

Cette synthèse, mise en forme par Jean-Paul Barousseau, Francesco Chiocci, Bernard Long, Carl Amos, Maria Snoussi, Agustín Sánchez Arcilla, et Anna Correggiari, puis éditée par Frédéric Briand et Jean Mascle, est le fruit d'un travail collectif initié durant la réunion de Tanger : y ont contribué tous les autres acteurs de l'atelier.

1 - INTRODUCTION

Cet atelier de recherche s'est tenu à Tanger, Maroc, du 18 au 21 septembre 2002, avec la participation de 17 spécialistes invités par la CIESM.

Après avoir souhaité la bienvenue aux participants, Frédéric Briand, Jean Mascle et Ferdinando Boero rappelèrent dans leurs remarques introductives que cette réunion se plaçait délibérément à l'interface de deux comités de la CIESM – le Comité Géosciences marines et le Comité Ecologie côtière – afin de tirer parti des approches et des concepts propres à chacune de ces disciplines. Le thème, suggéré initialement par Maria Snoussi, par ailleurs représentante du Maroc au Bureau Central de la CIESM, avait été retenu par les deux comités en raison non seulement de sa pertinence scientifique mais surtout de son importance économique croissante dans les enjeux d'aménagement côtier et de développement durable de la façade sud-méditerranéenne. Ainsi que le soulignèrent bon nombre d'intervenants, et notamment les chercheurs du Maghreb, l'impact intense des pressions anthropiques se traduit en fait depuis quelques dizaines d'années par une érosion accélérée, souvent spectaculaire, du littoral méditerranéen.

L'atelier devait permettre aux chercheurs présents de dégager – à partir d'exemples régionaux – une vision plus générale, plus synthétique, des phénomènes d'érosion côtière à l'œuvre en Méditerranée occidentale. Ce rapport exécutif en dresse un bilan préliminaire, présente les options disponibles pour en réduire les effets et identifie certains axes de recherche estimés prioritaires.

Le problème de l'érosion

L'érosion littorale est une forme de dégradation mécanique qui se manifeste par un recul du trait de côte. Présente à toutes les échelles d'espace et de temps, elle est l'expression de processus morphodynamiques affectant l'interface terre/mer/atmosphère. Elle est naturelle mais peut être déclenchée et souvent accélérée par des interventions humaines. Parce que le régime des marées y est micro-tidal, que la pression de l'urbanisation et des aménagements touristiques, combinée aux effets locaux de subsidence, y est considérable, les côtes de Méditerranée occidentale sont en voie de dégradation rapide (CIESM Science Series, 1997). Non seulement l'étroit pourtour méditerranéen compte désormais quelque 150 millions de résidents, aujourd'hui à peu près également répartis sur les rives nord et sud, mais il doit de plus absorber 150 millions de visiteurs chaque année [350 millions en 2025 d'après les projections !] en tant que première destination touristique mondiale : de telles pressions, concentrées sur une bande littorale fragile, sont sans équivalent.

L'occurrence et l'intensité de l'érosion côtière varieront en fonction des caractéristiques morpholithologiques dont la géodiversité se décline en Méditerranée occidentale en côtes rocheuses (env. 2/3) et côtes sableuses (plages et deltas; env. 1/3). Seules ces dernières, sur lesquelles la pression est particulièrement forte, sont prises en compte ici. Les participants à l'atelier ont cependant noté l'importance qu'il conviendrait d'accorder dans un proche futur à la protection des côtes rocheuses qui, certes moins agressées à l'heure actuelle, sont également menacées.

Si la définition du phénomène et de son objet est relativement aisée, son étude apparaît vite complexe, comme un énoncé de cas qui traduit un manque de doctrine. Avant de songer aux solutions éventuelles, il est donc nécessaire de faire le point sur les modalités de fonctionnement

de la zone littorale – notamment celle des unités sableuses – susceptibles d’induire l’érosion. Cette démarche conduit à examiner successivement la plage naturelle et la plage anthropisée.

2 - EROSION DU SYSTÈME LITTORAL À L’ÉTAT NATUREL

L’état naturel n’est pas figé, il est évolutif. Les changements que l’on observe peuvent y être orientés (le recul destructif des falaises, l’accumulation sédimentaire constructive des schorres et des slikkes). Ils sont le plus souvent rythmés par des épisodes de construction et de destruction. Cette alternance, ainsi que leur fréquence dans le temps et leur amplitude dans l’espace, conduisent à accorder une attention particulière aux plages sableuses, objets de grande importance économique en Méditerranée, et milieux vulnérables puisque l’ampleur des changements qui les frappent inopinément nuit à leur exploitation durable. L’exemple du recul des plages de la Baie de Tanger et le déclin conséquent du tourisme local (El Moumni, Snoussi, ce volume) n’en sont qu’une des nombreuses illustrations.

2.1. Les facteurs du fonctionnement des plages sableuses

Interface des trois enveloppes externes de la terre, la plage intègre dans son fonctionnement leurs constantes particulières. Le niveau scalaire pertinent des observations doit donc être soigneusement ajusté au sujet d’étude. Ce premier point étant établi, quatre types de forçages peuvent être distingués qui réagissent, chacun, aux commandes directes ou aux interactions mutuelles des trois enveloppes: le cadre géologique, la position du niveau marin, l’apport sédimentaire et les conditions météomarines. A cela il convient d’ajouter une dimension biologique, souvent négligée car beaucoup plus difficile à prendre en compte, mais partie intégrante du système: voir la présence ou non d’herbiers stabilisateurs de phanérogames marines, l’importance des débris coquilliers de mollusques dans les réserves sédimentaires, etc.

