



MERS REGIONALES

PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR L'ENVIRONNEMENT

Pollution par pétrole et nettoyage du littoral des côtes de la région de l'Afrique orientale

PNUE : rapports et études des mers régionales n° 57

Préparé avec la collaboration de



OMI

PREFACE

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 conçu 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 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/}.

Dans la décision 8/13(C) prise à sa huitième session, le Conseil d'administration du PNUE a demandé l'élaboration d'un plan d'action pour la protection et la mise en valeur du milieu marin et du milieu côtier de la région de l'Afrique de l'Est. A titre de première activité entreprise dans la région, le PNUE a organisé en octobre et novembre 1981 une mission exploratoire PNUE/ONU/ONUDI/FAO/Unesco/OMS/OMCI/UICN qui s'est rendue dans la région et dont les constatations ont servi à établir les six rapports sectoriels suivants :

- ONU/Unesco/PNUE : Mise en valeur du milieu marin et des zones côtières dans la région de l'Afrique de l'Est. Rapports et études des mers régionales No 6. PNUE 1982.
- ONUDI/PNUE : Sources industrielles de pollution des mers et des côtes dans la région de l'Afrique de l'Est. Rapports et études des mers régionales No 7. PNUE 1982.
- FAO/PNUE : La pollution des mers dans la région de l'Afrique de l'Est. Rapports et études des mers régionales No 8. PNUE 1982.

^{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, de la mer Rouge et du Golfe d'Aden, de l'Afrique orientale, 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 des mers régionales No 1. PNUE 1982.

- OMS/PNUE : Problèmes de santé publique dans la zone côtière de la région de l'Afrique de l'Est. Rapports et études des mers régionales No 9. PNUE 1982;
- OMI/PNUE : Lutte contre la pollution par les hydrocarbures dans la région de l'Afrique de l'Est. Rapports et études des mers régionales No 10. PNUE 1982;
- UICN/PNUE : Conservation des écosystèmes et ressources biologiques des mers et des côtes dans la région de l'Afrique de l'Est. Rapports et études des mers régionales No 11. PNUE 1982.

Les six rapports sectoriels préparés sur la base des données rassemblées par cette mission ont été utilisés par le secrétariat du PNUE pour préparer un rapport de synthèse intitulé :

- PNUE : Problèmes d'environnement qui se posent dans la région de l'Afrique de l'Est. Rapports et études des mers régionales No 12. PNUE 1982.

Le rapport de synthèse et les six rapports sectoriels furent soumis à la réunion de travail PNUE sur la protection et la mise en valeur de l'environnement marin et des zones côtières de la région de l'Afrique de l'Est (Mahé, Seychelles, 27-30 septembre 1982) à laquelle ont assisté des experts désignés par les Gouvernements de la région.

La réunion de travail a :

- passé en revue les problèmes environnementaux de la région;
- approuvé un projet de plan d'action pour la protection et la mise en valeur de l'environnement marin et côtier de la région de l'Afrique orientale;
- défini l'ordre de priorité des activités du programme qui doivent être menées dans le cadre du projet du plan d'action; et
- recommandé que le projet de plan d'action, ainsi qu'un projet de convention régionale pour la protection et la mise en valeur de l'environnement marin et côtier de la région de l'Afrique orientale et de protocoles relatifs (a) à la coopération en matière de lutte contre la pollution en cas d'urgence, (b) aux zones spécialement protégées et aux espèces menacées, soient soumis à une conférence des plénipotentiaires des Gouvernements de la région en vue de leur adoption.

En consultation avec les Gouvernements de la région de l'Afrique orientale, l'élaboration du plan d'action a mis l'accent sur les activités directement reliées aux préparatifs de la conférence des plénipotentiaires et aux autres activités régionales que la réunion de travail de Mahé a recommandé de classer dans la catégorie de première priorité ^{3/}. Il s'agit entre autres de la préparation

^{3/} Rapport de la Réunion de travail sur la protection et la mise en valeur du milieu marin et des zones côtières de la région de l'Afrique de l'Est, Mahé, 27 - 30 septembre 1982 (PNUE/WG/77/4).

par des experts de la région d'une série de rapports nationaux sur :

- la législation
- la conservation des ressources naturelles et
- les activités socio-économiques qui peuvent avoir un impact sur l'environnement marin et côtier.

Les rapports nationaux ont fait l'objet d'une synthèse dans les rapports régionaux 4/5/6/ préparés pour aider les Gouvernements de la région de l'Afrique orientale à négocier la Convention régionale et ses protocoles.

En outre, un atelier de formation technique sur la prévention de la pollution pétrolière, de la lutte contre cette pollution et de la riposte à lui opposer dans la région de l'Afrique orientale a été organisé en commun par l'Organisation maritime internationale (OMI) et le PNUE du 24 novembre au 2 décembre 1983 à Mombasa au Kenya.

Le présent document est une collection des notes d'atelier et du guide de site préparés pour les participants à l'atelier de formation. L'assistance d'un groupe de consultants, Woodward-Clyde Oceanengineering, dans la préparation de ce document est très appréciée.

4/ FAO/PNUE : Aspects juridiques de la protection et de la gestion du milieu marin et côtier de la région de l'Afrique de l'Est. Rapports et études des mers régionales No 38. PNUE, 1983.

5/ UICN/PNUE : Conservation marine et côtière dans la région de l'Afrique de l'Est. Rapports et études des mers régionales No 39. PNUE, 1984.

6 / PNUE : L'impact potentiel des activités socio-économiques sur l'environnement marin et côtier de la région de l'Afrique de l'Est. Rapports et études des mers régionales No 41. PNUE, 1984.

TABLE DES MATIERES

	pages
INTRODUCTION	1
Objectifs de l'atelier	2
Format	3
PHENOMENES COTIERS, GEOLOGIE COTIERE, ET TYPE DE LITTORaux	3
Phénomènes côtiers	3
Vagues	3
Marées et niveaux d'eau	4
Vents	4
Migration des sédiments et stabilité des plages	4
Types de littoraux	5
Plages de sable	7
Plages de gravier, de galets et de blocs	10
Côtes rocheuses	10
Mangliers	10
Roche côtière	10
Récifs côtiers	16
Géologie régionale	16
Climat et océanographie régionale	20
Conditions et océanographie régionale	20
Courants	24
Marées	24
Vagues	28
Environnement littoral et phénomènes côtiers	31
Côtes sablonneuses	31
Deltas fluviaux et passes	35
Côtes rocheuses	40
Récifs et environnements associés	44
PETROLE ET L'ENVIRONNEMENT	59
Sources de pollution marine par le pétrole	59
Nature du pétrole	60
Migration des nappes polluantes	63
Persistance du pétrole	65
"Sensibilité" de la zone côtière	68

MESURES CONTRE LES NAPPES DE PETROLE COTIERES	71
Mesures de protection côtière et terrestre	71
Méthodes de protection des zones voisines de la côte	71
Méthodes de protection terrestre	80
Priorités de nettoyage à terre	83
Méthodes de nettoyage à terre	83
Enlèvement manuel des matériaux contaminés	89
Machines de nettoyage des plages et des nodules de goudron	91
Méthodes de décharge	92
Dommages potentiels du nettoyage	92
Accessibilité logistique	95
Contraintes opérationnelles	96
Stratégie de lutte anti-pollution	97
GUIDE AUX EXCURSIONS SUR LE TERRAIN	101
REFERENCES	102

INTRODUCTION

Conformément aux recommandations prises par la Réunion de travail sur la protection et la mise en valeur du milieu marin et des zones côtières de la région de l'Afrique de l'Est (Seychelles, 27-30 septembre 1982), une réunion de travail sur la pollution par le pétrole et le nettoyage du littoral des côtes de la région Est Africaine a eu lieu à Mombasa au Kenya du 24 novembre au 2 décembre 1983. Organiser par l'OMI en coopération avec le PNUE, la réunion de travail a réunie ensemble 20 experts des Comores, de la France (Réunion), du Kenya, de Madagascar, des Seychelles, de la Somalie, de la République unie de la Tanzanie et des observateurs/experts de Djibouti et du Soudan.

La réunion de travail rentre dans le cadre du développement du Plan d'action pour la protection et la mise en valeur de l'environnement marin et côtier de l'Afrique de l'est. Son but était de fournir une formation dans la matière de prévention, de contrôle et de diminution de la pollution par les hydrocarbures en soulignant le combat sur ses déchets et la préparation de plans d'urgence régionaux et nationaux.

Le programme du cours qui était composé de lectures, de présentations audio-visuels et de manuels écrits, a fourni aux participants une compréhension des caractères du littoral et des facteurs qui contrôlent sa stabilité pour que les méthodes choisies pour la protection ou le nettoyage conviennent à l'environnement local et qu'elles ne causent pas plus de dommage que celles qui résultent de l'échouement d'une nappe de pétrole.

Deux excursions à la plage et à des sites de mangroves qui sont caractéristiques des côtes de la région étaient inclus dans le programme.

En reconnaissant que le contrôle de la pollution par les hydrocarbures commence avec la prévention, une vue d'ensemble des conventions internationales relatives à la pollution marine a été présentée en insistant sur le rôle de l'Etat portuaire dans l'application des règlements internationaux développer par l'OMI. L'impact économique d'un écoulement d'hydrocarbures a été soulevé pendant des présentations traitant de responsabilité et régimes juridiques et les procédures à suivre existants pour obtenir de la compensation.

En parlant de plan d'intervention, la réunion de travail a grandement bénéficié des présentations individuelles des experts du Kenya et de la République unie de la Tanzanie qui ont donnés un aperçu du statut de l'élaboration de plans d'intervention dans chacun de leur pays. Un intérêt considérable a été manifesté par les participants dans les possibilités pour la coopération régionale et le développement du projet de protocole relatif à la coopération en matière de lutte contre la pollution des mers en cas de situation critique dans la région de l'Afrique orientale.

Bien que la réunion de travail ait surtout été un cours de formation, il y a eu à la fin, un consensus général; il devrait y avoir des programmes de continuation destinés à assister des pays individuellement dans le développement des projets de contingence nationaux et pour discuter de ce qui pourrait, avec réalisme, être accompli aux niveaux régionaux et sous-régionaux dans le domaine de l'élaboration des plans d'intervention.

Objectifs de l'atelier

Une action anti-pollution efficace exige une préparation et une formation adéquates pour la mise sur pied aussi rapide que nécessaire de procédés de lutte appropriés. Un des aspects des activités anti-pollution est la protection et le nettoyage du littoral. Un des objectifs principaux de cet atelier est le développement d'une compréhension des caractères du littoral et des facteurs contrôlant sa stabilité afin que les méthodes sélectionnées pour sa protection ou son nettoyage conviennent à l'environnement local et ne causent pas plus de dommages que ceux résultant de l'échouement d'une nappe de pétrole.

L'atelier se propose de donner une connaissance pratique des facteurs qui contrôlent les processus littoraux afin que des décisions convenant aux sites spécifiques puissent être prises. Il est, par exemple, impossible de traiter de manière identique toute plage de sable, l'abondance des sédiments, l'érosion ou l'enfouissement du pétrole, ainsi que les accès terrestres à la rive variant de site en site. La flexibilité nécessaire à une adaptation aux situations et aux environnements divers peut être développée par la compréhension de la zone côtière de l'Afrique orientale (tableau 1).

Cet atelier n'est qu'une des composantes d'un assortiment d'éléments de préparation ou de formation nécessaires au développement d'une capacité de réaction étendue. La préparation de plans d'urgence régionaux et locaux est l'un des aspects fondamentaux de l'organisation de la lutte anti-pollution; la manipulation et le déploiement des barrières flottantes par exemple, demande une expérience pratique et l'étude d'évaluation de l'impact d'une nappe polluante implique des études de sites ainsi qu'une préparation cartographique. Toutes des diverses composantes sont partie nécessaires d'une campagne de lutte anti-pollution adéquate.

Tableau 1 : L'Afrique de l'Est - Etendues Côtières

Comoros	350 km
France (Réunion)	250
Kenya	500
Madagascar	4000
Maurice	200
Mozambique	2500
Seychelles	600
Somalie	3000
Tanzanie	750

Les éléments de l'atelier considérés dans le document se rapportent aux conférences sur:

- phénomènes côtiers et géologie côtière;
- types de littoraux;
- pétrole et devenir de la nappe polluante;
- protection du littoral;
- nettoyage du littoral;
- dommages potentiels du nettoyage; et
- stratégie de réponse.

Les deux excursions sur les sites faisaient partie intégrante de l'atelier, elles étaient destinées à l'examen et à la discussion des caractéristiques de la zone côtière à des endroits typiques le long de la côte du Kenya. Les excursions sur le site ont complété le matériel pédagogique par un élément réaliste, la discussion de problèmes côtiers et de pollution.

Format

L'atelier est une combinaison de conférences, d'excursions sur le site et de discussions pratiques. Les grandes lignes du cours sont données aux pages suivantes. Le cadre des conférences est donné ensuite dans ces notes, il est suivi par un guide d'excursion. Ces notes d'atelier ne sont conçues que comme un synopsis des conférences. Des informations supplémentaires peuvent être trouvées dans les documents mentionnés dans la bibliographie présentée à la fin de ce rapport.

PHENOMENES COTIERS, GEOLOGIE COTIERE ET TYPES DE LITTORAUX

Phénomènes côtiers

Vagues

Les vents génèrent des vagues qui à leur tour dépensent leur énergie dans la zone côtière. Le genre des vagues générées localement est contrôlé par la vitesse du vent, la distance parcourue et la durée du vent. Les vagues quittant la zone de génération se sont plus influencées par les vents locaux et se déplacent sous forme de houle de grande longueur d'onde. Le niveau d'énergie des vagues sur le littoral est fonction de l'inclinaison des vagues et de la profondeur de l'eau dans la zone littorale; les récifs et les hautfonds proches du rivage protègent la côte des vagues qui arrivent. Dans les régions balayées par des vents relativement unidirectionnels, comme la ceinture des Alizés, il y a une différence marquée du niveau d'énergie des vagues entre la côte au vent et la côte sous le vent. L'énergie mécanique des déferlantes au littoral provoque la redistribution ou la migration des sédiments.

Marées ou niveau des eaux

Les modifications cycliques du niveau des marées à la côte dans l'ouest de l'Océan Indien sont de l'ordre de 1.0m ou plus. Dans les micro-environnements de petite amplitude de marnage (où la zone de marnage est égale ou inférieure à 1.0m), l'action des vagues est concentrée sur une bande étroite du rivage; par contraste, dans les zones de grandes amplitude de marnage (variations de 3.0m ou plus), l'énergie des vagues est dissipée sur une large section du rivage. Les vagues de fond, masses d'eau poussées par le vent vers le rivage, élèvent le niveau des eaux au-dessus du niveau normal du ressac.

Vents

En plus de la génération des vagues, les vents peuvent jouer un rôle important en transportant des sédiments sablonneux dans la zone du rivage. Les dunes sont des dépôts de sédiments mobiles résultant de l'effet du vent; les dunes peuvent être stabilisées par la croissance, à leur surface, d'une couverture végétale.

Migration des sédiments et stabilité des plages

Pour les plages les sources de sédiments comprennent:

- la migration vers la terre de sédiments provenant des eaux littorales;
- la migration longitudinale par rapport au rivage de sédiments provenant de côtes voisines;
- l'érosion côtière par les vagues d'affleurements rocheux ou de dépôts sédimentaires existants;
- les sédiments érodés à l'intérieur et apportés par les eaux pluviales à la côte.

Les sédiments subissent une redistribution presque continue, à l'exception des matériaux de forte granulométrie (galets et blocs) dont le transport exige une grande quantité d'énergie ou des environnements à bas niveaux d'énergie, protégés de l'activité des vagues.

Les plages sont en équilibre dynamique avec les phénomènes côtiers. Les changements appartiennent à un processus normal. Les changements peuvent provenir de la migration des sédiments le long de la rive, migration provoquée par les vagues arrivant à un angle par rapport à la plage. Si l'angle d'approche des vagues varie, la direction de la migration peut être inversée. Lorsque cela se produit dans un système de plage refermé, l'érosion d'une section de la plage est compensée par l'accroissement d'une autre. L'interruption de la migration longitudinale des sédiments, par la construction d'un brise-lames, peut amener à l'accumulation de sédiments en amont accompagnée d'érosion dans la zone privée de sédiments en aval (fig. 1).

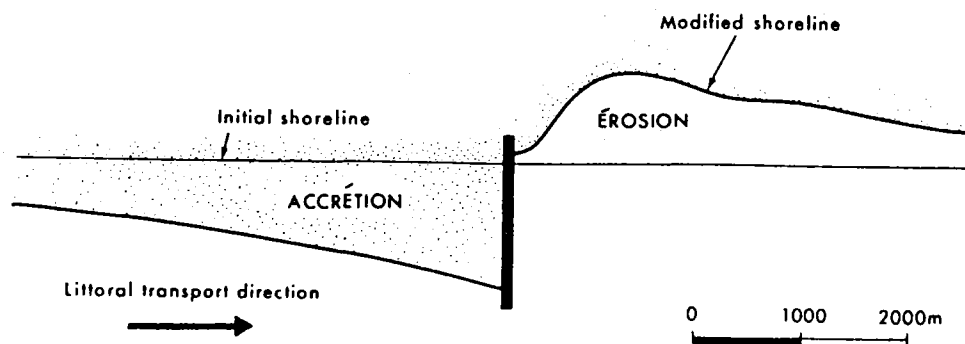


Figure 1: Littoral initial et modifications dues à la construction d'un brise-lames en travers de la plage (d'après Komac, 1976)

Pendant les périodes d'activité des vagues à haute énergie (par exemple: les tempêtes), les plages sont habituellement érodées par le transport des sédiments de la zone de marnage à la zone noyée. Les plages se reconstituent par la suite par l'activité constructive des vagues après la tempête, lorsqu'elles repoussent les sédiments (sous forme de crêtes) dans la zone de marnage (fig. 2). Ce cycle de va-et-vient, d'érosion et d'accroissement, peut se compléter sur de courtes périodes (jours ou semaines), ou selon un rythme saisonnier. Les plages peuvent subir une retraite à long terme (érosion) si plus de sédiments sont perdus que gagnés. Ceci peut se produire lorsque des sédiments sont enlevés par l'homme sans être remplacés.

Types de littoraux

Le caractère du littoral est fonction des phénomènes côtiers qu'il subit et des matériaux sur lesquels ces phénomènes agissent. Une distinction essentielle doit être faite entre les côtes bordées de dépôts sédimentaires et celles qui en sont dépourvues. Ces différents types de côtes (tableau 2) coexistent fréquemment (par exemple, une plage de sable comportant soit un écueil, soit une plateforme rocheuse dans la basse zone de marnage). La subdivision subséquente des littoraux sédimentaires est principalement basée sur la granulométrie des matériaux (tableau 3). L'origine des sédiments littoraux varie dans toute la région. Les sources principales en sont (1) l'érosion du substratum ou de la rive (sables de quartz ou volcaniques) et (2) le broyage des coquillages ou des coraux (sables à coquilles, sables "carbonatés" et blocaille corallienne) (voir fig. 3). Cet abord peut être étendu aux paramètres morphologiques (falaises rocheuses verticales; rampes, plateformes, éperons rocheux; deltas intérieurs de lagons; rempart de galets etc) et, dans le cas de côtes rocheuses, la résistance du matériau pourrait être pris en considération (affleurements de grès fragiles ou de granites plus résistants).

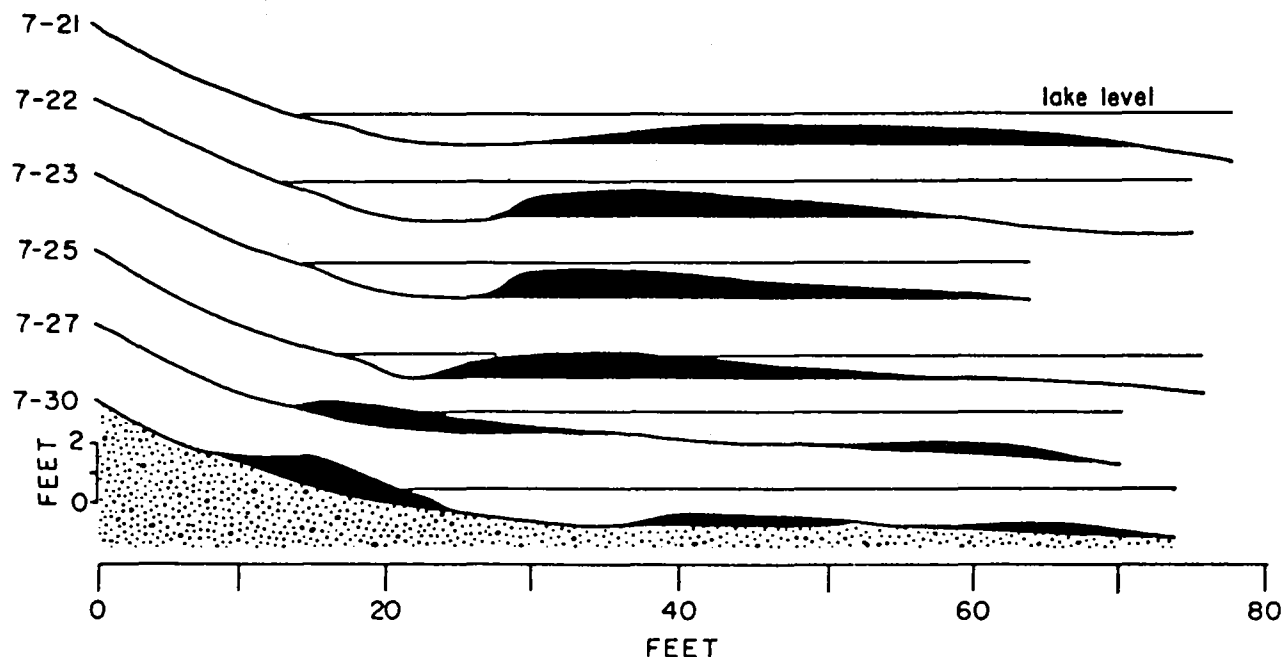


Figure 2: Succession de la migration des crêtes sur le littoral à la suite de l'érosion d'une plage par la tempête lac Michigan (d'après Davis et Fox, 1971)

Tableau 2 : Types de littoraux basés sur le substrat

Non-sédimentaires	Sédimentaires
Sode	Boue
Dépôt de plage indure	Sable
Corail	Gravier
Constructions	Galets
- béton	Bloc
- métal	Mixte (comprenant gravier et blocaille)
- bois	Avec croissance végétale
	- mangrove
	- marais
	- arrière-plage de dunes

Tableau 3 : Granulométrie des sédiments

Diamètre des particules	
Boue	> 0.06mm
Sable	0.06-4mm
Gravier	4-64mm
Galets	64-256mm
Blocs	>256mm
(Gravier	>2mm)



Figure 3: Exposé des fragments de corail sur la plage adjacente à celle dans la figure 4

Un résumé de quelques caractéristiques des principaux types de littoraux est donné au tableau 4.

Plages de sable

Les sédiments sablonneux peuvent être de nature siliceuse (quartz) volcanique, calcique, ou corallienne selon leur origine (figs. 3 et 4). La morphologie de la plage est fonction du relief côtier de l'abondance des sédiments et du niveau d'énergie des vagues. Les plages de sable subissent des changements continus dus à la constante redistribution des sédiments par l'action des vagues. Le taux de changement et le taux de migration des sédiments augmente avec l'augmentation du niveau d'énergie des vagues à la côte. Sur beaucoup de côtes exposées la présence de récifs au large protège les plages en absorbant l'énergie des vagues. Les dunes de sable s'établissent dans certaines zones en retrait (fig. 5) des plages. Elles peuvent subir un balayage par les hautes vagues ou pendant les périodes de hautes eaux (sur les plages bordées par des lagons).

Tableau 4: Caractéristiques des principaux types de littoraux

Matériau de la zone littorale	Granulométrie (mm)	Caractéristiques descriptives générales
BOUE	≥ 0.06	• pente faible • se développe dans les zones présentant une source de fines particules • surface généralement plate, incisée par un réseau complexe de ruisseaux et de canaux • saturés d'eau, les dépôts de boue sont souvent recouverts d'un film d'eau ne pouvant s'infiltrer dans la couche sédimentaire • capacité portante faible, incapable de supporter le poids d'un homme lorsque les sédiments sont saturés d'eau; les sédiments secs peuvent être susceptibles de supporter des hommes et des véhicules
SABLES	0.06-4.0	• pente de 1° - 40° • soumis à des cycles saisonniers d'érosion et d'accroissement dus aux variations du niveau d'énergie des vagues • substrat compact avec faible taux d'infiltration de l'eau
GRAVIER	4.0-64	• plage plus étroite et à pente plus raide que les plages de sable • présence fréquente de crêtes de tempête du côté intérieur de la berme; la hauteur de la crête augmente avec l'exposition à l'énergie des vagues
GALETS	64-256	• plage plus étroite et à pente plus raide que les plages de sable • présence fréquente de crêtes de tempête du côté intérieur de la berme; la hauteur de la crête augmente avec l'exposition à l'énergie des vagues
BLOCS	≥ 256	• blocs détachés du rocher et quelque peu érodés et formés par abrasion au cours de leur migration • typiquement localisés à la base des falaises ou des affleurements rocheux; fréquents sur les plages fermées
SÉDIMENTS MIXTES	toutes tailles	• le piétre tri des sédiments résulte dans bien des cas du bas niveau d'énergie des vagues • la taille des sédiments augmente fréquemment sur les bermes ou les crêtes de tempête • le taux d'infiltration de l'eau est faible lorsque le sable a envahi les vides entre les graviers et les galets
VÉGÉTATION		
Mangrove		• marais cotiers présentant une association complexe d'arbres et de buissons halophiles, habitat très productif • fréquent dans la plupart des régions tropicales entre 25°N et 25° S • les sédiments sont bloqués par le système racinaire
Marais		• se développe dans les zones présentant une source de fines particules • la surface des marais est inondée en période de hautes eaux • la surface plate du marais est parcourue par des ruisseaux et des canaux boueux
Dune		• le sable souffle par le vent est capturé par la végétation de la zone en retrait de la plage • l'enlèvement ou les dommages causés à la végétation déstabilise les dunes
ROCHER		
Falaises		• résultent de relief élevé dans la zone cotière ou du fait de l'érosion rapide par les phénomènes littoraux de rochers peu résistantes ou de matériaux non-consolidés • souvent peu ou pas d'accumulation sédimentaire à la base de la falaise ce qui la prive de toute protection face aux phénomènes d'érosion
Plateformes		• se rencontrent typiquement sur les hauts-fonds à la base des falaises rocheuses • une couverture sédimentaire, lorsqu'elle est présente, n'offre aucune protection car les phénomènes induits par les vagues agissent directement sur la surface du rocher • sont formées par la cimentation interstitielle de sédiments provenant de la zone noyée et de la zone de marnage, ou résultent d'une précipitation physique ou encore sont le sous-produit d'une activité biologique • elles s'étendent au-dessous du niveau du reflux; surviennent fréquemment en couches stratifiées
CONSTRUCTIONS		• toute structure se trouvant sur un littoral et construite par l'homme; les matériaux peuvent être: la pierre, le béton, le métal ou le bois

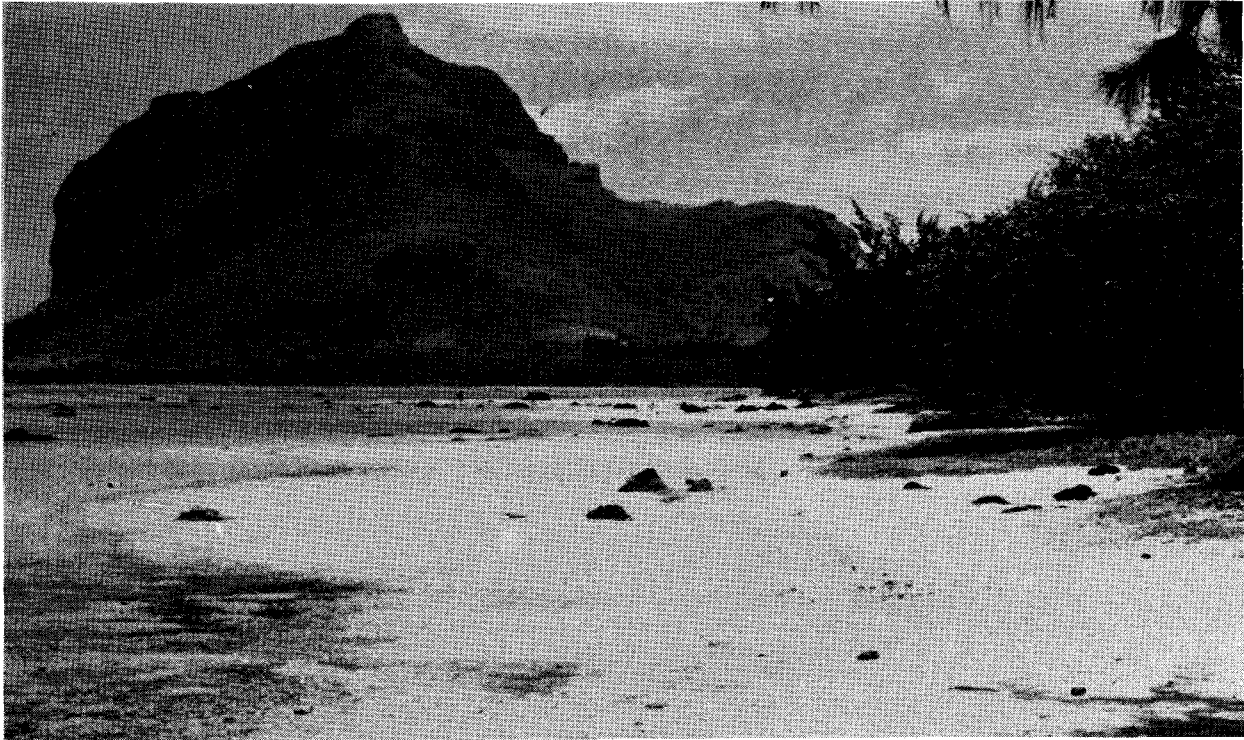


Figure 4: Plage plate et vaste: l'embrasure, près de La Morne Brabant Ile de Maurice



Plages de gravier, de galets et de blocs

Le type de matériau n'est pas commun sur les côtes de la région de l'Afrique orientale. Lorsqu'il est présent, il est dérivé de l'érosion de sode (fig. 6), de l'érosion de récifs coraliens ou, comme à l'île Maurice, de la décomposition de colonnes de basalte (figs. 7 et 8).

Côtes rocheuses

Le relief de la zone côtière de presque toute la région est-africaine est très bas, bien que des affleurements rocheux soient communs dans certaines parties. Dans la plupart des régions de la côte continentale les affleurements rocheux résultent du soulèvement de formations coralliennes (fig. 9), au contraire, l'île Maurice est entièrement formée de rochers volcaniques (fig. 8). Les côtes rocheuses peuvent être partagées premièrement entre côtes à relief accidenté ou à relief plat et deuxièmement en termes de résistance à l'érosion. Sur les falaises verticales une entaille faite par les vagues au niveau du flux est une particularité commune (fig. 10). On trouve des plateformes modelées par les vagues dans les régions où les phénomènes côtiers ont pu évoluer les affleurements rocheux.

Mangliers

Les marais côtiers à eau salée ou saumâtre, rencontrés sous les tropiques, et bordés, sur leur frange extérieure, par le manglier rouge ou Rhizophora mangle, sont des mangliers (fig. 11). Elles s'établissent dans des milieux à faible niveau d'énergie, protégés de l'action des vagues de tempêtes; on ne les trouve sur les côtes au vent que lorsqu'une zone littorale peu profonde ou un système de récifs les protègent de l'action des vagues. Un système complexe de racines aériennes caractérise la frange extérieure d'un marais à manglier (fig. 12). Les racines s'étendent à travers la zone de marnage jusqu'au niveau des basses eaux. Vers l'intérieur, le manglier rouge fait place au manglier noir, Avicennia germinans, qui ne s'établit que vers le sommet de la zone de marnage. La marée circule parmi le système racinaire mais la circulation de l'eau ne conduit pas au développement de canaux (fig. 13). Les mangliers sont des environnements extrêmement productifs pour beaucoup d'espèces marines (en particulier, les poissons, les crevettes et les homards) fig. 11.

Roche côtière

La cimentation de sédiments trouvés sur les plages dans la zone de marnage amène à la formation d'un affleurement de roche en couches dans plusieurs locations (figs. 14 et 15). La roche côtière se forme au-dessous du niveau de la haute marée moyenne et souvent s'étend au-dessous du niveau de la basse marée. La formation de roche côtière est associée avec la production de ciments d'aragonite, de calcium et/ou de magnésium dans les systèmes interstitiels de plages souterrains par la précipitation physique ou comme un sous-produit de l'activité biologique (Roberts et Sneider, 1982). La présence de roche côtière produit un type de côte mixte, composée de sédiments et de roche.

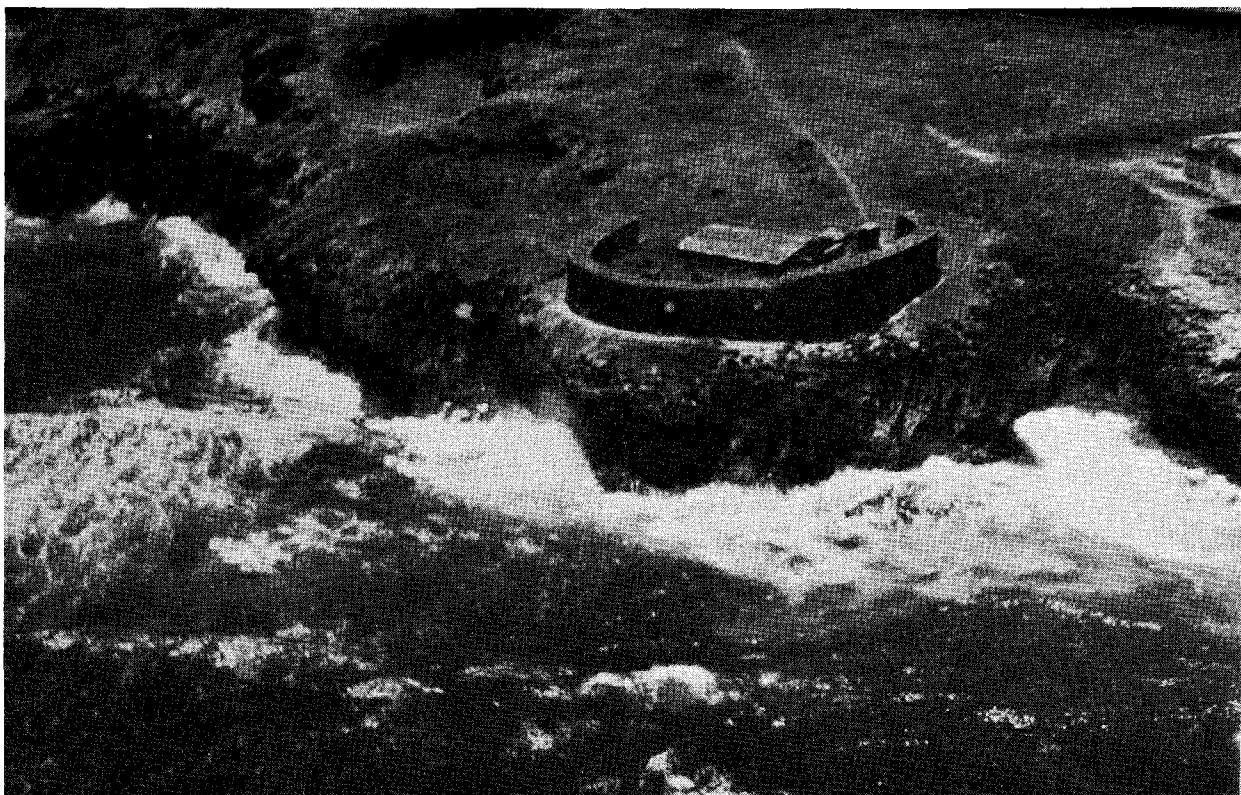


Figure 6: Plage de sable, galets, gravier et blocs, à bas niveau d'énergie ;
près de la Petite Rivière Noire, Ile de Maurice





Figure 8: Basalte en colonnes, qui sert de source pour les sédiments sur la plage montrée dans la figure 7



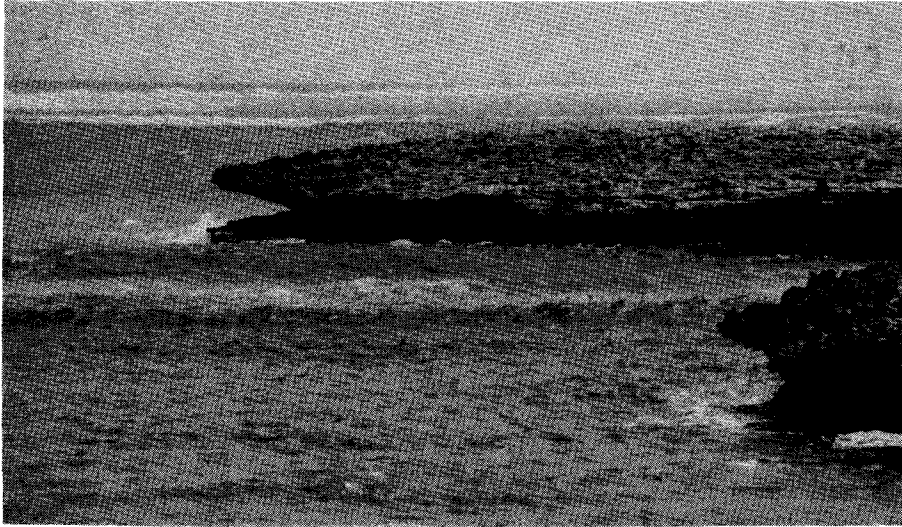


Figure 10: Des entailles creusées par les vagues (des "visors") dans des affleurements basaltiques; Îlot Sanchs, Ile de Maurice

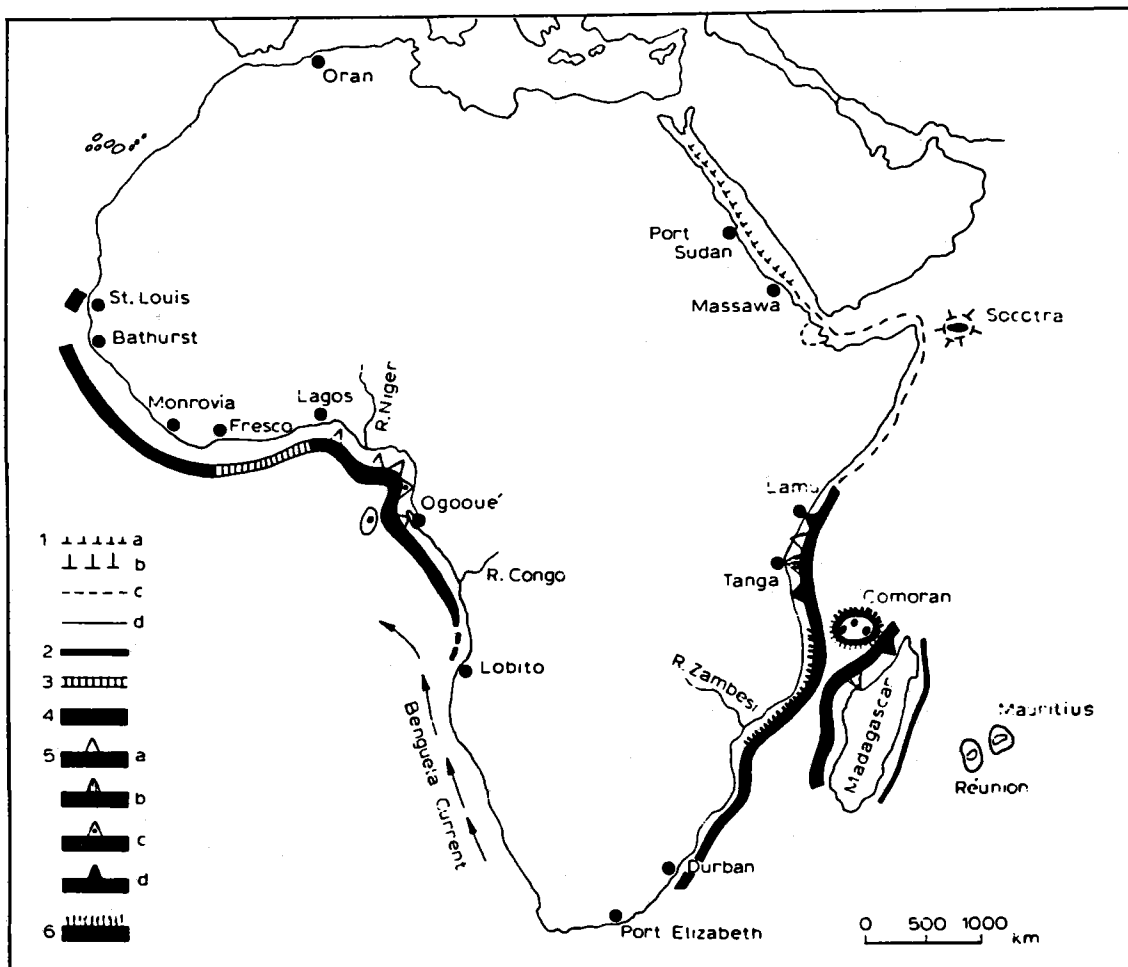


Figure 11: Distribution des mangliers en Afrique (après Grewe 1949) 1 *Avicennia* (a) de petits groupes individuels (b) des communautés fermées (c) avec des *Rhizophora* (d) des *Rhizophora* mieux développés. 2 la plupart des espèces présente, et bien développée. 3 comme no. 2 dans des lagons; 4 couverture complète de mangliers bien développés; 5 une forêt exploitée par le commerce (a) pas exporté (b) de l'écorce destinée à l'exportation (c) du bois destiné à



Figure 12: Manglier à basse marée; Chaussée Makupa, Mombasa, Kenya

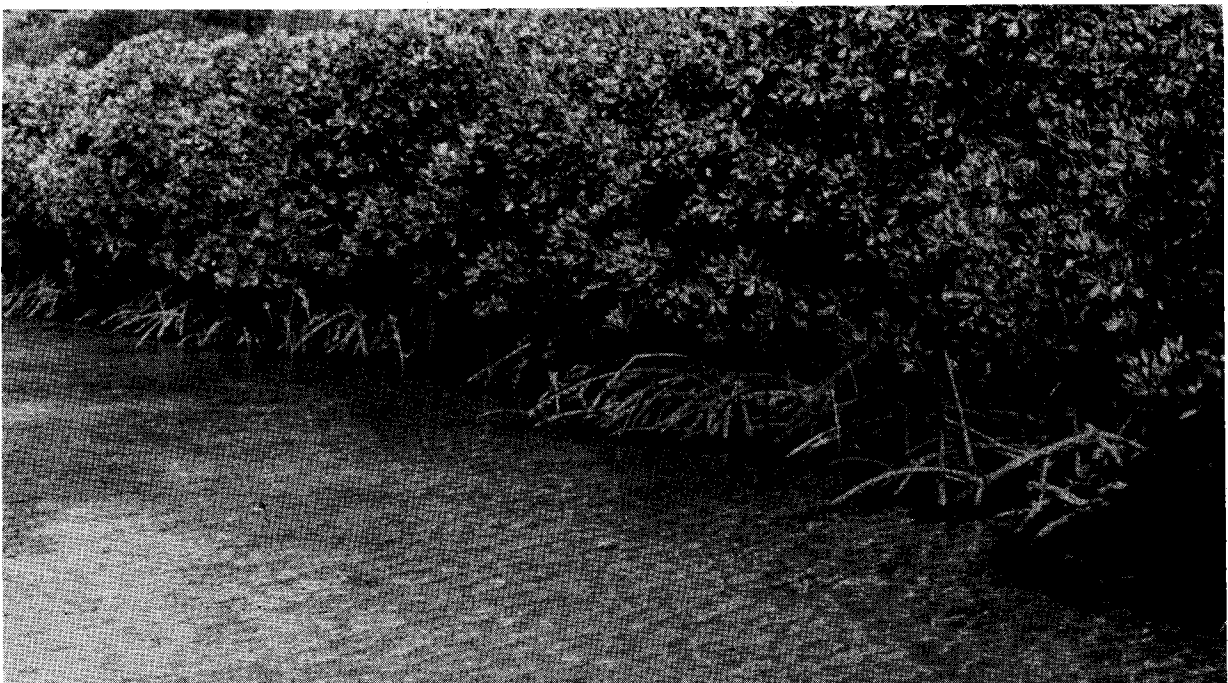




Figure 14: Affleurements de roches côtières, près de l'Hôtel de la Plage Mombasa, Kenya



Récifs côtiers

Un récif est composé de colonies complexes de polypes individuels sécrétant un squelette calcaire (carbonate de calcium). Les récifs ont la faculté de créer des structures rigides, résistant aux vagues qui modifient leur environnement physique. La croissance des coraux est limitée par une température trop basse ($<16^{\circ}\text{C}$) et une faible salinité, ainsi les récifs coraliens ne se développent que sous les tropiques et chaque bassin océanique à ses propres genres et espèces. Il existe trois principaux types de récifs:

- récif frangeant: parallèle au littoral et séparé de lui par un lagon étroit et peu profond (fig. 16);
- récif barrière: systèmes plus importants, établis au large sur le plateau; et
- atoll: récif s'établissant autour des îles du Pacifique.

