de béton armé préfabriqué. Dans les zones d'énergie modérée à faible, et de faible profondeur, ils peuvent être construits à partir de gabions, de sacs de sable, de rangées de pieux en bois traité renforcées par des blocs de pierres ou des pneus usagés.

Le troisième type de protection active couramment utilisé est l'alimentation artificielle du rivage par l'apport de sédiments prélevés en mer par dragage ou pompage. On peut, de ce fait, rétablir l'équilibre sédimentaire d'un segment côtier souffrant d'un déficit d'alimentation du fait, par exemple, de la construction d'ouvrages de type épis, brise-lames ou digues portuaires.

Les apports artificiels de sédiments sur une plage jouent le rôle de stock sédimentaire tampon qui favorise la dissipation de l'énergie de la houle, permet la saturation du transit littoral et limite les risques de recul du rivage. La reconstruction du stock sédimentaire est généralement faite périodiquement en raison du transit littoral et du triage granulométrique dû à la houle qui évacue vers le large les sédiments fins. Le choix des caractéristiques granulométriques des sédiments conditionne la fréquence du renouvellement des apports artificiels et la morphologie de la plage.

Les zones d'emprunt des sédiments doivent être situées au large de la côte, à des profondeurs suffisantes (généralement supérieures à - 10 m) pour éviter l'érosion du littoral due à la modification du profil de la plage sous-marine.

Des méthodes de protection actives associant épis ou brise-lames et alimentation artificielle sont souvent utilisées pour lutter contre l'érosion côtière ou créer de nouvelles plages.

L'application de ces méthodes nécessite des études détaillées préalables des caractéristiques hydrodynamiques et sédimentologiques des sites littoraux à protéger.

5.2.4. Méthodes de restauration

Ces méthodes n'ont pas pour objet de limiter ou de modifier, comme les méthodes précédentes, l'action directe des houles, mais de rétablir des équilibres détruits par l'Homme ou renforcer la stabilité de systèmes naturels. Elles concernent essentiellement trois types de faciès littoraux : les falaises érodables, les dunes et les marais maritimes.

La stabilité des falaises côtières sujettes à des glissements de terrain peut être renforcée par des travaux de lutte contre l'infiltration des eaux pluviales et de drainage. Dans les zones urbanisées, l'élévation du niveau piézométrique des nappes souterraines, due par exemple à la multiplication des réseaux d'assainissement individuel ou à des fuites dans les systèmes collectifs d'assainissement, peut favoriser des glissements de terrain dans des falaises littorales.

Les dunes littorales constituent des stocks sédimentaires qui servent à la fois de zones sources pour l'alimentation du transit littoral lors des tempêtes, et de digues naturelles pour la protection des zones d'arrière-plage contre les inondations lors des périodes de surcotes. L'augmentation du piégeage du sable de plage sur les dunes, leur protection contre les détériorations dues au piétinement, et leur restauration, peuvent être réalisés grâce à deux types d'action : l'érection de rideaux pare-vent qui servent de pièges à sable, et la revégétalisation grâce à des espèces adaptées. De telles actions permettent d'augmenter significativement les dimensions des dunes dans les zones littorales, dans le cas où un transport éolien notable existe.

Les marais maritimes se développent dans des zones littorales abritées et généralement colonisées, dans la région d'Afrique de l'Ouest et du Centre, par des mangroves. Les barrières de

mangroves favorisent la sédimentation en réduisant l'action des houles résiduelles sur le rivage et en fixant les sédiments. Ces barrières naturelles de protection doivent être protégées car leur disparition favorise le recul du rivage (UNESCO, 1985a).

5.3. CADRE DE DECISION POUR LA PROTECTION ET LA GESTION DU LITTORAL

Le choix d'une technique appropriée de défense du littoral exige une grande expérience des travaux d'aménagement du littoral. Il est conseillé de faire ce choix en se référant à un cadre de décision pour la gestion du littoral, solution qui permet de s'assurer que sont prises en compte toutes les solutions, ressources et facteurs appropriés.