2.1.1. Les échelles

Il existe un couplage entre les échelles de temps et d’espace (De Vriend, 1991). Par voie de conséquence, le système côtier peut être défini comme une série de compartiments emboîtés (Kroon, 1994). Un petit compartiment est régi par des échelles d’espace et de temps à courte portée, un grand ensemble implique une évolution inscrite dans le long terme. Un certain arbitraire règne quand il s’agit de préciser ces principes mais, pour la Méditerranée occidentale, trois échelles d’espace-temps semblent pertinentes pour décrire le fonctionnement de son système littoral.

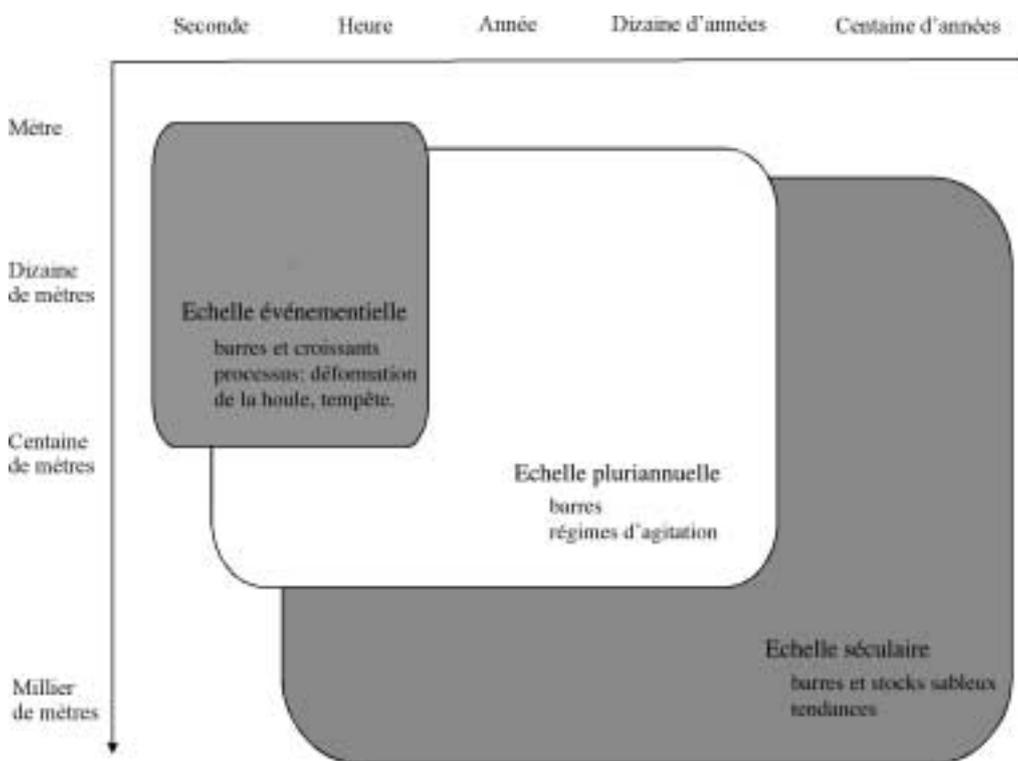


Fig. 1

L'une, séculaire, considère les tendances fortes du système côtier; elle gouverne notamment les déplacements du trait de côte tels qu'on peut les apprécier à partir de données historiques. Une autre, pluriannuelle voire pluridécennale, correspond à une approche fonctionnelle globale; elle examine à moyen terme la morphodynamique des plages, en particulier en réaction aux installations humaines récentes. La troisième, plus élémentaire, prend en compte les processus qui accompagnent les événements rythmant l'évolution des littoraux sableux en fonction des conditions météomarine. Cet emboîtement d'échelles est représenté sur la Figure 1 ci-dessus.

2.1.2. *Le cadre géologique*

Les plages sableuses se présentent sous deux formes principales :

- des côtes de régularisation, le long des régions de basse altitude;
 - Il s'agit d'étendues sableuses ininterrompues sur un linéaire de plusieurs kilomètres à dizaines de kilomètres dont les seules discontinuités sont constituées par des promontoires rocheux limités et, surtout, par des embouchures. Ces côtes correspondent le plus souvent à un lissage morphologique du tracé irrégulier du rivage fini-transgressif (formation de lidos en avant des baies et des golfes de cette époque avec création de lagunes; établissement de cordons littoraux en continuité linéaire partout ailleurs, d'où le terme utilisé de "régularisation").
- des criques, dans les baies et les anses des côtes rocheuses à falaises;
 - Elles sont alors beaucoup plus petites (quelques mètres à quelques centaines de mètres) et, surtout, leur continuité n'est pas interrompue par une embouchure fluviale.

Mis à part quelques cas ambigus, l'appartenance à l'une ou l'autre de ces grandes entités géographiques impose des caractères spécifiques à la région étudiée (voir Haïda et Snoussi, ce volume).

2.1.3. *Le niveau marin*

A l'échelle géologique, les retraits et les avancées du trait de côte induits par les variations du niveau marin se produisent sur de vastes étendues. Les reculs de la côte sont matérialisés par l'érosion de la plaine côtière [les côtes ligures en Italie et languedocienne en France en offrent des exemples] et les avancées sont représentées sur le plateau continental qui borde tous les rivages de la mer Méditerranée. A très long terme, la position du trait de côte peut donc fluctuer dans les limites de la ceinture constituée par ces deux régions morphologiques.