La forme d'un récif est largement contrôlée par les circulations et l'action des vagues (Robert et autres, 1977; Murray et autres, 1977). Les coraux s'établissent sur les côtes exposées et peuvent résister à des hauts niveaux d'action des vagues. La répartition des espèces en zones est fonction de la relation entre les vagues et les courants (Roberts et autres, 1979). Du fait de cette zonation on trouve une grande variété d'environnements littoraux le long d'un récif. Dans les îles où les sédiments du littoral sont balayés depuis la côte au vent vers la côte sous le vent, le développement des coraux se trouve limité du côté sous le vent de l'île (Adams, 1968). Les récifs actifs sont rarement émergés car les coraux à récifs ne peuvent supporter plus que quelques minutes d'exposition à l'air mais la profondeur peut être très faible ($<1\text{m}$) (fig. 17).

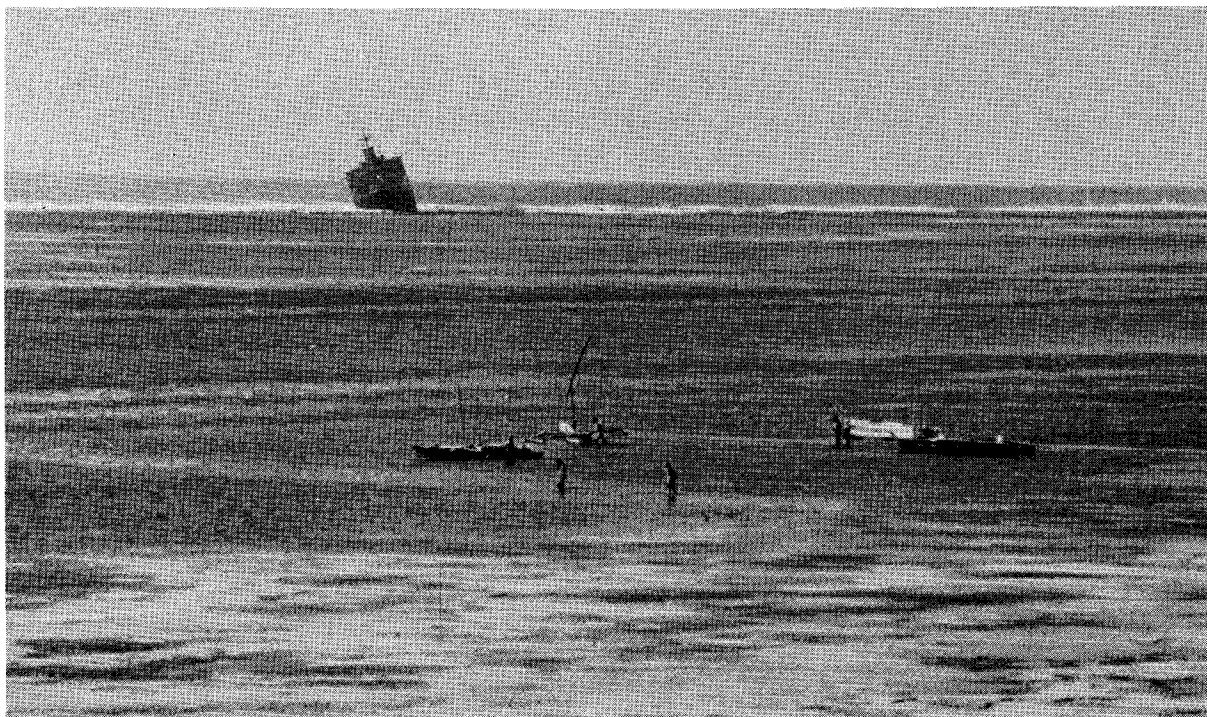
Les récifs coraliens sont la particularité la plus importante de la côte est-africaine et des îles du large. Du fait de leur complexité et du fait qu'ils sont responsables d'une grande variété de particularités littorales, une description détaillée des systèmes récifaux est donnée lors d'une section suivante. Les récifs sont un milieu biologiquement très divers et très productif. Leur importance géologique est également reconnue car ils augmentent la topographie des fonds marins et sont une source renouvelable de sédiments calcaïques.

Géologie régionale

Les marges continentales et les grandes masses terrestres isolées, comme Madagascar, marquent la transition entre la fine croûte océanique et la croûte plus épaisse et chimiquement différente des continents. Le type des marges continentales est déterminé par la tectonique des plaques. La topographie compliquée des fonds marins reflète le déplacement de larges plaques de la croûte terrestre (UNESCO, 1971).



Figure 16: Récif frangeant; Le Morne Brabant, dans le sud-ouest de l'Ile de Maurice



La plus grande partie de la côte est-africaine et toute la côte de Madagascar montrent des marges continentales (incluant la plaine côtière, le plateau et le talus continentaux et la crête océanique) qui sont classifiées comme pauvres en sédiments ou jeunes (figs. 18 et 19). Toute la côte est-africaine fait partie d'une marge divergente, c'est-à-dire, qu'elle ne forme pas la limite d'une plaque. Ce type de marge apparaît lorsqu'un continent est parcouru par une faille dont les lèvres s'écartent pour former un nouvel océan, ainsi le continent et le fond marin adjacent font partie de la même plaque. Avec le temps ils subissent un affaissement massif et une épaisse accumulation de sédiments. La marge est-africaine, comme celle de Madagascar, est à un stade très précoce de développement (figs. 18 et 19 et tableau 5).

Les marges jeunes n'ont pas encore accumulé de couches sédimentaires épaisses sur leurs côtes ni sur le plateau continental. Seuls les bassins tectoniques continentaux ont accumulé d'épaisses successions sédimentaires. Les temps géologiques n'ont pas été suffisants pour permettre aux marges continentales jeunes de développer une configuration plateau continental, talus continental et crête océanique en progression. Ainsi les affleurements de roches volcaniques traversant la mince couche recouvrant le plateau continental sont fréquents. Les crêtes océaniques sont rarement présentes et la transition avec les grands fonds océaniques est brutale. Les plateaux continentaux bordant les marges divergentes jeunes sont généralement étroits avec des bords abrupts et compliqués.

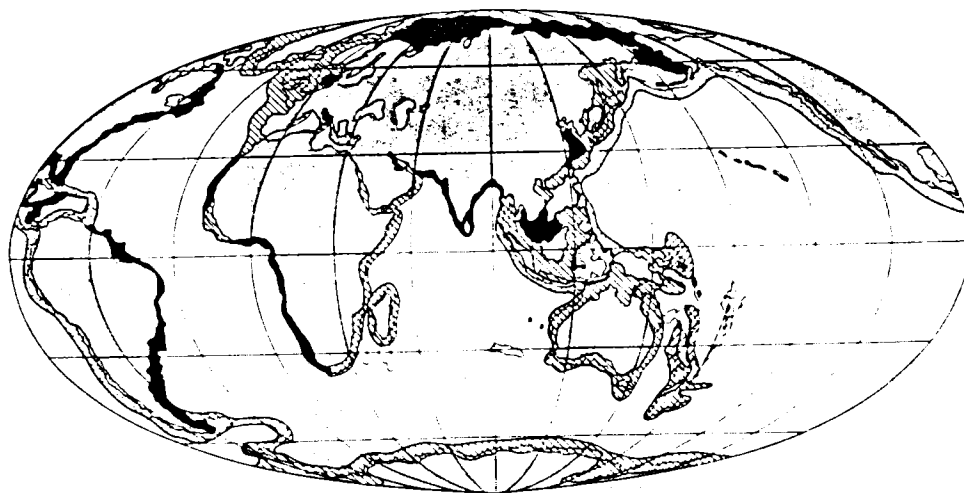


Figure 18: Distribution des quatre types de marges continentales mondiales d'après Emery 1980; 1: Initial, 2: jeune ou pauvre en sédiments, 3: sédimentation développée, 4: marges convergentes



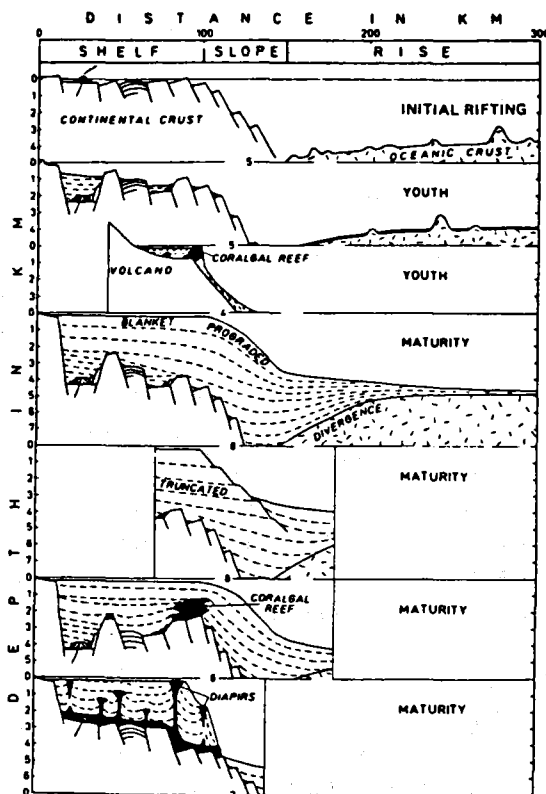


Figure 19: Etapes du développement évolutif des marges continentales.
Exagération verticale $\pm 10\times$ (d'après Emery, 1980)

Tableau 5: Etapes identifiables de l'évolution des marges continentales d'après des profils de réflexion sismique continue (Emery, 1980)

	Plateau continental	Talus continental	Crête océanique
Stade initial	Roches pré-tectoniques tectoniques, glaciaires ou volcaniques exposées ou finement recouvertes	Roches pré-tectoniques tectoniques, glaciaires ou volcaniques exposées ou finement recouvertes	Absent
Jeunesse	D'épais sédiments emplissent les cuvettes et les synclinaux	Roches pré-tectoniques tectoniques, glaciaires ou volcaniques exposées	Absent ou petit
Maturité	Épaisse couverture sédimentaire 1 Large couverture 2 Barrage de récifs 3 Diapirs	Sédiments épais 1 Avancés 2 Tronqués 3 Diapirs	1 Épais pour les marges divergentes 2 Minces pour les marges de translation

Climat et océanographie régionale

Conditions et océanographie régionale

Les zones de haute-pression planétaires déterminent la circulation générale de l'atmosphère. La rotation de la terre (force de Coriolis) cause une déflexion des vents vers la gauche dans l'hémisphère sud et vers la droite dans l'hémisphère nord. Les Alizés, soufflant du sud-ouest vers la côte est-africaine en sont une conséquence (fig. 20). En hiver les zones de pression sur l'Océan Indien se conforment au modèle planétaire (par exemple, janvier, fig. 21), hautes le long du 30° de latitude sud et basses au sud de l'Inde. Elles engendrent un Alizé constant du sud-est. En hiver, les zones de pression sur l'Océan Indien sont dominées par les basses pressions des Moussons provoquées par la chaleur sur le sous-continent Indien et des crêtes de haute pression bien développées le long du 30° de latitude sud.

Les vents de surface suivent la répartition des zones de pression atmosphérique. En hiver (fig. 22), au sud du 10° de latitude, soufflent les Alizés du sud-est; au nord du 10° de latitude, les alizés du nord-est dominent avec des vitesses de vent élevées (60-70 pour cent) supérieures à 10 noeuds au large de la côte de la Somalie. De forts vents du nord dominant sur la côte est-africaine au nord de Madagascar. En été (par exemple, juillet, fig. 22), la circulation des Moussons domine, les alizés du sud-est atteignent l'équateur. Le long de la côte somalienne, de forts vents du sud-ouest soufflent en direction des zones de basse pression stationnées sur le sous-continent indien (Ramage 1971). A la côte, la fréquence des vents de mer est faible en hiver. Ils augmentent pendant la durée de l'hiver, en particulier, sur les rives orientées au sud-est (fig. 22).

Chutes de pluie: côte du Mozambique: saison des pluies de décembre à avril, pluviométrie annuelle de 89 cm principalement aux changements de moussons; Somalie, 38-50 cm annuellement sur la côte. De nombreuses rivières au Mozambique et en Tanzanie déversent de grandes quantités d'eau douce dans la mer, ce qui affectera les migrations du pétrole (Murray, 1975; 1982 a,b).

Des cyclones tropicaux - tempête intense caractérisée par le mouvement giratoire "dans le sens des aiguilles d'une montre" convergeant et ascendant du vent - frappent souvent les mers côtières depuis les Seychelles jusqu'au sud de Madagascar (fig. 23): environ 75 pour cent de ces dangereuses tempêtes surviennent entre janvier et avril comme le montre le tableau 6 (Ramage, 1971). Les cyclones se déplacent habituellement d'abord vers le sud-ouest puis obliquement, près du 20° de latitude sud, vers le sud-est (fig. 23). Les courants poussés par la brise de mer peuvent être extrêmement importants dans la zone comprise entre 10 et 50 km de la côte sous les latitudes tropicales (Sonu et autres, 1973). Les cyclones sont importants pour ce qui concerne la génération des vagues, des courants et pour des "marées de tempête". En particulier, de forts vents à terre peuvent élever le niveau de l'eau sur la côte au-dessus de celui des marées hautes normales (fig. 24).

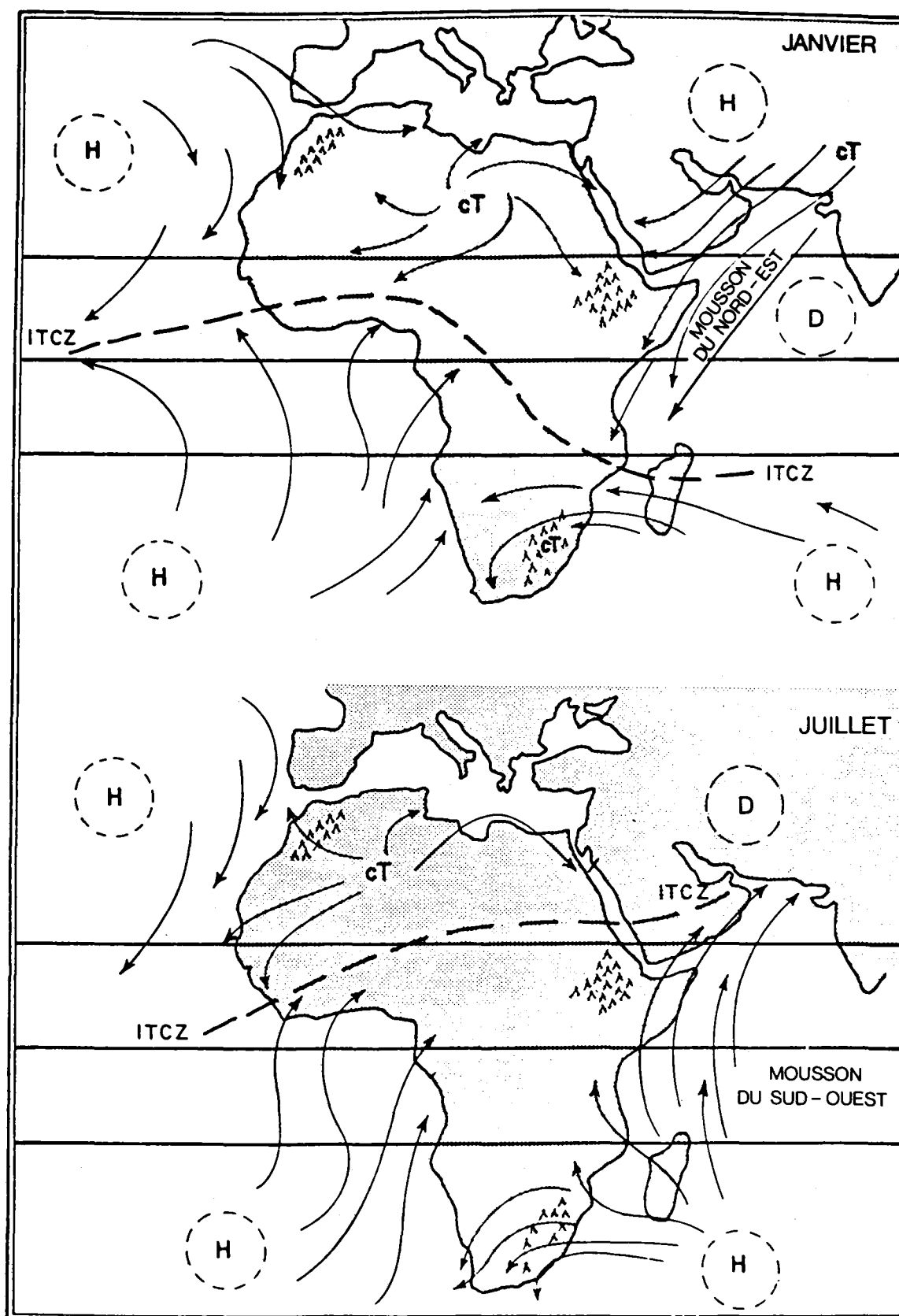


Figure 20: Systèmes de pression et résultantes d'écoulement de surface pour la côte africaine (d'après Hayden et autres, 1973)

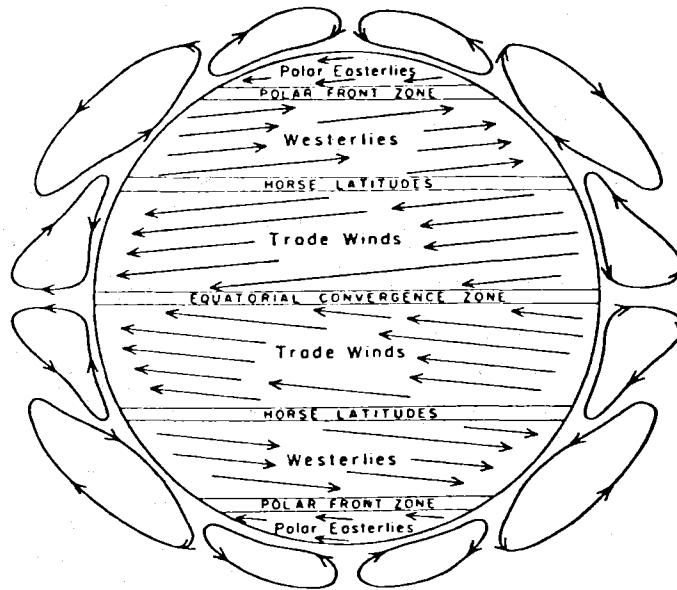


Figure 21: Représentation schématique de la circulation générale, de Byers (1959)

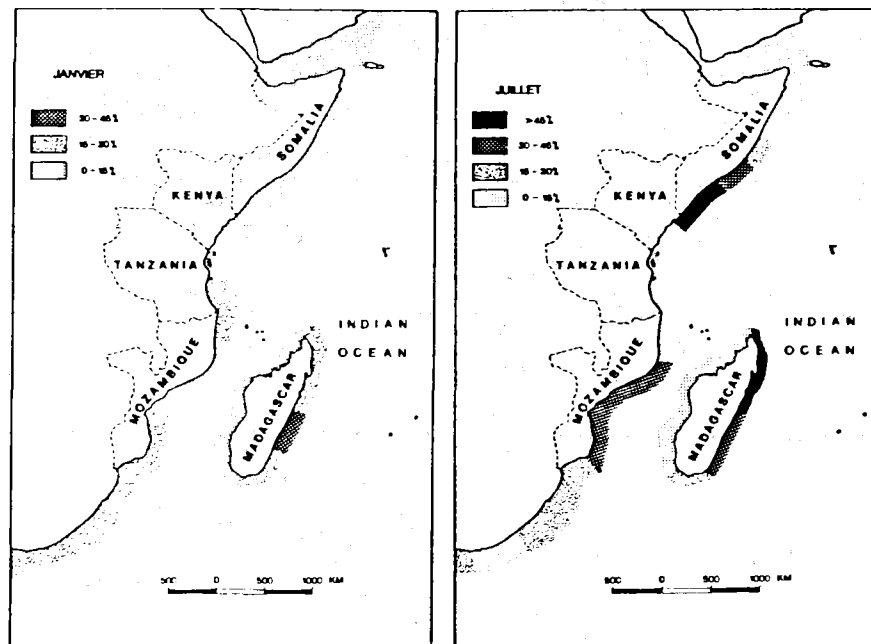


Figure 22: Fréquence des vents de mer à vélocité plus grande que 12 miles/heure (d'après Orme, 1982)

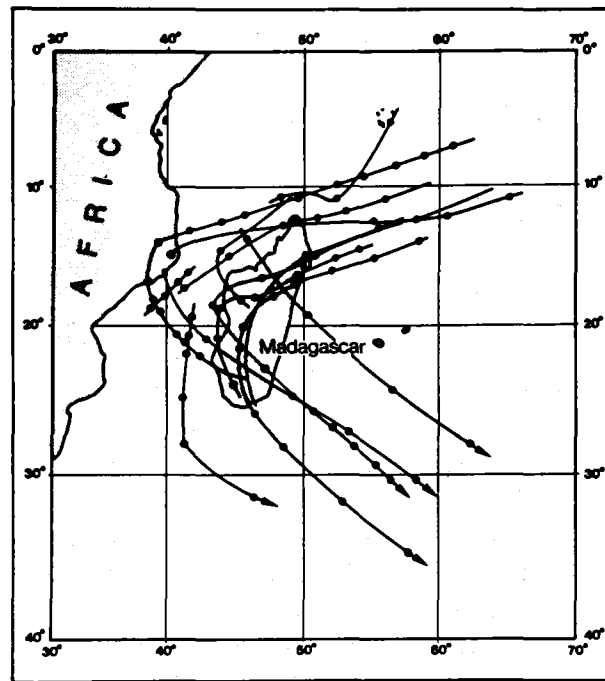


Figure 23: La carte montre des cheminements typiques de cyclones tropicaux ayant traversé Madagascar ou le canal du Mozambique (après les Directions de Navigation, 1951)

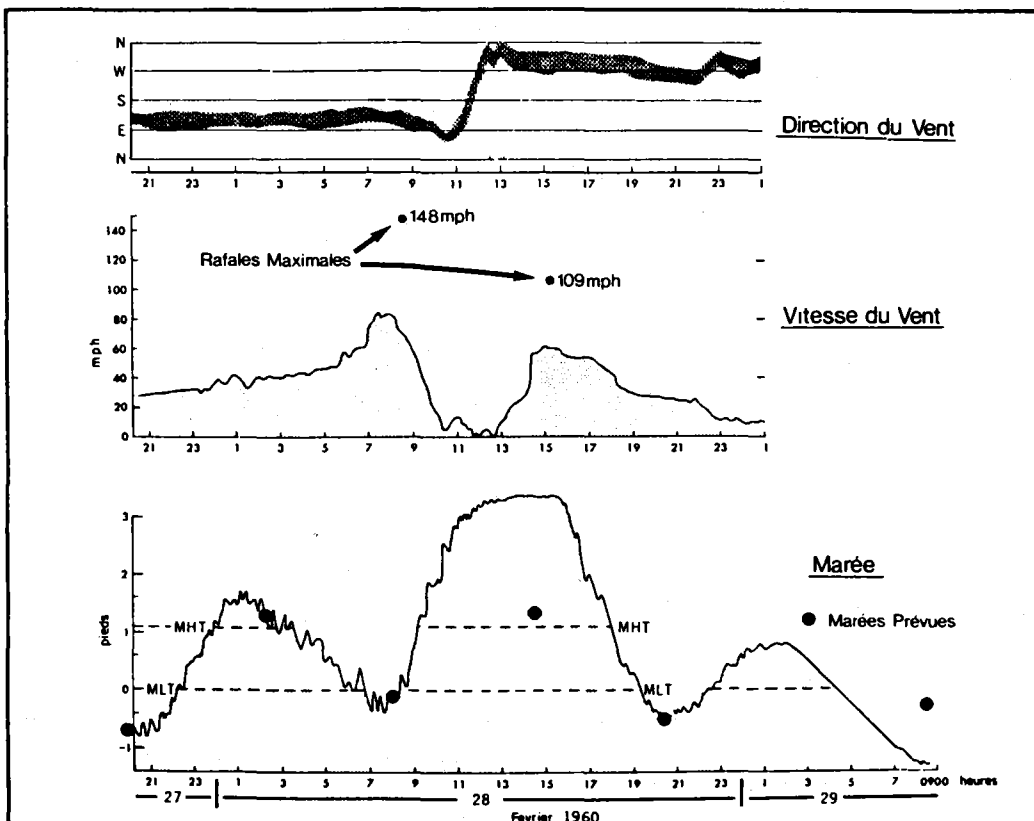


Figure 24: Direction et vélocité du vent, et les marées associées avec le cyclone tronique Carol (1960) (d'après McIntire et Walker, 1964)

Tableau 6 : Cyclones du sud de l'Océan Indien

jan	fev	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	Total
122	128	108	76	29	3	2	0	1	8	37	61	575

Courants

Les courants poussés par le vent ont généralement 3-5 pour cent de la vitesse du vent en eau libre, et sont défléchis vers la gauche du vent dans l'hémisphère sud et vers la droite dans l'hémisphère nord. Cet effet produit la spirale de Ekman. La configuration complexe des courants de surface varie de façon significative selon la saison (voir fig. 25). Pendant l'hiver le Courant de la Mousson du nord-est alimente le fort Courant somalien qui se déplace vers le sud le long de la côte de Somalie; le Courant côtier est-africain se déplace vers le nord longeant les côtes de la Tanzanie et du Kenya; le Canal du Mozambique est parcouru par de forts courants du nord de la côte ouest et du sud de la côte est; la côte est de Madagascar est longée par des courants du nord très constants. Pendant l'été (par exemple, en août), l'inversion des vents de Mousson vers l'Inde renverse également le Courant somalien, en faisant un fort et profond courant vers le nord (Düing et Schott, 1978).

Le jet de Somalie, un courant aérien bien défini et de grande vélocité frôle la côte de Somalie en juillet, provoquant la remontée d'eau marine bien connue de Ras Hafun (fig. 26) (Brown et Schott, 1981). Des roses de vent, les configurations des courants de surface et le cheminement des tempêtes sont également montrés pour chacun des mois de l'année dans "l'Atlas of Pilot Charts" (1966). Des cartes détaillées des courants de surface sont données dans une nouvelle série de publications (US Naval Oceanographic Office, 1977) pour chaque 1° carré au large de la côte est-africaine.

Marées

Les marées sont causées principalement par l'attraction gravitationnelle de la lune et du soleil sur l'eau et les ondes de marées progressent de façon systématique et parfaitement prévisible autour du globe. Les trois types fondamentaux de marées sont les marées semi-diurnes, diurnes et mixtes. L'amplitude des marées varie dans le temps et dans l'espace selon les positions respectives de la lune et du soleil qui provoquent les marées de vives-eaux, de mortes-eaux, tropicales et équatoriales. L'amplitude des marées le long de la côte est-africaine varie entre 0.3 et 5.7m (tableau 7). La figure 27 montre une image exagérée de l'amplitude des marées dans le canal du Mozambique. Les courbes des marées à Zanzibar et à Beira (fig. 28), illustrent les effets de l'alignement du soleil et de la lune sur l'amplitude des marées. Les courants de marée le long des côtes ouvertes ne sont habituellement pas très importants. Cependant les courants de marée sur les bancs des Seychelles, des îles Maurice et de la Réunion peuvent devenir extrêmement forts. Des jets et des revolins de lames se forment fréquemment au large des caps et des pointes de ces îles avec des vitesses pouvant atteindre 4 noeuds (Sailing Directions, 1952).

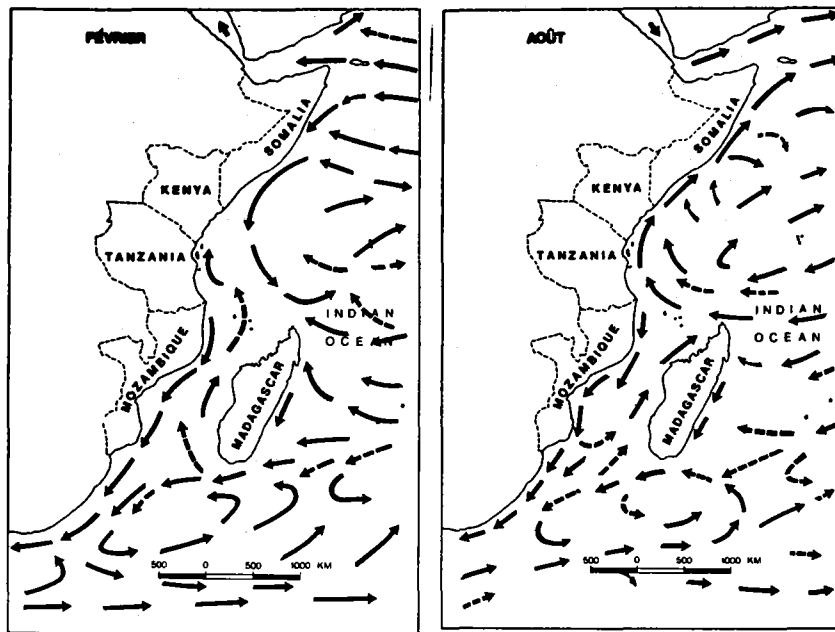


Figure 25: Distribution schématique des courants de surface dans l'ouest de l'Océan Indien pendant les deux saisons de Mousson (d'après Düing et Schott, 1978)

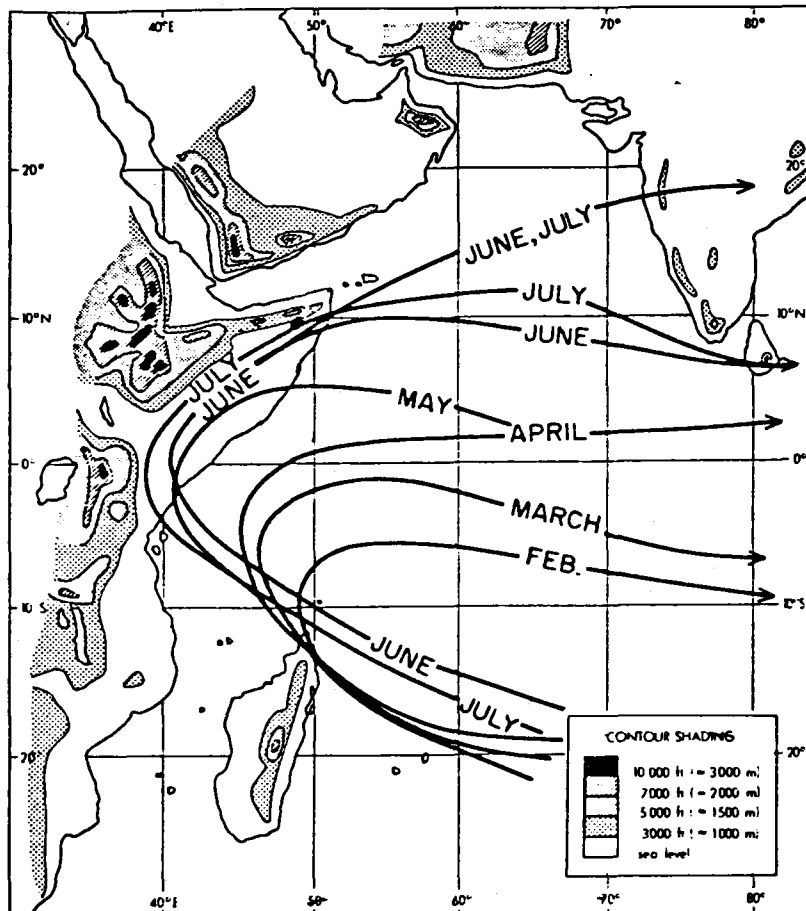


Figure 26: Progression mois par mois de l'axe du jet à basse pression (MONEX Panel, 1977)

Tableau 7 : Marées de la côte est-africaine

Site	Type	Amplitude de Quadrature	Amplitude de Printemps
SOMALIE			
Zeila	D	1.1m	1.6m
Obbia	M	1.1m	1.6m
Mogadishu	M	1.4m	1.9m
KENYA			
Malindi	SD	2.0m	2.9m
Kilindini (Port Mombasa)	SD	2.3m	3.2m
TANZANIE			
Mkoani, Ile de Pemba	SD	2.4m	3.3m
Zanzibar	SD	2.6m	3.7m
Lindi	SD	2.1m	2.9m
MOZAMBIQUE			
Porto de Mozambique	SD	2.6m	3.6m
Beira	SD	4.0m	5.7m
Porto de Inhambane	SD	2.0m	2.7m
Maputo	SD	2.1m	3.0m
MADAGASCAR			
Hellville	SD	2.5m	3.4m
Cap Saint André	SD	1.2m	3.9m
Tulear	SD	1.8m	2.6m
Taolanaro	SD	0.4m	0.6m
Maroantsetra	SD	0.9m	1.3m
COMORES			
Ile de Mayotte	SD	2.5m	3.4m
REUNION			
Pointe des Galets		0.4m	0.5m
MAURICE			
Port Louis		0.3m	0.5m
SEYCHELLES			
Port Victoria		0.9m	1.2m

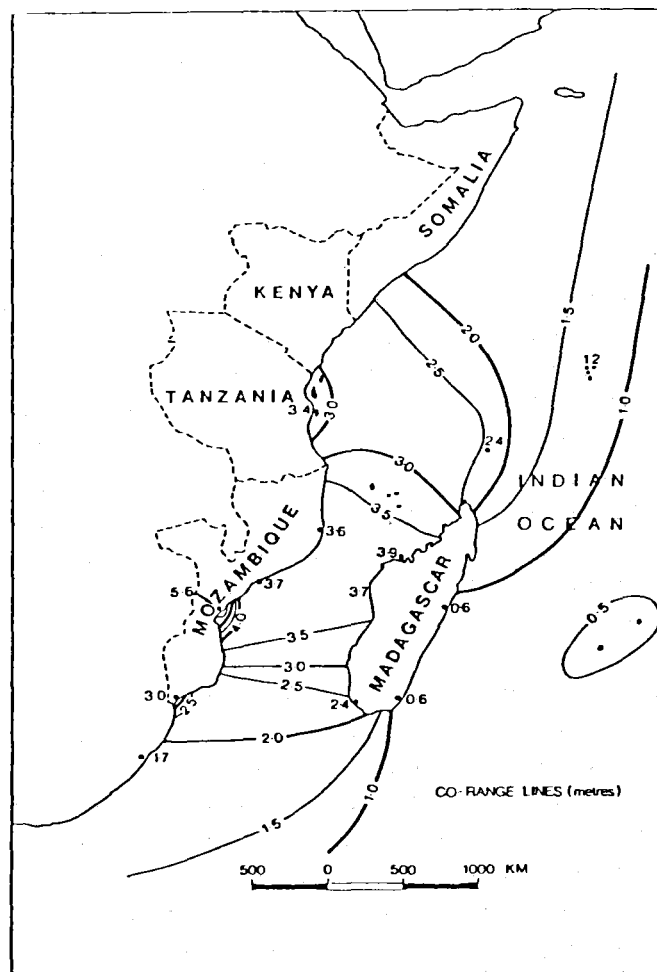


Figure 27: Amplitude moyenne des marées de vives-eaux le long de la côte ouest de l'Océan Indien

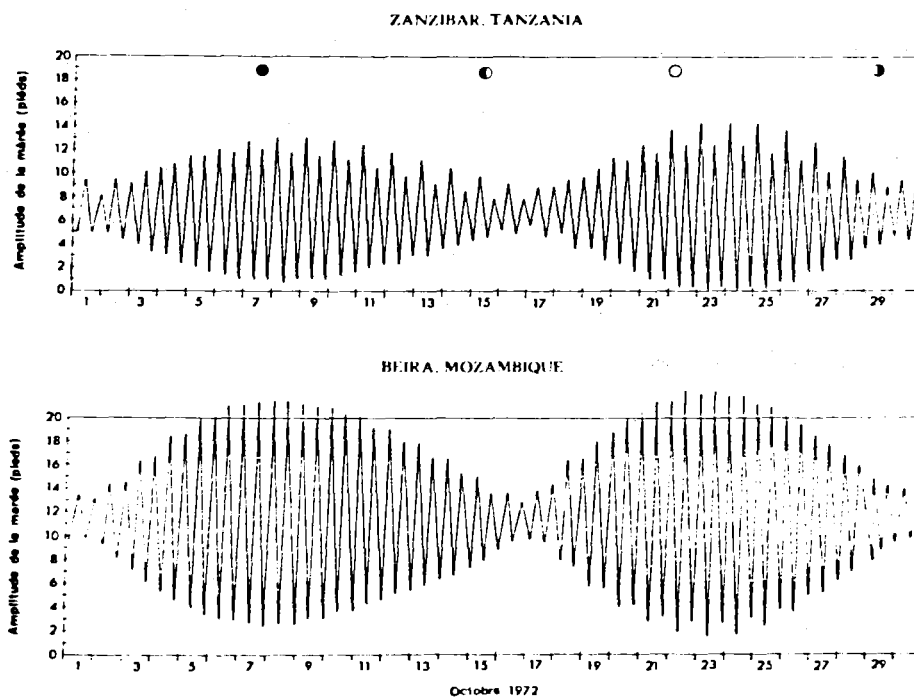


Figure 28: Amplitudes des marées au cours d'un cycle mensuel: • : nouvelle

Vagues

La levée des lames au large dépend de la vitesse du vent, de sa durée et de la distance parcourue. La véltité ou bitale est circulaire en eau profonde et elliptique en eau peu profonde. Les vagues approchant la rive se brisent et se transforment en déferlantes lorsque leur levée représente environ 70 pour cent de la profondeur. La réfraction des vagues due à la topographie du fond provoque un changement de direction et une baisse de hauteur des vagues. Les vagues se réfracteront souvent complètement autour des îles, causant une zone de faible niveau d'énergie des vagues de la côte sous le vent. La diffraction dissipe l'énergie des vagues lorsqu'elles passent par une brèche dans le môle d'un port ou dans un récif marginal (voir fig. 29).

Des méthodes de prédiction simples de la levée, de la direction et de la longueur d'onde des vagues sont disponibles (par exemple, dans le "U.S. Army Corp of Engineers Shore Protection Manuel", US Army, 1973). L'ensemble des conditions de vagues au large de la côte est-africaine (fig. 31) est fonction des vagues générées localement, des vagues générées par les tempêtes et de la houle. Les régimes des vents associés à la génération de vagues sont les Alizés, les tempêtes tropicales (cyclones) et les Moussons. La valeur moyenne de levée de la lame le long de la côte est la plus élevée au large du sud du Mozambique et de l'est de Madagascar (fig. 30 et tableau 8).