Ce cadre permet d'établir une procédure logique pour l'estimation des coûts et avantages des diverses techniques et moyens de défense côtière (Kerns et al., 1980). L'une des manières d'y parvenir est d'employer la théorie des "utilités" (Oguara et Ibe, sous presse). Celle-ci prévoit un recensement des diverses mesures de lutte contre l'érosion du littoral, et la définition d'un ensemble d'objectifs appropriés. De tels objectifs s'insèrent dans le cadre d'une politique de "gestion régionale des sédiments" (Quélenec, 1981) qui permet de tenir compte des interactions entre les processus naturels et les activités humaines dans les bassins-versants, et les zones littorales associées.

La meilleure mesure de protection du littoral est celle qui minimise les coûts et les atteintes à l'environnement, tout en garantissant l'efficacité maximale à court et à long termes des décisions et moyens mis en oeuvre. Le cadre proposé offre ainsi une procédure qui permet de décider, pour un secteur donné du littoral, s'il convient de recommander un ensemble de mesures structurelles ou non, ou de reporter les décisions à une date où de nouvelles données seront disponibles.

Il est important que la solution proposée ait l'impact le plus réduit possible sur le tissu socio-économique et culturel de la région.

5.4. POLITIQUE DE GESTION DES ZONES LITTORALES

Il convient de souligner la nécessité pour les pays de la Région d'abandonner l'approche des années passées et récentes, qui consistait en une série d'actions de portée ponctuelle et souvent à court terme.

Comme l'ont souligné de nombreux auteurs, le littoral est non seulement un patrimoine en danger, constitué de plusieurs écosystèmes fragiles, mais aussi une zone de conflits d'usages. Dans le delta du Niger (Nigéria) par exemple, le littoral est utilisé à des fins divergentes, et l'agriculture (y compris la pêche) entre en conflit avec l'exploitation du pétrole dans certains secteurs.

Les conflits qu'amènent de telles situations sont parfois difficiles à résoudre, en raison notamment de l'absence de cadres de gestion institutionnalisés. A cet égard, on peut s'inspirer et tirer enseignement des pratiques de la plupart des pays du monde occidental. En effet, en dépit de la grande variété des contrôles gouvernementaux destinés à réduire les causes et l'ampleur des conflits liés à l'utilisation du littoral, des législations spécifiques ont été mises en place. Le "Coastal Zone Management Act" de 1972 aux U.S.A. et le décret-loi No. 86-2 du 3 janvier 1986 en France sont particulièrement instructifs à cet égard.

Il est donc urgent que les différents pays de la Région d'Afrique de l'Ouest et du Centre définissent et mettent en oeuvre, si possible après une concertation régionale préalable, des législations nationales équivalentes, adaptées aux caractéristiques de l'environnement côtier et du développement socio-économique de la Région.

Pour être efficaces, de telles législations spécifiques doivent favoriser les mesures concrètes d'accompagnement, portant notamment sur des efforts nationaux et régionaux de recherche, de formation et d'information (moyens audio-visuels) sur les spécificités et ressources du patrimoine littoral, lequel est un atout de grande valeur pour le développement de la région.

LISTE DES FIGURES DU CHAPITRE 5

- Fig. 5.1. - Méthodes couramment utilisées pour contrôler l'érosion côtière
- Fig. 5.2. - Revêtement en gabions du haut-estran d'une plage en recul près d'Accra (Ghana) - (Ibé)
- Fig. 5.3. - Protection de la plage de Cape St. Mary (Gambie) par des épis en bois (Quélenec, 1988)
- Fig. 5.4. - Principe de fonctionnement des épis.
- Fig. 5.5. - Principe de fonctionnement des brise-lames