La position moyenne du niveau de la mer, qui commande la localisation instantanée du trait de côte, est relative. Elle résulte de l'interaction – à leur fréquence propre – des mouvements d'ensemble de l'hydrosphère marine et de la lithosphère.

La composante hydrosphérique est représentée par la variation absolue, purement eustatique, du niveau marin. Elle ne dépend que du volume d'eau contenu dans les bassins océaniques et de ses propriétés physiques, notamment sa température. En période de réchauffement global, la lente élévation consécutive du niveau marin (transgression) entraîne un large débat spéculatif sur ses effets éventuels sur les littoraux.

Les mouvements lithosphériques ont d'abord une composante néotectonique positive (le niveau relatif s'abaisse) ou négative (il s'élève) dont le rythme peut être progressif ou saccadé en réponse co-sismique. De nombreuses régions méditerranéennes connaissent ce phénomène qui, au cours du temps, peut s'inverser à plusieurs reprises, par exemple dans les régions volcaniques. A l'échelle globale, les mouvements lithosphériques dus à la glacio-isostasie représentent le facteur primordial des variations du niveau marin (Pirazzoli, 1991). En second lieu, ils ont une composante anthropique (Chiocci, ce volume) car les entreprises humaines exploitant des fluides interstitiels liquides (pétrole ou eau) ou gazeux (hydrocarbures) induisent une modification de la texture (*fabric*) des particules sédimentaires des niveaux réservoirs, donc leur tassement, provoquant une subsidence de compaction.

2.1.4. *L'apport sédimentaire*

Le prisme littoral est constitué de sables et comprend la plage, au sens commun du terme, les cordons dunaires qui la bordent et le domaine d'avant côte jusqu'à la profondeur de fermeture, limite d'action des vagues vers le large, variable en fonction de leur longueur d'onde. Le maintien de cette unité morphodynamique ou sa réduction dépend du bilan entre la quantité de matériel frais

qui entre dans le système et celle qui le quitte. L'apport sédimentaire admet trois sources principales :

i) *les apports continentaux* sont issus des bassins versants tributaires où se rassemble un flux d'alluvions dont l'exutoire, quasi-ponctuel, forme un prodelta au niveau d'une embouchure. Seule la composante sableuse de cet apport concerne les plages. L'abondante fraction terrigène fine en suspension est autant incompatible avec leur existence qu'avec leur usage; elle est cependant souvent la seule qui soit bien connue. La livraison de la composante sableuse a varié, de façon naturelle, dans un passé récent, en fonction de l'histoire fini-holocène, avec l'établissement du niveau marin au voisinage de sa cote actuelle il y a environ 6 000 ans. Cette durée est suffisante pour qu'une majorité des profils longitudinaux des fleuves aient été débarrassés des alluvions abondantes délivrées, lors de l'épisode du bas niveau marin antérieur, par le processus de l'érosion linéaire (augmentation de la pente, de l'énergie potentielle et érosion régressive). Cependant cette règle générale doit être ajustée, pour chaque bassin, en fonction des facteurs locaux qui sont susceptibles d'inverser la tendance. La logique climatique globale est à nuancer en fonction des spécificités de l'évolution des bassins.

ii) *les apports côtiers* résultent de l'érosion des falaises. Ce sont eux, avec la contribution des micro-bassins versants, qui sont en cause dans l'équilibre des criques sableuses mais avec une grande diversité de modalités (Oueslati, ce volume).

iii) *les apports marins* (dont doit être exclu tout ce qui relève des flux sableux qui s'échangent transversalement entre les différents étages du prisme littoral) se réduisent, pour la composante détritique, aux seules contributions nouvelles provenant de gisements fossiles. Ces réserves silico-clastiques jalonnent notamment les paléo-rivages formés au cours de stades de ralentissement de la transgression postglaciaire et abandonnés au cours de la phase de reprise transgressive ultérieure. Rien ne prouve, dans le milieu a- ou micro- tidal de la Méditerranée occidentale, que cette contribution silico-clastique puisse être significative, car le paléo-rivage le plus élevé, vers -30 m, et les accumulations facultatives (leur cartographie est encore mal connue) qui en résultent, sont hors de portée des zones de *shoaling* qui pourraient provoquer la remontée des sables vers la plage. Cependant il est utile de les évoquer, moins comme ressource potentielle accidentelle, que comme des réservoirs susceptibles d'être exploités dans le futur (Correggiari *et al.*, ce volume). On ne doit pas méconnaître non plus comme apport marin, la contribution biogène. Elle est représentée, le plus souvent, par des débris coquilliers de mollusques, bien que d'autres groupes vivants (algues, cnidaires, bryozoaires, brachiopodes, crustacés, échinodermes) puissent contribuer à sa production. L'état de cette composante essentiellement carbonatée, labile parce que mécaniquement moins résistante que la composante silicoclastique est en conséquence une mouture plus ou moins fine rapidement renouvelée parce que biogène. Son abondance est très variable mais une valeur modale de l'ordre de 20% est indicative de son impact possible sur le volume sédimentaire dans une majorité de cas. Toutefois, dans les systèmes insulaires de la Méditerranée ou d'ailleurs, cette composante peut être majoritaire, voire former la totalité du sédiment des plages. De là découle l'évidente nécessité de connaître les écosystèmes d'où procède ce matériel bioclastique, et de les protéger coûte que coûte.