Tableau 8 : Moyenne saisonnière de la levée des vagues - (mètres)

	jan-mars	avril-juin	juil-sept	oct-dec
Zone côtière de Somalie	0.52	0.97	0.52	0.61
Zone côtière du Kenya	0.85	1.22	0.85	0.52
Zone côtière du Sud-Mozambique	1.28	1.31	1.28	1.22

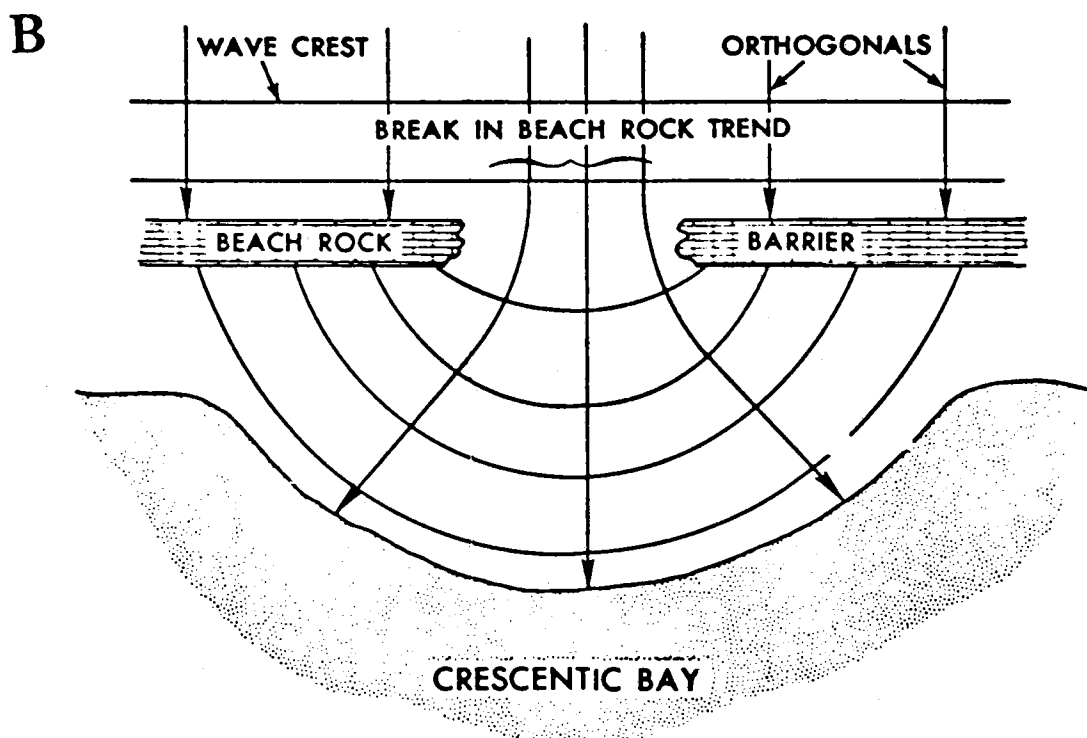
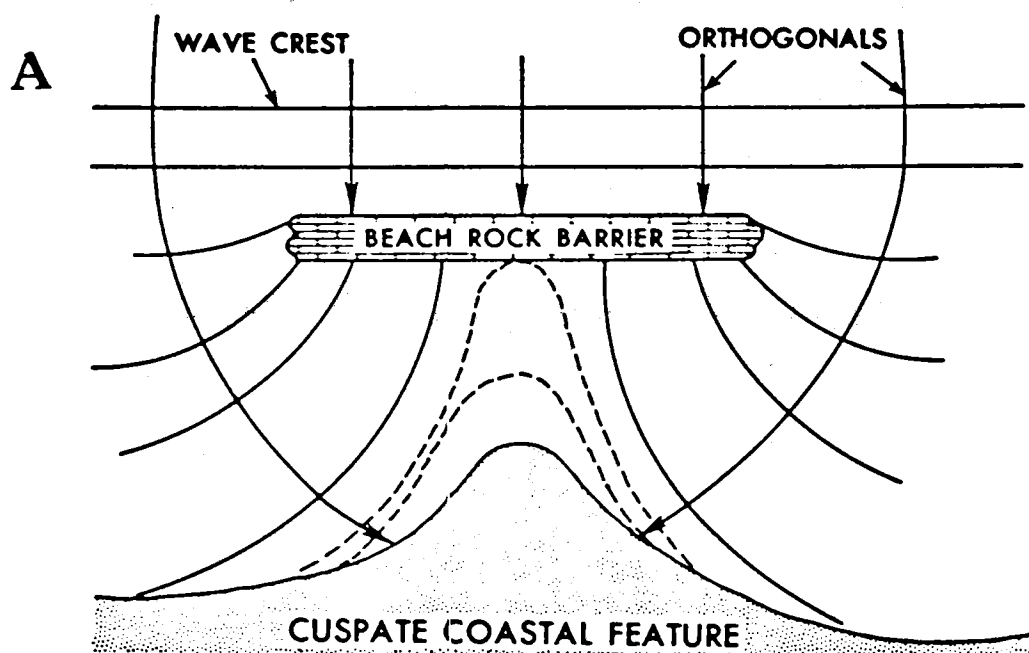


Figure 29: Représentation schématique de l'influence de barrières rocheuses au large de la côte sur les réactions caractéristiques de la côte sablonneuse moderne. Ces changements résultent des effets de diffraction et de réfraction des vagues

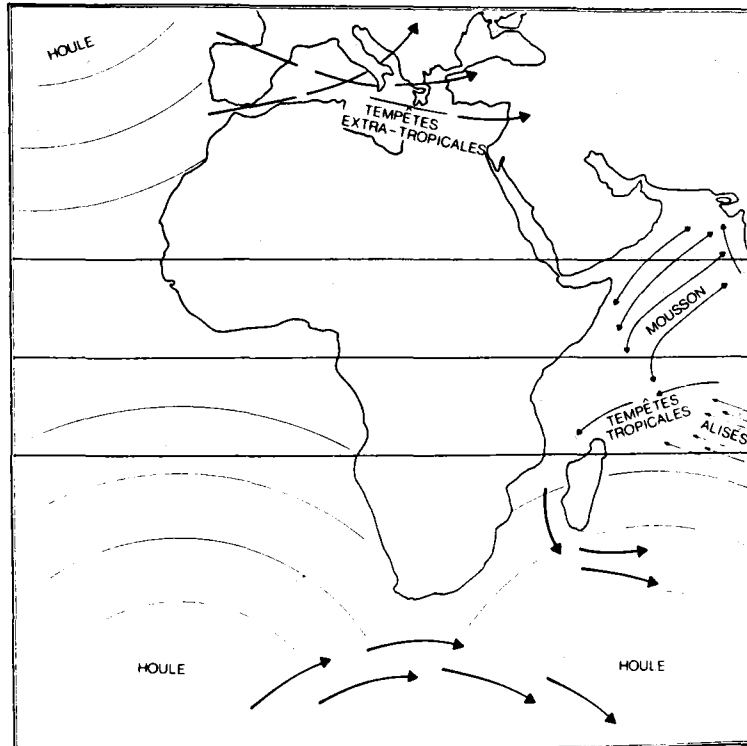


Figure 30: Principales forces génératrices des vagues (d'après Hayden et autres, 1973)

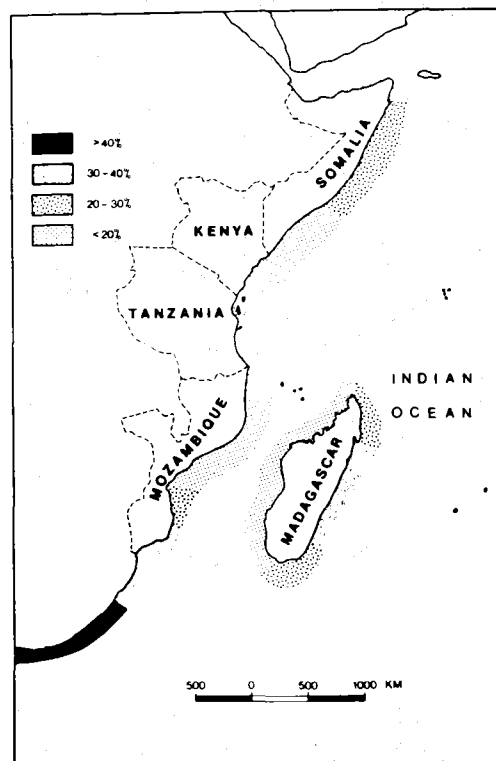


Figure 31: Pourcentage annuel de fréquence de levée de vague moyenne plus grande que 1.5m (d'après Orme, 1982)

Environnement littoral et phénomènes côtiers

Côtes sablonneuses

La zone côtière, à travers les âges, a traditionnellement été une région de concentration de population du fait de ses ressources potentielles, de sa productivité biologique et de l'attrait esthétique et récréatif de ses plages. Globalement on estime qu'environ les deux-tiers de la population mondiale est concentrée dans la zone côtière. Les côtes sablonneuses représentent approximativement 45 pour cent de la longueur totale des côtes. Cette catégorie de côtes comprend les plages, les crêtes d'avant-plage émergées et autres formes d'accumulations telles que les langues de sable et les levées. Les côtes sablonneuses étant en équilibre dynamique, elles changent constamment et ces changements peuvent affecter l'usage que l'homme fait de l'environnement, particulièrement si l'allure du changement est rapide par rapport à la durée de la vie de l'homme et de celle des constructions qu'il érige dans la zone côtière.

Les changements du rivage, qui peuvent parfois être dramatiques, sont généralement reliés, dans les environnements côtiers sablonneux, à des changements dans le niveau des phénomènes littoraux, tels que l'activité des vagues, l'amplitude des marées et/ou des changements dans l'approvisionnement en sédiments. Du fait de la nature dynamique des côtes sablonneuses et de l'impact potentiel sur l'usage que les hommes font de cet environnement, aucune autre catégorie de côte n'a été l'objet d'autant d'attention de la part des scientifiques et des ingénieurs. Les côtes sablonneuses sont extrêmement variables dans l'espace et dans le temps. Donc chaque secteur côtier a sa propre batterie de caractéristiques géologiques et de phénomènes physiques. Afin de comprendre la nature de cet environnement, il est nécessaire d'évaluer l'association entre les phénomènes littoraux et la géologie côtière.

Une plage est définie comme "la zone de matériaux non-consolidés s'étendant de la ligne de reflux jusqu'à l'endroit d'un changement marqué dans les matériaux ou dans la forme géomorphologique, ou jusqu'à la ligne de végétation permanente (habituellement la limite effective des vagues de tempête). Vers le large, la limite d'une plage - sauf spécifications contraires - est la ligne moyenne de marée basse" (US Army, 1973, v.III). Il est généralement reconnu qu'une plage, telle que définie ci-dessus, est une partie d'une plus grande masse de sédiments qui s'étend sur une certaine distance au large de la ligne de reflux, devenant ce à quoi l'on se réfère généralement en faisant allusion à la zone immergée proche. La dynamique des plages, qui comprend les variations spatiales, et temporelles de la géométrie littorale, est relativement bien comprise en ce qui concerne les côtes sablonneuses. La connaissance de la course des sédiments et des mécanismes de déscollement induisant les changements géologiques nous permettent de prédire, avec un degré de précision acceptable, la fréquence et l'ampleur des changements dans une section particulière de côte.

(a) Variabilité géomorphologique des côtes sablonneuses

Le profil d'une plage de sable typique et de la zone immergée proche peut être extrêmement variable (fig. 32). La partie de la plage où s'exerce l'action des vagues (par leur mouvement de va-et-vient) pendant tout le cycle de la marée est communément désignée comme la "zone de ressac". Cette subdivision du profil de la plage est limitée par la limite du reflux de la vague à marée basse et à marée haute, par la crête de la berme. La berme appartient à l'arrière-plage, elle est formée des sédiments déposés par la vague à son recul. Certaines plages peuvent avoir plus d'une berme alors que d'autres peuvent ne pas en avoir du tout.

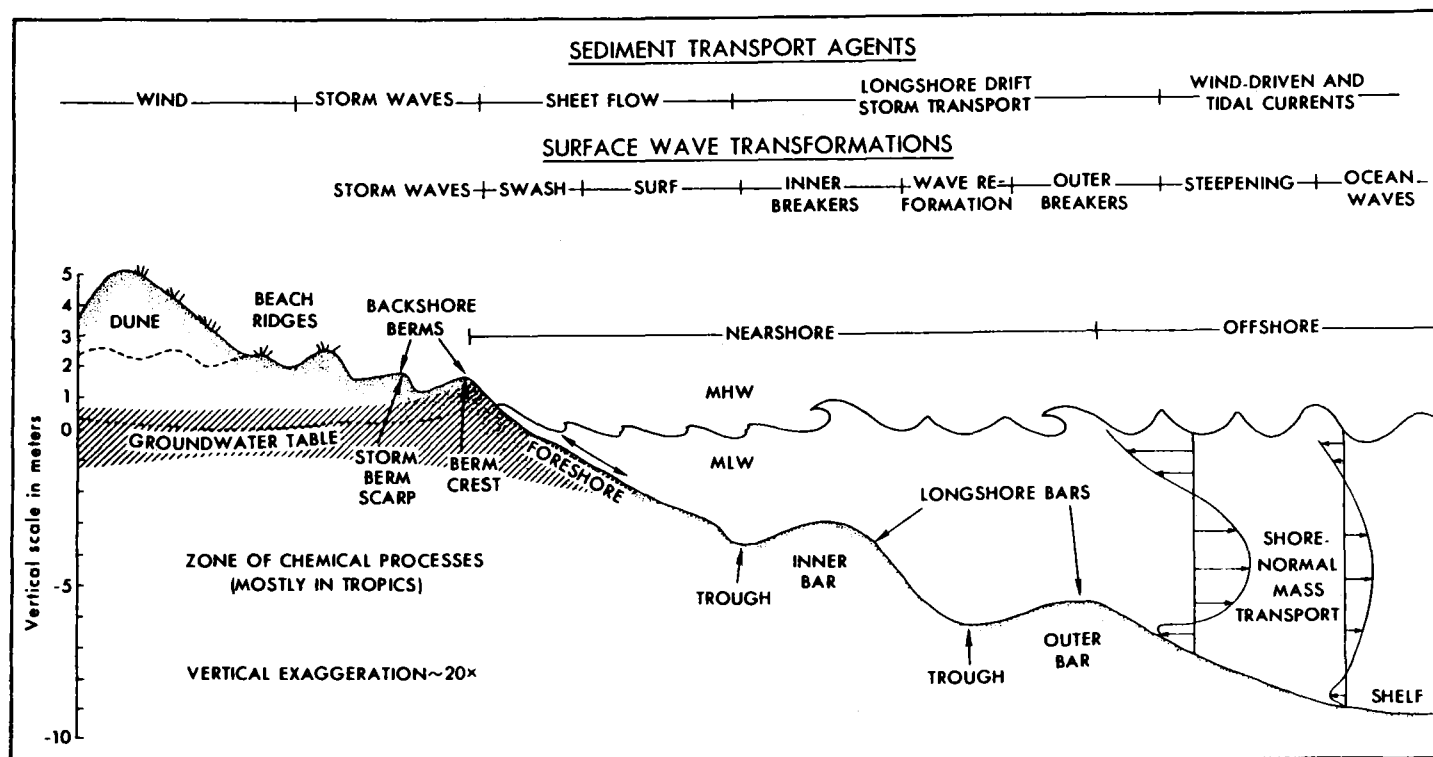


Figure 32: Profil de côte sablonneuse définissant des composants géomorphologiques et des procédés physiques

Au large de la zone du ressac, dans la zone noyée, il peut y avoir une ou plusieurs crêtes de sable parallèles au littoral. Ces barres longitudinales sont accompagnées par des dépressions allongées. Ces barres parallèles au littoral ne sont habituellement pas découvertes à marée basse. Les vagues qui se brisent sur leurs crêtes trahissent leur position. En retrait de la zone active de la plage il peut y avoir, du fait de la progression du rivage vers la mer, des crêtes de sédiments abandonnés, initialement formées par l'activité des vagues. Ces crêtes abandonnées sont souvent surmontées de dunes constituées de sédiments transportés à terre par les vents de mer (fig. 5). Il peut y avoir des plages situées entre deux promontoires rocheux. Appelées les plages refermées, elles sont habituellement autonomes, c'est-à-dire que les sédiments ne sont pas transportés vers elles ni emportés vers d'autres plages (fig. 33). D'autres formes de littoraux sablonneux comprennent les crêtes d'avant-plage émergées (avec les criques et les petits bras de mer qui leur sont associés), les digues et les lanques de sables, les isthmes, les grandes étendues d'avant-cote et les



Figure 33: Plage sablonneuse en forme de poche (indiquée par la flèche) associée avec la côte complexe de Hahe, les Seychelles

Cette grande variété de types de côtes sablonneuses peut être attribuée à trois facteurs principaux:

- l'approvisionnement sédimentaire;
- l'histoire côtière de la région; et
- les phénomènes physiques agissant sur cette section de la côte.

L'amplitude des marées et l'action des vagues sont les plus importants des facteurs contrôlant la forme d'une plage de sable.

(b) Changements affectant les plages transversalement

Les plages subissent constamment des cycles d'érosion et de déposition. Ces fluctuations affectant les sédiments des plages diffèrent d'un environnement à un autre. L'érosion se produit pendant les périodes d'intense activité des vagues, ordinairement en hiver (fig. 34). Du fait de cette dépense d'énergie les sédiments sont transférés de la plage vers une zone d'emmagasinement au large. Lorsque diminue l'activité des vagues et que baisse leur niveau d'énergie ordinairement pendant les mois d'été les sédiments migrent une fois de plus vers la plage. Pour les côtes sablonneuses le temps nécessaire à l'accomplissement d'un cycle d'érosion-déposition varie d'un environnement à un autre. Le cycle "tempête-après-tempête" est une autre série de modifications subies par les plages. Il est relié à des périodes relativement courtes d'intense activité des vagues (voir fig. 2).

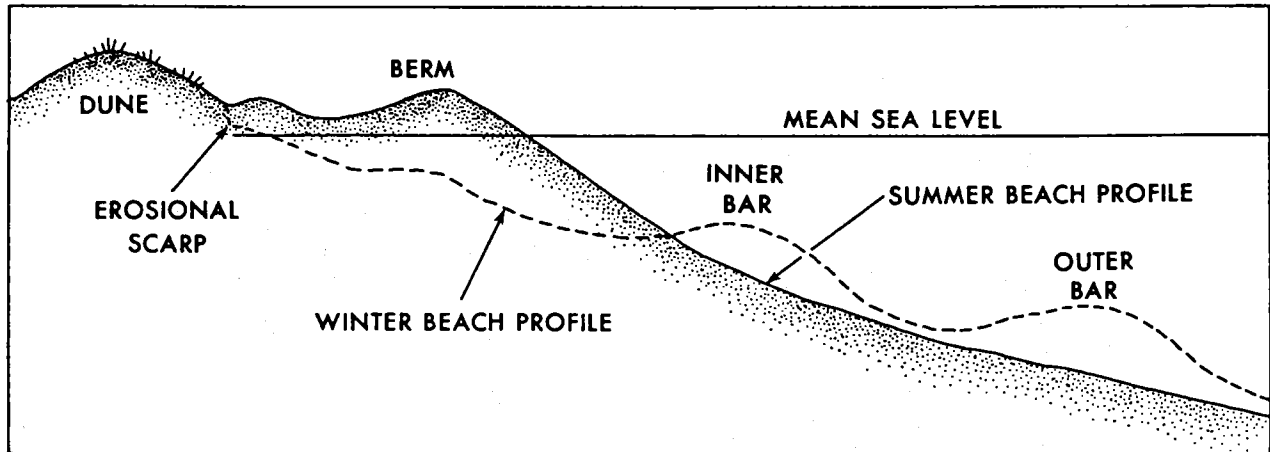


Figure 34: Changements typiques dans la morphologie des plages représentant une plage de tempête d'hiver avec des sédiments déposés en barres dans la zone littorale, et un profil d'été de l'énergie modérée des vagues avec la migration littorale de sédiments et la formation de bermes

Les plages de la côte nord-ouest de l'Amérique du nord illustrent ce type de changement de profil. Dans ce cadre les variations saisonnières sont faibles en comparaison avec des cycles plus fréquents d'érosion intense liés au passage des tempêtes. En quelques semaines, à moins d'interruption par une autre tempête, les sédiments déplacés vers le large par l'action de la tempête sont ramenés à la plage pour reconstituer la berme totalement ou partiellement érodée. La durée de la période de récupération après une tempête dépend dans une grande mesure de l'intensité et de la durée de la tempête. Généralement les tempêtes les plus longues et les plus fortes exigent les périodes de récupération les plus longues.

(c) Changements affectant les plages longitudinalement

L'action des vagues dans la zone littorale déplace les particules sédimentaires dans l'axe d'approche des vagues, ainsi la migration nette des sédiments se fait dans le même sens que le déplacement des vagues. Ces phénomènes amenés par les vagues tendent à créer un profil de la plage et de la zone immergée proche en équilibre avec la quantité d'énergie des vagues à la rive. Si les vagues abordent la côte avec un angle, elles créent un courant qui, en s'écoulant le long de la rive, résultera en une migration longitudinale nette des sédiments. Une particule isolée de sédiment serpente habituellement le long de la plage, suivant l'onde de translation de la vague qui aborde la côte avec un angle puis le retour de la vague sous l'influence de la gravité. L'amplitude de cette dérive longitudinale est fonction de beaucoup de facteurs tels que l'énergie des vagues, l'angle d'approche des vagues par rapport à la côte et la taille des particules sédimentaires. La configuration longitudinale réelle d'une côte sablonneuse dépend de l'interaction des phénomènes de la zone littorale et de l'approvisionnement en sédiments. La plus grande partie de l'énergie alimentant les phénomènes de la zone littorale y parvient sous forme de vents, de courants, et de vagues. Les vagues générées par les vents transmettent de l'énergie vers la côte. Dans les eaux peu profondes des bords, les vagues entrent en réaction avec le fond, les courants, et avec les autres vagues,

(d) Changements chimiques

Sous les latitudes tropicales, il est localement fréquent que les sédiments littoraux se cimentent en ce qu'il est convenu d'appeler les dépôts de plage indurés. Les plages composées de sédiments calcaires sont chimiquement très actives. La décomposition biologique et mécanique du carbonate de calcium provenant de la charpente osseuse des plantes et des animaux fournit des sédiments aux plages qui à leur tour sont susceptibles de se cimenter et de former ces dépôts de plage indurés. Les plages de carbonate de quartz et de carbonate non-calcaïques peuvent aussi se cimenter en dépôts de plage indurés. Ce type de formation est fréquente le long des plages dans les Seychelles, à Madagascar, et aussi dans les régions locales le long de la côte continentale est-africaine (fig. 35; voir aussi figs. 14 et 15).

Ce processus de cimentation peut être ou une précipitation directe de l'eau salée, dans les espaces inter-granulaires, ou un sous-produit secondaire de l'activité biologique sur la plage (Moore, 1973). La cimentation s'effectue très rapidement dans la formation de dépôts de plages indurés: on trouve fréquemment des bouteilles et d'autres articles encadrés dans le matériau cimenté (Russel et McIntire, 1965). La présence de dépôts de plage indurés et d'autres obstacles terrestres à l'activité des vagues peut exercer un effet dramatique sur les processus côtiers.

Sur les côtes à hauts niveaux d'énergie, avec une abondance de sédiments il y a une tendance vers la formation de plages longues et droites ou des barrières avec généralement une ou plusieurs barres parallèles à la côte. Si ces barrières et plages deviennent lithifiées ils servent de filtres semi-perméables pour l'énergie marine se dirigeant vers la côte active. A cause de la canalisation locale de l'énergie des vagues due à la présence de dépôts de plage indurés et des ruptures dans la direction des dépôts de plage indurés, la côte active peut subir un haut degré de crénulation. Des traits cuspatés, ou des tombolos, se forment en face des obstacles isolées littorales. Par contre des baies en forme de croissant tendent à former des ruptures opposées en créant une barrière littorale continue (fig. 29).

Deltas fluviaux et passes

(a) Deltas fluviaux

Les deltas sont formés des sédiments apportés par les cours d'eau au littoral. Ces sédiments sont redistribués à des degrés divers par les phénomènes marins. Les caractéristiques de tout delta sont fonction de l'interaction des phénomènes fluviaux et les phénomènes côtiers. Les phénomènes fluviaux comprennent le régime hydraulique, la charge sédimentaire, le climat, la stabilité tectonique et la configuration du bassin de transition. Les phénomènes océanographiques et côtiers importants comprennent les marées, le régime des vagues au littoral, la pente du littoral et les courants côtiers. C'est l'interaction de ces phénomènes dans le temps et dans l'espace qui contrôle la configuration de la plaine deltaïque comme la sédimentation du delta.

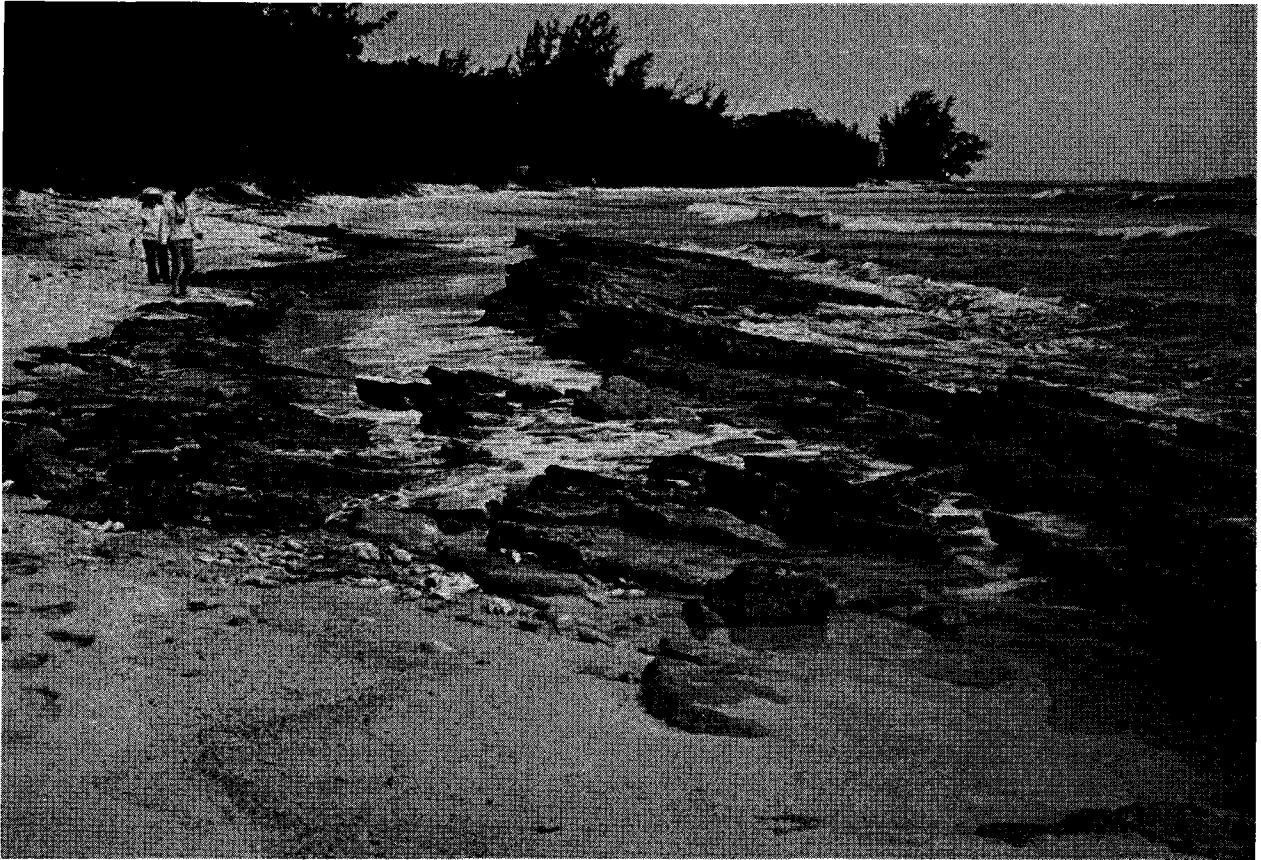


Figure 35: Dépôts de plage indurés dans la zone de marnage sur une plage sablonneuse. A noter les unités d'acréction originales de la plage, maintenant préservées par le processus de lithification. Ce processus s'effectue très rapidement (au cours de quelques dizaines d'années)

Il y a des deltas majeurs le long de la côte est-africaine, par exemple, à l'embouchure du Zambèze où une grande quantité de sédiments se sont déposés dans la zone côtière provoquant une progression de la côte vers le large. Le delta du Zambèze doit sa taille au volume du fleuve et à la grande quantité de sédiments apportés à la côte. La configuration du delta est contrôlée par l'activité des vagues qui ont redistribué les sédiments du delta pour former une structure douce de plages sablonneuses à l'embouchure du fleuve (fig. 36 a). Le delta du Pungue, par contraste, a une embouchure en forme de cloche avec des canaux partagés par une barre médiane allongée parce que sa charge sédimentaire est beaucoup plus faible que celle du Zambèze et qu'à cet endroit l'amplitude des marées est plus grande. Ce delta est donc dominé par les phénomènes de flux et de reflux (fig. 36 b).

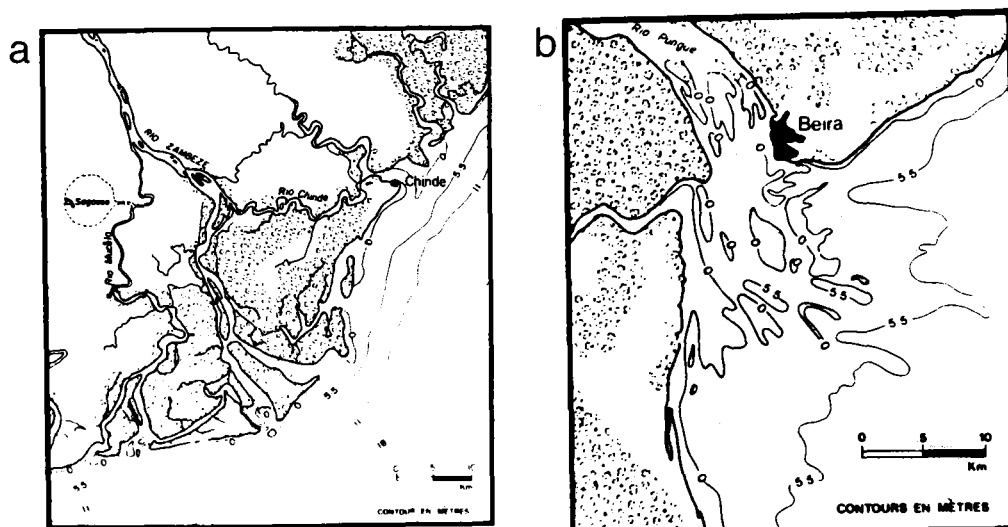


Figure 36 a,b: (a) Le delta du Zambèze, une morphologie lisse mais saillante, le résultat d'un déversement de rivière forte, de sédimentation et de l'action de hautes vagues sur la côte; (b) le delta du Pague a une embouchure en forme de cloche avec des canaux partagés par une barre médiane allongée qui implique un système dominé par les marées

(b) Passes

Les passes se forment sur les côtes sablonneuses là où des cours d'eau ou des lagons s'évacuent vers la mer. Dans la région est-africaine, les passes sont particulièrement fréquentes le long d'une grande partie de la côte du Mozambique et le long de la côte est de Madagascar (voir fig. 37). Le trait caractéristique des passes est que le flût s'y inverse avec les changements de marée. De petits deltas subaquatiques se forment aux deux embouchures de la passe. La forme effective de ces deltas subaquatiques résultent d'une combinaison des phénomènes liés aux vagues et aux marées avec la disponibilité des sédiments et le débit du cours d'eau. Sur les côtes où, du fait de l'angle d'approche des vagues, la direction prédominante de migration des sédiments est longitudinale, les passes peuvent migrer le long de la côte (fig. 38).

Les passes sont des particularités très changeantes, elles subissent à la fois des modifications à long terme, (telle que la migration le long de la plage) et des modifications dues aux tempêtes (particulièrement lors du passage d'un cyclone).



Figure 37: Passe défléchie, sur la côte à l'ouest de Madagascar, au nord de Mainterano. La croissance de la flèche littorale est vers le nord



Figure 38: Système complexe d'île barrière de passes et de delta fluviaux sur la côte de Mozambique à Angoche

Côtes rocheuses

Les affleurements rocheux présentent une grande variété d'aspects morphologiques, ils sont fréquents sur toutes les côtes continentales et sur la plupart des îles. On estime qu'à l'échelle mondiale, les affleurements rocheux (avec ceux associés aux plages fermées) représentent 39 pour cent du total de la longueur des côtes. Les falaises sont fréquentes le long de la côte est-africaine ainsi qu'à Madagascar, aux Seychelles, à la Réunion et à l'île Maurice (fig. 39). L'abondance des côtes à falaises dans le monde reflète les changements majeurs affectant les niveaux relatifs de la terre et de la mer survenus dans les temps géologiques récents. Bien des falaises actives aujourd'hui le sont depuis la dernière augmentation de niveau des eaux qui a commencé voilà 20 000 ans et qui se poursuit actuellement. Le niveau des mers est monté d'environ 100 mètres pendant cette période.



Figure 39: La côte à falaises au sud de l'île Maurice qui montre des roches volcaniques exposées à l'action des vagues. Les basaltes en retrait ravagés par le temps amènent à la formation d'une plate-forme sculptée par les vagues, habituellement habitée par des organismes

L'action des vagues, en particulier, des vagues de tempêtes, est l'agent d'érosion marine le plus important en ce qui concerne la formation de plate-formes rocheuses ou de falaises. Les petites vagues, comme celles associées aux conditions normales du ressac, peuvent causer une usure et une légère érosion des matériaux, mais ce sont les vagues de tempêtes qui infligent, en très peu de temps, plus de changements qu'un ressac moyen en plusieurs mois. L'action des vagues sur le rocher provoque l'érosion par:

- la force appliquée par la masse d'eau qui frappe le rocher à chaque vague;
- la compression hydraulique et le dégagement d'air dans les poches associées aux pentes aux fissures dans le rocher; et
- l'action abrasive du sable, du gravier et des débris de roche déplacés sur le rocher par l'activité des vagues.

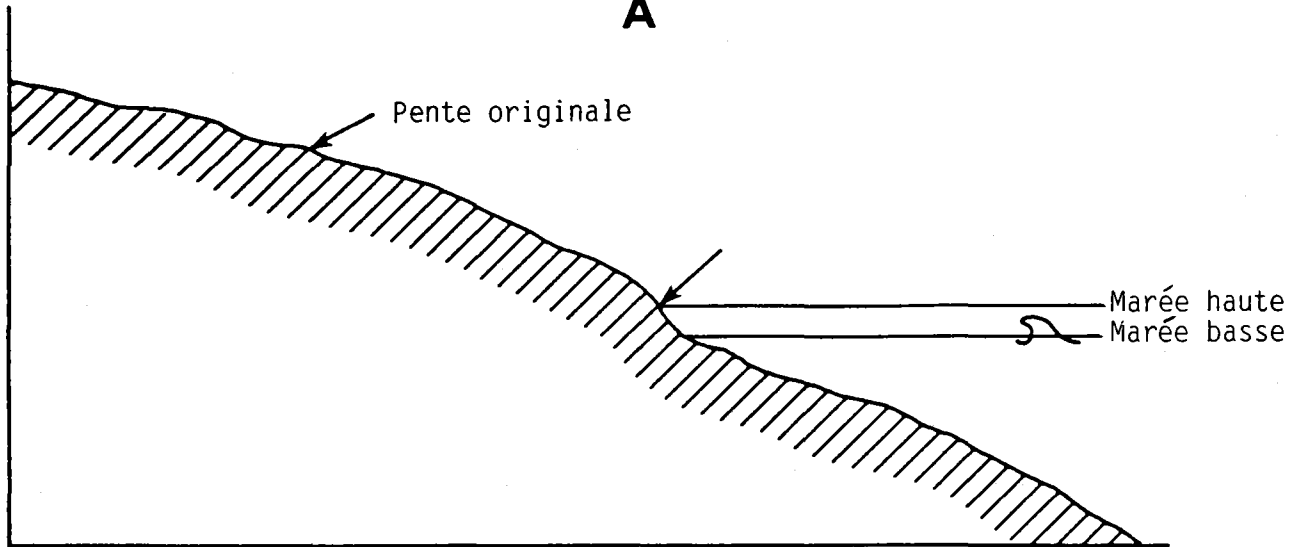
(a) Plate-forme rocheuses

Les plate-formes se forment généralement là où l'action des vagues est suffisamment forte pour éroder un affleurement rocheux. Le plus souvent, les plate-formes se créent au niveau du reflux ou près de ce niveau, mais peuvent aussi survenir à la hauteur du flux ou à des hauteurs intermédiaires. Le taux d'érosion du rocher est fonction à la fois de la résistance des roches de l'affleurement, qui est variable d'un endroit à un autre, et du niveau d'énergie des vagues au littoral. La largeur de la plate-forme est fonction de la différence entre le taux de retrait de la falaise par rapport au taux de retrait de la plate-forme. Le retrait de la plate-forme est principalement fonction de l'énergie des vagues alors que le retrait de la falaise dépend de paramètres atmosphériques comme de l'énergie des vagues. C'est la raison pour laquelle certaines côtes bordées de falaises n'ont pas de plate-forme rocheuse.

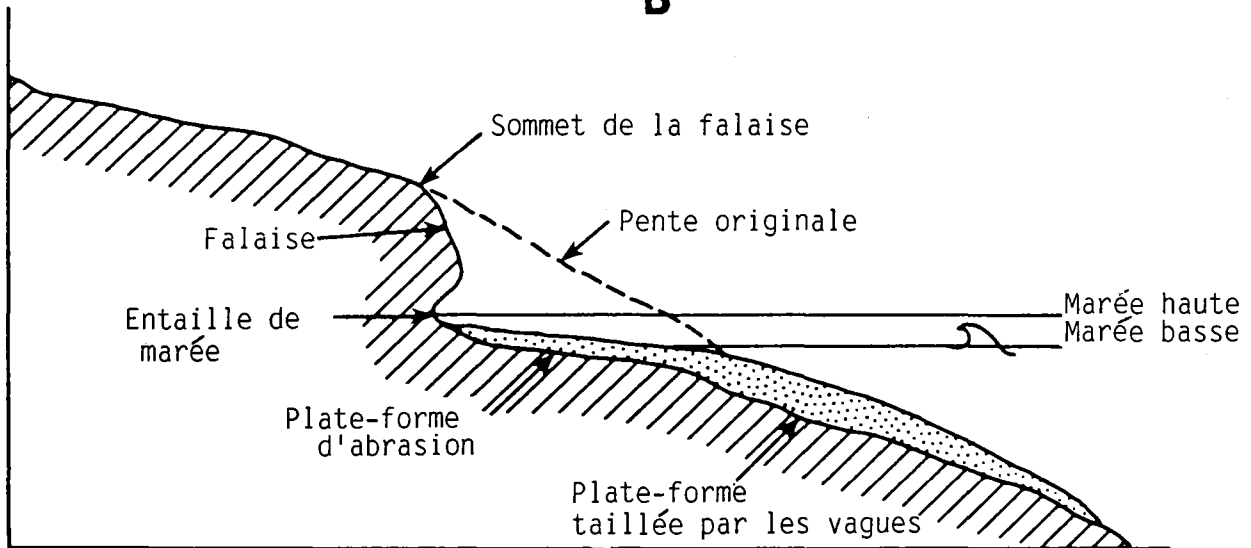
(b) Côtes à falaises

On trouve la forme de falaise la plus simple là où la mer érode une pente côtière raide dans une zone d'eaux relativement profondes. Dans ces conditions les vagues perdent peu d'énergie avant de se briser à la surface du rocher (fig. 40). Dans le cas d'affleurements rocheux résistants comme les granites ou les basaltes, la vitesse d'érosion est extrêmement lente alors que lorsque les affleurements sont moins résistants, comme les grès ou les calcaires, une petite falaise ou une entaille peut être rapidement érodée. De ces phénomènes d'érosion résultent deux particularités littorales: (1) une falaise marine abrupte taillée par les vagues, (2) une plate-forme d'abrasion en pente. Les matériaux produits par l'érosion s'accumulent communément à la base de la falaise ou à la limite au large de la plate-forme. Ils forment une masse abrasive qui avec l'action des vagues aggrandira encore l'entaille et usera la plate-forme. Lorsque le taux de production de sédiments et de débris dû à l'érosion côtière est plus grande que le taux d'évacuation par l'activité des vagues, alors les sédiments accumulés protègent la plate-forme ou la falaise d'une érosion ultérieure.

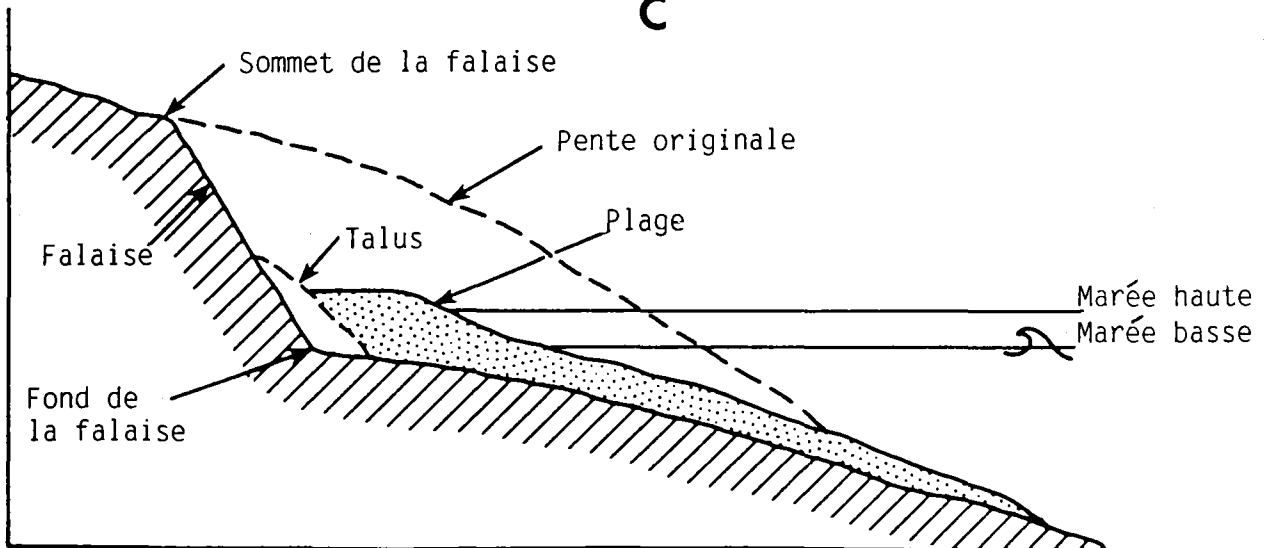
A



B



C



(c) Relations de rétroaction

Les phénomènes marins (vagues et courants) s'exercent sur le talus raide de la côte et les matériaux ainsi érodés agissent comme abrasifs, intensifiant la puissance d'érosion des vagues (fig. 41). Les stades initiaux de l'érosion sont rapide provoquant des entailles des plates-formes et un dépôt de sédiments au large de la falaise. Les dépôts sédimentaires s'accumulent le plus rapidement et sont le plus stables lorsque l'angle d'approche des vagues est voisin de la perpendiculaire. Autrement la migration longitudinale peut causer une érosion des sédiments littoraux. Avec l'augmentation d'épaisseur (augmentation de "n" fig. 41) et l'extension vers le large de la couche sédimentaire, la friction sur le fond atténue les vagues, le tourbillon creusant l'entaille s'arrête et l'érosion de la falaise est ralentie. Le long de beaucoup de côtes à falaises, sous les latitudes tropicales les coraux constructeurs de récifs colonisent rapidement les plate-formes et les étendent vers le large aussi bien que verticalement. Ce phénomène ralentit aussi le taux de retrait de la falaise et l'approvisionnement en sédiments d'origine rocheuse des eaux littorales.