LISTE DES REFERENCES SELECTIONNEES

- Allen, J.R.L., 1965. Late Quaternary Niger Delta and adjacent areas : sedimentary environments and lithofacies. AAPG Bull. 49, p.547-600
- Allen, J.R. and Wells, J.W. 1962. Holocene coral banks and subsidence in the Niger Delta. J. of Geology, 70, p.381-397.
- Bascom, W.N., 1951. The relationship between sand size and beach face slope. Trans. Am. Geoph. Union.
- Bellion et al., 1984. Sismicité historique de l'Afrique de l'Ouest Essais d'inventaire - Remarques et commentaires - Ass. Sénégal d'Etude du Quaternaire. Bull. de liaison No. 72-73 Dakar.
- Bird, E.C.F., 1967. Coasts : An introduction to systematic geomorphology, The MIT Press, Cambridge man., 246 p.
- Brink, A.H., 1974. Petroleum Geology of Gabon Basin : AAPG Bull., 50, p.108-158.
- Bruun, P., 1979. "The 'Bruun Rule' Discussion on Boundary Conditions". In Proceedings of the Per Bruun Symposium. Newport, R.I. : IGU Commission on the Coastal Environment, p.79.83
- Burke, K.C., 1972. Longshore drift, submarine canyons, and submarine fans in the development of the Niger Delta. AAPG Bull. 56, p.1975-83.
- Chen, Z, Xu, M, and Lin, B., 1981. Experimental study on sedimentation problems at Friendship Harbour in Mauritania. In Proc. 5th Australian Conf. on Coastal and Ocean Eng. Offshore Structures, Abstracts - in - Depht, p.10-11.
- CNEXO, 1976. Action de la houle sur les sédiments. Paris.
- Chateauneuf, J.J. et al, 1986. Facteurs contrôlant la genèse et la destruction des tourbes tropicales du littoral ouest-africain. Document du BRGM No. 110.
- Cooke, R.U. and Doornkamp, J.C., 1974. Geomorphology in Environmental Management: An Introduction : Clarendon Press, Oxford.
- Dietz, R.S., Knebel, H.J. and Somers, L.H., 1968. Cayar submarine canyon. Geol. Soc. of America Bull. Vol.79, p.1821-1828.
- Ebisemiju, F.A., 1985. Human impact on Marine Processes in the western Niger Delta, Nigeria. In Proceeding, Policy Seminar on Environmental Issues and Management in Nigerian Development. Benin City, Nov. 25-27, 1985.
- Einsele, G., Herm, D. and Schwarz, H.U., 1977. Variations du niveau de la mer sur la plate-forme continentale et la côte mauritanienne vers la fin de la glaciation du Würm et à l'Holocène, Bull. ASEQUA, No. 51, p.35-48.
- Emery, K.O., and Uchupi, E., 1972. Western North Atlantic Ocean : Topography, Rocks, Structure, Water, Life and Sediments : AAPG Mem. 17,532 p.
- Emery, K.O., Uchupi, E., Phillips, J., Bowin, C. and Mascle, J. 1974. The Continental Margin of Western Africa : Angola to Sierra Leone. Contribution No. 3481 of the Woods Hole Oceanographic Institution.