Au total, l'importance des sources ponctuelles (apports continentaux) apparaît aujourd'hui essentielle car les falaises (apports côtiers) délivrent leur matériel à trop faible vitesse et les apports marins sont, on l'a vu, plutôt hypothétiques ou demeurent faibles, la composante bioclastique mise à part. Tout facteur qui amoindrit les apports continentaux compromet donc, à terme plus au moins bref, l'équilibre du littoral.

2.1.5. Les conditions météomarines

Ce sont elles qui entretiennent la variabilité haute fréquence des plages. Le vent est un facteur actif sur les dunes bordières et la plage. Il induit des mouvements transversaux et longitudinaux. Les premiers sont les plus efficaces dans la morphogenèse de la zone littorale puisqu'ils façonnent les édifices dunaires et concourent – dans une mesure encore mal quantifiée – à l'alimentation des zones d'avant côte.

En milieu marin, l'absence de courants de marée significatifs, sauf rares exceptions (détroit de Messine, détroit de Gibraltar), confère aux houles et aux mers de vent le rôle hydrodynamique

majeur. A cela s'ajoutent cependant les courants de compensation provoqués par les variations du niveau marin d'ordre dynamique (*set-up*, *set-down*) ou météorologique (surcote, décote), particulièrement notables en période de tempête.

Il est habituel de distinguer, du large vers la côte et en fonction des modifications géométriques et dynamiques que subit la vague à l'approche de celle-ci, quatre zones qui se distribuent parallèlement au rivage :

- la zone de levée (ou de *shoaling*) au sein de laquelle la vague, ralentie par la remontée des fonds, devient de plus en plus dissymétrique. Sa limite inférieure pratique (profondeur de fermeture) s'abaisse avec l'échelle de temps considérée, une condition à prendre en considération en ingénierie côtière quand il s'agit de définir le mode de fonctionnement d'un littoral;
- la zone des brisants où, devenue instable par excès de dissymétrie, la vague se détruit par le basculement (brisant déversant, plongeant ou gonflant);
- la zone de déferlement parcourue par les vagues secondaires induites par le basculement;
- la zone de jet de rive où la masse d'eau consomme son reliquat d'énergie cinétique dans une ascension limitée de la partie basse de la plage.

Des courants à composantes transversale (*crossshore*), vers le large (*offshore*) ou la côte (*onshore*), et longitudinale (*longshore*) résultent de ces transformations et la Figure 2 illustre de façon schématique les caractères principaux de la zonation hydrodynamique et morphologique des plages sableuses.

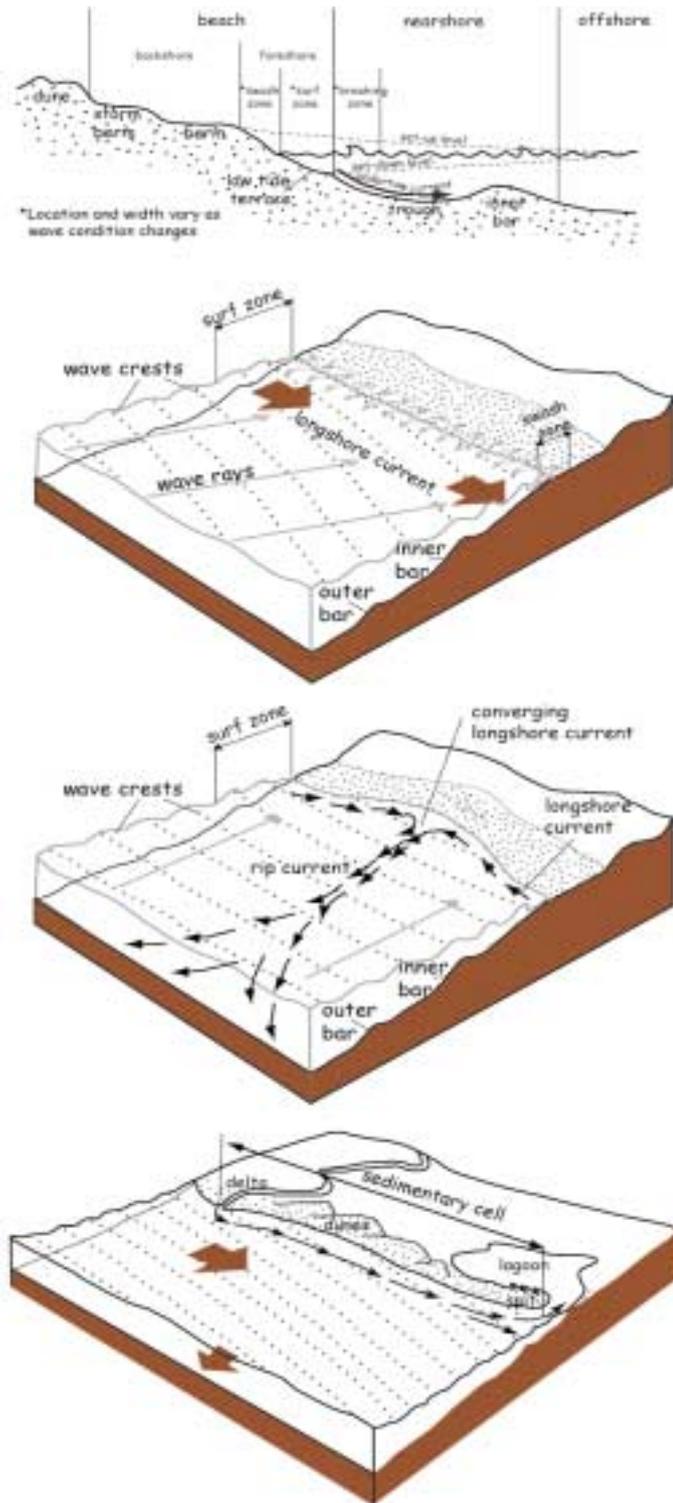


Fig. 2 . La zonation et la circulation littorale.