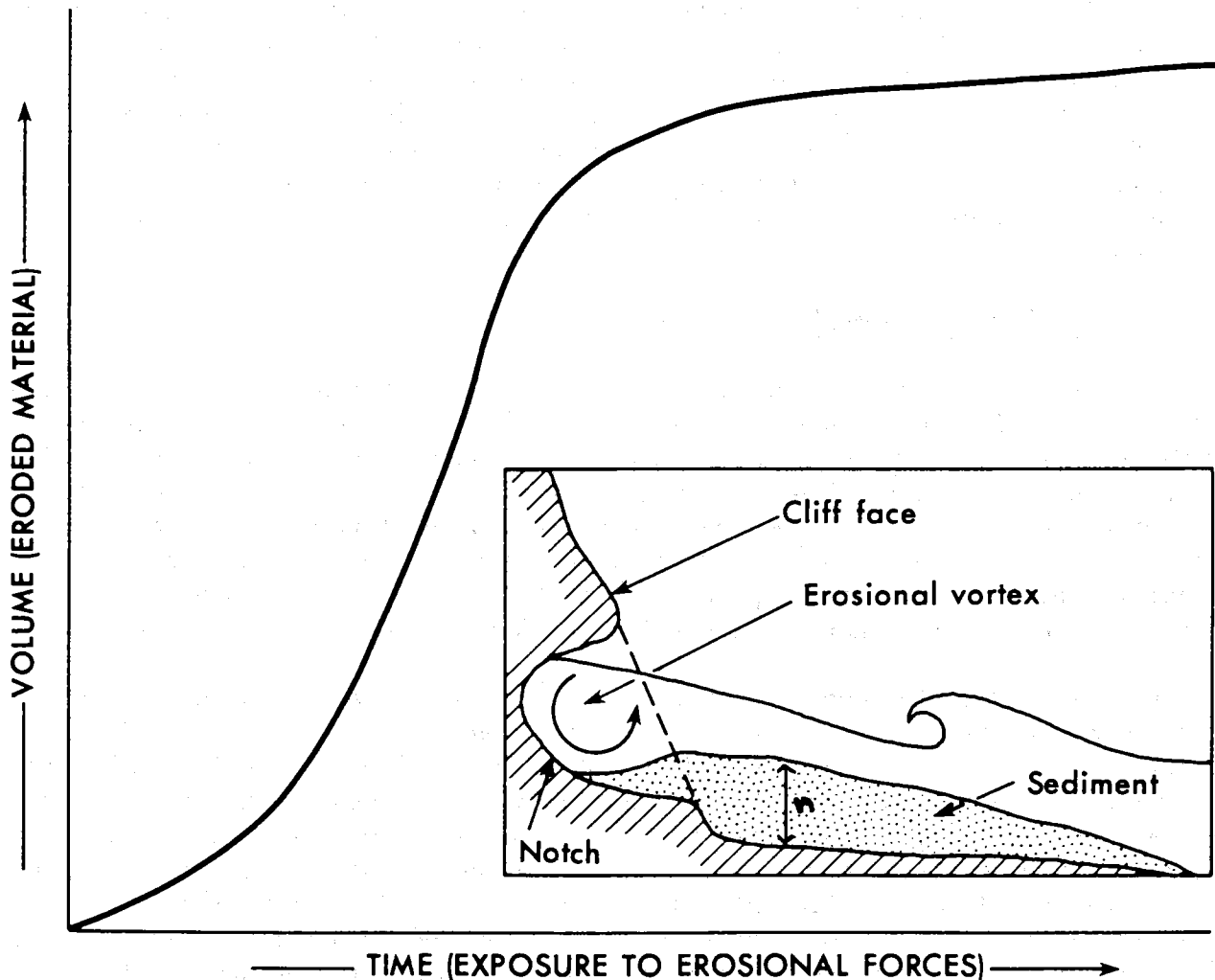


Figure 41: Représentation schématique des variations temporelles du volume de matériau érodé d'une falaise donnée (adapté de l'oeuvre de Sunamura et Horikawa, 1971)

(d) Variations morphologiques des côtes à falaise

Les variations de la morphologie des côtes à falaise sont associées à de nombreux facteurs:

- les différences pétrographiques et la complexité structurelle des formations rocheuses de la côte;
- le degré d'exposition à l'attaque des vagues (ouverture de la côte, caractéristiques des vagues et profondeur au large);
- l'intensité de l'érosion biologique (particulièrement en régions tropicales comme le centre de la côte est-africaine);
- l'efficacité relative des phénomènes subaériens et marins de dénudation côtière; et
- la stabilité de la situation du littoral par rapport aux fluctuations du niveau relatif de la terre et de la mer.

Les phénomènes divers de mouvement de masses provoquent des changements rapides le long des côtes bordées de falaises (fig. 42). Les glissements de terrain et autres phénomènes de mouvement de masses sont principalement des effets de la gravitation, cependant, l'activité séismique peut occasionnellement les initier. Dans les climats tropicaux et subtropicaux ces mouvements se produisent le plus souvent par fluage (mouvement lent) ou glissement de terrain (mouvement rapide). La granulométrie des sédiments et la géomorphologie peuvent changer rapidement le long d'une falaise subissant différents types de mouvements de masse.

Récifs et environnements associés

Les systèmes de récifs coralliens sont la caractéristique côtière la plus importante de la plupart des régions tropicales (par exemple, la côte sud-ouest de Madagascar; fig. 43). La croissance et la présence de récifs a un effet marqué sur le caractère biologique et physique de l'environnement de l'avant-plage et du littoral adjacent. Dans les zones littorales baignées par les chaudes eaux de l'Océan tropical et libres des venues importantes de sédiments terrigènes, se développent les récifs coralliens. Ils peuvent border d'autres types de littoraux, tels que les côtes rocheuses ou les mangroves.

De brèves descriptions des types de littoraux présents dans la région étudiée sont données dans la section sur les types de littoraux, et les facteurs régionaux influençant le caractère de la côte sont présentés ultérieurement dans ce document. Afin de rassembler ces composantes, ces sections décrivent systématiquement les caractéristiques principales d'un système de récif. Une coupe transversale typique de la rive du plateau est donnée dans la fig. 44, pour indiquer l'association relative des milieux de sédimentation et les particularités de leurs composantes. Bien que beaucoup de détails soient fournis dans cette section on trouvera des informations supplémentaires dans différents rapports (par exemple, Lewis, 1969; Roberts, 1977; Roberts et Sneider, 1982).

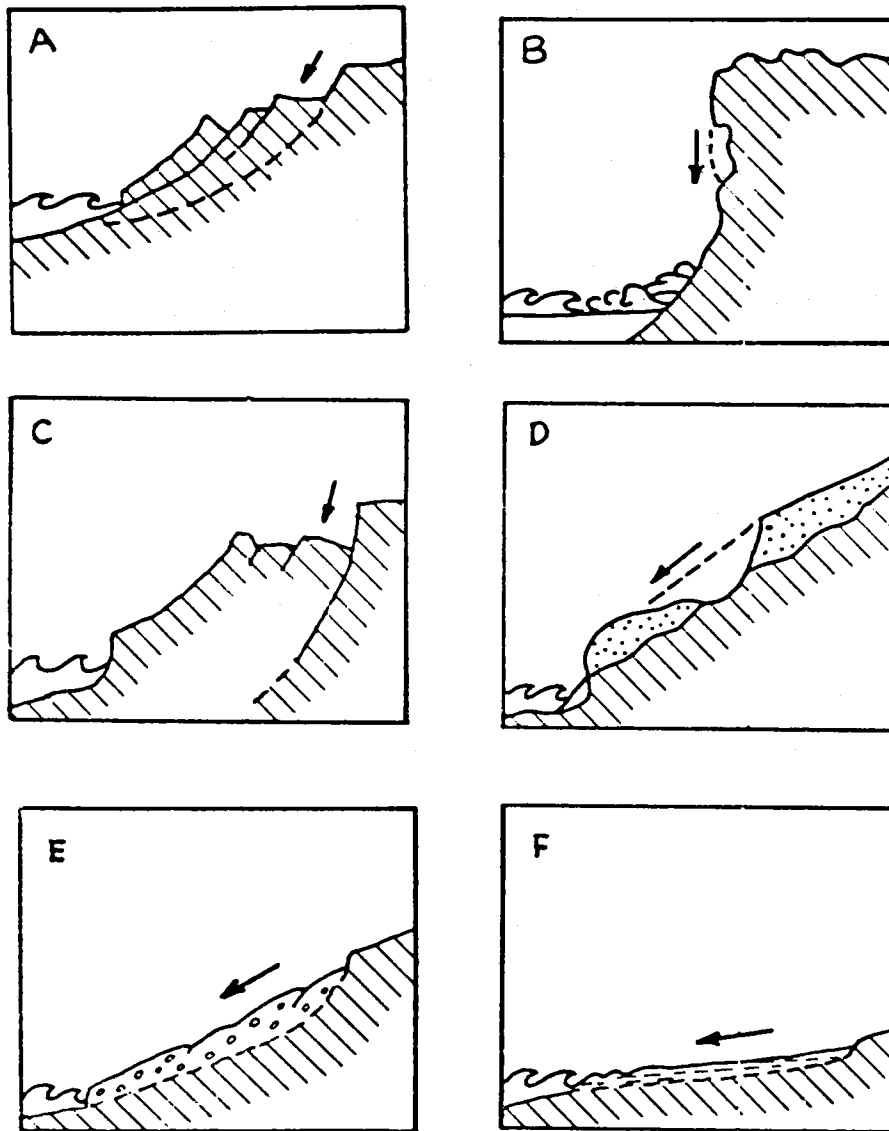


Figure 42: Types de glissements de terrain rencontrés fréquemment dans zones côtières: (a) glissement rotationnel, (b) chute de rocher (c) glissement composite (d) glissement de translation (e) glissement de terrain (f) coulée de boue

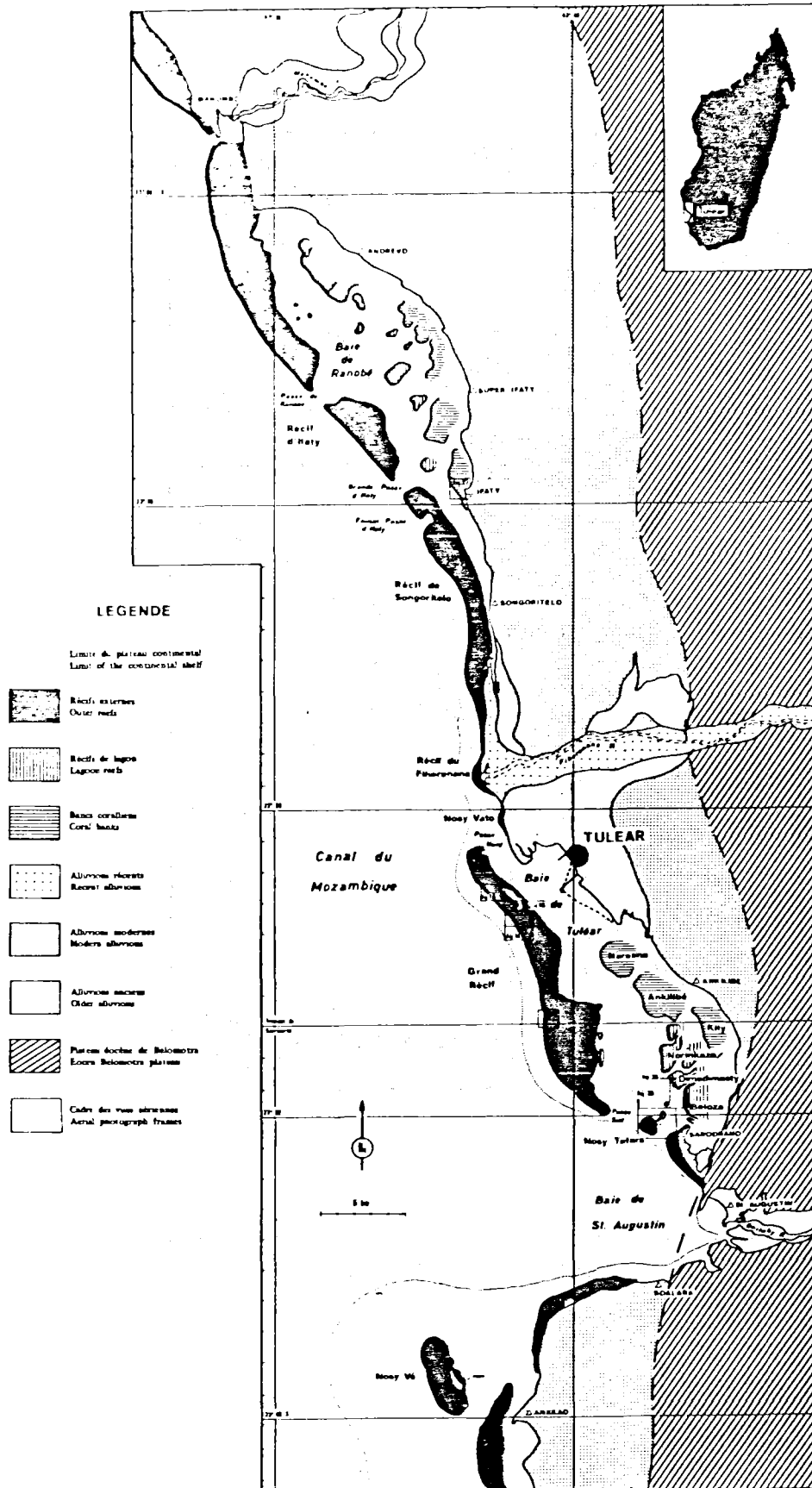


Figure 43: Récifs coralliens sur la côte sud-ouest de Madagascar

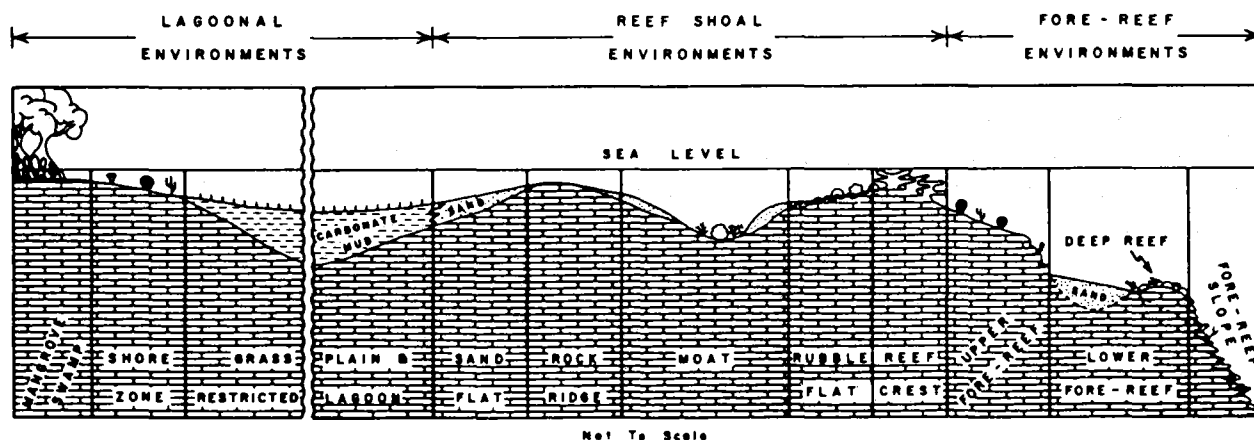


Figure 44: Profil schématique d'une plate-forme côtière typique de carbonate qui comprend un littoral d'arrière-récif à bas niveau d'énergie un lagon peu profond, et un récif à haut niveau d'énergie et des récifs associés à l'environnement

(a) Conditions d'environnement: les récifs comme écosystèmes

(1) Récifs et environnements associés aux récifs

Les coraux ont la faculté de créer des structures rigides, résistantes aux vagues qui modifient leur environnement physique créant ainsi une grande variété de milieux associés. Ainsi la plupart des littoraux arrière-plage sont caractérisés par un niveau d'énergie faible. La zonation des récifs et la distinction entre les milieux à niveau d'énergie élevé et à niveau d'énergie faible est la conséquence des modifications aux régimes des vagues et des courants (Roberts et autres, 1975). C'est dans les eaux tropicales que l'on trouve des coraux susceptibles d'édifier des récifs viables et chaque bassin océanique a ses genres et espèces propres. Biologiquement, les récifs coralliens sont les milieux les plus divers et les plus productifs des mers modernes. Ils sont également importants du point de vue géologique car ils modifient la topographie des fonds marins et sont une source renouvelable de sédiments calcaïques.

(2) Les récifs dépendant de la croissance et du développement de coraux coloniaux

Les genres de coraux constructeurs de récifs ont des exigences écologiques bien définies:

Profondeur - la profondeur limite pour la croissance des coraux constructeurs de récifs est environ 100m. Cette profondeur varie selon la quantité de sédiments suspendus dans la colonne d'eau. Les coraux abritent dans leurs tissus des algues symbiotiques qui aident aux processus métaboliques. Ainsi, la profondeur est un facteur limitatif du fait de la réduction drastique

Température - les coraux se développent dans les eaux tropicales chaudes. Ils réussissent le mieux dans des eaux entre 25° et 29°. Lorsque la température de l'eau est inférieure à 16°C la plupart des coraux à récifs deviennent incapables de se nourrir. Un séjour prolongé au-dessous de ce seuil de contrainte causera la mort des coraux. La tolérance à l'eau froide dépend des espèces mais la plupart des coraux des récifs de l'Océan indien meurent en quelques heures si la température de l'eau est inférieure à 10°C. La température maximale sur la platier peut atteindre 39°C. La plupart des espèces d'eau peu profonde survivent à cette température.

Salinité - la tolérance aux variations de salinité est inégale. La plupart des coraux se développent le mieux avec une salinité océanique normale, cependant une grande variété d'espèces semblent capables de survivre entre les extrêmes de 17.5 et 48 parties pour mille.

Emersion - les coraux typiques des platiers ont développé une tolérance à l'émersion durant les périodes de basses-eaux du cycle des marées. La plupart des coraux des récifs ne peuvent supporter plus de quelques minutes d'émersion.

Sédimentation - la sédimentation est un des paramètres contrôlant la croissance des coraux. Les taux de sédimentation sur les coraux peuvent parfois être élevés, comme après une tempête par exemple. Beaucoup de coraux ont cependant la faculté de s'auto-nettoyer. Ces espèces tolèrent donc la sédimentation. Une recherche récente suggère que la résistance des coraux à la sédimentation pourrait être beaucoup plus grande que ce que l'on ne pensait.

Turbulence de l'eau - les turbulences induites par les vagues et les courants sont importantes par leur influence physique directe sur la morphologie des coraux et du récif. Biologiquement, les turbulences supportent de l'eau fraîche aux coraux du récif, elles enlèvent également les résidus du métabolisme.

(3) Contraintes climatiques sur les récifs et les milieux associés

Les récifs se développent dans des climats tropicaux humides ou arides là où l'interdigitation avec des roches détritiques silicieuses est fréquente. Cependant, selon le cadre climatique, les sédiments sont amenés dans ces milieux calcaires de façons différentes selon les sources terrigènes. Un apport plus ou moins continu de sédiments terrigènes provenant des fleuves et cours d'eau est typique des tropiques humides. Des flôts de sédiments associés à des crues secondaires sont typiques des régions arides. La précipitation chimique des minéraux évaporitiques tels que le sel, le gypse et l'anhydrite est typique des milieux côtiers très chauds dans les climats arides. Ces dépôts évaporitiques ne font habituellement pas partie du cortège de faciès trouvés dans les zones tropicales humides.

(b) Milieux sédimentaires d'un complexe récifal

Milieux arrière-récifs

Le type d'un arrière récif littoral dépend de la continuité du récif de la largeur de lagon arrière-récif, de l'architecture du substrat des sédiments quaternaires, du relief de la région adjacente et du climat.

Littoraux à faible niveau énergétique

Estrans - ces littoraux boueux caractéristiques se développent du côté abrité des îles sur de larges plate-formes calcaïques ou le long de côtes à relief bas. Des boues calcaïques fines sont dérivées de la large plate-forme peu profonde précédant l'estran. Les récifs sont habituellement situés loin du large ou distribués en petites constructions coralliennes. Il arrive que des sédiments terrigènes forment des estrans en arrière d'un récif du fait de leur introduction par les petits cours d'eau et les rivières.

Marais à mangroves - dans les régions tropicales humides, une végétation halophile, principalement des palétuviers, peut coloniser un littoral à faible niveau d'énergie qui, dans un climat aride, serait un estran. Beaucoup de plaines littorales est-africaines et de sites voisins comme, par exemple, les côtes protégées de Tanzanie (figs. 11 et 45), de Mahé et des Seychelles sont peuplées par des mangroves (figs. 46 et 47). Ces marais de mangrove sont biologiquement importants car ils servent de terrain de reproduction et d'élevage à de nombreuses espèces marines qui vivent plus au large à l'âge adulte. De plus, des mangroves fournissent des déchets organiques au milieu environnant. Ces déchets alimentent les organismes formant le maillon le plus bas de la chaîne alimentaire. Géologiquement, les mangroves sont importantes car elles stabilisent les rives et peuvent en étendre la topographie vers le large. La production organique est si élevée dans les mangroves que d'épaisses tourbières peuvent se former. Les palétuviers à racines aériennes sont les plus importants producteurs de tourbe. Leurs racines peuvent pénétrer jusqu'à 5m au-dessous de l'interface eau-sédiments.

Littoraux à haut niveau énergétique

Plages - lorsque le lagon est étroit et que la côte est approvisionnée en sédiments grossiers, des plages se développent. Les vagues normales, nécessaires au maintien de ces plages, entrent dans le lagon par des passes traversant les formations récifales et par-dessus le récif à marée haute (si la géométrie est favorable). Les vagues de tempête traversent le récif du fait du niveau élevé de l'eau. Des dunes se forment fréquemment en association avec les plages lorsque l'approvisionnement en sédiments est suffisant.

Plages de blocs et crêtes côtières - si le récif est proche de la rive, des plages de blocs et des crêtes côtières composées de blocaille grossière d'origine corallienne se forment du côté au vent des îles et des récifs. Des études ont montré que des coraux vivants ont été arrachés à des profondeurs de 15m du plateau avant récif pour être transportés dans ce cadre subséquent.

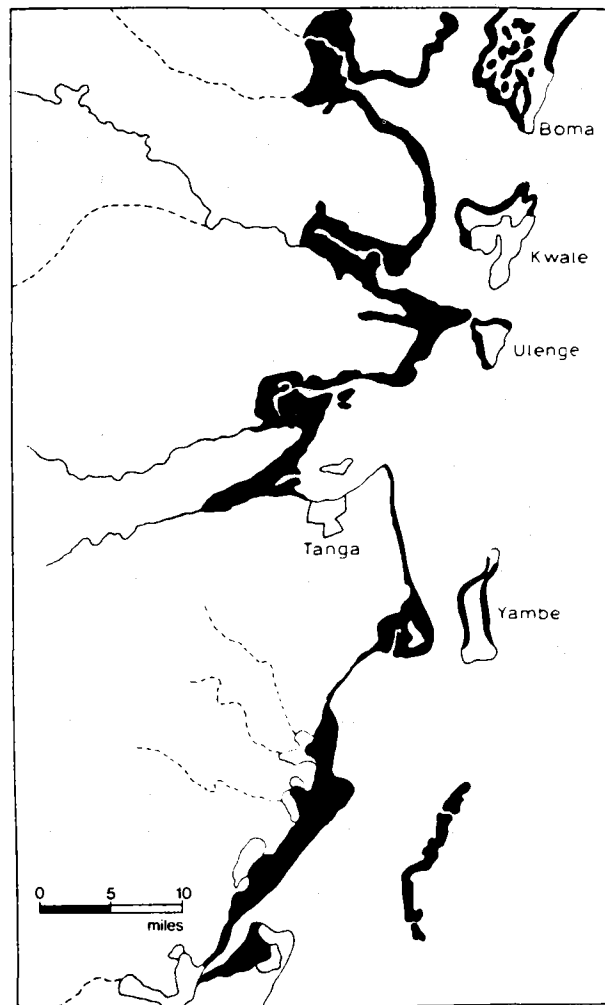


Figure 45: Mangrove au voisinage de Tange (d'après Walter et Steiner, 1936)



Figure 46: Mangroves à Port Tudor, Mombasa. A noter le manque de végétation sur le rivage à haut niveau de marée (voir figure 47)

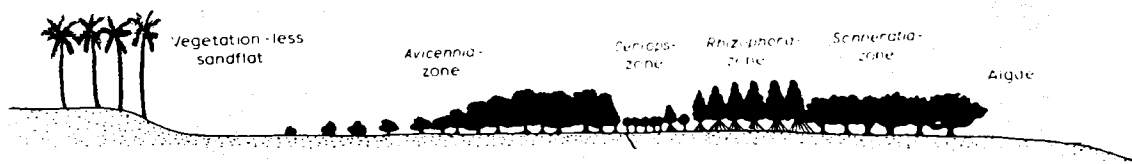


Figure 47: Zonation de mangrove à Tanga, (d'après Walter et Steiner, 1936)

Lagons

Les courants et les vagues typiques de ces milieux sont insuffisants pour transporter des particules de sable. Les vagues de l'océan sont filtrées par le récif, laissant l'arrière récif aux faibles vagues qui y sont générées par le vent. La circulation y est forcée par la poussée de la vague de marée passant par-dessus le récif et par les mouvements induits par les vents locaux (Roberts, 1980).

Du fait du peu d'énergie physique du milieu, les lagons d'arrière récif sont généralement des sites d'accumulation de sédiments calciques fins. Bien que des sédiments fins, provenant de la décomposition du récif, soient apportés à ce milieu, la plus grande partie des particules sédimentaires sont produites in-situ. Le résultat final est un sédiment bi-modal composé de particules grossières flottant dans une matrice de boue calcique. Les particules grossières proviennent de la décomposition de coquilles de mollusques, d'algues vertes calcaires (*Halimeda*), et de grands foraminifères. La fraction fine est fournie principalement par les algues vertes calcaires. A cause de l'intense bioturbation, les structures sédimentaires primaires sont rapidement oblitérées et les sédiments ont un aspect gigarrés.

Biologiquement, les lagons d'arrière récif peuvent être des zones très productives. Un épais tapis de diverses herbes marines (fig. 48), servant à stabiliser les sédiments du fond, est typique de cette situation. La croissance épiphyte d'organismes producteurs de carbonate sur les feuilles des plantes marines contribue de façon importante à la partie boueuse des sédiments.



Figure 48: Herbes marines communes dans les eaux calmes des lagons

Milieu du banc récifal

Nappe de sable - derrière chaque récif linéaire, il y a un dépôt grossier, composé principalement par des sédiments de la taille des grains de sable. Ce matériau est arraché au récif et amené vers l'arrière récif pendant les grandes tempêtes. Bien que les courants de houle générés par les vagues normales se brisant sur la crête du récif puissent transporter du sable et des particules plus grosses sur une courte distance, la formation d'une large nappe de sable et des hauts-fonds lui associés exige des vagues et des courants de tempêtes. Cette nappe de sable et ses hauts-fonds se développent fréquemment à l'opposé des passes et peuvent s'étendre sur plusieurs kilomètres à l'intérieur du lagon. La ceinture de sable est parallèle au récif. En règle générale, cette étendue plate sablonneuse est composée de particules dont la granulométrie est voisine, avec très peu de carbonates de la taille des limons ou de l'argile. Les courants de marée et l'écoulement passant par-dessus le récif en conjonction avec les vagues et l'activité biologique, trient ces sédiments (fig. 49).



Figure 49: Nappes de sable dans le lagon adjacent à la Morne, au sud-ouest de l'Ile Maurice

Les sédiments des hauteurs telles que les estrans et les hauts-fonds sont particulièrement propres et bien classés. A la différence des débris grossiers du lagon, la couverture de sable est composée principalement de fragments de corail et d'algues calcaires rouges. Généralement, le changement de faciès entre les sables de ce milieu de déposition et les sables boueux et les boues du lagon est très net.

Fossé - immédiatement du côté sous le vent des récifs linéaires, un canal joue le rôle de conduit aquifère assurant les échanges entre le lagon et le plateau ouvert. Ces canaux, communément appelés fossés, sont reliés à la haute mer des failles bien définies traversant le récif. Ces failles sont les points d'échange entre l'arrière récif et l'avant récif. Les fossés sont habités par une communauté corallienne typique consistant en de grandes têtes coralliennes et des fourres d'espèces délicatement ramifiées. Ces deux types de coraux coloniaux préfèrent les situations abritées des vagues mais tolèrent bien un régime de forts courants. Le fond du fossé est composé de sable riche en matières coralliennes dérivées du récif. Lorsque le flût de jusant est élevé, ces sédiments sont transportés par la passe vers le plateau avant-récif.

Fond rocailleux - immédiatement en arrière de récif linéaire vivant se trouve un dépôt de matériaux grossiers provenant de la décomposition des colonies coralliennes de la crête du récif. De nombreux organismes perforants, y compris les éponges, les bivalves les vers et les algues, affaiblissent les colonies coralliennes, particulièrement les variétés ramifiées qui sont les principaux bâtisseurs de l'ossature du récif. Les vagues de tempête brisent les colonies affaiblies et transportent les morceaux en direction du lagon par de forts courants de houle générés par l'écrasement des vagues sur la crête récifale. Cette étendue plate de débris coralliens est parallèle au récif et établit une transition avec la nappe de sable en direction du lagon. La cimentation biologique et chimique stabilisent rapidement ces débris en une masse consolidée dite "récif géologique".

Récif - un récif de corail vivant est l'un des milieux biologiques les plus divers et les plus productifs des mers modernes. Géologiquement, cette communauté de coraux, d'algues coralliennes et d'autres organismes accessoires, constitue une source renouvelable de particules sédimentaires pour d'autres milieux sédimentaires (fig. 50).

Les récifs linéaires peu profonds filtrent l'énergie des vagues et des courants entre le milieu océanique avant-récif et le cadre paisible de l'arrière récif. De cette modification de l'énergie dirigée vers la plage résulte une transition brutale entre les dépôts "de haute énergie" et les dépôts "de faible énergie" (changement de faciès). Des expériences montrent que dans des conditions de vagues d'Alizés normales, la plupart des récifs frangeants et barrières et des bancs coralliens filtrent 78 pour cent à 90 pour cent de l'énergie des vagues avant qu'elle n'atteigne l'arrière récif (Roberts, 1980). Ces phénomènes créent des courants forts mais de courte durée susceptibles de transporter des particules de la taille des grains de sable ou plus grosses. Dans les zones où l'amplitude des marées est importante, de grandes surfaces de platier sont exposées à marée basse (fig. 51).

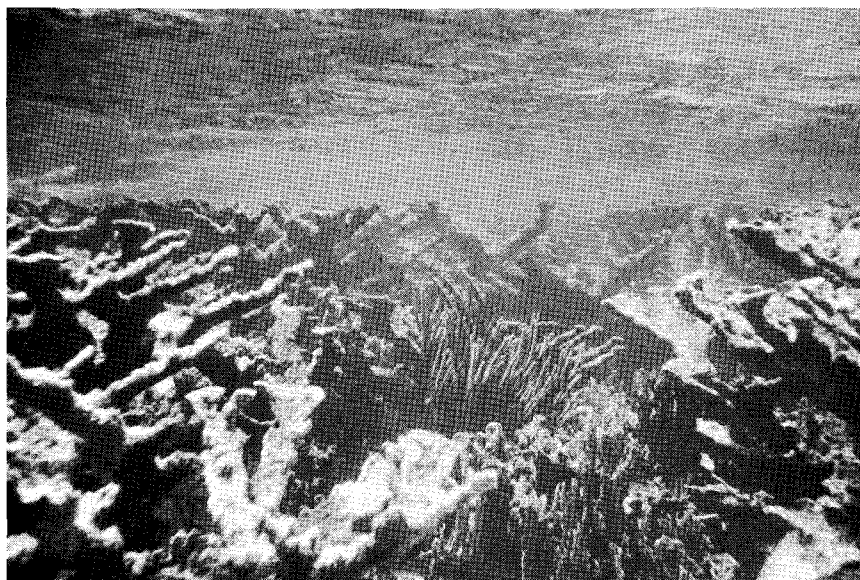


Figure 50: La crête récifale est l'un des milieux les plus densément peuplés et les plus divers des océans modernes

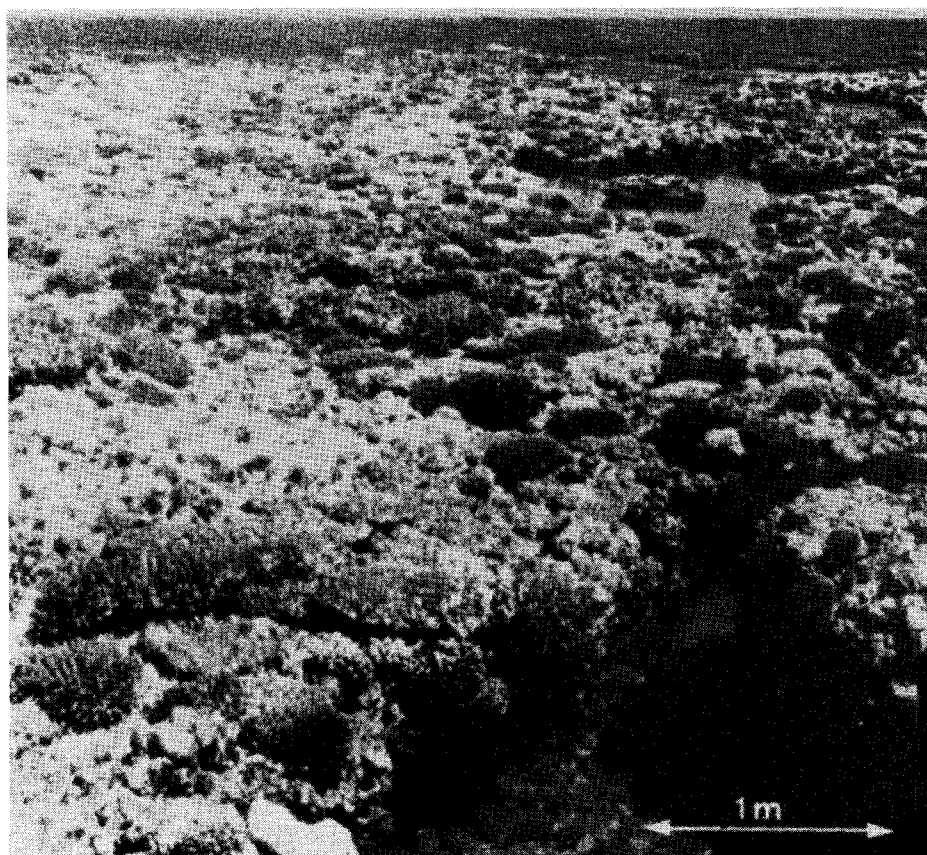


Figure 51: Là où l'amplitude des marées est importante, à marée basse, tout le

La production de carbonates dans les récifs peu profonds est telle que l'ossature corallienne serait enfouie dans ses propres débris si l'énergie dissipée par des phénomènes locaux ne poussaient de grandes quantités de matériaux pulvérulents vers l'arrière récif, alimentant ainsi en sédiments le fond rocailleux et la nappe de sable.

Plateau avant-récif

Généralement, autour des îles un plateau étroit et parfois topographiquement complexe borde la face au large des récifs linéaires bien développés. Le long des côtes continentales la distance entre le récif et le bord du plateau peut être grande. L'augmentation rapide de la profondeur de l'eau sur le plateau récifal provoque des changements dans les communautés récifales du fait de la diminution de l'intensité de la lumière et de l'énergie des vagues.

Les rebords récifaux sont habituellement des sites de forte croissance (fig. 52). La plupart des récifs en bord de plateau emprisonnent en arrière d'épais biseaux de sédiments. Des sillons bien délimités traversent les récifs du rebord et permettent le passage des sédiments.

Tel qu'indiqué par le diagramme de la fig. 53 les récifs de l'ouest de l'Océan indien présentent des morphologies diverses associées à des sous-environnements compliqués. Beaucoup de plate-formes calcaïques dominées par des récifs se sont simplement construites par accumulation sur ce qui à l'origine était un littoral raide de roches éruptives (figs. 54 et 55).



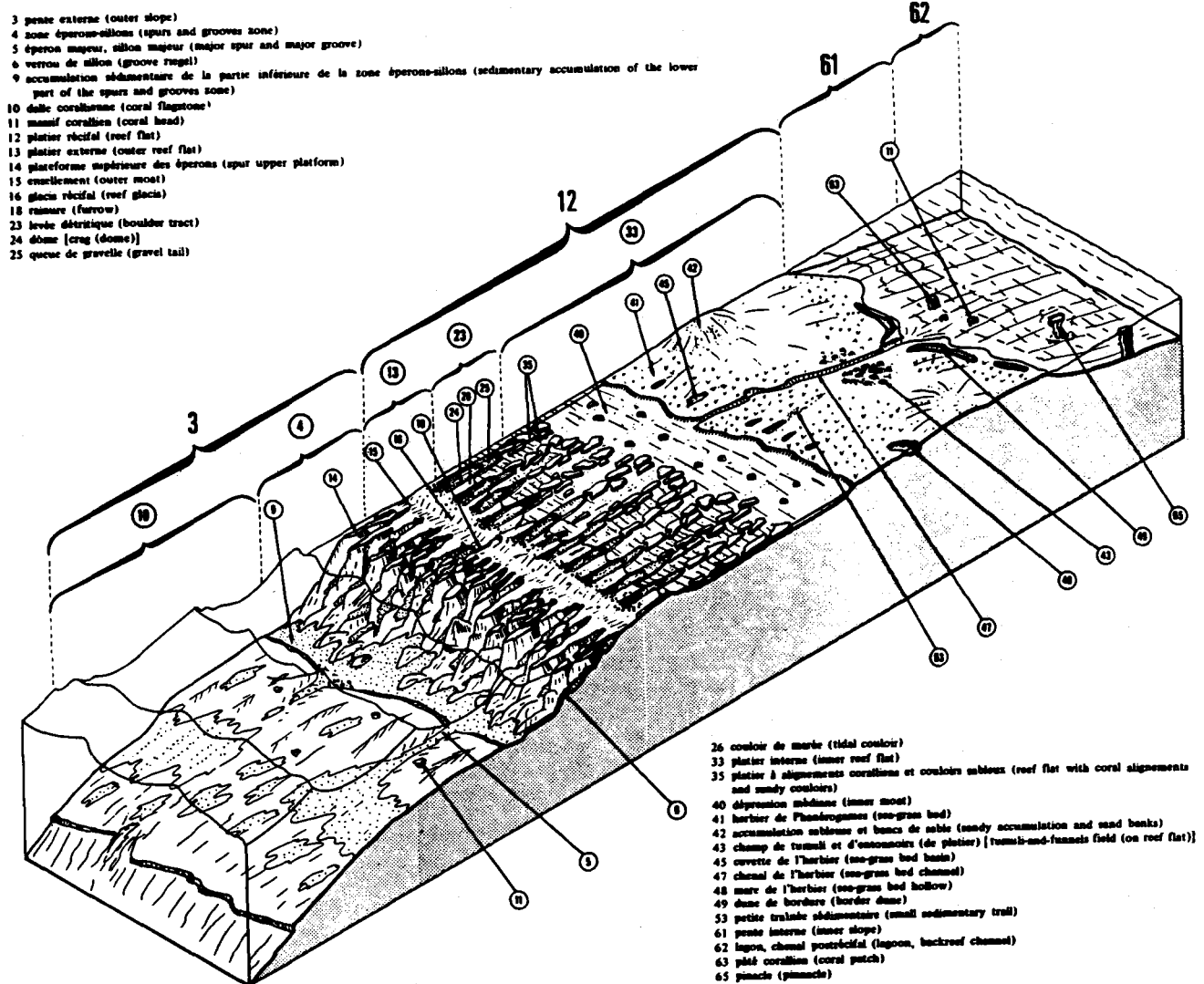


Figure 53: Bloc diagramme schématique d'un récif corallien de la région de Tuléar ("Grand Récif") Croquis sans échelle

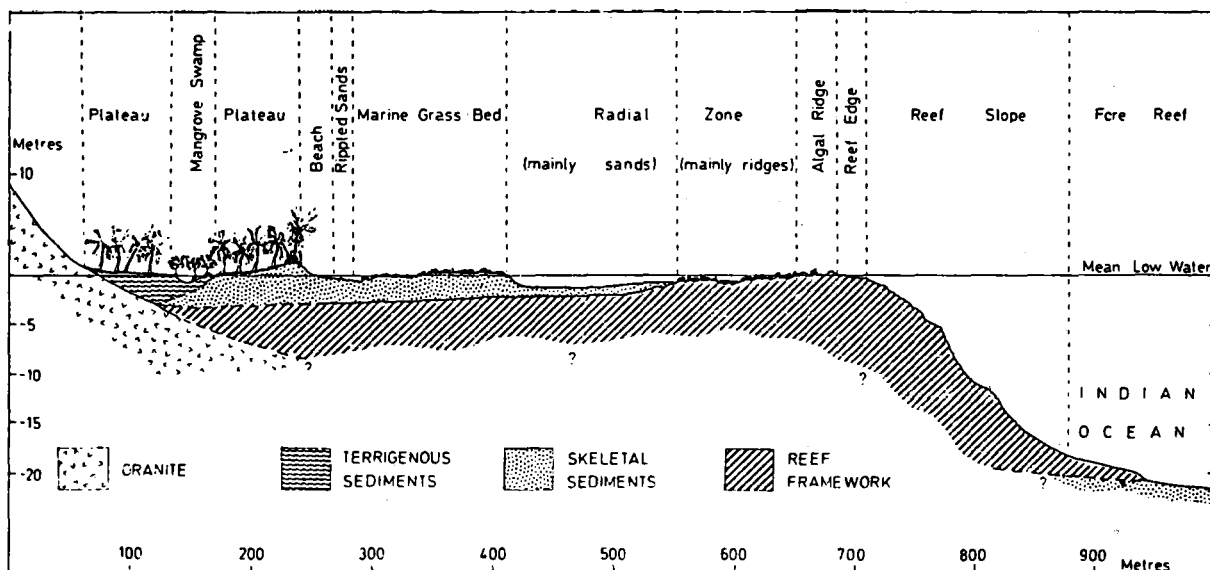


Figure 54: Profil transversal d'un platier corallien de la côte au vent du Mahé, aux Seychelles (Lewis, 1969)



Figure 55: Photographie aérienne de la côte ouest de Mahé aux Seychelles, montrant la côte de roches éruptives bordée de falaises et précédée d'un récif actif et d'un platier

LE PETROLE ET L'ENVIRONNEMENT

Sources de pollution marine par le pétrole

Le pétrole atteignant la côte peut provenir de:

- fuites naturelles;
- déversement accidentel (lors d'opérations de chargement ou de déchargement);
- déversement d'exploitation (par exemple, lavage des réservoirs, ballast ou locaux des machines pollués; et
- accidents maritime (échouages, collision).