- Ewing, M., Ewing, J.I., Talwani, M., 1964. Sediment distribution in the oceans : the Mid-Atlantic Ridge; Geol. Soc. America Bull., 75, p.17-36.
- Ewing, M., Le Pichon, X., and Ewing, J., 1966. Coastal structure of the Mid-Ocean Ridges 4. Sediment Distribution in the South Atlantic Ocean and the Cenozoic History of the Mid-Atlantic Ridge : Jour. Geophys. Research, 71, p.1611-1653.
- Guilcher, A., Medeiros, C.A., De Matos, J.E, and De Oliveira, J.T. 1974. Les restingas (flèches littorales) d'Angola, spécialement celles du Sud et du Centre. Finisterra, 9, p.171-211.
- Hallermeier, R., 1981. Seaward limit of significant sand transport by waves : An annual zonation for seasonal profiles. GERC. Eng. Techn. Aid., No. 81.
- Heezen, B.C., Bunce, J.B., Schneider, E.D., Ewing, E.W., and Graneli, N.C.L., 1964b. Congo Submarine Canyon. AAPG Bull. 48, p.1126-1149.
- Hinschberger, F., 1977. Aspects et problèmes d'aménagement littoral en Côte d'Ivoire. Cahiers Nautias, 13, p.51-63.
- Horn, R., Le Lann, F. and Tixeront, M. 1974. Recherche d'ilménite au large des côtes du Sénégal (Operation Rosilda). Rapport BRGM., 35p.
- Ibé, A.C. 1982. A review of economic mineral resources in offshore Nigeria. NIOMR Tech. Paper No. 8, 21p.
- Ibé, A.C. and Antia, E.E. 1983. Preliminary assessment of the impact of coastal erosion along the Nigerian shoreline. NIOMR Tech. Paper No. 13, 17p.
- Ibé, A.C., Awosika, L.F., and Antia, E.E. 1984. Progress report No.2. Coastal Erosion Research Project. NIOMR Special Publication; 106p.
- Ibé, A.C., Awosika, L.F., Ihenyen, A.E., Ibé, C.E. and Tihamiyu A.I., 1985d. Coastal Erosion at Awoye and Molume, Ondo States, Nigeria. A report for Gulf Oil Company (Nigeria) Ltd., 123p.
- Ibé, A.C., Awosika, L.F., Ihenyen, A.E., Ibé, C.E., Tihamiyu, A.I., Okonya, E.C. and Drekeya, T., 1985b. A study of currents and scouring effects at the proposed Davy Bank 'A' Location in OML 14. A report for Shell Petroleum Development Company of Nigeria Ltd. 56p.
- Ibé, A.C., Ihenyen, A.E. and Ibé, C.E., 1985. A hydrographic survey of the Proposed Benin Estuary Location OML 43. A report for Shell Petroleum Development Company of Nigeria Ltd., 25p.
- Ibé, A.C., 1985a. Nearshore Dynamics and Coastal Erosion in Nigeria. In Proc. UNESCO Expert Workshop on WACAF/3 Project : Dakar, Senegal, March 11-19, 1985.
- Ibé, A.C., 1986. Harbour Development Related Erosion at Victoria Island, Lagos. International Geomorphology 1986, Part 1, V. Gardiner John Wiley and Sons Ltd., p.165-181.
- Ibé, A.C., 1987a. Collective Response to Erosion Hazards along the Nigerian Coastline. In Proc. Coastal Zone '87. Seattle, Washington, p.741-754.
- Ibé, A.C., 1987b. Marine erosion on a transgressive Mud Beach in Western Nigeria. In Proc. Intern. Symposium on Geomorphology and Environmental Management, Alahabad, India, Jan. 17-20 eds. S. Sighn and R.C. Tiwari (In Press).

- Ibé, A.C., 1987c. Port development related erosion at Escravos, Bendel State, Nigeria. In Proc. Man's Impact on the Coastal Environment Barcelona, Spain, 6-13 September, 1986. In Thallasa, Revista De Ciencions Del Mar Sp. ed. F. Villas-editor.
- Ibé, A.C., 1987d. Human impact on the coastal erosion problem in the West and Central Africa (WACAF) region. In Proc. International Sea Conference, University of Mauritius, Reduit, Mauritius, 7-12 September, 1987 (In Press).
- Ibé, A.C. and Antia, E.E. 1983. Preliminary assessment of the impact of coastal erosion along the Nigerian shoreline. NIOMR Tech. Paper, No. 13, 17p.
- Jeffreys, H., 1925. On the formation of water waves by Wind. Proc. Roy. Soc. A. 107, p.189-206.
- Kerns, W.R., Byrne, R.H. and Hobbs, C.H., 1980. An economic analysis for Management of shoreline erosion. Coastal Zone Management Journal, 8, p.785.
- Lehner, P. and De Ruiter, P.A.C., 1977. Structural history of Atlantic Margin of Africa. AAPG. Bull. 61, p.961-981.
- Lepple, F.K., 1975. Eolian dust over the North Atlantic Ocean. Ph. D. Dissert. Univ. Univ. Delaware, Newark.
- Lenôtre, N., 1985. Les facteurs d'une érosion côtière naturelle. Moyens d'étude en mer. Cours du séminaire atelier WACAF/3 de Lomé (Togo). Rapport BRGM 1985.
- Litvin, V.M., 1980. Morphostructure of the Atlantic Ocean Bottom and its Development in the Mesozoic an Cenozoic, Nauka. Moscow.
- Ly, C.K., 1980. The role of the Akosombo dam on the Volta River in causing coastal erosion in central an eastern Ghana. Marine Geology, 37 (3/4), p. 323.332.
- Migniot, C., 1982. Etude de la dynamique sédimentaire marine, fluviale, estuarienne. Thèse Univ. Paris Sud.
- Miles, J.W., 1965. A note on the interaction between surface waves and wind profiles. J. Fluid. Mech. 22, p.823-7.
- Miles, J.W., 1967. On the generation of surface waves by shear flows. part V. J. Fluid Mech. 30, p.163-75.
- MacDowell, D.M., Postlewaite, R.W. and Hayes, R.J. 1983. Control of erosion at sites in the Niger Delta. In Proc. Intl. Conf. on Coastal and Port Engineering in Developing Countries (20-26 March, 1983), Colombo, Sri Lanka, Vol.1., p.130-140.
- Manohar, M. Quélenec, R.E., Fatah, M., Rashad, H., 1976 : Sediment movement along the Nile delta coast. Proc. UNESCO Seminar on Nile delta coastal processes with special emphasis on hydrodynamical aspects. Alexandria, Egypt.
- NEDECO, 1961. The waters of the Niger Delta. The Hague, 317 p.
- NEDECO, 1975. Etude de l'avancement de l'érosion et analyse des solutions immédiates. Togo Phase 2.
- NEDECO, 1978. Etude de l'avancement de l'érosion et analyse des solutions immédiates. Togo. Rapport final.