Le profil transversal indique les différentes zones du domaine littoral et leurs caractères morphologiques principaux ; le découpage résultant de la déformation de la houle à la côte est indiqué ainsi que les variations de niveaux entraînés par les surcotes et décotes. Les deux blocs-diagrammes supérieurs indiquent respectivement les éléments dominants de la courantologie longitudinale et transversale. Le schéma du bas illustre, dans un cas particulier, la notion de cellule sédimentaire en fonction d'une dérive littorale dominante (de gauche à droite) depuis une zone source (embouchure) jusqu'à une zone puits (extrémité de flèche sédimentaire).

2.2. Caractérisation des unités fonctionnelles

De l'organisation spatio-temporelle des forçages à deux échelles radicalement distinctes, celle à maille large et basse fréquence des facteurs géodynamiques et celle à courte portée et haute fréquence des contraintes hydrodynamiques, découle l'appartenance de toute portion du littoral sableux à deux entités physiographiques distinctes: la province géodynamique et la cellule sédimentaire.

2.2.1. L'appartenance à une province géodynamique

La province géodynamique est un secteur côtier structurellement et géologiquement homogène (Chiocci, ce volume). Cette homogénéité est la conséquence, à l'échelle régionale, d'une particularité liée au cadre géologique, à la variation du niveau marin relatif ou au régime des apports sédimentaires. Inscrite comme une tendance lourde dans un vaste compartiment littoral, cette particularité peut prendre le pas sur les facteurs actifs aux échelles courtes. Ainsi, la subsidence, le caractère rocheux d'un massif en position bordière, l'existence d'un fleuve capable de fournir actuellement un volume sableux notable sont-ils des éléments qui orientent durablement et à un échelon spatial important (plusieurs dizaines de kilomètres) l'évolution de tout un compartiment.

2.2.2. L'appartenance à une cellule sédimentaire

Aux courtes et moyennes échelles de temps et d'espace, le résultat de l'hydrodynamique littorale est un mouvement des sédiments qui peut s'analyser selon les deux directions du rivage : longitudinalement et transversalement. La composante longitudinale constitue le transit littoral, résultante d'un déplacement alternant commandé par la direction dominante de la dérive littorale. La composante transversale de la dynamique sédimentaire s'exprime souvent dans des morphologies spécifiques – les barres d'avant-côte – et dans leur dynamique, principalement transversale. De la même façon que le transit littoral est orienté dans une direction dominante, le déplacement transversal conduit, en général, *in fine* à une déperdition de matériel vers le large.

Parmi les composantes orthonormées du flux sédimentaire, le transit littoral, par son volume et son incidence directe sur la plage, occupe une position éminente. Par conséquent, toute altération qualitative ou quantitative de sa continuité modifie l'assiette du bilan et, partant, l'équilibre de la plage. La notion de cellule sédimentaire prend en compte les irrégularités temporelles et spatiales de son débit dont le rythme, la polarité et l'ampleur permettent de mieux aborder la compréhension du fonctionnement des plages sableuses.

Une cellule sédimentaire est une unité identifiée sur un littoral sableux étendu (Barusseau et Certain, ce volume). Elle comprend quatre frontières : la frontière terrestre, fermée, parce que le matériel sableux demeure dans la partie du système littoral constituée par les dunes et la plage émergée ; la frontière marine, ouverte, parce qu'une certaine quantité de sable s'échappe à ce niveau vers le large et n'est plus récupérée par le système littoral ; deux frontières latérales plus ou moins imperméables marquant, l'une le départ d'un transit littoral (zone-source), l'autre un secteur d'accumulation du sable qu'il a transporté (zone-puits). Dans le cas des criques sableuses des côtes à falaises, chaque plage est *a priori* une cellule sédimentaire. Dans le cas des cordons littoraux étendus, les frontières latérales sont représentées par tout obstacle atteignant ou approchant la profondeur de fermeture des houles de tempêtes annuelles: promontoires rocheux avancés, embouchures et prodeltas actifs. Des constructions anthropiques peuvent jouer ce rôle (voir plus loin).

2.3. L'établissement du bilan sédimentaire

L'érosion découle du déficit, à différentes échelles de temps, survenant entre les flux sableux entrants et sortants, ainsi que des modalités de redistribution interne entre les différents étages du prisme littoral dont certaines parties peuvent être engraisées au détriment de la plage émergée. L'établissement du bilan sédimentaire est donc la première démarche à entreprendre pour la gestion du littoral.