L'ouest de l'Océan Indien est une importante artère maritime de transport du pétrole brut, le risque de pollution marine y est élevé. Le pétrole brut transite dans cette région en provenance du Moyen-Orient (fig. 56). Kenya, Tanzanie, Somalie, et Madagascar ont des raffineries côtières et importent du pétrole brut dans des grands transporteurs; Comoros, Maurice, et les Seychelles importent du pétrole raffiné.

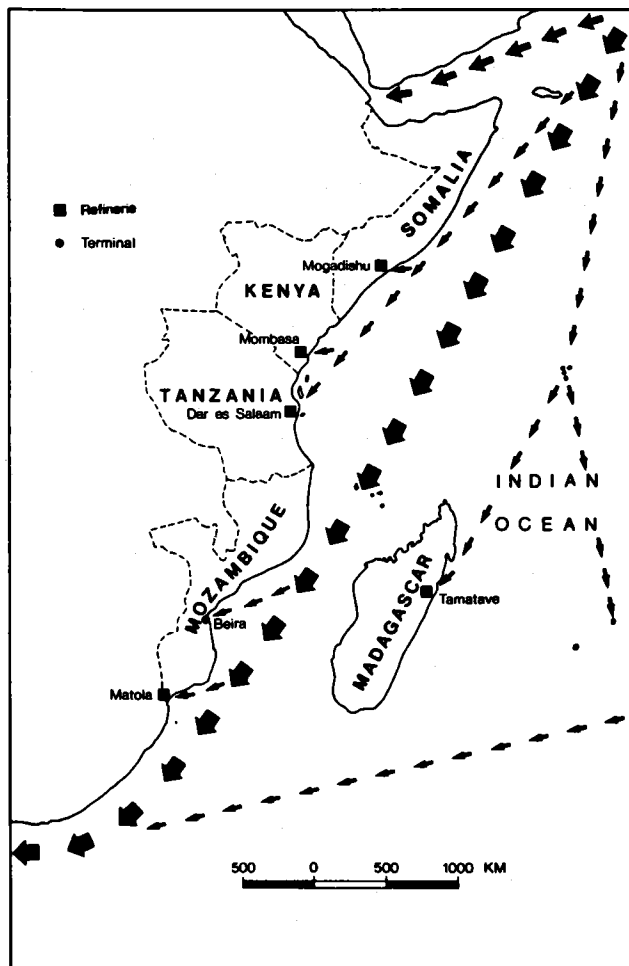


Figure 56: Routes des pétroliers dans l'ouest de l'Océan Indien

Environ 450 millions de tonnes de pétrole transitent chaque année dans l'ouest de l'Océan Indien, en outre 22 millions de tonnes sont importées par l'Afrique de l'est et du sud (UNEP 1982). Environ 25 très grands transporteurs chargés et 75 pétroliers de petit ou moyen tonnage, chargés, transitent chaque année à travers cette région. Etant donné les habitudes de trafic et le grand volume de pétrole transitant par la région, des fuites accidentelles (importantes) ou des fuites d'exploitation ainsi que l'échouage de nodules de goudron peuvent survenir à tout moment dans toute la région. Les risques de pollution sont le plus élevés dans le Canal du Mozambique ainsi qu'à proximité des grandes raffineries côtières. Plusieurs cas de pollution dus à des accidents maritimes se sont déjà produits dans la région. La distribution géographique de nappes, observées sur la côte est-africaine (fig. 57) implique qu'une connaissance des vents et des courants maritimes soient d'une importance suprême. Il est estimé qu'il y a toujours, quelquepart, dans la région est-africaine, 24 transporteurs chargés, 24 transporteurs vides, 88 pétroliers chargés et 88 pétroliers vides de moyen tonnage qui transitent à travers cette région.

Nature du pétrole

Le pétrole et les produits dérivés sont d'une grande diversité possédant des propriétés physiques et chimiques très diverses (par exemple kérosène, fuels lourds, asphalt). Les propriétés physiques les plus importantes des produits pétroliers sont:

- le point d'ébullition: température à laquelle les fractions de pétrole s'évaporent;
- le point d'éclair: température la plus basse à laquelle les fractions s'enflamment;
- le point d'écoulement: température en deçà de laquelle le pétrole cesse de couler;
- la tension superficielle: aptitude à l'étalement des pétroles légers;
- la viscosité: résistance des pétroles à l'écoulement; et
- la masse spécifique: densité relative du pétrole.

A la suite d'un déversement les propriétés physiques et chimiques du pétrole changent sans cesse sous l'effet du transport et des modifications (dégradations) dus à des processus naturels. Ces modifications sont le plus rapide immédiatement après un déversement, lorsque les fractions légères disparaissent, principalement par l'évaporation (fig. 58). Du fait de la disparition des fractions légères, le pétrole s'altère pour devenir une substance plus résistante et plus visqueuse. L'action mécanique des vagues peut former une émulsion "mousse au chocolat".

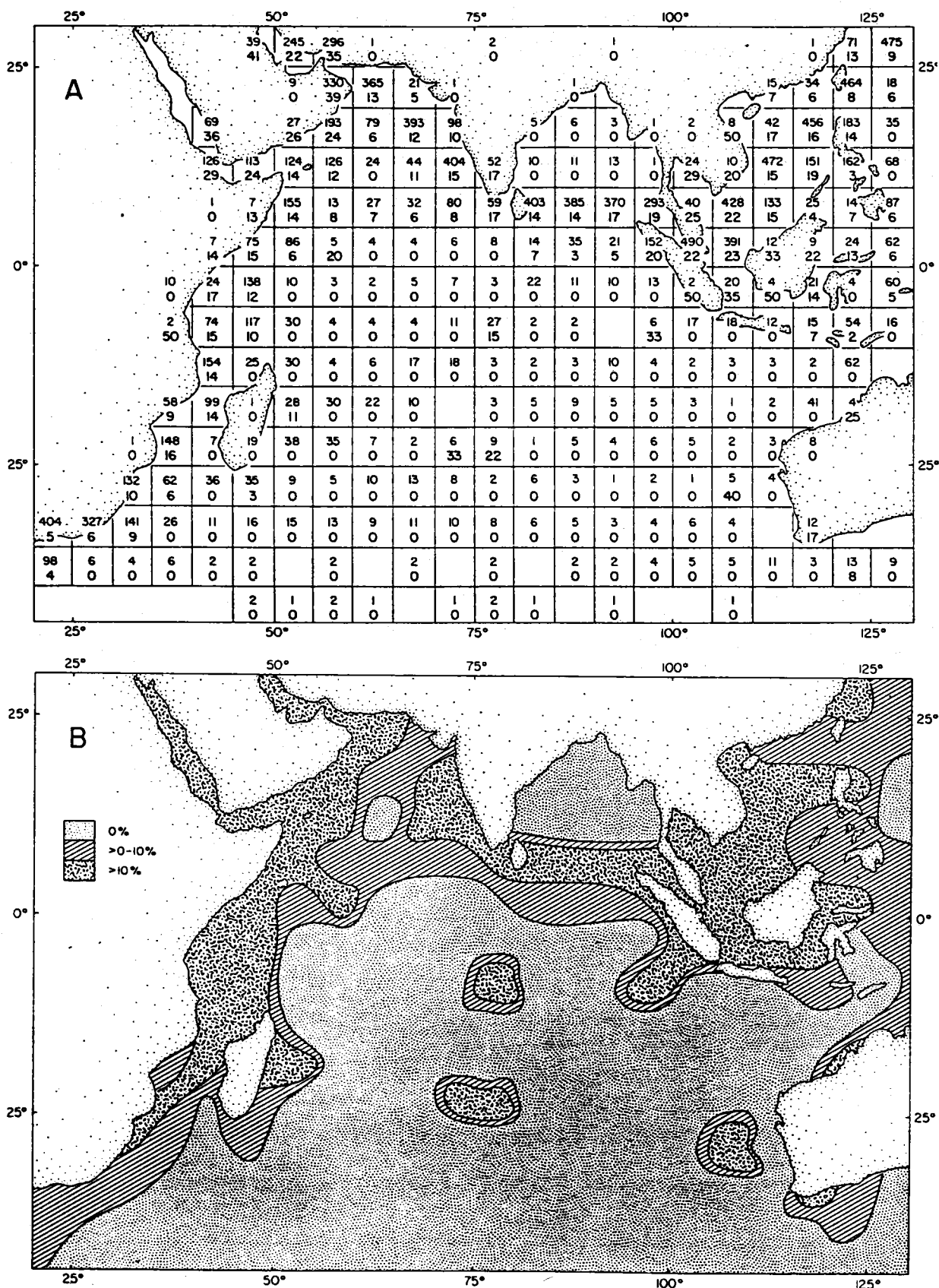


Figure 57: La distribution géographique de nappes polluantes dans l'Océan Indien selon le pourcentage de rapports positifs. A. Nombre total d'observations visuelles de nappes pour 5°x5° carres de latitude et de longitude de l'Océan Indien et selon le pourcentage qui indiquait la présence de pétrole (Valeurs supérieures, nombre total d'observations; valeurs inférieures, pourcentage de rapports positifs). B. Présentation picturale des faits (selon Levy, et autres. 1981)

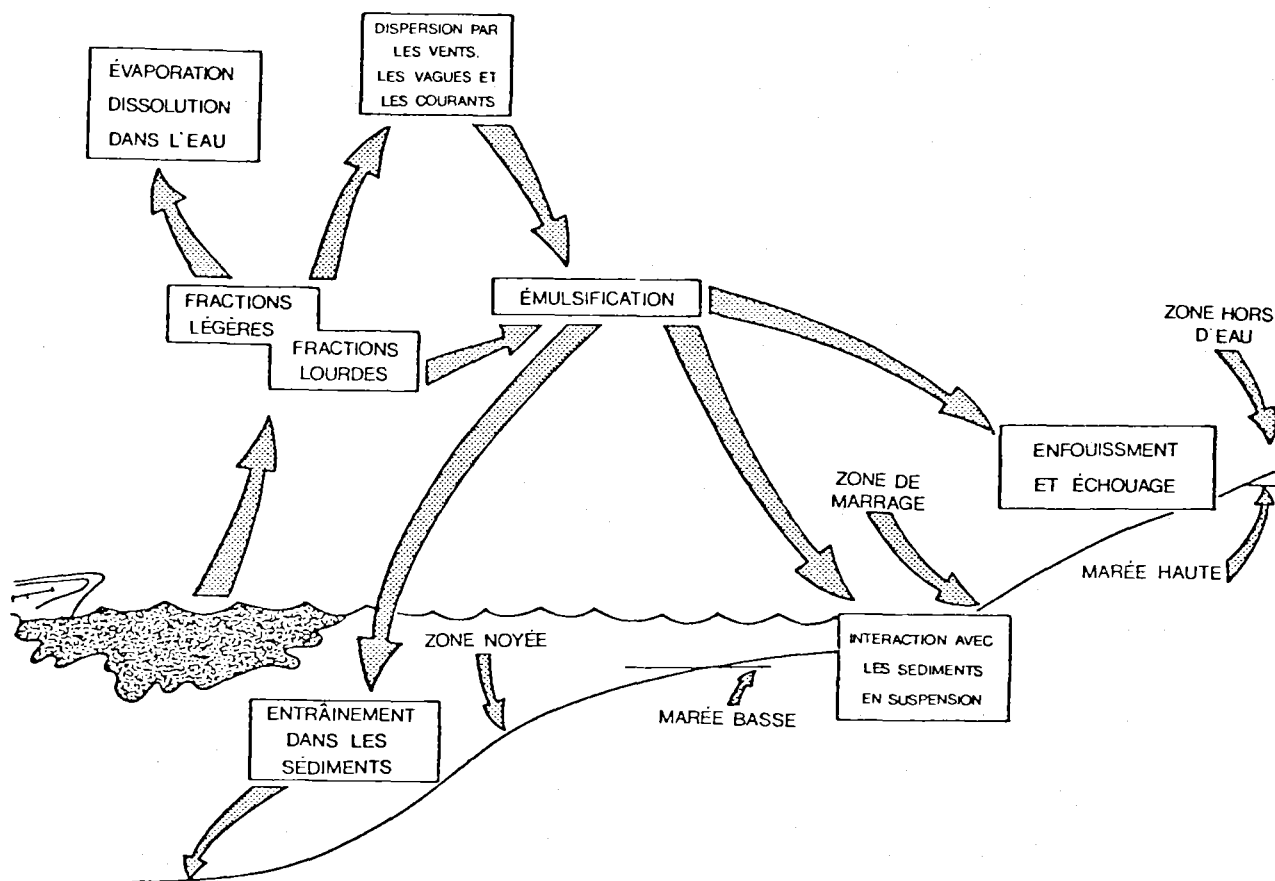


Figure 58: Facteurs d'équilibre de la nappe polluante (d'après Wheeler, 1978)

Le pétrole peut s'étendre jusqu'à ne former qu'une couche très fine à la surface de l'eau puis se reformer en nappe plus épaisse. Le pétrole s'accumule près de la côte ou contre un obstacle. Le déplacement du pétrole à la surface de l'océan est contrôlé principalement par les vents mais les courants de surface peuvent également influencer la direction et la vitesse de son déplacement (voir section sur la migration des nappes polluantes). La dégradation du pétrole est une fonction des effets des paramètres d'entrée tels que l'énergie thermique, mécanique et biochimique. Le processus de dégradation ou l'altération par exposition à l'air se produit à des échelles de temps différentes. La dissémination initiale (sous l'influence de la gravité et des effets chimiques de surface) est rapide et immédiate; l'évaporation des fractions légères n'est habituellement une réaction dominante que pendant le premier, ou les deux premiers jours suivant l'exposition du pétrole (fig. 59).

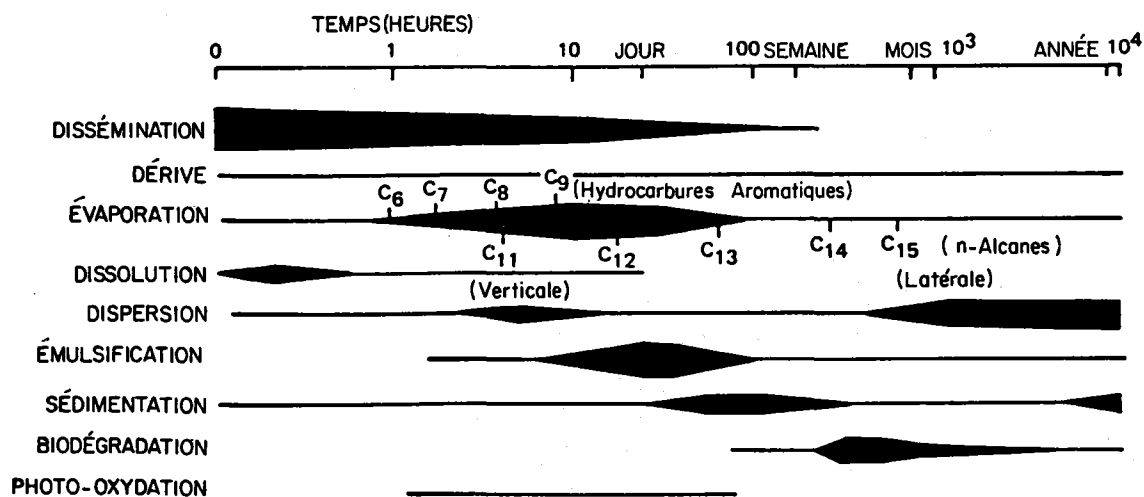


Figure 59: Durée (en heures) des processus physico-chimiques de la dégradation du pétrole (de Wheeler, 1978)

Migration des nappes polluantes

La migration des nappes de pétrole à la surface de l'eau est contrôlée principalement par les courants de surface ou les vents locaux si leur vitesse dépasse celle des courants. Les changements de direction du vent ainsi que la migration du pétrole dans un autre système de courants entraîne un changement dans la direction de déplacement de la nappe. La vitesse de migration des nappes est de l'ordre de 3 à 5 pour cent de celle du vent et se produit habituellement avec un angle compris entre 10 et 40° à la droite du vent. L'huile déversée en zone côtière (50km du rivage) sera probablement poussée vers la rive, les vents du large étant plus forts et mieux établis que ceux de terre (Hsu, 1970), à l'exception des régions où les vents locaux prennent l'avantage sur les conditions de vent régionales.

Un module général de comportement et de croissance des nappes en relation avec les conditions océanographiques physiques et météorologiques est montré fig. 60. Le comportement des nappes doit être considéré sous l'aspect des processus de dégradation comme sous l'aspect des forces qui transportent l'huile. Par exemple, une huile légère, volatile, peut s'évaporer totalement en quelques heures alors que des nodules de goudron, qui sont un résidu de l'altération du pétrole, par exposition à l'air, peuvent durer pendant des mois ou des années (on trouve des traces de vie marine sur des nodules de goudron). L'action des vagues dans la zone côtière tend à briser la nappe et peut amener à la formation d'une émulsion.

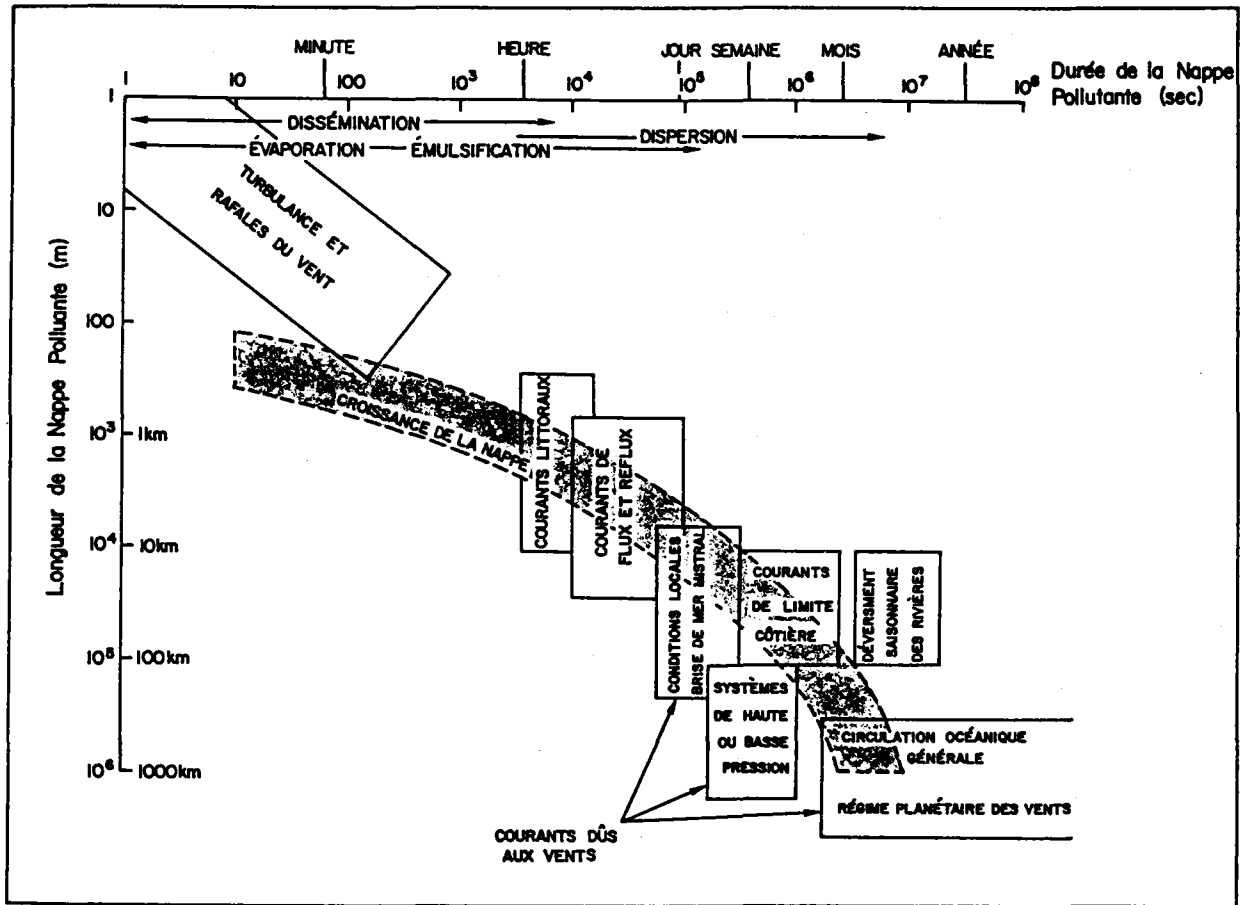


Figure 60: Croissance des nappes de pétrole en relation avec les processus physiques océanographique-météorologiques (d'après Murray, 1982)

Les mouvements de l'eau le long de la côte associés à l'action des vagues jouent un rôle important dans la localisation et la migration des nappes de pétrole (par exemple, le long des côtes rocheuses raides les vagues réfléchies par les falaises peuvent empêcher le pétrole d'atteindre le rivage). Les grandes arrivées d'eau douce dans la mer, dues à des pluies importantes ou provenant d'une rivière, peuvent constituer une barrière à la migration de la nappe vers le littoral. Il peut y avoir une extrême variété de processus physiques locaux à l'intérieur même d'une région, comme dans la région de l'Afrique de l'Est. Des études exploratoires devraient être conduites dans les zones vulnérables aux migrations de nappes polluantes.

Persistance du pétrole

La durée de persistance du pétrole échoué dépend principalement:

- des propriétés physiques et chimique du pétrole;
- du volume du pétrole;
- de l'épaisseur de la nappe de pétrole;
- de la profondeur de pénétration ou de l'enfouissement dans les sédiments;
- de la température de l'air ambiant;
- de la localisation du dépôt de pétrole; et
- du niveau d'énergie des vagues sur le littoral.

Le facteur isolé le plus important pour la persistance du pétrole dans la zone littorale est le niveau d'énergie mécanique (vagues), énergie pouvant agir sur le pétrole; lorsqu'elle augmente, la persistance (temps de résidence) du pétrole échoué décroît (fig. 61). La dégradation biologique du pétrole échoué est un procédé lent, il n'est significatif que lorsque le pétrole est déposé au-dessus de la limite de l'action des vagues (par exemple, pendant une période de tempête). Sur les côtes des îles le niveau d'énergie des vagues varie considérablement selon les directions relatives de la côte et des vagues dominantes et dépend également de la présence, (ou de l'absence) de récifs dans les eaux voisines. Le pétrole tend à se rassembler le long des sections abritées de la côte, zones où le niveau d'énergie mécanique est habituellement le plus faible.

La remise en oeuvre (reworking) du pétrole échoué est aussi affectée par les taux de transformation de la côte (par exemple la remise en oeuvre normale des sédiments de la plage par les vagues, ou le recul de la côte par érosion). L'enfouissement du pétrole ou son érosion peuvent survenir pendant les périodes de tempête. Lorsque le pétrole est enfoui il est peu probable qu'il poursuive sa dégradation avant d'être réexposé par un remaniement subséquent des sédiments. Il a été reconnu que des températures ambiantes élevées ainsi que la lumière du soleil causent le lessivage de l'eau d'une émulsion échouée lors de la marée descendante. A cause de ce phénomène, l'émulsion n'est plus stable, et il en résulte la possibilité pour le pétrole de pénétrer dans les sédiments.

Si le pétrole s'échoue à une époque de hautes eaux, (flux de tempête ou marées de printemps) il peut être déposé au-dessus de la limite normale du ressac. Le pétrole qui atteint un rivage lorsque le niveau des eaux est normal aura un impact différent sur les mangliers et les zones marécageuses que celui qui s'échoue lorsque les eaux sont hautes.

Facteurs de persistance du pétrole échoué

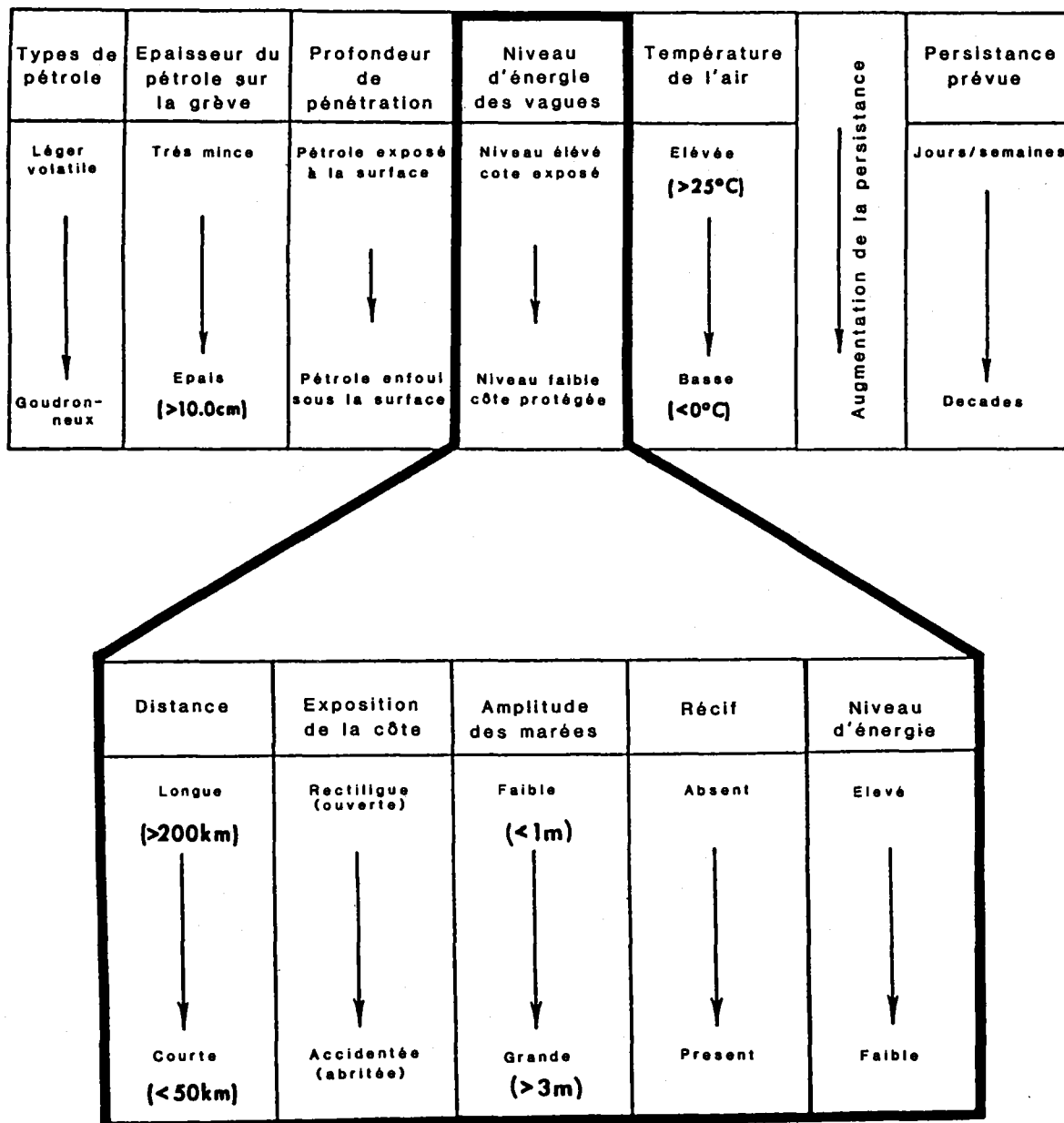


Figure 61: Niveau d'énergie au littoral et persistance du pétrole échoué (adapté de Owens, 1977)

Le pétrole peut être enfoui dans des sédiments qui se déplacent vers le rivage à la suite d'une période d'érosion due à des vagues de tempêtes (fig. 62) ou par des transports de sédiments le long du rivage. Le pétrole tend à s'accumuler dans des zones protégées où l'impact biologique est plus sévère et où les processus d'altération naturelle sont plus lents.

Sur les plages de gravier, le pétrole se mélange aux sédiments pour former un revêtement asphalté résistant.

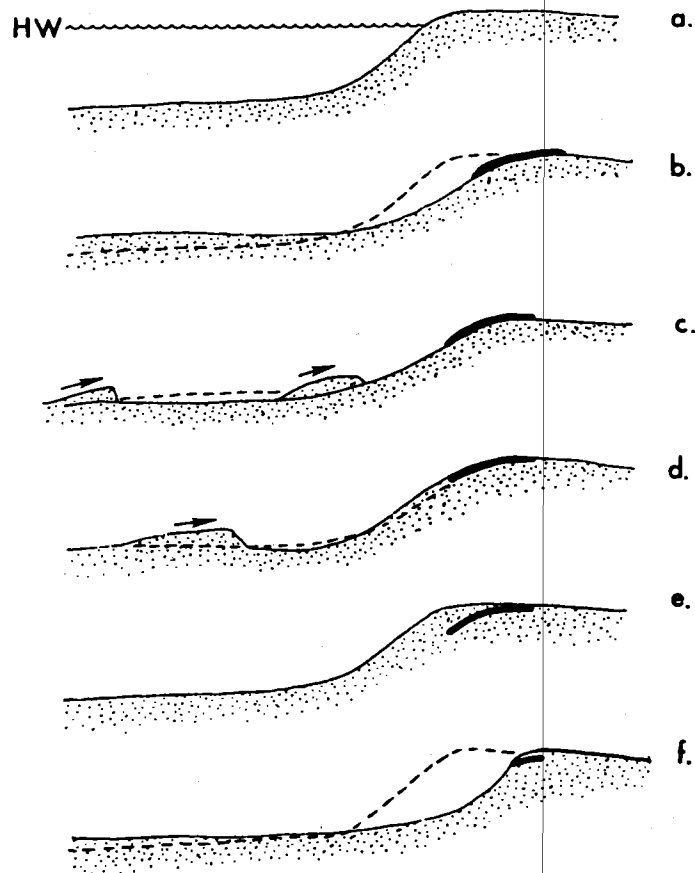


Figure 62: Succession d'érosion due à la tempête et dépôt du pétrole (b); enfouissement (d), (e); et réexposition suite à une seconde tempête (f) sur une plage de sable (d'après Owens, 1977); voir aussi fig. 2

"Sensibilité" de la zone côtière

L'impact du pétrole échoué est habituellement évalué en termes de degré d'altération de l'environnement naturel. Le degré d'impact du pétrole sur l'environnement dépend d'une grande variété de facteurs (voir fig. 63). Le pétrole restant dans la zone côtière pendant de longues périodes aura un impact plus grand que celui qui aura été rapidement dispersé par des processus naturels (tableaux 9 et 10). La durée nécessaire de récupération d'une espèce animale ou la reprise des activités humaines est un facteur important dans les études prévisionnelles d'impact. L'époque d'un déversement de pétrole est habituellement important car l'impact sur l'environnement biologique ou sur des activités humaines dépend fréquemment de la saison.

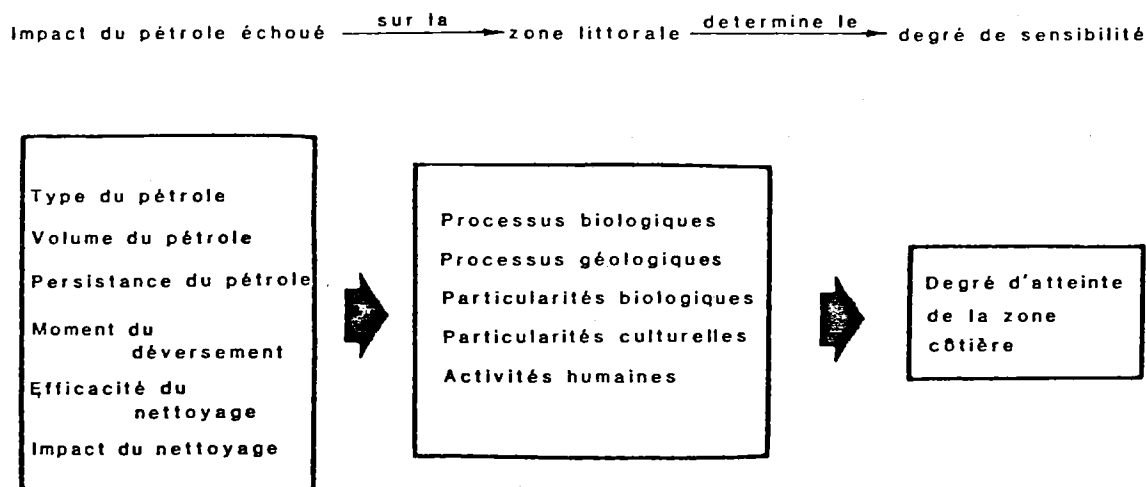


Figure 63: Facteurs affectant le degré de sensibilité de la côte

Tableau 9: Facteurs modifiant le temps de persistance du pétrole échoué

Facteurs réduisant l'impact et accroissant les taux de décomposition physique et de dégradation du pétrole	Facteurs augmentant l'impact et réduisant le taux de décomposition physique et la dégradation du pétrole
<u>Les vagues</u> - niveaux plus élevés d'énergie des vagues - mélange ou décomposition du pétrole dans les brisants - la zone de ressac et de clapotis - l'usage des sédiments comme abrasifs - redistribution ou érosion du pétrole sur la grève - vagues réfléchies mélangeant ou décomposant le pétrole et pouvant l'empêcher d'atteindre le littoral <u>Les marées</u> - basses eaux provoquant le dépôt du pétrole dans des zones plus tard sujettes à l'action des vagues et des courants <u>Les vents</u> - élèvent le taux d'évaporation - augmentent la dispersion et la propagation des nappes polluantes <u>Les courants</u> - augmentent la dispersion du pétrole dans l'eau - éloignent le pétrole du rivage	<u>Les vagues</u> - abaissement du niveau d'énergie des vagues - enfouissement du pétrole par déplacement de la côte, ou par migration de sédiments le long de la rive - réduction de la température du pétrole - projection de pétrole au-dessus du niveau d'activité des vagues par l'action d'éclaboussement des brisants <u>Les marées</u> - niveau d'eau élevé causant la déposition du pétrole au-dessus de la limite d'action normale des vagues et des courants - pétrole apporté dans des zones marécageuses <u>Les vents</u> - redistribuent les sédiments et enfouissent le pétrole dans la zone en retrait de la côte <u>Les courants</u> - concentrent le pétrole dans des tourbillons et dans des zones à faible courant - transportent le pétrole vers les zones qui n'ont pas subi son impact auparavant

Tableau 10: L'impact et la persistance du pétrole échoué

TYPE DE CÔTE	IMPACT DU PÉTROLE	PERSISTANCE
Côtes non-sédimentaires		
ROCHERS ARTIFICIELS	- le pétrole peut être repoussé - enduit les surfaces sèches - le clapotis peut projeter le pétrole au-delà de la limite du ressac - le pétrole adhère difficilement aux surfaces humides - l'épaisseur de la couche de pétrole décroît lorsque augmente la pente - le pétrole se rassemble dans les flaques des rochers	- le pétrole est rapidement érodé lorsqu'il échoue au-dessus de la limite du ressac sauf dans les sites protégés
Côtes sédimentaires		
BOUE	- les espaces inter-particulaires des boues sont très petites et sont habituellement remplies par de l'eau, ainsi seuls les pétroles très légers peuvent-ils les pénétrer	- les boues sont facilement remaniées par les vagues ainsi le pétrole peut-il être enfoui - le pétrole enfoui dans les boues se dégrade très lentement - le pétrole de surface est facilement enlevé par les vagues du fait que l'eau sépare habituellement le pétrole de la boue
SABLE	- seuls les pétroles légers pénétrant le sable - les huiles lourdes pénétrant rarement plus profondément que 2 ou 3cm - la profondeur de pénétration est plus grande en période chaude - le pétrole est habituellement déposé à la limite supérieure du ressac	- le pétrole dans la zone de ressac est facilement érodé lorsqu'il n'est pas enfoui - les possibilités d'enfouissement sont élevées si la plage est soumise au ressac lors des tempêtes - les sédiments et le pétrole peuvent former un "revêtement asphalté" augmentant la persistance
GRAVIER GALETS ET GROSSES PIERRES	- avec l'accroissement de la taille des sédiments la profondeur de pénétration de tous les types de pétrole augmente - la pénétration des pétroles lourds et moyens peut atteindre 1.0m - les parties légères du pétrole peuvent être réparties sur toute la plage et être balayées par les vagues	- le pétrole enfoui et le revêtement asphalté sont très persistants - le pétrole à la surface est facilement abrasé par les vagues et les mouvements de sédiments
SEDIMENTS MIXTES	- les vides entre les particules de grande taille sont comblés par des particules de taille plus petite, ainsi le pétrole ne ne pénètre-t-il que que rarement (à l'exception des pétroles légers)	- habituellement un environnement à faible niveau d'énergie, ainsi même le pétrole de surface persiste-t-il - les revêtements asphaltés sont fréquents
MARAIS	- le pétrole est habituellement confiné aux rives du marais - les pétroles légers sont plus toxiques pour la végétation et peuvent infiltrer les sédiments du marais	- les niveaux d'énergie mécanique sont bas, mais la dégradation biochimique est rapide si le pétrole n'est pas enfoui - les marais récupèrent habituellement de façon naturelle sauf si le pétrole est très toxique ou si une grande quantité de pétrole lapisse la végétation

La définition des seuls habitats côtiers est une base insuffisante pour évaluer l'impact d'une pollution car elle implique l'hypothèse implicite que l'impact est similaire pour des types de côtes similaires. La sensibilité peut varier en fonction du caractère pratique et de l'efficacité des opérations de nettoyage. Si la zone côtière peut être restaurée, l'impact de pétrole peut être réduit dans une large mesure. Le facteur unique le plus important dans l'évaluation de l'impact côtier est lié aux activités humaines et aux paramètres liés à la subsistance de l'homme à l'utilisation de la zone côtière à des fins commerciales et récréatives.

Bien qu'une grande quantité d'information pertinente relative aux menaces et aux impacts potentiels puisse être obtenues avant un incident de déversement il est encore nécessaire de déterminer par surveillance et par observation sur le site si cette menace est réelle au moment même du déversement (par exemple, la présence ou les mouvements anticipés d'espèce migratrice).

Dans la région est-africaine la zone côtière a une importance critique quant à la subsistance locale et aux activités commerciales et récréatives. En plus de l'effet direct du pétrole sur la côte exploitée à des usages récréatifs, les effets secondaires potentiels du pétrole dans les zones de reproduction, telles les mangliers, doivent être réévalués avec soin pour s'assurer que les facteurs les plus critiques (de même que les facteurs à long terme), sont pris en considération. Les effets du pétrole sur les activités de loisir seraient évidents dans le cas de déversements importants alors que la pollution par des nodules de goudron est très habituelle et n'a qu'un impact relativement faible sur les loisirs. Le type et la quantité de la pollution sont des facteurs importants à considérer dans toute analyse de sensibilité.

Définitions:

- la sensibilité côtière est l'effet du pétrole sur les ressources (humaines et biologiques), et le potentiel de recouvrement de ces ressources
- la vulnérabilité côtière est l'effet adverse qui pourrait résulter du contact du pétrole avec les ressources
- le risque de contamination de la côte est la probabilité qu'un déversement de contaminant ait lieu et qu'il entre en contact avec les ressources
- la persistance de pétrole est le temps pendant lequel le pétrole reste dans un endroit particulier

MESURES CONTRE LES NAPPES DE PETROLE COTIERES

Mesures de protection côtière et terrestre

Si plus d'une zone est menacée par une contamination (et que ces menaces ont été vérifiées sur place) alors une décision est nécessaire pour déterminer la façon dont la main d'oeuvre et les équipements disponibles seront déployés. L'établissement de ces priorités ne peut être fait qu'au moment où a lieu l'incident de contamination. Les domaines de première priorité seraient normalement ceux pour lesquels la vie humaine et/ou la sécurité sont en danger. Les domaines de seconde priorité peuvent être par exemple ces tronçons de côte (a) utilisés de façon intensive par des espèces rares, menacées ou en voie de disparition, ou (b) où des activités de subsistance humaine sont menacées.

Méthodes de protection des zones voisines de la côte

La prévention d'une atteinte par le pétrole de la côte ou d'une de ses parties implique l'utilisation de ressources pour contenir et enlever le pétrole de la surface de l'eau ou pour en réorienter la dérive.