- NEDECO, 1984. Coastal erosion West Africa. Inventory of coastal problems based on Nedeco's project experience in the region. Internal Report prepared for UNESCO WACAF/3 Project, No. R2039, March, 1984.
- Oguara, T.M. and Ibé, A.C., (In Press). Decision Analysis for the selection of erosion control measures. NIOMR Tech.
- Oliveros, C., Quélenec, R.E., 1985. Etude du littoral du Togo à l'est de Lomé à partir de l'évolution des profils de plage. UNESCO/BRGM. Rapport 85 TGO 071 MAR.
- Olofin, E.A. 1985. Channel responses to stream flow control in a Savana Environment, In International Geomorphology ed T. Spenser. Department of Geography, University of Manchester, 451.
- Paradis, G., 1979. Rôle de l'extraction traditionnelle du sel dans la formation des aires dénudées des mangroves de l'Afrique de l'Ouest. Bull. ASEQUA, No. 56-57, p.61-65.
- Pelletier, J.P. 1971. Techniques numériques appliquées au calcul scientifique. Masson, Paris.
- Phillips, O.M. 1957. On the generation of waves by turbulent wind. J. Fluid Mech. 2, p.417-45.
- Pilkey, O.H. et al., 1981. Old solutions fail to solve beach problem. Geotimes, Vol. 26, p.18-22.
- Pugh, J.C., 1954. Sand movement in relation to wind direction as exemplified on the Nigerian coastline. Univ. of Ibadan. Research Notes.
- Quélenec, R.E., 1976. Study of wave runs in Nile delta nearshore wave records (Burullus). Proc. UNESCO Seminar on Nile delta coastal processes with special emphasis on hydrodynamical aspects. Alexandria, Egypt.
- Quélenec, R.E., 1981. La gestion régionale des sédiments. Rapport de synthèse générale du séminaire de Propriano. Bull. BRGM Section 3 No.1. 1982.
- Quélenec, R.E., 1984. Possibilités d'utilisation de la télé-transmission de données par satellite. Application au projet "Bassins versants expérimentaux en région provençale". Rapport BRGM 84 SGN 397 EAU.
- Quélenec, R.E., 1984a. Intérêt de l'analyse des profils de plage pour l'étude de la dynamique sédimentaire littorale. Cas du littoral du delta du Nil. 18e journée de la Sté Hydrotechnique de France (SHF). Marseille, Sept. 1984.
- Quélenec, R.E., 1984b. Eléments de dynamique sédimentaire littorale. Vol. 1 et 2. Manuel du cours-atelier de formation de Lomé. UNESCO, Projet WACAF/3. Rapports BRGM 85 SGN 272/273 EAU.
- Quélenec, R.E., 1984c. Identification des problèmes d'érosion sur le littoral sableux de Côte d'Ivoire. Proposition d'actions prioritaires. Rapport BRGM No. 84 AGE 033.
- Quélenec, R.E., 1987a. Inventaire des problèmes d'érosion côtière dans les pays de la Communauté Européenne. Guide méthodologique. Rapport BRGM 87 EUR 140 MAR.
- Quélenec, R.E., 1987b. L'érosion côtière : Exemples, causes, aléas, et risques induits. Colloque "Mer et Littoral : Couple à risque". Ministère de l'Environnement. Paris. France.
- Quélenec, R.E., 1988a. Identification of coastal erosion problems in the Gambia. UNEP Report.
- Quélenec, R.E., 1988b. Dynamique sédimentaire littorale. Rapport BRGM (A paraître).