2.3.1. Les approches méthodologiques

La quantification de l'érosion repose sur une double démarche : (i) l'évaluation volumétrique des flux et des stocks et (ii) l'identification des relations entre l'hydrodynamique et la dynamique sédimentaire de forme (morphodynamique) et de grain (transport sédimentaire).

i) Compte-tenu de la variabilité spatio-temporelle décrite plus haut, il n'y a pas de méthode instantanée susceptible de fournir des estimations fiables des flux et des stocks. Seuls des suivis de longue durée peuvent permettre de les établir.

les flux entrants

Le volume de matériel frais issu des sources est très difficile à évaluer. Il y a là un effort à réaliser pour corriger les approximations et lever les incertitudes. Ce travail concerne plus particulièrement les hydrologues des bassins versants et éventuellement les biologistes travaillant sur le côtier. Les méthodes sont peu nombreuses et leur fiabilité médiocre (pièges) ou leur emploi malaisé (traceurs radioactifs).

les flux sortants

De même une réelle difficulté réside dans l'évaluation des quantités de matériel sableux (terrigenè ou organogène) définitivement perdu (aux échelles décrites) par le système littoral. En revanche, il est relativement plus simple d'envisager la mesure des quantités de matériel qui traversent les frontières latérales (méthode de cubature, notamment).

les stocks

Deux approches principales permettent d'aborder cette question centrale : le suivi topobathymétrique et les levés sismiques THR (voir Barusseau et Certain, ce volume). La première méthode fournit des enveloppes (fonds successifs), donc la possibilité d'estimer les volumes en mouvement. La seconde conduit à identifier le plancher stratigraphique sur lequel reposent les sables disponibles, mobilisables ou mobilisés.

ii) Le point de départ de l'établissement des relations dynamiques réside dans la mesure des courants générés par les interactions d'ondes et les fluctuations de niveaux. Ces mesures imposent la mise en place d'un dispositif de capteurs adéquats et la gestion d'un flux de données abondant.

L'approche hydrodynamique doit être couplée avec des levés topobathymétriques, des levés de trait de côte et une analyse sédimentologique. Elle peut servir d'introduction à une approche par modélisation.

A l'échelle de la dernière transgression (entre - 18 000 et - 6 000 ans) et dans des cas exceptionnels de plateaux continentaux étroits et à dynamique unidirectionnelle nette de transport constant, on peut établir des taux de transport à partir de l'analyse sismique HR des corps sableux existant en surface ou enfouis. Ces données peuvent être appliquées au transport côtier actuel.

2.3.2. La méthodologie

L'organisation méthodologique des différentes approches mises en œuvre doit tenir compte de trois échelles d'évaluation des changements géologiques et géomorphologiques des côtes : (1) les études modernes fondées sur des données de terrain et des expériences de laboratoire concernant les processus environnementaux ou des résultats de simulations utilisant des codes de modélisation de plus en plus divers et élaborés, (2) les études historiques basées sur les archives cartographiques et photographiques et (3) les études de paléoenvironnements, largement appuyées sur une approche stratigraphique et sur la définition des structures géologiques du Quaternaire terminal (essentiellement terminaison de l'Holocène).

Données existantes: ce sont pour l'essentiel les cartes disponibles, photographies aériennes et imagerie satellitaire, profils bathymétriques en archive, séries temporelles de données météorologiques et climatiques et autres sources bibliographiques. Le but est de réunir les données géologiques, sédimentologiques et physiques dispersées dans de multiples agences et pour des objectifs divers : cartes hydrographiques ou géologiques, cartes des sols, études de tracés d'autoroute ou géotechniques...

Etudes de terrain :

- *océanographie*: données de houle (hauteurs caractéristiques, spectres de fréquence, périodes, cambrures et directions; données de comportement de la houle à la côte: réflectivité et dissipativité...); données relatives aux courants (mesures par flotteurs dérivants, courantographes, ADCP...);
- *météorologie*: données climatiques et météorologiques orientées vers l'occurrence des tempêtes et leurs caractéristiques;

- *topographie et bathymétrie* : levées par station totale ou DGPS, réalisation de MNT;
- *géologie et sédimentologie* : réalisation de profils géophysiques et de sonar latéral, carottage conventionnel ou vibrocarottage, analyse de faciès, datations; mesures de déplacements sédimentaires par traceurs ou recueil dans des pièges à particules ou par méthodes indirectes étalonnées (OBS);
- *biologie* : cartographie des herbiers de phanérogames, prélèvements pour évaluer les stocks et la proportion d'animaux à forte composante calcaire.

Les mesures *in situ* et les modèles de simulation des processus côtiers sont valables seulement à court terme et à l'échelle locale. Les séquences de photographies aériennes représentent la source d'informations la plus couramment utilisée pour définir les problèmes d'érosion côtière. Néanmoins, elles ne donnent aucune information en dessous du niveau de la mer là où le problème débute, ni sur les facteurs déclencheurs de ces problèmes. La bathymétrie à très haute résolution ne représente pas une méthode encore très utilisée; elle n'a été réalisée que sur un petit nombre de sites côtiers. Les campagnes de géophysique à haute résolution sont elles aussi très éparpillées, car le matériel utilisé a été développé pour l'eau profonde.

De nouveaux instruments montés sur les satellites ou aéroportés (comme ENVISAT, LIDAR) fournissent des informations capitales au niveau national et international qui alimenteront les banques de données de base pour le futur (par exemple le site Web du climat global de la NOAA). Les techniques disponibles pour la prédiction de l'évolution côtière à moyen et long terme sont basées sur les modèles numériques et géologiques qui deviennent de plus en plus imprécis à mesure qu'augmentent les échelles de temps et d'espace.

2.4. Diversité des situations

Afin d'illustrer l'application de ces méthodes aux concepts de province géodynamique et de cellule sédimentaire, quelques exemples sont brièvement présentés ci-dessous.