Les principaux outils pour contenir le pétrole sont des barrières flottantes, ceux pour l'enlèvement sont des écrémeuses. Les barrières flottantes sont sensibles aux vitesses de courant élevées et aux hautes vagues. Différentes méthodes utilisant des barrières flottantes sont plus ou moins applicables selon les conditions (voir tableau 11). Les figures 64 à 70 illustrent les techniques utilisant des barrières flottantes. Il existe plusieurs types et tailles différents de barrières flottantes: les principaux sont des barrières palissades, clôture enceinte, des barrières rideaux et des barrières absorbantes (déshydratantes, chimiques). L'échec d'une barrière flottante est habituellement dû à de forts vents ou aux courants marins et le pétrole se trouve soit entraîné, soit projeté par dessus la barrière.

Les écrémeuses peuvent être utilisées pour enlever le pétrole flottant librement ou contenu par les barrières. Les écrémeuses peuvent être auto-propulsées ou flottantes. Les principaux types d'écrémeuses sont montrées, dans la fig. 71. Ils comprennent:

- écrémeuses oléophile à disque;
- absorbantes (bandes ou cordes oléophiles);
- écrémeuses à déversoir;
- bandes filtrantes ou non-absorbantes;
- écrémeuses centrifuges ou à tourbillon; et
- système à vide d'air.

Tableau 11: Techniques de protection côtière

TECHNIQUE DE PROTECTION	DESCRIPTION DE LA TECHNIQUE	USAGE PRINCIPALE DE LA TECHNIQUE	EFFETS SUR L'ENVIRONNEMENT
1 Clôture d'exclusion	La barrière est déployée à travers ou autour des zones sensibles et ancrée en place. Le pétrole qui approche est défléchi ou arrêté par la barrière.	Utilisée en travers de petites baies, des entrées de port, des criques, des estuaires de rivières et de ruisseaux ou les courants sont plus faibles que 1 noeud et les déferlantes plus petites que 25 cm de hauteur.	Perturbation mineure aux rives ou aux fonds aux points d'anfrage
2 Clôture de diversion	La barrière est déployée selon un angle à l'arrivée de la nappe. Le pétrole est repoussé au large des zones sensibles ou vers une zone moins fragile pour récupération.	Utilisée sur des cours d'eau ou les courants sont plus élevés que 1 noeud, en travers de petite baie, entrées de port, crique ou estuaires de ruisseaux lorsque le courant excède 1 noeud; que les déferlantes ont moins de 25 cm de hauteur et sur les côtes rectilignes pour protéger des sites spécifiques, lorsque les déferlantes ont moins de 25 cm.	Perturbation mineure aux points d'anfrage, cause une forte pollution cotière en aval.
3 Clôture de confinement	La barrière flottante est déployée en "U" devant la nappe qui progresse. Les barres du "U" sont ancrées par des corps-morts ou des remorqueurs. Le pétrole est contenu dans le "U" et empêché d'atteindre la rive.	Utilisée en eau libre pour confiner une nappe de pétrole approchant une côte bordée par le ressac lorsque la nappe ne couvre pas une grande surface; utilisée également en eaux intérieures lorsque les courants sont plus faibles que 1 noeud.	Aucun effet en eau libre; des perturbations mineures au fond aux points d'anfrage
4 Barrières flottantes absorbantes	La barrière est ancrée le long de la côte ou utilisée de l'une des manières décrites ci-dessus pour protéger les zones sensibles et absorber le pétrole.	Utilisée en eaux calmes en cas de pollution légère.	Perturbation mineure aux points d'anfrage.
5 Barrières absorbantes	Ces barrières sont construites en travers d'un cours d'eau et formées de deux grillages fixes pieux et emprisonnant des matériaux absorbants. Elles permettent l'écoulement de l'eau mais retiennent et absorbent le pétrole flottant à la surface	Utilisées dans des cours d'eau lents et peu importants, dans des criques soumises à la marée, des canaux ou toute voie d'eau à faible courant.	Perturbation mineure au fond du cours d'eau ou du canal

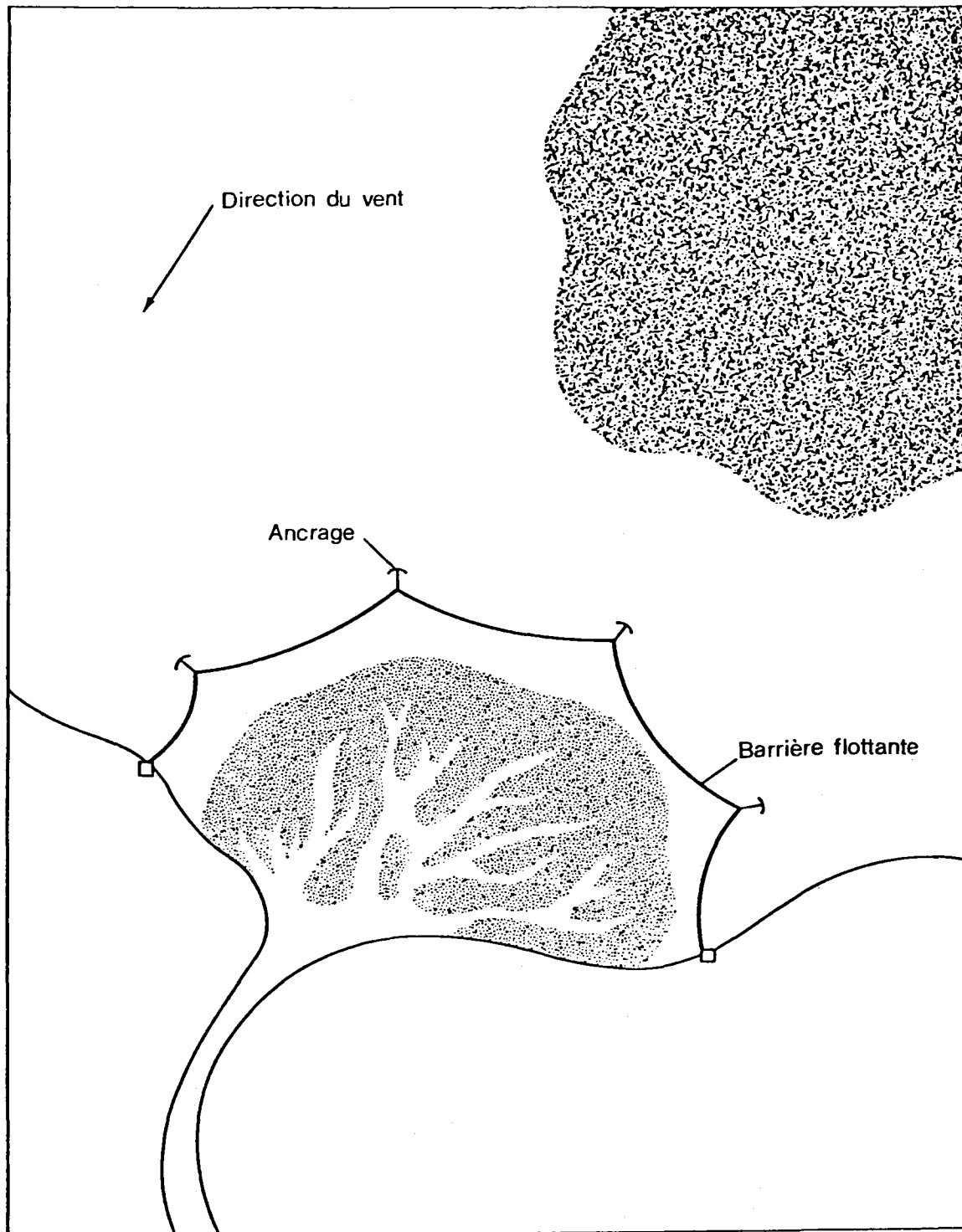


Figure 64: Clôture d'exclusion du delta au cours d'eau

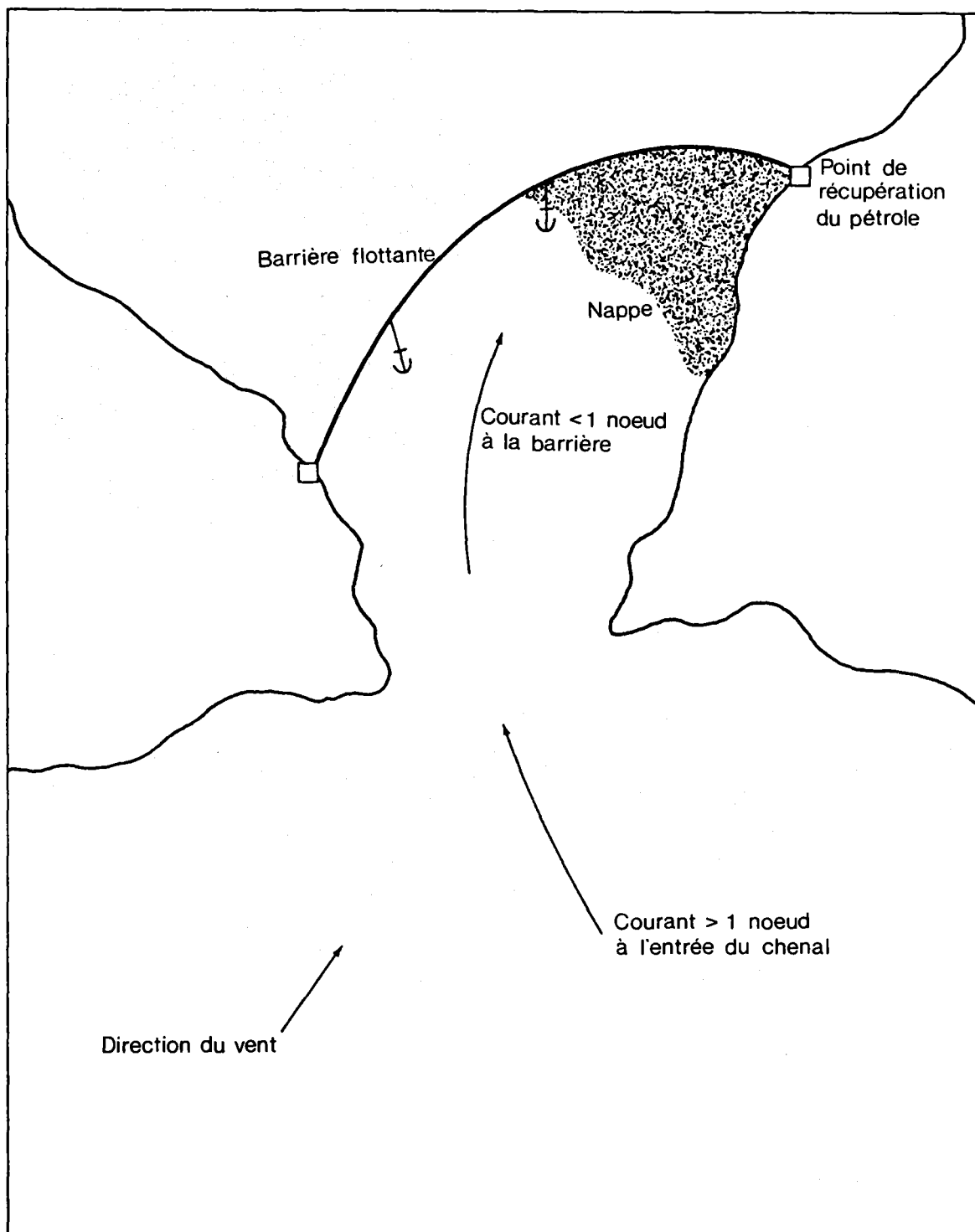


Figure 65: Clôture de protection d'une crique avec chenal à fort courant

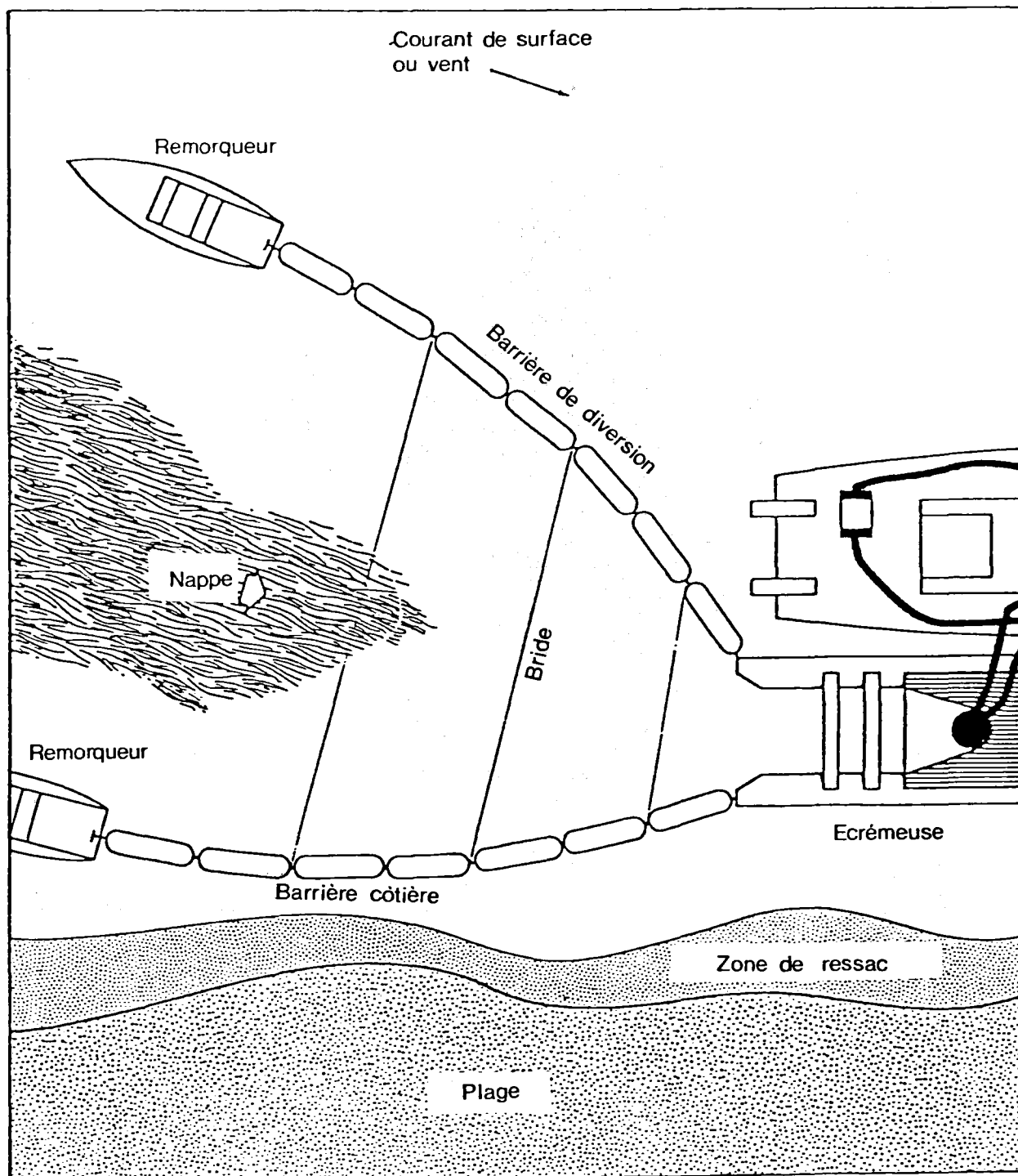


Figure 66: Protection d'un rivage fragile à l'aide de deux barrières flottantes

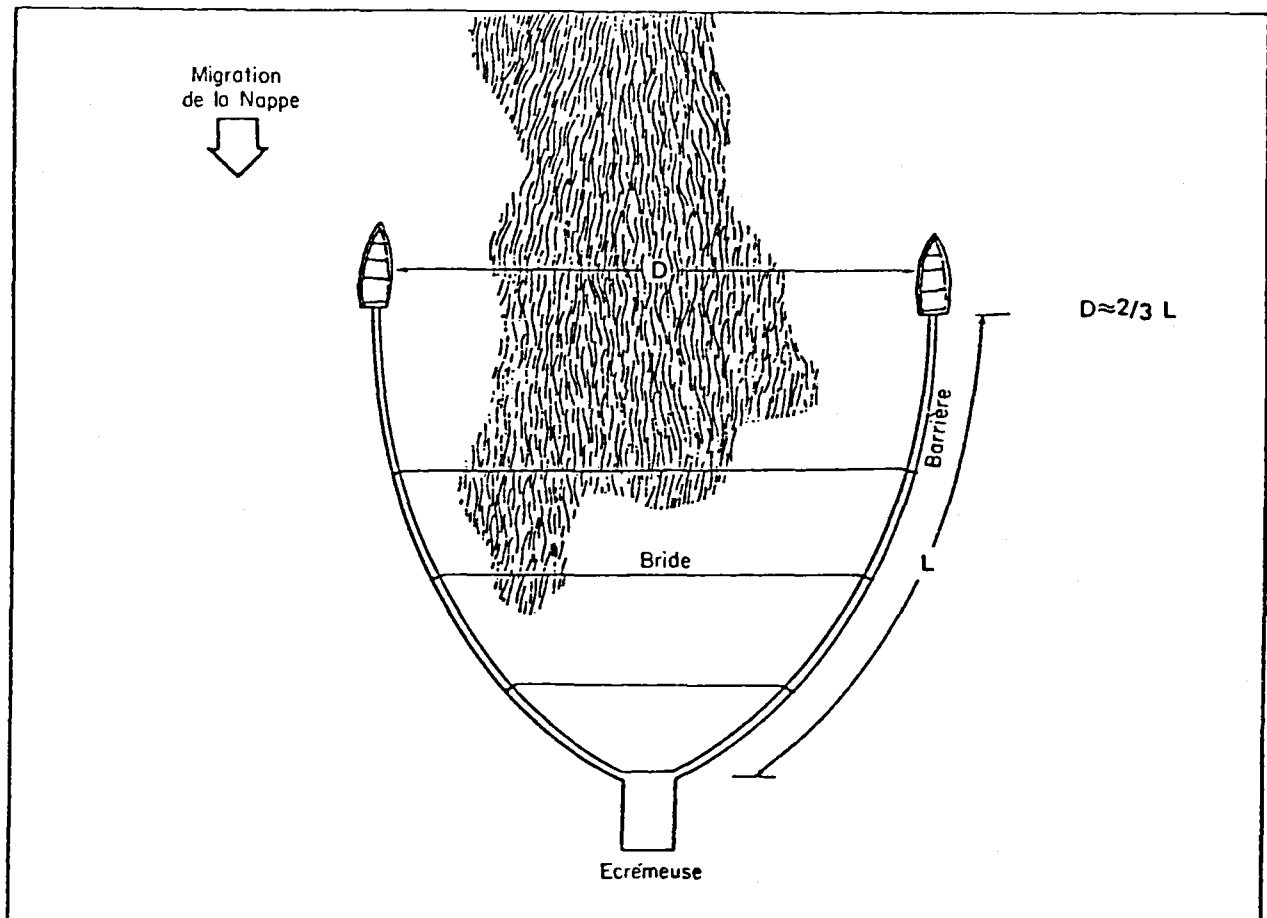


Figure 67: Relation entre les bateaux, les barrières et l'écrémeuse

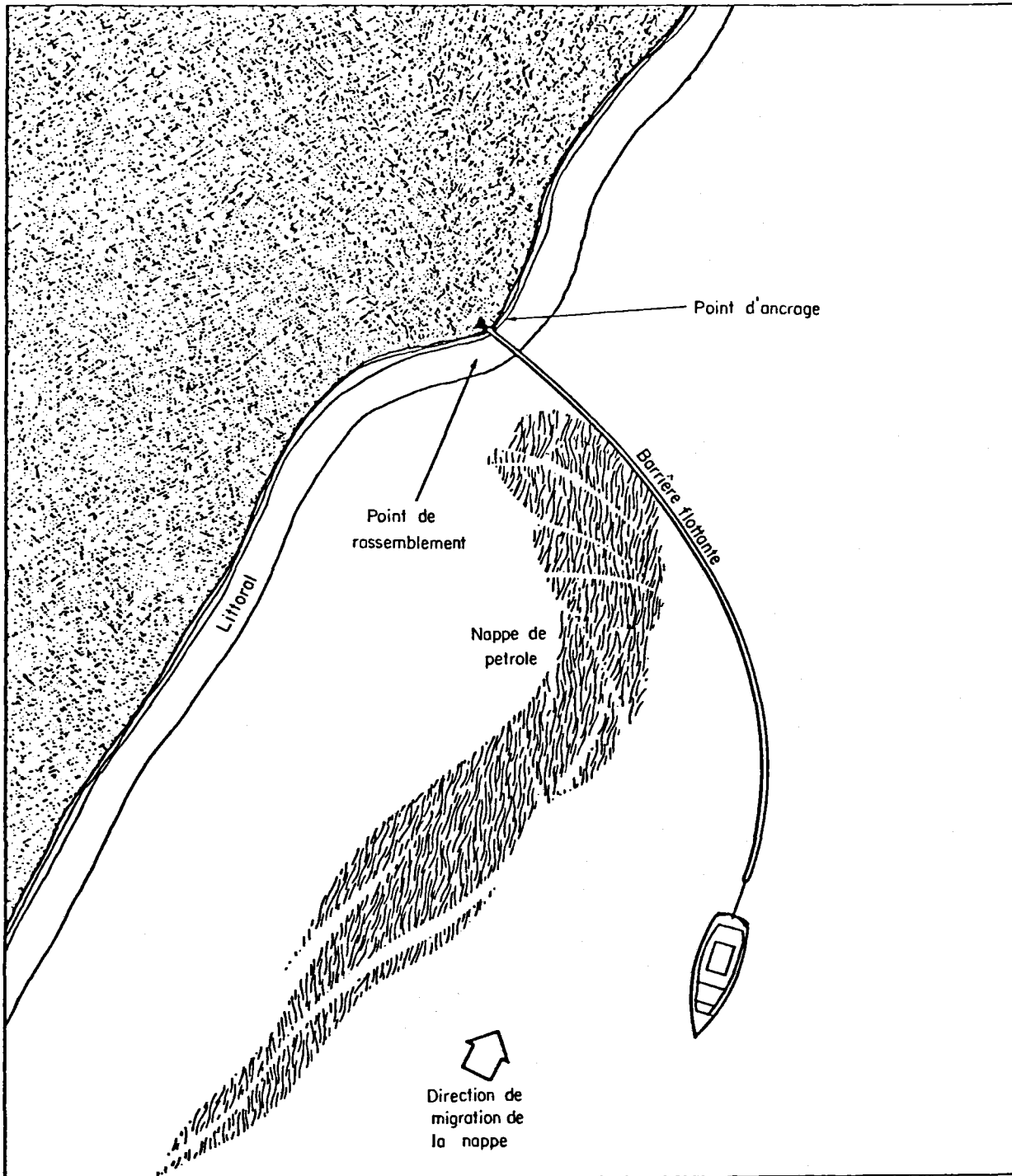


Figure 68: Clôture de diversion le long du littoral

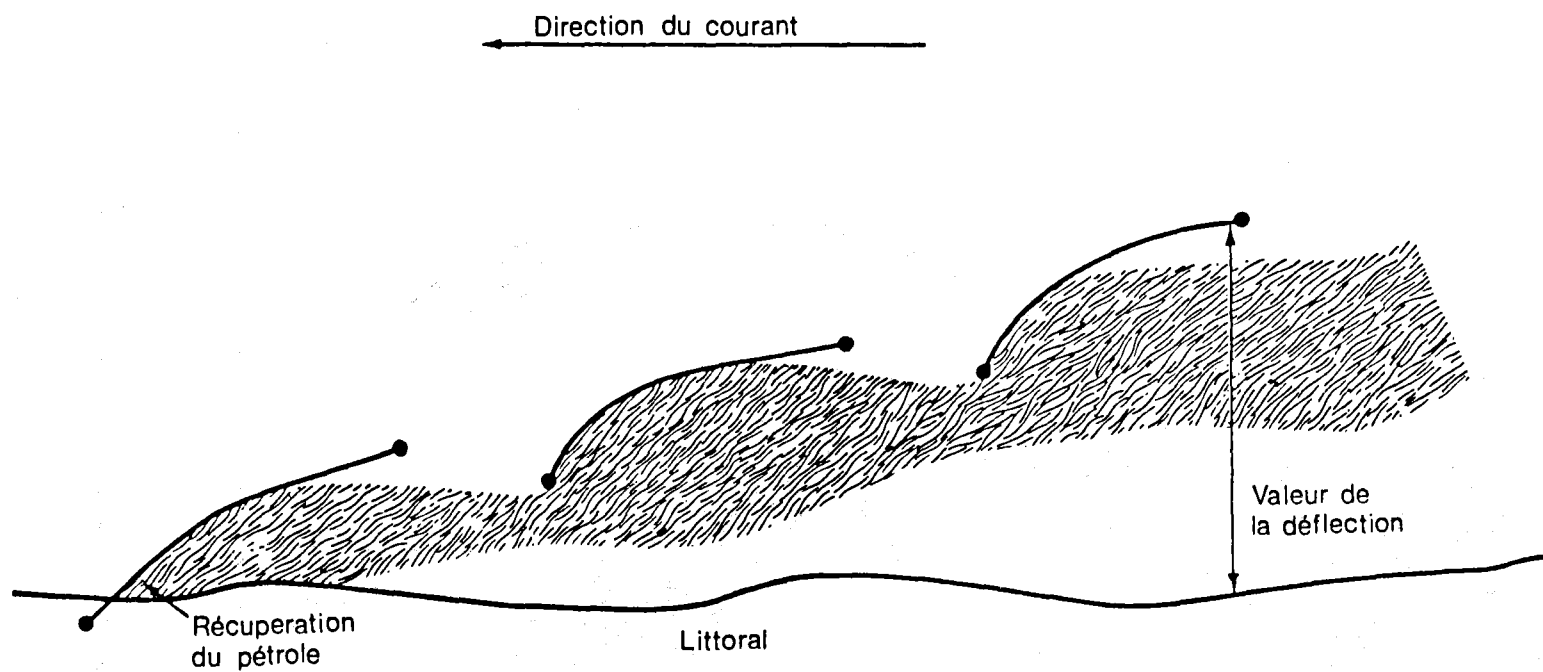


Figure 69: Configuration de mise en place de trois unités de barrières flottantes (déflexion en cascade)

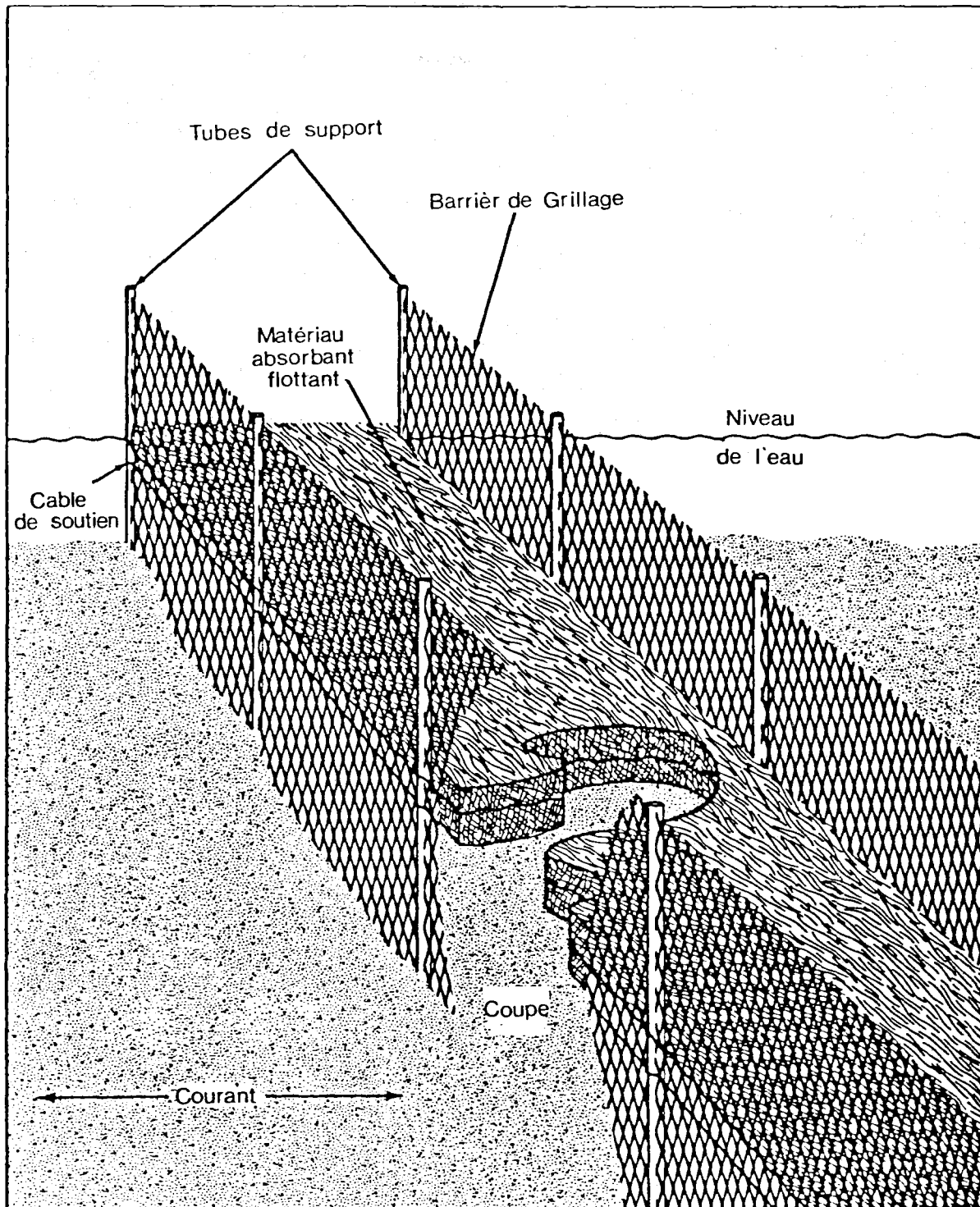


Figure 70: Barrière perméable typique

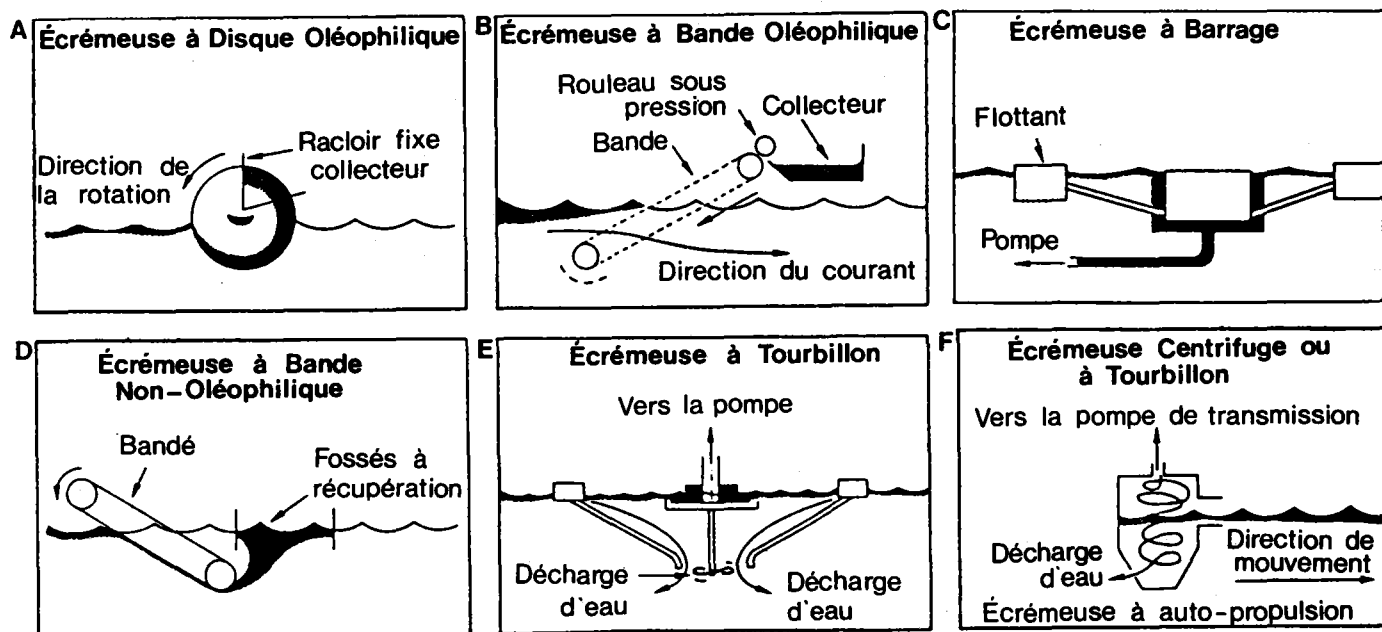


Figure 71: Exemples de différents types d'écumeuses (d'après CONCAWE, 1981)

Méthodes de protection terrestre

Sur les plages, la construction de digues (bermes artificielles) ou de digue/fossé peut empêcher la migration du pétrole dans les zones en retrait de la côte (voir fig. 72). Ceci peut être souhaitable si (a) il existe un marais ou un lagon sensible dans la zone en retrait, ou (b) l'usage des engins de nettoyage en serait facilité. Dans le deuxième cas, la capacité portante pour les véhicules est plus grande sur la partie basse de la plage (au-dessous du niveau normal de marée haute) que sur l'arrière de la plage et il est ainsi préférable d'empêcher le pétrole d'atteindre des zones où les opérations de nettoyage pourraient être plus difficiles et moins efficaces.

Les digues peuvent être construites rapidement avec des engins. Un fossé côté océan de la digue peut faire fonction de collecteur pour le pétrole qui pourra être enlevé à l'aide de seaux ou de pompes (voir fig. 72). Des barrages peuvent être construits en travers des chenaux ou des criques pour empêcher le pétrole d'atteindre des lagons ou des étangs. Dans certains cas (par exemple, lorsque la marée provoque des échanges), il peut être nécessaire d'installer un canal couvert subaquatique pour que ces échanges ne soient pas entravés, tout en empêchant le pétrole de passer par le canal normal (voir fig. 73).

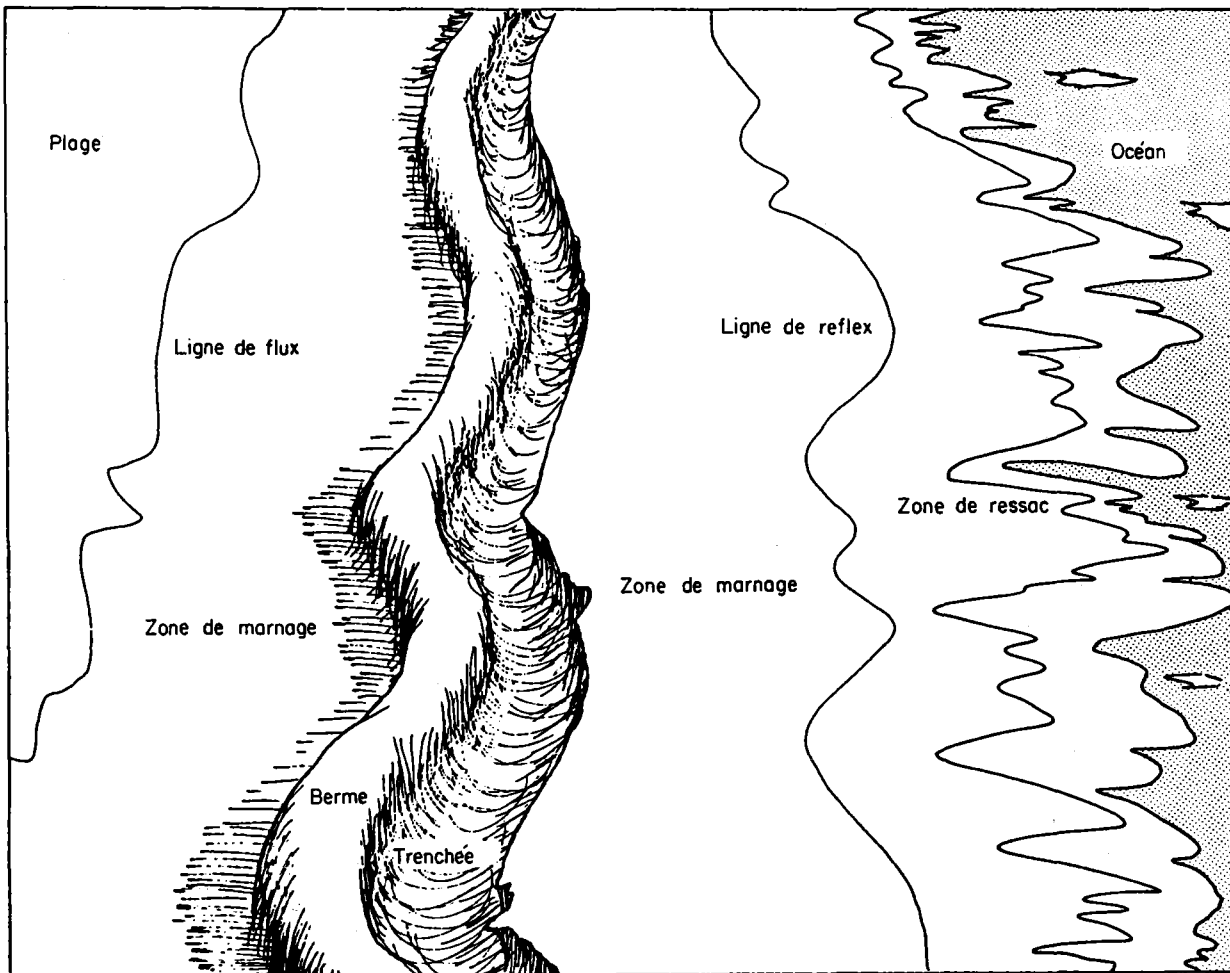


Figure 72: Système de digue et fossé

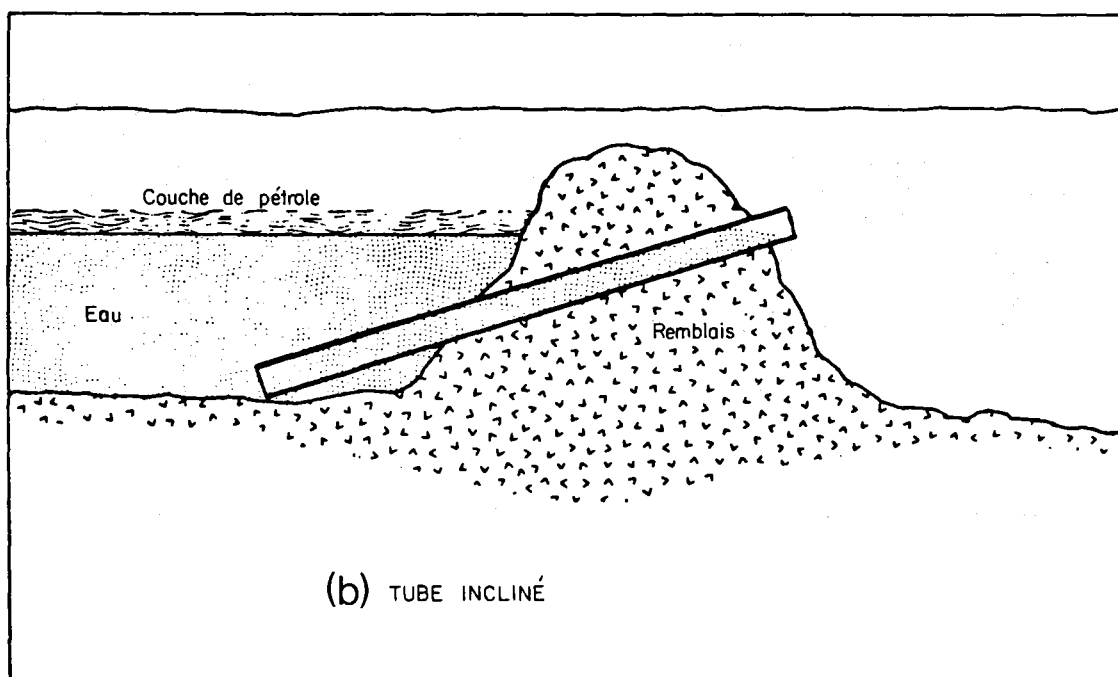
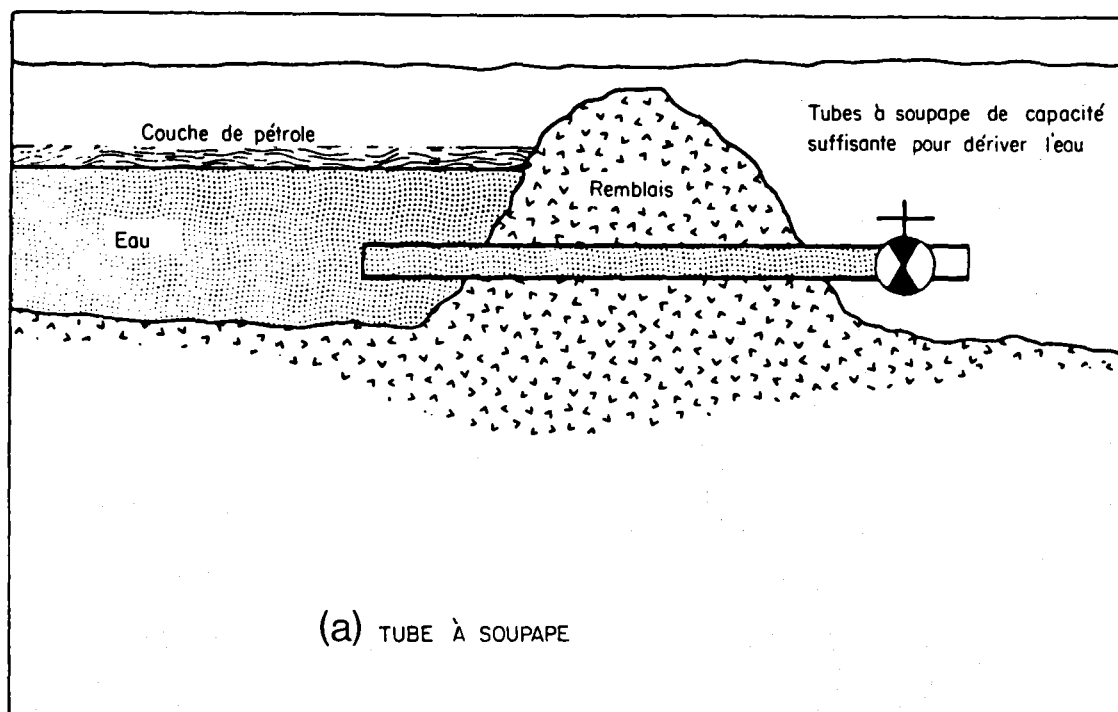


Figure 73: Barrages à dérivation d'eau (a) tube à soupape (b) tube incliné

Priorités de nettoyage à terre

La limitation des ressources (équipement et main d'oeuvre) exige qu'un ordre de priorité soit établi pour le nettoyage du pétrole échoué lorsqu'un retour à la normale par les voies naturelles est inacceptable. Cette sélection des priorités ne peut se faire qu'au moment d'une pollution, lorsque le type, le volume, la distribution du pétrole ainsi que les conditions d'environnement sont connues. Il faut également évaluer le potentiel de succès d'une opération de nettoyage. Si le programme de nettoyage d'une section de la côte ne peut atteindre l'objectif qui lui a été fixé pour des raisons de ressources insuffisantes ou d'autres contraintes, alors la priorité de cette action doit être ré-évaluée.