- Riffault, A. 1980. Les environnements sédimentaires actuels et quaternaires du plateau continental sénégalais au sud de la presqu'île du Cap Vert. Thèse Univ. Bordeaux.
- Ruffman, A., Meagher, L.J. and McG. Stenxvt, J., 1977. Bathymétrie du talus et du plateau continental du Sénégal et de la Gambie. Geomarine Association Ltd. New Scotia, Canada, 130p.
- Shepard, F.P., and Emery, K.O., 1973. Congo submarine Canyon and Fan Valley. AAPG Bull., 57, 1679-1691.
- Sireyjol, P. 1977. Transit littoral et conception des ports : l'exemple du port de Cotonou. La Houille Blanche, No.5/6, p.401-408.
- Sverdrup, H.U. and Munk, W.H., 1947. Wind, sea and swell - Theory of relationships in forecasting. Hydrog. Off. Publ. 601, Hydrog. off. U.S. Navy. (47p).
- UNITED NATIONS, 1982. Coastal Erosion Control Technologies.
- UNEP/PNUE, 1985a. Report of the UNESCO/UN-DIEM/UNEP, Seminar - Workshop on control of coastal erosion in West and Central Africa. Dakar, Senegal 11 - 18 March, 1985, 22p.
- UNEP/PNUE, 1985b. Coastal Erosion in West and Central Africa, 165p.
- UNESCO, 1985. Manual on sea level measurement and interpretation. IOC Techn. Report.
- UNESCO, 1985a. Proc. UNDP/UNESCO Workshop on mangrove ecosystems dynamics - Port Moresby - Papua New Guinea.
- UNESCO, 1987. IOC Regional Committee for the Central Eastern Atlantic. 1st session. Praia, Cape Verde, Jan. 1987.
- Veatch, A.C. and Smith, P.A., 1939. Atlantic submarine valleys of United States and Congo submarine valley : Geol. Soc. America Spec. Paper 7, 100p.
- Verstraete, J.M. and Picaut, J. 1983. Variation du niveau de la mer de la température de surface et des hauteurs dynamiques le long de la côte nord du Golfe de Guinée. Oceanogr. trop. 18(2) p.139-162.
- Vitale, P., 1980. A guide for estimations longshore transport rate using four SPM methods. CERC/TA No. 80-6.
- Walton, T.L., 1980. Computation of longshore energy flux using LEO current observations. CERC/TA No. 80-3.
- Webb, J.E. 1960. The erosion of Victoria Beach. Its cause and cure. Ibadan University Press, 42p.
- Wiegel, R.L., 1984. Oceanographical engineering. Prentice Hall.

Publié et imprimé par:



Centre d'activité du Programme pour les océans
et les zones côtières
Programme des Nations Unies pour l'environnement

Des exemplaires de ce document ainsi que d'autres
publications du Centre d'activité du Programme pour les
océans et les zones côtières du PNUÉ peuvent être obtenus auprès du:

Centre d'activité du Programme pour les océans
et les zones côtières
Programme des Nations Unies pour l'environnement
B.P. 30552
NAIROBI
Kenya