Cas des côtes à delta

En Méditerranée occidentale, les grands deltas comme le Rhône, l'Ebre et le Pô ainsi que, de façon partielle, ceux des rivières moyennes développant un corps deltaïque proéminent, ont acquis une autonomie de fonctionnement à partir du moment où le niveau de la mer s'est stabilisé. La progradation rapide du corps deltaïque entraîne le maintien de la fraction sableuse des apports au sein du système côtier du delta lui-même et son élimination comme ressource naturelle de la côte adjacente. Dans ces conditions, la façade deltaïque constitue une province géodynamique qui doit être traitée de façon indépendante des domaines adjacents.

Le delta de l'Ebre peut être pris comme modèle de ce système autonome. Il présente un seul chenal et une seule embouchure, à partir de laquelle et en fonction d'une dérive littorale bilatérale s'écartant de l'embouchure, se développent les côtes sableuses des hémideltas nord et sud ainsi que leurs flèches sédimentaires terminales respectives. Il peut donc être divisé en deux cellules sédimentaires, isolées des secteurs côtiers voisins, car l'apex deltaïque et son embouchure ont progradé hors du domaine de remaniement possible du flux entrant de sédiment grossier en faveur de ces derniers.

La transition entre une situation où le fleuve nourrit un domaine voisin plus ou moins étendu et celle où il est devenu autonome et où les régions voisines entrent en régime de pénurie sédimentaire peut se faire de façon brusque. Le cas de La Tordera (NE Espagne), petit delta de sable grossier qui alimentait un littoral de plus de 60 km jusqu'au delta du Llobregat plus au sud, en est un exemple. Vers la fin du XIXe siècle, une flèche sédimentaire s'est développée à partir de l'embouchure et le sédiment, bloqué dans le front deltaïque, n'alimente plus les côtes voisines qui subissent donc une érosion. Dans un premier temps, cette érosion a été attribuée à la seule action humaine (industrialisation, urbanisation, ports, etc.), mais elle doit aussi être rapportée à un processus naturel (voir Serra, ce volume).

La définition des cellules sédimentaires peut ainsi être rapidement remise en question dans les situations très évolutives des édifices deltaïques et de leur voisinage. C'est également ce que montre, à deux échelles de temps, le cas de la Moulouya. Dans l'histoire de la basse Moulouya, qui débouche sur la côte méditerranéenne orientale du Maroc, deux épisodes de progradation de la côte ont été mis en évidence :

- Une première avancée du trait de côte, due à une progression importante du front deltaïque, est caractérisée par la formation de cordons obliques très développés et d'espaces plats interdunaires formant une plaine maritime large de 2 km en moyenne et longue d'une dizaine de km. Cet épisode repousse la mer mellahienne dont le retrait est daté de - 4 500 ans. Les flux liquides et les apports solides résultants étaient manifestement plus importants pendant cet épisode pluvial néolithique.
- Une deuxième progradation du delta, de moindre importance que la précédente, apparaît en comparant les photos aériennes de la plaine de Triffa entre 1958 et 1988. Cet épisode est en relation avec les crues très exceptionnelles qu'a connues le Maroc en 1963. Après ces événements hydrologiques catastrophiques, on observe une inversion de la tendance et une régularisation de la côte à la suite de l'érosion des prismes deltaïques.

Tout en reconnaissant qu'un processus dominant, le régime des apports fluviaux, conditionne l'évolution de cette côte marocaine, on devine que la compréhension de la dynamique du milieu et sa gestion doivent aussi tenir compte de rythmes qui s'inscrivent autant dans le long terme (évolution climatique) que dans le court terme (phénomènes hydrologiques extrêmes liés aux aléas météorologiques).

Cas d'une côte sableuse

La frange littorale méditerranéenne entre Fnideq et Martil (Province de Tétouan, Maroc septentrional) est caractérisée par une grande variabilité des phénomènes conditionnant son évolution (El Moutchou, ce volume). C'est un environnement dont l'équilibre dépend à la fois du contexte géologique, de facteurs dynamiques spécifiques et de l'anthropisation.

Les sédiments littoraux ont subi une longue évolution marquée pour l'essentiel par la superposition dans le temps des effets de deux dynamiques différentes: marine et fluviale; cette superposition entraîne :

- un apport terrigène très restreint des principaux cours d'eau,
- un pouvoir de transport par effet de houle parallèlement à la côte, du sud vers le nord,
- une importante perte de sables fins vers le large,
- une érosion généralisée au taux moyen annuel d'environ 1,5 à 2 m par an.

L'étude de l'évolution de ce domaine littoral a permis d'individualiser deux grandes unités sédimentaires, un secteur septentrional (de Fnideq à M'diq) et un secteur méridional (de M'diq à Martil), dont les vitesses d'érosion sont variables au cours du temps sous l'influence des différents agents dynamiques et des différentes formes d'actions anthropiques, à savoir :

- une certaine activité néotectonique le long de failles d'âge oligo-aquitainien et de direction nord-sud et est-ouest, à l'origine des grabens au sein desquels se sont installées les plaines littorales,
- la consolidation des dunes bordières par la construction de complexes touristiques, l'extraction massive des sables, les aménagements portuaires et l'installation de barrages sur l'arrière pays.