Méthodes de nettoyage à terre

Une vaste gamme de méthodes et de techniques a été développée pour l'enlèvement, de sédiments contaminés ou de pétrole, des couches variées. Dans le développement de paramètres pour des opérations côtières il y a une distinction fondamentale entre des méthodes mécaniques, qui comprennent l'usage d'une machine d'une manière peu intensive, une machine motorisée telle que l'équipement roule le long du rivage, et des techniques manuelles, dans lesquelles l'enlèvement ou la dispersion physique de pétrole sont manuels ou effectués à l'aide de petites machines (par exemple, une pompe ou un tuyau) d'une manière intensive. Le tableau 12 résume les différentes méthodes de nettoyage à terre et les exigences de main d'oeuvre et de la disposition de matériaux contaminés. Dans le tableau 12 l'efficacité est relative à la quantité de pétrole enlevé, et le rendement est relatif à la vitesse avec laquelle est effectuée l'opération.

Les catégories principales de techniques de nettoyage à terre présentées dans le tableau 13 se précisent ainsi:

- enlèvement et disposition manuels - avec les mains ou à l'aide de pelles, de rateaux, de dissolvants ou des machines opérées à la main;
- dispersion manuelle - en utilisant des tuyaux ou des arrosoirs montés sur le dos (dispersion hydraulique ou chimique);
- enlèvement et disposition motorisés - en utilisant des machines pour enlever le pétrole ou des matériaux contaminés de la zone littorale et les disposer ailleurs;
- dispersion motorisée - comprend des techniques de dispersion hydrauliques ou chimiques (par exemple, en utilisant des machines vaporisateurs, des hélicoptères ou des avions aux ailes fixes);
- nettoyage sédimentaire - les matériaux contaminés sont enlevés soit de manière manuelle soit de manière mécanique, et puis nettoyés par des techniques hydrauliques ou par l'incinération: le matériau nettoyé est alors remis dans la zone littorale;
- enlèvement motorisé in-site - en utilisant des engins pour enlever le pétrole de la plage, avec l'aide d'un tamis, ou en faisant adhérer le pétrole à un matériau oléophile; et
- brassage motorisé - il faut de l'équipement lourd pour briser la couverture de pétrole et pousser le matériel vers la zone de rasage ou mélanger les

Tableau 12: Méthodes de nettoyage des côtes

TECHNIQUE DE NETTOYAGE	DESCRIPTION	USAGE PRINCIPAL DE LA TECHNIQUE	EXIGENCES	EFFETS PHYSIQUES DE L'EMPLOI	EFFETS BIOLOGIQUES DE L'EMPLOI
1 Dragueuses motorisées/racloir élévateur	Les dragueuses forment des andains qui seront enlevés par le racloir élévateur	Utilisées principalement sur les plages de sable et de gravier où la pénétration n'est que de 0 à 3cm et lorsque la traficabilité de la plage est bonne. Peut aussi être utilisée sur les étendues de boue.	Bonne traficabilité; accès pour engins lourds.	Ne retire que 3cm d'épaisseur à la plage.	Enlève les bivalves, les polychaètes, et les amphipods habitant les terriers peu profonds. La recolonisation suivra rapidement le remplacement du substrat.
2 Racloir élévateur	Le racloir recueille directement les matériaux de la plage.	Utilisé sur les plages de sable et de gravier où la pénétration n'est que de 0 à 3cm. Peut aussi être utilisé sur les étendues de boue, utilisé également pour enlever les nodules de goudron ou les morceaux de la surface d'une plage.	Assez bonne ou bonne traficabilité. Accès pour engins lourds.	Retire de 3 à 10cm de la couche supérieure de la plage. Réduction mineure de la stabilité de la plage.	Enlève les polychaètes, les bivalves, et les amphipods habitant des terriers de moyenne profondeur. La stabilité du substrat probablement lente; la recolonisation suivra le remplacement naturel du substrat; le retour de la faune indigène à plus grande longévité peut prendre plusieurs années.
3 Dragueuses motorisées et chargeur frontal	Les dragueuses forment des andains qui seront enlevés par le chargeur frontal.	Utilisées sur les plages de sable et de gravier lorsque la pénétration est inférieure à 2 ou 3cm. Cette méthode est moins rapide que la méthode no.1 mais peut être utilisée lorsqu'on ne dispose pas de racloirs élévateurs. Peut être utilisée également sur les étendues de boue.	Bonne traficabilité, accès pour engins lourds.	Ne retire que 3cm d'épaisseur à la plage.	Enlève les bivalves, les polychaètes, et les amphipods habitant des terriers plus profonds. La recolonisation suivra rapidement le remplacement du substrat.
4 Chargeur frontal à pneus ou tracté	Le chargeur récolte les matériaux directement de la plage et les amène à une zone de dépôt.	Utilisé sur les plages de boue, de sable ou de gravier lorsque la pénétration est modérée et la contamination légère à modérée; les chargeurs frontaux à pneus sont préférables parce que plus rapides et qu'ils évitent un trop grand remaniement de la surface. Meilleur choix pour enlever les galets. Si les chargeurs à pneus ne peuvent être utilisés le chargeur à chenille est la meilleure alternative. Il peut également évacuer la végétation fortement polluée.	Assez bonne ou bonne traficabilité pour les chargeurs à pneus. Accès pour engins lourds.	Enlève 10 à 25cm de la plage. Réduction de la stabilité de la plage. Érosion et recul de la plage.	Enlève presque tout organisme vivant dans la couche supérieure ou profonde. La réstabilisation physique est lente; de nouvelles communautés animales pourraient se développer.
5 Bulldozers, chargeur frontal à pneus	Le bulldozer pousse les matériaux contaminés en tas qui seront repris par le chargeur frontal.	Utilisé sur les plages de sable grossier, de gravier ou de galets, où la pénétration est profonde, la contamination extensive, et la traficabilité mauvaise. Peut aussi être utilisé pour évacuer la végétation fortement polluée.	Accès pour engins lourds. Traficabilité bonne ou assez bonne pour le chargeur frontal	Enlève 15 à 50cm de la plage. Perte de la stabilité de la plage. Érosion importante et recul de la falaise ou de la plage. Inondation des zones en retrait.	Enlève tout organisme vivant. La réstabilisation du substrat et repopulation de la faune indigène extrêmement lente; de nouvelles communautés animales pourraient s'établir dans l'interim.

Tableau 12 (suite)

lle rêtre	Travail de la berge ou de la plage pour enlever les sédiments contaminés et les charger dans un camion.	Utilisée pour enlever les sédiments pollués (principalement les boues ou les vases) sur les berges raides.	Accès pour engins lourds; stabilité du sommet de la berge	Enlève 25 à 50cm de la plage ou de la berge. Réduction importante de la stabilité et retrait de la plage.	Enlève tout organisme vivant. La réstabilisation du substrat et la répopulation de la faune indigène est extrêmement lente; de nouvelles communautés animales pourraient s'établir dans l'intervale.
ergeuse à cable, dragueuse godets	Travail depuis le sommet de la zone contaminée pour enlever les sédiments pollués.	Utilisée sur les plages de sable, de gravier ou de galets où la traficabilité est très faible (par exemple, lorsque les engins à chenilles ne peuvent opérer) lorsque la contamination est extensive.	Accès pour engins lourds à la zone contaminée incluse	Enlève 25 à 50cm de la plage. Importante réduction de la stabilité de la plage. Érosion et retrait de la plage.	Enlève tout organisme vivant. La réstabilisation du substrat et la répopulation de la faune indigène est extrêmement lente; de nouvelles communautés animales pourraient s'établir dans l'intervale.
ncage à haute pression (hydro-explosion)	Des jets d'eau sous pression enlèvent le pétrole du substrat et l'emportent vers une zone de récupération.	Utilisée pour enlever l'enduit de pétrole des galets, des blocs et des constructions; meilleure méthode pour le nettoyage de ce type de surface.	Accès aux véhicules légers. Équipement de récupération	Peut perturber la surface du substrat.	Enlève quelques animaux ou plantes du substrat, les dommages aux organismes vivants qui restent en place sont variables. Le pétrole non-récupéré peut être toxique aux organismes vivants en aval de la zone de nettoyage.
ttoyage à la vapeur	La vapeur enlève le pétrole du substrat d'où il est emporté vers une zone de récupération.	Utilisé pour enlever l'enduit de pétrole des galets, des blocs et des constructions.	Accès aux véhicules légers, équipement de récupération. Adduction d'eau douce	Rechauffe la surface (> 100°C)	Enlève une partie des organismes vivants mais la mortalité due à la chaleur est très élevée. Les coquilles vides qui restent en place peuvent aider à la répopulation. Le pétrole non-récupéré peut être toxique aux organismes vivants en aval de la zone de nettoyage.
blage sous pression	Le sable projeté à grande vitesse, enlève le pétrole du substrat d'où il est emporté vers une zone de récupération.	Utilisée pour enlever un enduit de pétrole mince sur les constructions.	Accès aux véhicules légers; le pétrole doit être semi-solide. Réserve de sable sec	Ajoute des matériaux à l'environnement. Érosion et, en cas de ré-contamination, pénétration plus profonde dans le substrat.	Enlève tous les organismes vivants et les coquillages du substrat. Le pétrole non-récupéré peut être toxique aux organismes vivants en aval de la zone de nettoyage.
clage manuel	Le pétrole est racié à l'aide d'outils manuels.	Utilisé pour enlever le pétrole des blocs, des rochers et des constructions légèrement contaminés ou en cas de forte accumulation lorsque d'autres techniques ne peuvent être utilisées.	Accès pédestre, outils de grattage et récipients de décharge	Enlèvement sélectif des matériaux. Le piétinement peut perturber la couche sédimentaire.	Enlève quelques organismes vivants du substrat en écrasé d'autres. Le pétrole non-récupéré peut être toxique aux organismes réoccupant le substrat rocheux ou vivant dans les sédiments en aval de la zone de nettoyage.

Tableau 12 (suite)

TECHNIQUES DE NETTOYAGE	DESCRIPTION	USAGE PRINCIPAL DE LA TECHNIQUE	EXIGENCES	EFFETS PHYSIQUES DE L'EMPLOI	EFFETS BIOLOGIQUES DE L'EMPLOI
Fosse et pompe à vide	Le pétrole se rassemble dans la fosse en suivant le courant longent la plage et est récupéré avec une pompe ou un camion-pompe.	Utilisé sur les plages de sable ou de boue fermes en cas de pollution s'étendant dans le temps lorsque les courants côtiers sont présents et sur les cours d'eau en conjonction avec les barrières flottantes de diversion.	Accès pour engins lourds, présence d'un courant côtier	Exige l'excavation sur la plage d'une fosse de 60 à 120 cm de profondeur. Il subsistara probablement du pétrole sur la plage.	Enlève les organismes vivants au site de la fosse. Les effets toxiques potentiels du pétrole subsistent dans la fosse. La récupération du pétrole dépend de la persistance du pétrole dans la fosse.
Enlèvement manuel des matériaux contaminés	Les sédiments et débris sont enlevés à l'aide de pelles, râteaux, brouettes etc.	Utilisé sur les plages de boue, de sable, de gravier et de galets lorsque la contamination est faible ou sporadique et que la pénétration est faible, ou sur les plages où l'accès d'engins lourds n'est pas possible.	Accès pédestre ou pour véhicules légers	Enlève 30 cm au moins de la plage. Méthode sélective. Risque de perturbation et d'érosion.	Enlève et perturbe les organismes vivants à faible profondeur.
Nettoyage à basse pression	Un jet d'eau à faible pression enlève le pétrole du substrat et l'exporte vers une zone de récupération.	Utilisé pour rincer les pétroles légers non-adhérents de substrats légèrement contaminés: boues, graviers, galets, blocs, rochers, construction et végétation.	Accès pour véhicules légers, équipement de récupération.	Ne perturbe que très peu les surfaces. Risque de récontamination.	Laisse la plus grande partie des organismes vivants et en place. Le pétrole non-récupéré peut être toxique aux organismes vivants en aval de la zone de nettoyage.
Engin de nettoyage de plage	Tracteur ou auto motrice ramasse les modules et les morceaux de goudron.	Utilisé sur les plages de sable ou de gravier peu contaminées par du pétrole sous forme de modules ou de morceaux de goudron.	Accès aux véhicules moyens ou lourds. Bonne traçabilité	Perturbe les 5 à 10 cm supérieurs de la plage.	Perturbe les organismes vivants à faible profondeur.
Application manuelle de matériaux absorbants	Les matériaux absorbants sont déposés aux zones polluées pour absorber le pétrole.	Utilisé pour éliminer les flaques de pétrole léger et non-adhérent de la boue, des blocs, des rochers et des constructions.	Accès pédestre, récipients de décharge des matériaux absorbants	Enlèvement sélectif des matériaux, le piétinement peut perturber les végétaux.	Le piétinement peut écraser les organismes vivants. Ingestion possible des matériaux absorbants par les oiseaux et les petits animaux.
Enlèvement manuel	La végétation contaminée est coupée à la main, ramassée et déposée dans des sacs ou des récipients pour décharge.	Utilisée sur la végétation contaminée.	Accès pédestre ou par la mer. Outils de ramassage	Perturbe la couche végétale du littoral; piétinement; peut provoquer une érosion.	Enlève et écrase des organismes vivants. Nécessite une attention soignée. Le défillement des dommages aux racines et ralentit le processus de récupération.
Inclinaison	On met le feu à la limite au vent de la zone contaminée et on contrôle l'incendie jusqu'à la limite sous le vent.	Utilisée sur tout substrat où végétation lorsque le pétrole est inflammable, que la quantité est suffisante pour alimenter la combustion et que les règlements concernant la pollution de l'air le permettent.	Accès aux véhicules légers ou par la mer. Matériel de contrôle de feu.	Provoque une pollution de l'air importante, réchauffe le substrat, peut provoquer une érosion si le système racinaire est endommagé.	Tue les organismes vivants de la zone incendiée. Les matériaux résiduels peuvent être légèrement toxiques (métaux lourds).
Camions-pompes	Le camion est amené à la fosse de récupération où le pétrole est prélevé par le tuyau d'aspiration.	Utilisés pour récolter le pétrole sur les côtes lorsque des flaques se sont formées dans les dépressions naturelles ou pour récupérer le pétrole flottant à la surface de l'eau en l'absence d'écrans.	Accès pour engins lourds, flaques suffisamment grandes à terre ou épaisseur suffisante en mer pour assurer l'efficacité de la technique	Il peut rester du pétrole sur le littoral ou à la surface de l'eau.	Enlève quelques organismes vivants. Risque d'effets toxiques à long terme associés à la présence de restes de pétrole dans le littoral. La récupération dépend de la persistance du pétrole laissé dans les flaques.
Déplacement dans la zone de ressac	Le bulldozer pousse le substrat contaminé dans la zone de ressac pour accélérer le nettoyage naturel.	Utilisé pour les plages de sables contaminées et les plages de gravier légèrement contaminées lorsque l'enlèvement des sédiments causerait une érosion de la zone en retrait.	Accès pour engins lourds. Côte à haut niveau d'énergie.	Perturbation de la couche superficielle du substrat; laisse un peu de pétrole dans la zone de marnage. Risque de récontamination.	Tue la plus grande partie des organismes vivants peuplant le substrat non-contaminé. La récupération sera habituellement plus rapide qu'en cas d'enlèvement du substrat.
Fragmentation du revêtement	Un tracteur attelé d'une défonceuse laboure la plage.	Utilisé sur les plages de sable, de gravier ou de galets où le pétrole est présent. L'enlèvement du substrat causerait une érosion; ou lorsqu'une couche épaisse de pétrole a formé un revêtement dur à la surface de la plage.	Accès pour engins lourds. Côte à haut niveau d'énergie	Perturbation des sédiments, laisse le pétrole en place.	Perturbe les organismes vivants à faible profondeur et à profondeur importante.
Abourrage	Un tracteur attelé d'une charnue laboure la région contaminée.	Utilisé sur les plages de sable ou de gravier n'ayant pas d'usage récréatif et légèrement contaminées.	Accès pour engins lourds. Accessibilité bonne ou moyenne. Côte à haut niveau d'énergie.	Laisse le pétrole enfoui dans le sable. Perturbe la couche supérieure du substrat.	Perturbe les organismes vivants à faible profondeur. Effets toxiques possibles dus au pétrole enfoui.
Récupération naturelle	Aucune action, le pétrole se dégrade naturellement.	Utilisé dans les cas de pollution sur les plages à haut niveau d'énergie (principalement de blocs et rochers) où l'action des vagues enlèvera la nappe polluante en peu de temps.	Côte exposée à haute niveau d'énergie	Une partie du pétrole peut rester sur la plage et contaminer des zones éloignées.	Risques d'effets toxiques et d'enrobage par le pétrole. Risque d'incorporation du pétrole dans la chaîne alimentaire. Suppression de zone d'habitat si les organismes vivants ne peuvent coloniser le pétrole résiduel.

Tableau 13: Classement des méthodes de nettoyage des côtes

Méthodes	Exigences en main d'oeuvre	Exigences en moyens de décharge	Efficacité/Rendement
1 enlèvement et décharge manuels	beaucoup de main d'oeuvre	possibilité de décharge nécessaire	efficace mais méthode générale- ment lente
2 dispersion manuelle	beaucoup de main d'oeuvre	quelques possibilités de décharge si des techniques manuelles sont utilisées	habituellement efficace mais méthode généralement lente
3 enlèvement et décharge motorisés	peu de main d'oeuvre	problème de grand volume de décharge	efficace et rapide
4 dispersion motorisée	peu de main d'oeuvre	pas de décharge nécessaire	habituellement efficace et rapide
5 nettoyage des sédiments	peu de main d'oeuvre si enlèvement motorisé	peu d'exigence de décharge	bon rendement mais un peu lent
6 enlèvement motorisé in-situ	peu de main d'oeuvre	peu d'exigence de décharge	bon rendement mais un peu lent
7 brassage motorisé	peu de main d'oeuvre	aucune exigence de décharge	rapide mais ne nettoie pas les sédiments

Ces techniques sont résumées dans le tableau 12 (voir Fouget et autres, 1979, pour une analyse plus détaillée de ces techniques et de leurs applications). Les techniques de brassage (20, 21 et 22 sur le tableau 12) peuvent être utilisées pour favoriser la dégradation naturelle du pétrole, soit en exposant une plus grande surface du pétrole en utilisant des machines comme source d'énergie mécanique, soit en déplaçant le pétrole et les sédiments contaminés dans la zone de ressac. On utilise ces techniques lorsque l'enlèvement du pétrole et des sédiments contaminés n'est pas exigé.

Une discussion sur l'usage des engins de nettoyage de plages (numéro 15, tableau 12) est donnée dans une section suivante du document. Si la contamination des plages est importante, l'usage d'équipement lourd est plus efficace et donne un meilleur rendement que l'enlèvement manuel. Le nettoyage manuel est efficace si (a) la pollution est légère ou discontinue (b) le matériel lourd ne peut pas être utilisé, ou (c) pour enlever la pollution résiduelle après une opération de nettoyage mécanique. Le nettoyage des marais exige une approche différente que celle appliquée à d'autres types de côtes. Les techniques applicables sont indiquées dans le tableau 14 et d'autres informations sur le nettoyage des marais et des mangliers sont données par Maiero et autres (1978).

Tableau 14: Techniques de nettoyage des marais

Techniques de nettoyage du marais	Situation adéquate pour l'usage	Équipement nécessaire	Impact de la technique sur l'environnement
Rinçage à basse pression	Meilleure méthode à utiliser dans les chenaux étroits, autour des touffes de plantes et d'arbres sur la végétation, le long des rives et des côtes	Petite embarcation pompe à essence tuyaux d'arrivée et d'évacuation*, réservoir portatif, barrière flottante à rideau légère	Impact minimal: quelques plantes écrasées si le rinçage est fait du rivage
Absorbants, en vrac, en plaque ou rouleaux	Absorbants en vrac: à utiliser dans les chenaux étroits, ou à faible courant	Barils vides pour le stockage des matériaux récupérés, un aspirateur industriel ou des filets pour repêcher les matériaux à la dérive - peuvent être rassemblés à l'aide d'un jet d'eau	Les absorbants en vrac sont difficiles à récupérer et peuvent écraser la végétation
Écumeuse oléophile à bande continue	Meilleure méthode: à utiliser dans les chenaux ouverts ou dans les marais lorsque la nappe est libre; en amont des barrières flottantes; et le long des rives du marais	Système oléophile, réservoir portatif pour le pétrole récupéré, poulies	Impact minimal
Fauchage et évacuation de la végétation (à n'utiliser qu'avec la méthode de rinçage - n'enlève pas le pétrole des plantes*)	Fauchage à la main sur la végétation des petits chenaux Fauchage mécanique le long des rives des chenaux ou de la côte	Fauchage à la main, ciseaux, déboussailleuses mécaniques ou faucilles; fauchage mécanique, faucheuses	Endommagement la surface du marais, le piétinement endommage les plantes
Incinération	À utiliser dans les grandes zones polluées; possible lorsque le pétrole est inflammable. Adéquate lorsque le marais est irréparablement endommagé	Lances-flammes portatifs au propane ou incinérateurs	Pollution considérable de l'air par la fumée; peut se propager à des zones non-contaminées
Enlèvement du sol et de la végétation	À utiliser lorsque des hydrocarbures toxiques et persistants ont profondément contaminé le substrat	Dragueuse, dragueux à câble, suceuse, dragueuse à godet, chargeur frontal, pelle rétro, bulldozer	Impact important, détruit la zone traitée, exige une remise en état complète ultérieure

* Pour utilisation sur les marais herbeux seulement

Les facteurs à considérer en préparant une opération de nettoyage de côte comprennent:

- persistance estimée du pétrole;
- enfouissement ou pénétration du pétrole;
- accès à la zone polluée;
- traficabilité des sédiments;
- disponibilité de l'équipement et de la main d'oeuvre; et
- situation des sites de décharge temporaires et permanentes.

L'usage des détergents n'est pas recommandé principalement du fait que le pétrole additionne les agents tension-actifs, s'il ne lèse pas le biotope de la zone littorale, il peut avoir un effet adverse sur la faune et la flore de la zone marine proche.

Enlèvement manuel des matériaux contaminés

L'enlèvement manuel est utilisé sur les plages de boue, de sable, de gravier et de galets lorsque la contamination est légère ou discontinue et l'enfouissement faible, ou lorsque les engins lourds ne peuvent accéder. L'enlèvement manuel peut également être utilisé lorsque l'usage d'engins lourds serait dommageable à l'environnement.

L'équipement nécessaire à ce travail comprend des rateaux, des pelles, des racloirs à manche, des sacs de plastiques et de toile, des seaux et des barils. La végétation contaminée, les débris et les sédiments sont récoltés par des manoeuvres et mis en sacs pour enlèvement et décharge (voir fig. 74). Les surveillants devraient être en charge de plusieurs équipes de travailleurs, chaque équipe ayant son chef d'équipe. Les procédures d'enlèvement sont les suivantes:

- porter des gants de protection, des bottes et une crème protectrice sur les mains;
- couper et/ou rassembler les matériaux contaminés en petits tas;
- ne pas ratisser la végétation;
- remplir à demi des sacs de plastique ^{1/} ou de toile des matériaux entassés;
- rassembler les sacs pleins sur des feuilles de plastique au-dessus du niveau de flux;
- les sacs peuvent être évacués à la main, avec un véhicule, par exemple, par hélicoptère ou chargés sur de petits bateaux ou des péniches depuis la côte ou des docks de fortune.

^{1/} épaisseur recommandée des sacs: 0.0254mm (opaque)
taille recommandée des sacs : hauteur 91cm
: largeur 46 - 61cm.

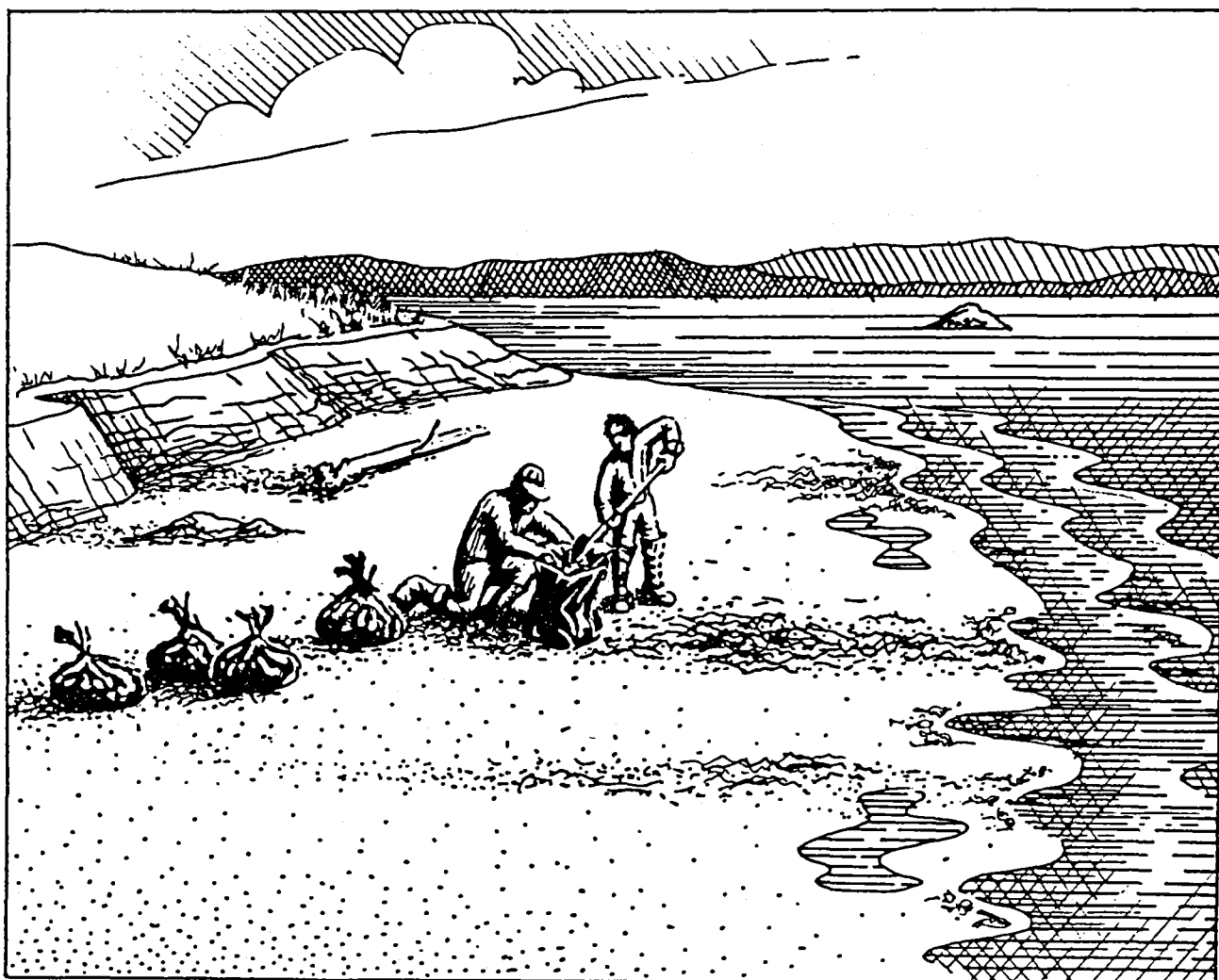


Figure 74: L'enlèvement du pétrole et des sédiments contaminés à l'aide de pelles et de sacs de plastique

L'allure du nettoyage manuel d'une zone côtière dépend du nombre des travailleurs, de leur productivité, de la méthode d'enlèvement des matériaux contaminés et du degré de contamination. Lorsque une côte est polluée sporadiquement elle sera plus rapidement nettoyée qu'une côte fortement contaminée. Plus la main d'oeuvre est nombreuse, plus rapidement la zone sera nettoyée. L'enlèvement des matériaux collectés par hélicoptère, bateau ou véhicule est rapide et efficace, alors que l'enlèvement manuel des matériaux collectés est très lent et demande beaucoup de main d'oeuvre.

Machines de nettoyage des plages et des nodules de goudron

Les nodules de goudron sont communs sur les plages de la région est-africaine (fig. 75). Plusieurs machines ont été développées et essayées pour enlever les nodules de goudron des plages de sable. Le "Brighton Beach Cleaner" de Massey-Fergusson utilise un tamis conique rotatif tracté avec tamis interchangeables d'ouverture différentes (Nightingale 1973). Le "Beemer Beach Cleaner" est un système tracté qui consiste en un convoyeur à barre et un tamis vibrant à barre pouvant recevoir deux tamis à barres interchangeables de tailles différentes (Nightingale 1974). Une troisième méthode, développée par le laboratoire Warren Spring au Royaume Uni utilise des disques grossièrement dentés pour récolter les nodules de goudron (Wardley-Smith, 1976, page 188).

Les développements récents en matière d'équipement portent sur des essais utilisant (i) une roue à vis (le système de Caltrop), (ii) une chaîne sans fin et (iii) un disque (Russel et autres, 1979). Une machine utilisée actuellement aux Bermudes pour enlever les nodules de goudron et les déchets des plages touristiques utilise le principe du tamis. Pour de faibles quantités de nodules de goudrons, un rateau finement denté peut être adéquate pour nettoyer manuellement une petite section de plage.



Figure 75: Nodules de goudron, Long Bay (Chancery Lane), Barbados

Méthodes de décharge

Des zones de stockage temporaire devraient être disponibles à proximité de la zone en cours de nettoyage. Des puits doublés sont une méthode simple et peu coûteuse de stockage des liquides. Des puits longs et étroits sont plus faciles à mettre en oeuvre et sont plus pratiques que des puits larges. Si des puits ne peuvent être excavés, on peut élever des bermes ou des digues qui devront également être doublées. Les matériaux solides peuvent être stockés à la surface, mais lorsque c'est possible la zone de dépôt devrait être protégée et entourée d'une digue basse (fig. 76). La séparation de l'huile et de l'eau peut être réalisée sur le chantier pour de petites quantités de pétrole avec des barils de pétrole ou des bassins de décantation (fig. 77) afin de réduire le volume des matériaux transportés pour séparation. La décharge permanente est influencé par:

(a) les techniques de récupération du pétrole:

- séparation pétrole/eau;
- décomposition de l'émulsion;
- lessivage des solides;
- procédé thermique; et
- procédé de raffinage.

(b) stabilisation

- utilisation pour la construction de voutes; et
- remblais ou enfouissement.

(c) destruction

- incinération (soit sur le site ou suite à un stockage temporaire); et
- dégradation biologique (par compostage).

L'efficacité d'une opération de nettoyage dépend de l'évacuation de pétrole, des sédiments et des débris contaminés sur des sites de décharge temporaires ou permanents, ce qui requiert la disponibilité de moyens de transport adéquate (péniches, réservoirs, camions, etc) et la mise sur pied d'un système logistique bien organisé.

Dommages potentiels du nettoyage

L'enlèvement des sédiments de la côte réduit le volume des matériaux de la place ce qui, lorsque le taux de remplacement par le transport de sédiment est lent, peut conduire à un retrait de plage (Owens et Drapeau, 1973). Pour éviter cet inconvénient, l'opération de nettoyage doit tendre à enlever aussi peu de sédiments de la plage que possible. La connaissance du taux de remplacement des sédiments naturels est nécessaire pour les décisions concernant l'enlèvement dans les cas où il implique plus que la couche de surface contaminée. Cette procédure implique habituellement l'opinion d'un géologue spécialiste des problèmes côtiers ou d'un ingénieur. Le taux de remplacement des sédiments de la taille du gravier ou des galets est généralement extrêmement lent. La récupération naturelle de ce type de plage est peu probable si les sédiments sont enlevés. Les dommages (érosion) dû à l'enlèvement de sédiments est particulièrement inquiétant dans les îles de la région étudiée du fait que les sources de matériaux sédimentaires de remplacement sont limitées.

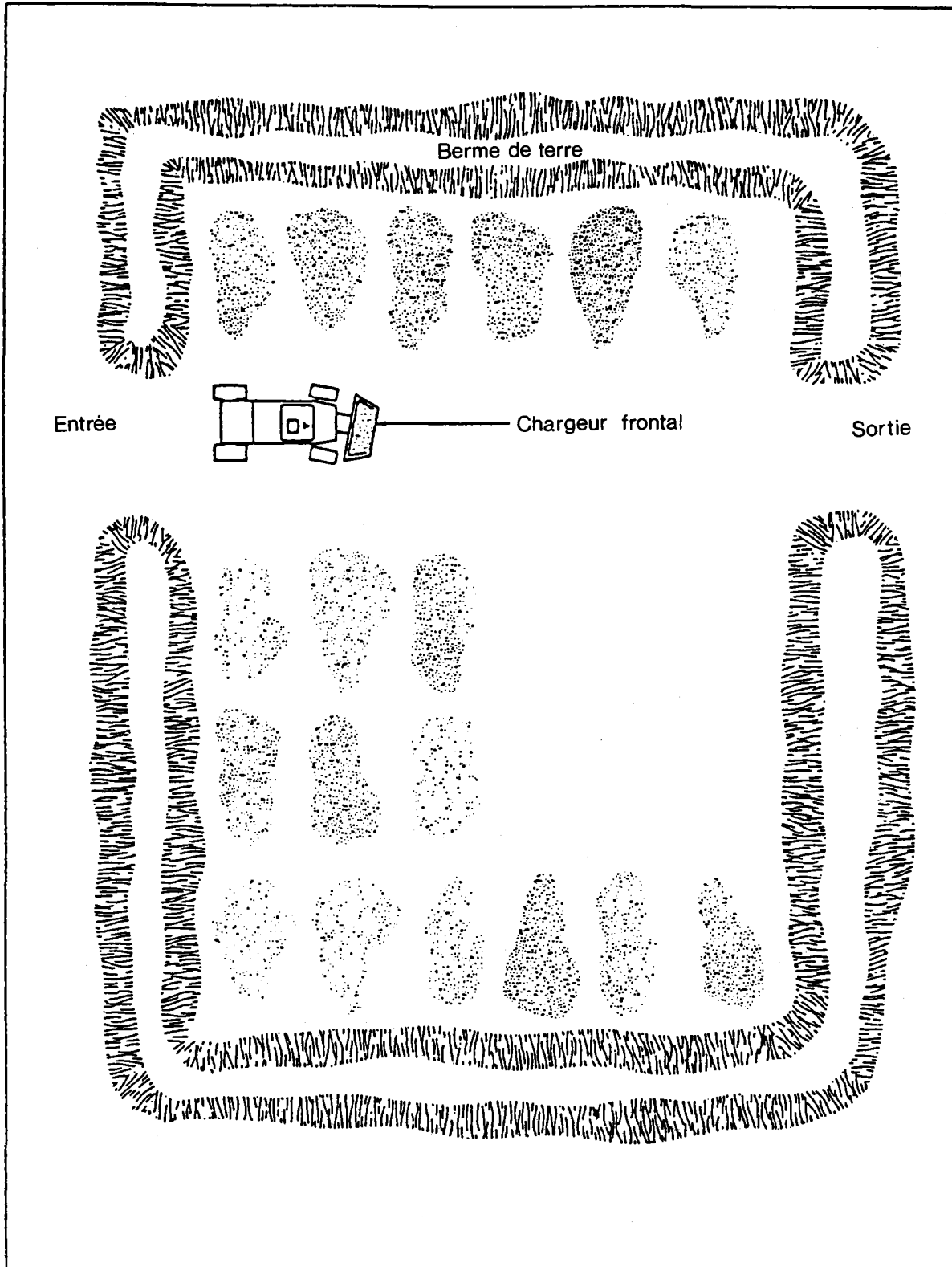
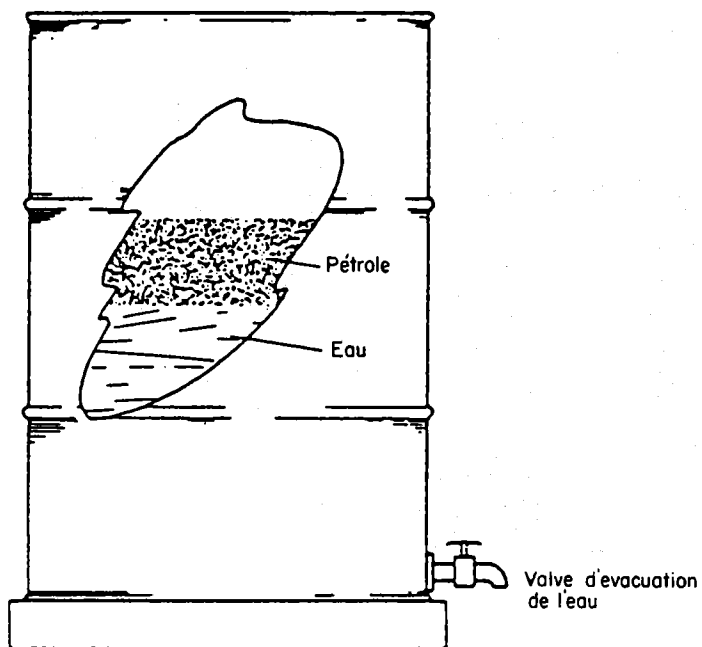
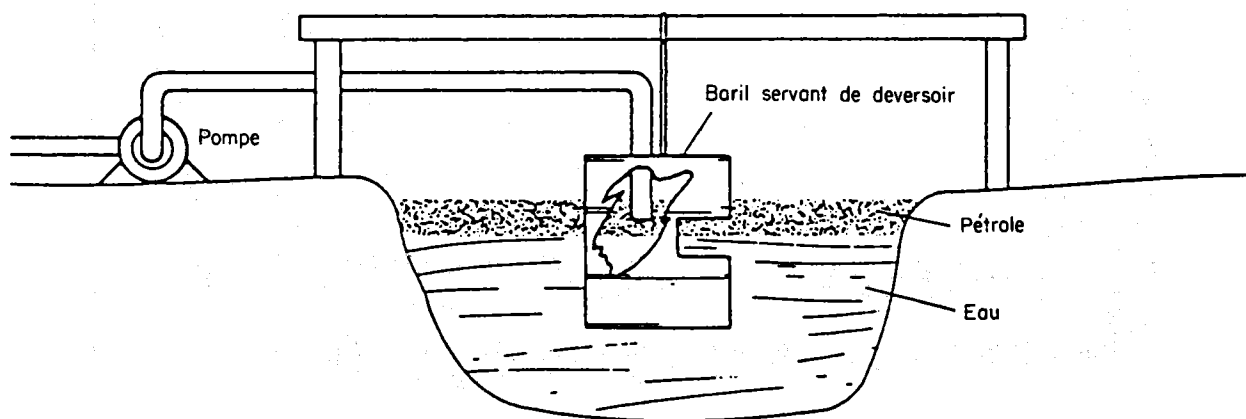


Figure 76: Proposition de configuration d'un site de stockage temporaire



A. Separateur eau/petrole dans un baril de 55 gallons



B. Baril de 55 gallons et fosse de separation eau/petrole

Figure 77: Techniques de séparation eau/pétrole in-situ

Au niveau local, l'identification de la direction de migration et des zones d'accumulation sera d'un grand secours pour la mise sur pied des stratégies de nettoyage. Par exemple, en utilisant des barrières flottantes de diversion pour amener le pétrole sur des plages où l'enlèvement de sédiments ne causera pas d'érosion littorale (voir fig. 69).

La végétation de surface (dunes, mangliers et marais) peut être gravement perturbée par les déplacements incontrôlés de l'équipement ou du personnel. Si l'accès à la côte traverse des zones vertes, les accès seront limités à quelques uns, et si c'est possible, une couverture de surface, telle que des tapis, à la fois pour améliorer la traction et réduire les dommages. Dans les systèmes de dunes et de marais, le dommage est le plus sévère quand le système racinaire des plantes a été perturbé. De l'information supplémentaire relative au nettoyage par différentes techniques correctives est donné pour (a) les plages et les côtes rocheuses par Foget et autres (1979), et (b) pour les mangliers et marais par Maiero et autres (1978).

Accessibilité logistique

Les mouvements de l'équipement, du personnel et du pétrole ou des matériaux contaminés entraînent des contraintes de logistique majeures dans la plupart des endroits. Pour le choix des techniques de nettoyage, il faut considérer les aspects suivants: le stockage, le transport et la décharge ultime des matériaux collectés. Les opérations d'enlèvement de grande envergure devraient probablement être limitées aux endroits voisins des voutes, où l'accès des véhicules à la plage est possible. Les catégories en matière d'accessibilité définies dans le tableau 15 représentent les facteurs primaires devant être considérés lors de la planification de l'opération de nettoyage d'un site donné. Dans le cas d'un accès par les terres la construction de voutes d'accès pour l'équipement lourd ou les véhicules légers devrait être considéré.

Tableau 15: Accessibilité de la côte

ACCES ROUTIER

- A.1 Accès pour des véhicules lourds (y compris des camions) par les routes ou les sentiers vers la zone côtière.
- A.2 Conditions favorables à la construction d'accès A1.
- A.3 Accès direct pour des véhicules légers (petits camions) par les sentiers.
- A.4 Accès pédestre par les sentiers.
- A.5 Zone côtière inaccessible par les routes.

ACCES COTIER

- B.1 Accès côtier facile pour des bateaux ou des péniches transportant de l'équipement léger ou lourd.
- B.2 Accès à travers de l'eau peu profonde, pour des petits bateaux seulement; accès pédestre.
- B.3 Accès bouché, inaccessible de la mer.

ACCES AERIEN

- C.1 Côte plate convenable pour des avions capables de décollage et d'atterrissages rapides.
- C.2 Endroit plat pour accès par hélicoptère.
- C.3 Accès aérien impossible.

(Note: dans certains cas, une combinaison de paramètres d'accès est possible).

Contraintes opérationnelles

(Note: LA SECURITE DES PERSONNES EST UN PREREQUIS LORS DES MESURES CORRECTIVES DE POLLUTION PAR LE PETROLE)

Climat

Des températures élevées, des vitesses de vent élevées, ou des conditions de tempête imposent des contraintes tant à l'équipement qu'au personnel.

Accessibilité

L'absence d'apportements au voisinage des sites d'action peut obliger le déploiement de l'équipement et du personnel. Les zones littorales non-cartographiées peuvent limiter les mouvements par la mer. Les cartes périmées des zones côtières peuvent être à l'origine de préoccupations des zones où la ligne de côte change rapidement.

Ressources

La disponibilité de la main d'oeuvre et de l'équipement; l'envergure des opérations correctives. Les moyens de transport pour l'équipement et le personnel (maritimes ou terrestres) peuvent limiter le déplacement des ressources entre, et à l'intérieur des zones d'opération.

Stratégie de lutte anti-pollution

La planification de la lutte en cas de pollution imprévue comprend:

- la reconnaissance des sources potentielles de pollution ;
- l'identification des dommages probables;
- l'identification des particularités de l'environnement caractérisant la zone;
- l'organisation d'une équipe de lutte en termes de co-ordination détachée et de responsabilités.

La mise en oeuvre d'une stratégie de nettoyage exige au préalable:

- la connaissance de la localisation, de la dérive, de la quantité et du type du pétrole;
- une évaluation de l'impact potentiel du pétrole (sur les activités humaines comme sur les ressources biologiques);
- une infrastructure de communications et un support logistique conçus pour la lutte contre les nappes polluantes.

La définition des sites où l'impact potentiel du pétrole serait important permet la mobilisation des ressources de protection. Le plus souvent ces décisions ne peuvent être prises avant le déversement de la nappe ni avant une campagne de reconnaissance. Les études et les inventaires antérieurs à toute pollution fournissent des informations utiles au processus de prise de décision. Habituellement, au moment d'une pollution, les ressources sont insuffisantes et le temps trop court pour entreprendre la récolte de ces données.

Le plus souvent le nettoyage d'une section de côte est de peu d'intérêt avant que tout danger de pollution ou de recontamination ne soit écarté car on pourrait être amené à nettoyer cette même section à plusieurs reprises. Sur les plages il est préférable d'enlever la nappe échouée ou les sédiments contaminés lorsqu'il y a la possibilité que le pétrole puisse être enfoui par le remaniement naturel de la plage, ou puisse être ré-empporté et contaminer les côtes adjacentes.

La plus grande partie du pétrole est récupérée au début des opérations de lutte (fig. 78). Avec le temps, les difficultés de nettoyage et les coûts augmentent (fig. 79). La sélection des techniques appropriées et la supervision attentive de la mise en oeuvre de la lutte anti-pollution sont essentielles pour éviter des dommages plus grands que ceux causés par le pétrole seul.

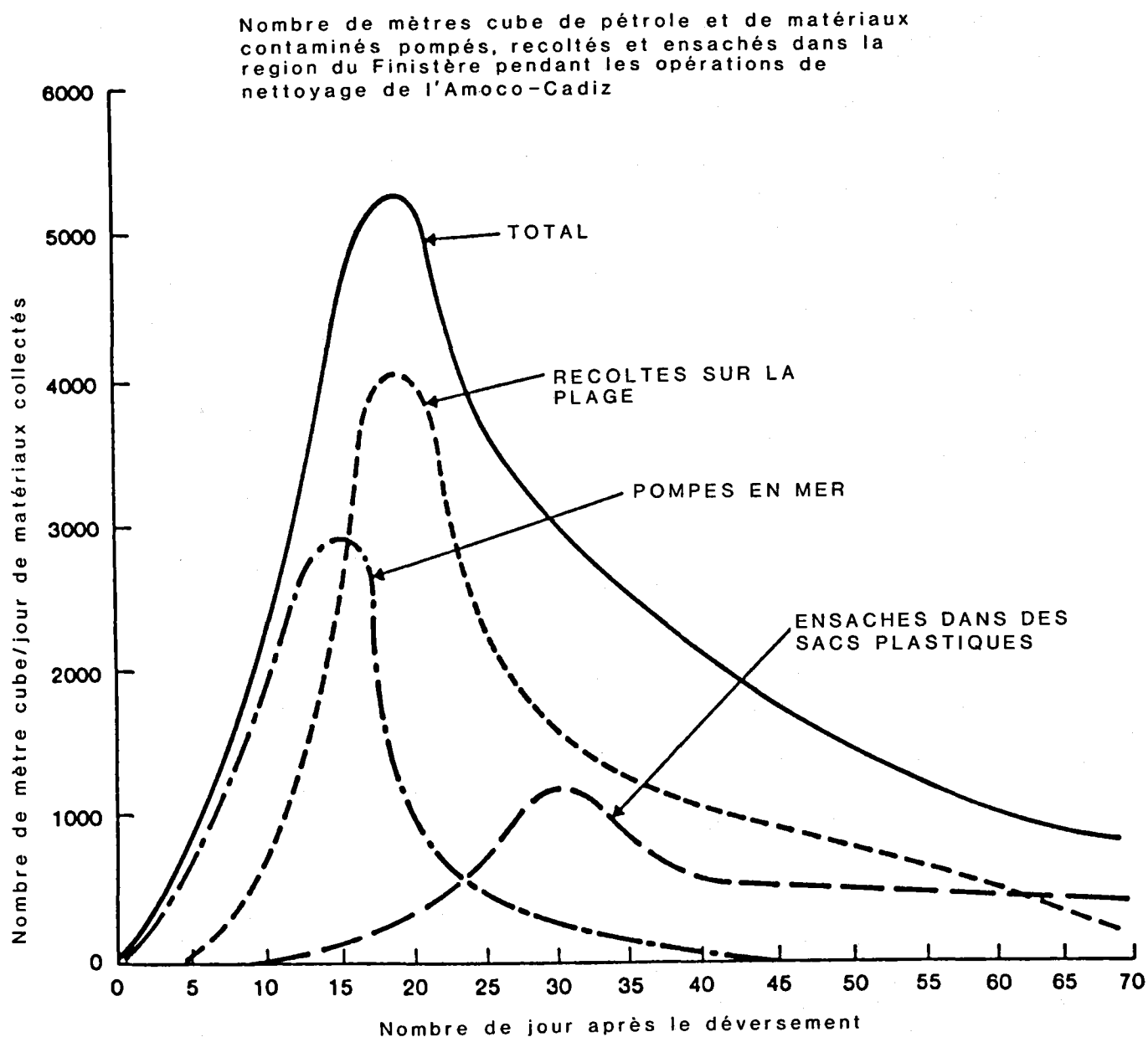


Figure 78: Opération de nettoyage de l'AMOCO CADIZ (d'après Exxon, 1979)

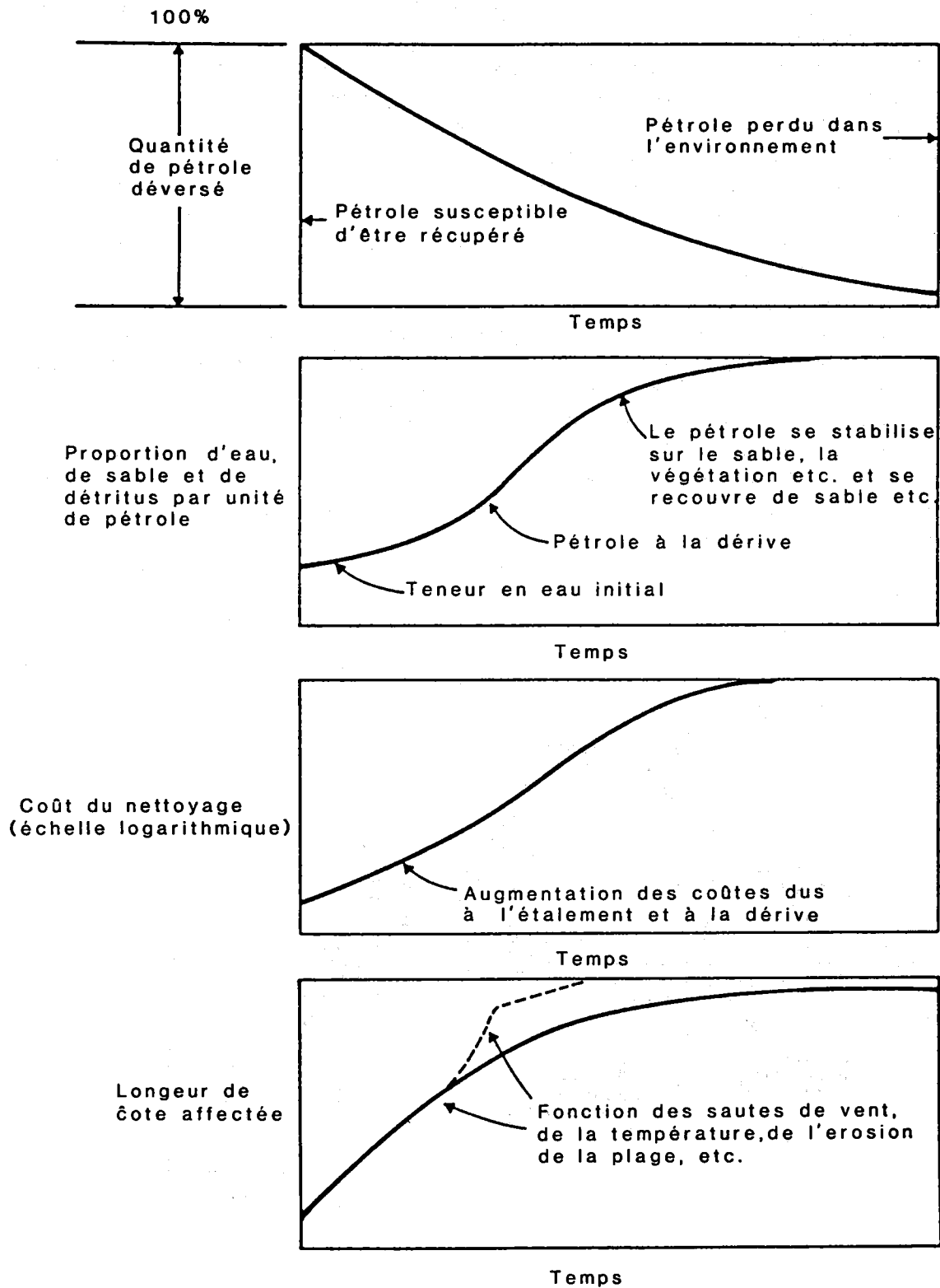


Figure 79: Effets du retard (d'après Exxon, 1979)

Sur les plages l'objectif de l'opération doit être d'enlever le minimum de sédiments non-contaminés. Une grande prudence doit être exercée dans les zones de mangliers et de marais. Les opérations de nettoyage peuvent causer des dommages importants au système écologique alors que le pétrole seul pourrait avoir un impact plus faible et que le système peut avoir un potentiel de récupération élevé. Dans les zones de mangliers et de marais, tout trafic doit être évité lorsque c'est possible. L'accès par terre aux zones de nettoyage doit être contrôlé pour éviter les dommages à la végétation (par exemple, dans les dunes). Les sites de stockage ou de décharge temporaires devraient être proche de la zone de nettoyage et conçus pour prévenir les fuites ou débordements.

Les décisions appropriées pour la protection et le nettoyage devant être prises au moment d'une pollution, il n'y a pas de règles ou de réponses pré-établies. Une opération de lutte anti-pollution exige une série de décisions séquentielles déterminant la démarche la plus appropriée pour une section de côte (fig. 80). Les objectifs d'une planification antérieure à la pollution sont (a) mettre sur pied une organisation de lutte (b) localiser les ressources disponibles (c) former du personnel et (d) récolter et classer les données qui changent peu dans le temps.

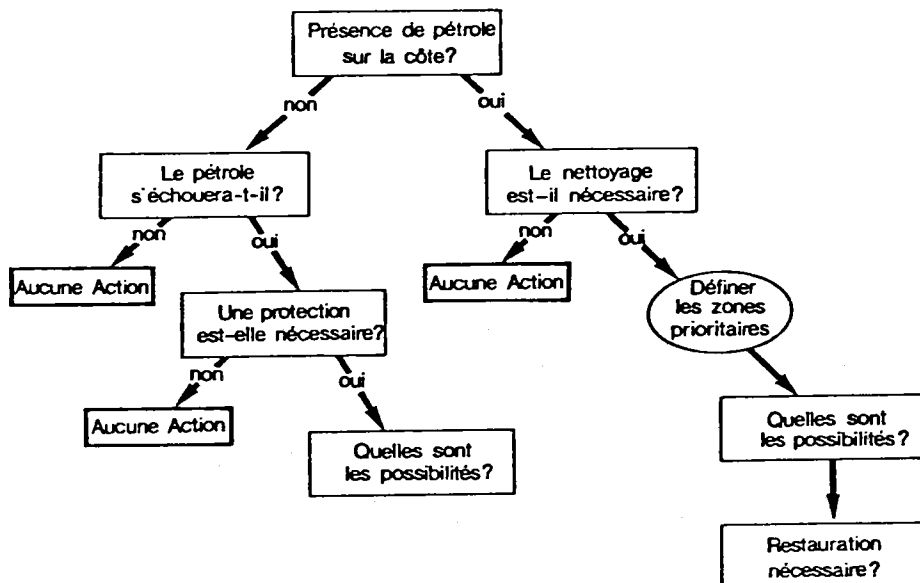


Figure 80: Arbre de décision pour l'établissement d'une stratégie de lutte anti-pollution

GUIDE AUX EXCURSIONS SUR LE TERRAIN

L'examination des sections représentatives du littoral illustrant les traits ou les caractéristiques décrits dans le rapport, constitue un élément intégral de l'atelier.

A chaque endroit le groupe a débattu sur une série de questions désignées à développer une compréhension du caractère physique (géologique et océanographique) du site. Pour la deuxième excursion les questions ont traitées des facteurs affectant des exigences et des priorités de réaction.

REFERENCES

References cited in notes

- Adams, R.D., 1968. The leeward reefs of St. Vincent, West Indies. *Jour. Geog.*, (76):587-595.
- Alexander, C.S., 1968. The marine terraces of the Northeast coast of Tanganyika: *Zeitschrift für Geomorphologie*, Supp. 7, p. 133-154.
- _____, 1969. Beach Ridges in northeastern Tanzania, *Geogr. Rev.* 59, p. 104-122.
- Atlas of Pilot Charts, 1966, South Pacific and Indian Oceans. H.O. Publ. No. 107, U.S. Naval Oceanographic Office, Washington, D.C.
- Baker, B.H., 1963. Geology and mineral resources of the Seychelles archipelago: Memoir No. 3, Ministry of Commerce and Industry Geological Survey of Kenya, 140 pp.
- Brown, O., and Schott, F., 1981. MONEX oceanographic observations along the east African coast. *Int. Conf. on Early Results of the FGGE and Large-scale Aspects of Its Monsoon Experiments*, World Meteorological Organisation, Geneva, pp. 9.4-9.19.
- Butler, J.N., Morris, B.F., and Sass, J., 1973. Pelagic tar from Bermuda and the Sargasso Sea. Bermuda Biological Station for Research, St. George's West, Bermuda, Spec. Pub. No. 10.
- Chapman, V.J., (ed) 1977. *Wet Coastal Ecosystems*: Elsevier, Oxford, 428 pp. (Chapter 11: Africa B. The Remainder of Africa p. 233-240).
- Clausade, M., Gravier, N., Picard, J., Pichon, M., Roman, M., Thomassin, B., Vasseur, P., Vivien M., and Weydert, P., 1971. Coral reef morphology in the vicinity of Tulear (Madagascar): Contribution to a coral reef terminology: *Tethys*, Supplement 2, Station Marine d'Endoume, 74 pp.
- CONCAWE, 1980. Disposal techniques for spilled oil. *Oil Spill Cleanup Tech. Special Task Force No. 2*, Den Haag, 52 pp.
- _____, 1981. A field guide to coastal oil spill control and cleanup techniques. *Oil spill cleanup technology special task force No. 1*, Den Haag, 112 pp.
- Davis, R.A., Jr. and Fox, W.T., 1971. Beach and nearshore dynamics in eastern Lake Michigan. Williams College, Mass., Tech. Rept. No. 4, ONR Contract 388-092, 145 pp.
- Duing, W., and Schott, F., 1978. Measurements in the source region of the Somali Current during the monsoon reversal. *J. Phys. Oceanogr.*, 8:278-289.

- Emery, K.O., 1980. Continental margins - classification and petroleum prospects: Amer. Assoc. Petr. Geol. Bull. 64, p. 297-315.
- Exxon, 1979. Oil spill cleanup manual - Vol. 2, Response Guidelines. Unpub. Rept., Exxon Corp.
- Foget, C.R., Schrier, E., Cramer, M., and Castle, R.W., 1979. Manual of practice for protection and cleanup of shorelines: Vol. I - Decision Guide, Vol. II - Implementation Guide. Rept. to US EPA by Woodward-Clyde Consultants, EPA-600/7-79-187 (a and b), 283 pp.
- Grewe, F., 1941. Afrikanische Mangrovelandschaften, Verbreitung und Wirtschafts geographische Bedutung. Wiss. Veroff. Dtch. Mus. Landerkd., N.F. 9, 105-177.
- Hayden, B., Vincent, M., Resio, D., Biscoe, C., and Dolan, R., 1973. Classification of the Coastal Environments of the World: Part II, Africa. Dept. of Env. Sci., Univ. of Virginia, Tech. Rept. No. 3, 46 pp.
- Hernandez-Avila, M.L. and Roberts, H.H., 1974. Form-process relationships on island coasts. Tech. Rept. 166, Coastal Studies Inst., Louisiana State Univ. 76 pp.
- Hernandez-Avila, M.L., Roberts, H.H., and Rouse, L.J., 1977. Hurricane-generated waves and coastal boulder rampant formation. Proc. 3rd Int. Coral Reef Symposium, Univ. of Miami, (2):71-78.
- Hsu, S.A., 1970. Coastal air circulation: observations and empirical model: Monthly Weather Review, (98):487.
- IMCO, 1980. Manual on oil pollution - section IV (revised): practical information on means of dealing with oil spillages. Inter-Governmental Maritime Consultative Organization, London, U.K. 143 pp.
- IMO, 1982. IMO/UNEP guidelines on oil spill dispersant application and environmental considerations. International Maritime Organization, London, U.K., 43 pp.
- Komar, P.D., 1976. Beach processes and sedimentation, Prentice-Hall, N.J., 429 pp.
- Levy, E.M., Erhardt, M., Kohnke, D., Sobtchenko, E., Suzuoki, T., and Tokuhiko, A., 1981. Global oil pollution. Intergovernmental Oceanographic Commission, UNESCO, Paris, 35 pp.
- Lewis, M.S., 1969. Sedimentary environments and unconsolidated carbonate sediments of the fringing coral reefs of Mahé, Seychelles: Marine Geology, Vol. 7, p. 95-127.
- _____, 1968. The morphology of the fringing coral reefs along the east coast of Mahé, Seychelles: Jour. of Geol., Vol. 76, p. 140-153.

- Maiero, D.J., Castle, R.W., and Crain, O.L., 1978. Protection, cleanup and restoration of salt marshes endangered by oil spills - a procedural manual. Rept. to U.S. EPA by URS Co., 152 pp.
- McIntire, W.G., and Walker, H.J., 1964. Tropical Cyclones and the Coastal Morphology of Mauritius. *Ann. Assoc. Amer. Geogr.*, 54(4):582-596.
- MONEX Panel, 1977. Plan for U.S. participation in the Monsoon Experiment (MONEX). U.S. Comm. for Global Atmospheric Research Program, National Academy of Science, Washington, DC., 126 pp.
- Moore, C.H. Jr., 1973. Intertidal carbonate cementation, Grand Cayman, West Indies: *Jour. Sed. Petrol.*, Vol. 43, p. 591-602.
- Murray, S.P., 1972. Turbulent diffusion of oil in the ocean. *Limnology and Oceanography*, 17(5):651-660.
- Murray, S.P., 1975. Wind and current effects on large-scale oil slicks. *Proceedings, Offshore Technology Conf.*, Houston, Paper No. 2389, 11 pp.
- Murray, S.P., Roberts, H.H., Conlon, D.M., and Rudder, G.M., 1977. Nearshore current field around coral islands: control on sediment accumulation and reef growth. *Proc. 3rd Int. Coral Reef Symposium, Univ. of Miami*, (2):53-60.
- Murray, S.P., 1982. The effects and weather systems, currents, and coastal processes on major oil spills at sea. In G. Kullenberg (ed.), "Pollutant Transfer and Transport in the Sea", CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, p. 169-227.
- Murray, S.P., 1982b. Physical processes and sedimentation on a broad shallow bank. *Coastal and Estuarine Shelf Science*, 14:135-157.
- NAVAER, 1957. U.S. Navy marine climatic atlas of the world, Vol. III, Indian Ocean. U.S. Govt. Print. Off., Washington, DC.
- Nightingale, J., 1973. Beach cleaning equipment: M.F. Brighton (Australia) Beach Cleaner. Oil Pollution Rept. L.R. 185 (OP), Warren Spring Lab., Stevenage, U.K., 8 pp.
- _____, 1974. Beach cleaning equipment: the Beemer Beach Cleaner. Oil Pollution Rept. L.R. 198 (OP), Warren Spring Lab., Stevenage, U.K., 12 pp.
- Orme, A.R., 1982. Africa, Coastal Geomorphology. in, M.L. Schwartz, ed., "The Encyclopedia of Beaches and Coastal Environments", Hutchinson Ross Pub. Co., Stroudsburg, Penn., p. 17-32.
- Owens, E.H., and Drapeau, G., 1973. Changes in beach profiles at Chedabucto Bay, Nova Scotia, following large-scale removal of sediments. *Can. Jour. Earth Sci.*, 10(8):1226-1232.

- Owens, E.H., 1977. Coastal environments of Canada: the impact and cleanup of oil spills. Envir. Can., Envir. Protection Ser., Ottawa, Econ. and Tech. Review Rept., EPS-3-EC-77-13, 413 pp.
- _____, 1978. Mechanical dispersal of oil stranded in the littoral zone. Jour. Fish. Res. Bd., Canada, 35(5):563-572.
- Ramage, C.S., 1971. Monsoon meteorology. Int. Geophysis Series, Vol. 15, Academic Press, New York. 296 pp.
- Roberts, H.H., 1974. Variability of reefs with regard to change in wave power around an island. Proc. 2nd Int. Coral Reef Symposium, Brisbane, p. 497-512.
- Roberts, H.H., Murray, S.P., and Suhayda, J.N., 1975. Physical processes in a fringing reef system. Jour. Mar. Res., 33(2):233-260.
- Roberts, H.H., 1977. Field guidebook to reefs and geology of Grand Cayman Island, B.W.I.. Proc. 3rd Int. Symposium on Coral Reefs, Atlantic Reef Comm., Univ. of Miami, Fisher Island, 41 pp.
- Roberts, H.H., 1980. Physical processes and sediment flux through reef-lagoon systems: Proc. 17th Int. Coastal Eng. Conf., Sydney, Australia, p. 946-962.
- Roberts, H.H. and Sneider, R.M., 1982. Reefs and associated sediments of Grand Cayman Island, B.W.I.: Recent carbonate sedimentation. Field Trip Guidebook, 1982 Geol. Soc. Amer. Annual Meeting, 51 pp.
- Russell, R.J. and McIntire, W.G., 1965. Southern hemisphere beach rock, Geogr. Rev., 55(1):17-45.
- Russell, L.T., MacKay, G.D.M., Carson, W., and Skinner, D., 1979. The removal of spilled oil from recreational beaches. Proc. Second Arctic Marine Oil Spill Program Tech. Seminar, Edmonton, Alta, Envir. Can., Envir. Protec. Ser. Ottawa, p. 277-286.
- Sailing Directions, 1951. Southeast coast of Africa, Cape of Good Hope to Ras Hafun. U.S. Navy Oceanographic Office, Washington, DC.
- Sailing Directions, 1952. Sailing directions for the south Indian Ocean, Madagascar and islands westward of longitude 90°. U.S. Navy Oceanographic Office, Washington, DC.
- Sauer, J.D., 1960. Coastal plant geography of Mauritius: Tech. Rept. 15 (Part A) Coastal Studies Institute, Louisiana State Univ., Baton Rouge, 153 pp.
- Sauer, J.D., 1965. Notes on seashore vegetation of Kenya. Ann. Missouri Bot. Gard., Vol. 52, p. 438-443.
- Sauer, J.D., 1967. Plants and man on the Seychelles coast: Tech. Rept. 49, Coastal Studies Institute, Louisiana State Univ., Baton Rouge, 132 pp.

- Sonu, C.J., Murray, S.P., Hsu, S.A., Suhayda, J.N., and Waddell, E., 1973. Sea breeze and coastal processes. EOS Trans. Amer. Geophys. Union, 54(9):820-833.
- Strahler, A.N., 1965. Introduction to physical geography, J. Wiley and Sons, Inc., New York, 455 pp.
- Sunamura, T., and Horikawa, K., 1971. A quantitative study on the effect of beach deposits upon cliff erosion. Coastal Engr. in Japan, Vol 14, p. 97-106.
- Tide Tables, 1980. Central and Western Pacific Ocean and Indian Ocean. U.S. Dept. of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Agency, Washington, D.C., 386 pp.
- Tide Tables, 1983. Admiralty Tide Tables, Vol. II, Atlantic and Indian Oceans. H.M.S.O., London, 462 pp.
- UNEP, 1982. Oil pollution control in the East African region. UNEP Regional Seas Reports and Studies No. 10, 86 pp.
- UNESCO, 1971. Tectonics of Africa/Tectonique de L'Afrique: UNESCO, Paris (Earth Sciences 6), 602 pp.
- U.S. Army, 1973. Shore Protection Manual. Dept. of the Army, Corps of Engineers Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir, Virginia. 3 Volumes.
- U.S. Naval Hydrographic Office, 1977a. Surface currents, northwest Indian Ocean, including the Arabian and Laccadive Seas. Naval Oceanographic Office Spec. Publ. 1404-IN1, Dept. of Navy, NSTL Station, MS 39522.
- U.S. Naval Oceanographic Office, 1977b. Surface currents, west-central Indian Ocean, including Mozambique Channel. Naval Oceanographic Office, Spec. Publ. 1404-IN3, Dept. of Navy, NSTL Station, MS 39522.
- Walter, H., and Steiner, M., 1936. Die Okologie der Ost-Afrikanischen Mangroven, Zeits. Bot., 30, p. 65-193.
- Wardley-Smith, J. (ed), 1976. The control of oil pollution. Graham and Trotman Ltd., London, 251 pp.
- Wayment, E.C., 1977. Portable beach incinerator. Rept. LR250(OP), Warren Spring Laboratory, Stevenage, U.K., 7 pp.
- Weydert, P., 1974. Sur l'existence d'une topographie anti-recifale dans la région de Tuléar (côte sud ouest de Madagascar) Mar. Geol., 16, p. 39-46.
- Wheeler, R.B., 1978. The fate of petroleum in the marine environment. Special Rept., Exxon Production Res. Co., Houston, Texas, 32 pp.
- Whitehead, H., 1976. An A-Z of offshore oil and gas. Gulf Pub. Co., Houston, Texas, 339 pp.

Références sélectionnées: Impact d'une nappe de pétrole sur les corails et sur les mangliers

- Baker, J.M., 1982. Mangrove swamps and the oil industry. *Oil and Petrol. Poll.* 1(1), p. 5-22.
- Baker, J.M., Suryowinoto, I.M., Brooks, P., and Rowland, S., 1981. Tropical marine ecosystems and the oil industry, with a description of a post-oil spill survey in Indonesian mangroves. *In* *Pet. and the Mar. Envir. - Petromar 80*, Graham and Trotman, Ltd., London, p. 679-703.
- Chan, E.I., 1977. Oil pollution and tropical littoral communities: biological effects of the 1975 Florida Keys oil spill. *In* *Proc. 1977 Oil Spill Conf.*, Amer. Pet. Inst., Washington, D.C., Pub. No. 4284, p. 539-542.
- Diaz-Piferrer, M., 1962. The effects of an oil spill on the shore of Guanica, Puerto Rico. *In* *Proc. 4th Meet., Ass. Is. Mar. Labs, Curacao. Univ. of Puerto Rico, Mayaguez*, p. 12-13.
- Getter, C.D., Scott, G.I., and Michel, J., 1981. The effects of oil spills on mangrove forests: a comparison of five oil spill sites in the Gulf of Mexico and the Caribbean Sea. *In* *Proc. 1981 Oil Spill Conf.*, Amer. Pet. Inst., Washington, D.C., Pub. No. 4334, p. 535-540.
- Gilfillan, E.S., Page, D.S., Gerber, R.P., Hansen, S., Cooley, J., and Hothan, J., 1981. Fate of the Zoe Colocotroni oil spill and its effects on infaunal communities associated with mangroves. *In* *Proc. of the 1981 Oil Spill conf.*, Amer. Pet. Inst., Washington, D.C., Pub. No. 4334, p. 353-360.
- Humbert, H., 1927. Principaux aspects de la végétation à Madagascar. *Mém. Acad. Malgache*, 5, 78 pp.
- Jernelov, A. and Linden, O., 1980. The effects of oil pollution on mangroves and fisheries in Ecuador-Columbia. 2nd Int. Symp. on the Biology and Management of Mangroves and Tropical Shallow Water Communities, Port Moresby, Papua New Guinea, 31 pp.
- Knap, A.H., Sleeter, T.D., Wyers, S.C., Frith, H.R., Smith, S.R. and Dodge, R.E., 1983. The effects of oil spills and dispersant use on corals: A review and multidisciplinary experimental approach. *Jour. Oil and Petrochem. Poll.* 1(3), p. 157-169.
- Keiner, A., 1972. Ecologie, biologie, et possibilités de mise en valeur des mangroves malgaches. *Bull. Madag.*, 308, p. 49-84.
- Lewis, R.R., 1980. Impact of oil spills on mangrove forests. Second Int. Symposia on the Biology and Management of Mangroves and Tropical Shallow Water Communities. Port Moresby, Papua, New Guinea, 36 pp.

- Lewis, R.R. and Haines, K.C., 1980. Large scale mangrove restoration on St. Croix, U.S. Virgin Islands, II, Second Year. In Proc. of the seventh Annual Conf. on Restoration and Creation of Wetlands, Hillsborough Comm. College, Tampa, Florida, 294 pp.
- Loya, Y., 1975. Possible effects of water pollution on the community structure of Red Sea corals: Mar. Biol. Vol. 29, p. 177-185.
- Loya, Y., and Rinkevich B., 1979. Abortion effect in corals influenced by oil pollution. Mat. Ecol. Prog. Ser. 1, p. 77-80.
- Loya, Y., 1980. Effects of oil pollution on coral reef communities. Mar. Ecol. Prog. Ser. 3., p. 167-180.
- Loya, Y. and Rinkevich, B., 1980. Effects of oil pollution on coral reef communities. Mar. Ecol. Prog. Ser. 3(2):167-180.
- MacNae, W. and Kalk, M., 1962. The ecology of mangrove swamps at Inhaca Island, Mozambique. Jour. Ecol., 50, p. 19-35.
- Ray, J.P., 1981. The effects of petroleum hydrocarbons on corals. In Pet. and the Mar. Envir. - Petromar 80. Graham and Trotham, Ltd., London, U.K. p. 705-726.

PUBLICATIONS DE LA SERIE DES RAPPORTS ET ETUDES DU PNUE
SUR LES MERS REGIONALES

- No. 1 PNUE: Réalisations et projets d'extension du programme du PNUE pour les mers régionales et des programmes comparables relevant d'autres organismes. (1982)
- No. 2 ONUDI/PNUE: Etudes de polluants marins provenant de sources industrielles dans la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre. (1982)
- No. 3 UNESCO/PNUE: Les apports de polluants par les fleuves dans les eaux côtières de l'Afrique de l'Ouest et du Centre. (1982)
- No. 4 OMCI/PNUE: La pollution par les hydrocarbures dans la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre : état actuel et mesures à prendre. (1982)
- No. 5 IAEA/UNEP: Survey of tar, oil, chlorinated hydrocarbons and trace metal pollution in coastal waters of the Sultanate of Oman. (1982) (anglais seulement)
- No. 6 ONU/UNESCO/PNUE: Mise en valeur du milieu marin et des zones côtières dans la région de l'Afrique de l'Est. (1982)
- No. 7 ONUDI/PNUE: Sources industrielles de pollution des mers et des côtes dans la région de l'Afrique de l'Est. (1982)
- No. 8 FAO/PNUE: La pollution des mers dans la région de l'Afrique de l'Est. (1982)
- No. 9 OMS/PNUE: Problèmes de santé publique dans la zone côtière de la région de l'Afrique de l'Est. (1982)
- No. 10 OMI/PNUE: Lutte contre la pollution par les hydrocarbures dans la région de l'Afrique de l'Est. (1982)
- No. 11 UICN/PNUE: Conservation des écosystèmes et des ressources biologiques des mers et des côtes dans la région de l'Afrique de l'Est. (1982)
- No. 12 PNUE: Problèmes de l'environnement qui se posent dans la région de l'Afrique de l'Est. (1982)
- No. 13 UNEP: Pollution and the marine environment in the Indian Ocean. (1982) (anglais seulement)
- No. 14 PNUE/CEPAL: Développement et environnement dans la région des Caraïbes: une synthèse. (1982)
- No. 15 UNEP: Guidelines and principles for the preparation and implementation of comprehensive action plans for the protection and development of marine and coastal areas of regional seas. (1982) (anglais seulement)

- No. 16 GESAMP: The health of the oceans. (1982) (anglais seulement)
- No. 17 UNEP: Regional Seas Programme: Legislative authority. (1985) (anglais seulement)
- No. 18 UNEP: Regional Seas Programme: Workplan. (1982) (anglais seulement)
- No. 19 Rev. 2. UNEP: UNEP Oceans Programme: Compendium of projects. (1985) (anglais seulement)
- No. 20 CPPS/UNEP: Action Plan for the protection of the marine environment and coastal areas of the South-East Pacific. (1982) (anglais et espagnol seulement)
- No. 21 CPPS/PNUMA: Fuentes, niveles y efectos de la contaminacion marina en el Pacifico Sudeste. (1982) (espagnol seulement)
- No. 22 Rev. 2. PNUE: Programme pour les mers régionales en Amérique Latine et dans la région des Caraïbes. (1985)
- No. 23 FAO/UNESCO/IOC/WHO/WMO/IAEA/UNEP: Co-ordinated Mediterranean Pollution Monitoring and Research Programme (MED POL) - Phase I: Programme Description. (1983) (anglais seulement)
- No. 24 UNEP: Action Plan for the protection and development of the marine and coastal areas of the East Asian Region. (1983) (anglais seulement)
- No. 25 PNUE: Pollution marine. (1984)
- No. 26 PNUE: Plan d'action pour le programme d'environnement des Caraïbes. (1983)
- No. 27 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. (1983)
- No. 28 PNUE: Programme à long terme de surveillance continue et de recherche relatif au Plan d'action pour la Méditerranée (MED POL - Phase II). (1983)
- No. 29 CPS/SPEC/CESAP/PNUE: Plan d'action pour la gestion des ressources naturelles et de l'environnement du Pacifique Sud. (1983)
- No. 30 ONU-DAESI/PNUE: Potentiel énergétique de l'océan dans la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre. (1983)
- No. 31 A. L. Dahl et I. L. Baumgart: L'état de l'environnement dans le Pacifique Sud. (1983)
- No. 32 PNUE/CEE/ONUDI/FAO/UNESCO/OMS/AIEA: Les polluants d'origine tellurique en Méditerranée. (1984)

- No. 33 ONU-DAESI/PNUE: L'impact côtier des opérations d'exploitation du pétrole et du gaz en mer dans la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre. (1984)
- No. 34 PNUE: Plan d'action pour la protection et le développement de la région Méditerranéenne. (1984)
- No. 35 UNEP: Action Plan for the protection of the marine environment and the coastal areas of Bahrain, Iran, Iraq, Kuwait, Oman, Qatar, Saudi Arabia and the United Arab Emirates. (1983) (anglais seulement)
- No. 36 PNUE/CEPAL: L'état de la pollution marine dans la région des Caraïbes. (1984)
- No. 37 ONU-DAESI/PNUE: Problèmes de gestion de l'environnement liés à l'utilisation des ressources et inventaire des ressources de la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre. (1984)
- No. 38 FAO/PNUE: Aspects juridiques de la protection et de la gestion du milieu marin et côtier de la région de l'Afrique de l'Est. (1983)
- No. 39 PNUE: Conservation marine et côtière dans la région de l'Afrique de l'Est. (1984)
- No. 40 CPS/SPEC/CESAP/PNUE: Radioactivité dans le Pacifique du Sud. (1984)
- No. 41 PNUE: L'impact potentiel des activités socio-économiques sur l'environnement marin et côtier de la région de l'Afrique de l'Est. (1984)
- No. 42 GESAMP: Principles for developing coastal water quality criteria. (1984) (anglais seulement)
- No. 43 CPPS/UNEP: Contingency plan to combat oil pollution in the South-East Pacific in cases of emergency. (1984) (anglais et espagnol seulement)
- No. 44 IMO/ROPME/UNEP: Combating oil pollution in the Kuwait Action Plan region. (1984) (anglais seulement)
- No. 45 GESAMP: Thermal discharges in the marine environment. (1984) (anglais seulement)
- No. 46 UNEP: The marine and coastal environment of the West and Central African region and its state of pollution. (1984) (anglais seulement)
- No. 47 UNEP: Prospects for global ocean pollution monitoring. (1984) (anglais seulement)
- No. 48 CPS/SPEC/CESAP/PNUE: Le stockage et l'élimination des déchets dangereux dans le Pacifique Sud. (1984)
- No. 48/Appendices SPC/SPEC/ESCAP/UNEP: Hazardous waste storage and disposal in the South Pacific. (1984) (anglais seulement)

- No. 49 FAO/PNUÉ: Aspects juridiques de la protection et de la gestion du milieu marin et côtier de la région de l'Afrique de l'Est : Rapports nationaux. (1984) (en langues originales, anglais et français)
- No. 50 UICN/PNUÉ: Conservation marine et côtière dans la région de l'Afrique de l'Est : Rapports nationaux. (1984) (en langues originales, anglais et français)
- No. 51 PNUÉ: L'impact potentiel des activités socio-économiques sur l'environnement marin et côtier de la région de l'Afrique de l'Est : Rapports nationaux. (1984) (en langues originales, anglais et français)
- No. 52 UNEP: Arab co-operation for the protection and development of the marine environment and coastal areas resources of the Mediterranean. (1984) (anglais seulement)
- No. 53 PNUÉ: Programme pour les mers régionales du PNUÉ : le cas de l'Afrique Orientale. (1984)
- No. 54 ONUDI/PNUÉ: Plans d'intervention en cas d'accidents industriels dans la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre. (1985)
- No. 55 FAO/PNUÉ: Mammifères marins: plan d'action mondial. (1985)
- No. 55/Annex FAO/IUCN/IWC/UNEP: Marine mammals: global plan of action. (1985) (anglais seulement)
- No. 56 GESAMP: Cadmium, lead and tin in the marine environment. (1985) (anglais seulement)
- No. 57 OMI/PNUÉ: Pollution par pétrole et nettoyage du littoral des côtes de l'Afrique orientale. (1985)
- No. 58 UNEP: Co-operative programmes sponsored by UNEP for the protection of the marine and coastal environment in the wider Indian Ocean region. (anglais seulement) (1985)
- No. 59 UNEP: Environmental problems of the marine and coastal area of India: National Report. (1985) (anglais seulement)
- No. 60 UICN/PNUÉ: Gestion et conservation des ressources marines renouvelables dans la région de l'Océan Indien. (1985)
- No. 61 PNUÉ: Plan d'action pour la protection, la gestion et la mise en valeur du milieu marin et des zones côtières de la région de l'Afrique orientale. (1985)
- No. 62 UICN/PNUÉ: Management and conservation of renewable marine resources in the South Asian Seas region. (1985) (anglais seulement)

- No. 63 IUCN/UNEP: Management and conservation of renewable marine resources in the Kuwait Action Plan region. (1985) (anglais seulement)
- No. 64 IUCN/UNEP: Management and conservation of renewable marine resources in the Red Sea and Gulf of Aden region. (1985) (anglais seulement)
- No. 65 IUCN/UNEP: Management and conservation of renewable marine resources in the East Asian Seas region. (1985) (anglais seulement)
- No. 66 UICN/PNUE: Gestion et conservation des ressources marines renouvelables dans la région de l'Afrique Orientale. (1985)
- No. 67 ONU/PNUE: Erosion côtière en Afrique de l'Ouest et du Centre. (1985)
- No. 68 GESAMP: Atmospheric transport of contaminants into the Mediterranean region. (1985) (anglais seulement)
- No. 69 UNEP: Environment and resources in the Pacific. (1985) (anglais seulement)
- No. 70 UNESCO/ROPME/UPM: Proceedings of the Symposium/Workshop on oceanographic modelling of the Kuwait Action Plan (KAP) region. (1985) (anglais seulement)
- No. 71 IUCN/ROPME/UNEP: An ecological study of the rocky shores on the southern coast of Oman. (1985) (anglais seulement)
- No. 72 IUCN/ROPME/UNEP: An ecological study of the sites on the coast of Bahrain. (1985) (anglais seulement)
- No. 73 SPC/SPEC/ESCAP/UNEP: Ecological interactions between tropical coastal ecosystems. (1985) (anglais seulement)