On voit qu'ici l'évolution de la zone littorale ne prend que peu en compte la caractérisation morpho-hydrodynamique à l'origine de la distinction des cellules sédimentaires mais s'appuie surtout sur celle de province géodynamique. Seules les actions anthropiques qui ont réduit considérablement le bilan sédimentaire et transformé la dynamique sédimentaire de cette frange littorale pourraient permettre de mettre en évidence des unités fonctionnelles de plus petite taille ; mais ce travail reste à faire.

Cas de Carthage

Les vestiges archéologiques du segment côtier compris entre l'ancien palais beylical et les ports puniques permettent une reconstitution significative du déplacement du trait de côte à la suite des modifications enregistrées dans les apports latéraux de sédiments et des variations du niveau marin.

Les fouilles récentes ont révélé que, pendant l'époque carthaginoise, la position du trait de côte était très proche de celle de nos jours. En témoigne une encoche façonnée par les vagues dans les gros blocs de la muraille carthaginoise. A l'époque romaine, la tendance a été en revanche, au

moins dans un premier temps, à une progradation de la côte, favorisée par le dépôt ou l'apport de grandes quantités de sédiments poussées par les courants côtiers, à partir de l'embouchure de l'oued Méjerda; la dérive littorale la plus active étant dirigée vers le sud. L'élargissement de l'estran a alors permis la progression de l'espace bâti en direction de la mer.

Postérieurement à cette période, un retrait de la côte est enregistré. C'est au minimum la largeur d'une *insula*, comprise entre les Kardos XVIII et XIX, qui a été perdue pour le continent, attestant d'un recul du rivage de l'ordre de 50 à 60 m. Ce renversement de tendance s'explique non seulement par une réduction des apports latéraux, mais aussi et surtout par une variation relative positive du niveau marin (voir détails in Paskoff *et al.*, 1985).

On comprend par cet exemple que les conditions géologiques locales doivent conduire à une certaine circonspection quant à la définition d'unités homogènes.

Cas de la marge continentale du Latium

La marge continentale du Latium (Chiocci, ce volume) permet de bien illustrer les concepts de province et de cellule. Longue de quelque 300 km, elle est subdivisée en au moins six provinces (voir Fig. 3) dont le bilan sédimentaire est sous la dépendance de facteurs divers.

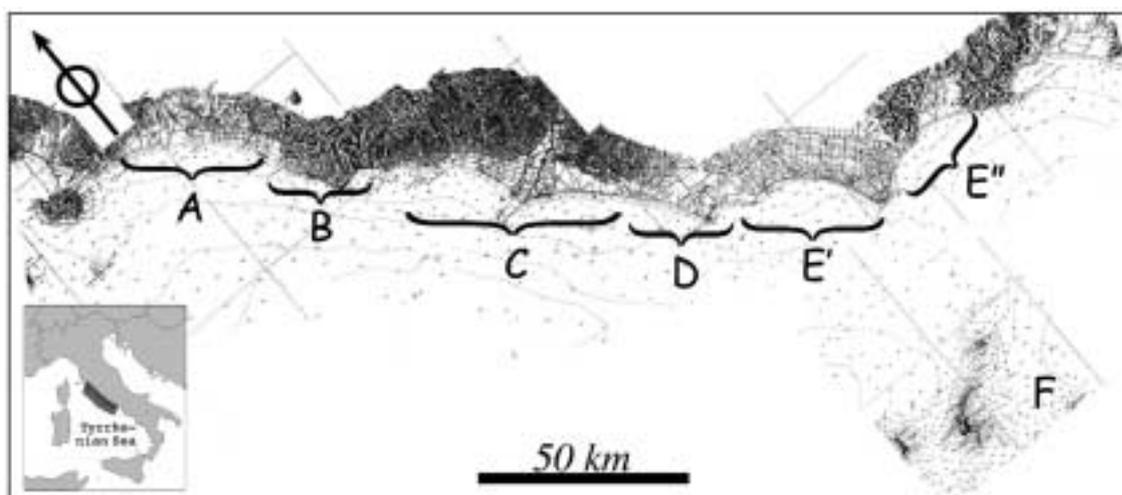


Fig. 3. Le littoral tyrrhénien et le découpage en provinces géodynamiques.

La figure va du promontoire du Monte Argentario à gauche aux îles Pontines (Isole Ponziane) et à l'embouchure de la Volturna à droite. L'étroite zone littorale est bordée des reliefs de la Maremma au nord-ouest et du Latium au sud-est (explications dans le texte).

- La province A, inscrite entre deux promontoires rocheux, est caractérisée par des fleuves côtiers courts à régime variable, drainant un complexe volcanique situé à quelques dizaines de km à l'intérieur des terres. Le prisme littoral est continu, étroit et peu affecté par l'érosion.
- La province B correspond à un cap rocheux à rares criques, chacune formant une cellule indépendante des autres.
- La province C est la plus large, dominée par la présence du delta du Tibre, principal fleuve de la mer Tyrrhénienne. L'apex deltaïque subit une forte érosion en raison des barrages édifiés et plusieurs cellules peuvent être identifiées, limitées par des ouvrages de défense.
- Vers le sud une transition s'opère entre des plages influencées par le delta et une étendue de côte (Province D) dans laquelle des sédiments du Pliocène soulevés forment une falaise basse bordée des dépôts de ruisseaux temporaires dont les embouchures représentent des limites de cellules.
- La province E est très particulière car des marais et marécages y existent depuis les années 30. Aucun tributaire ne débouche donc dans les deux cellules (E' et E''), longues de plusieurs dizaines de km et séparées par un cap rocheux, qui la constituent. Actuellement, les travaux effectués aux embouchures des chenaux de drainage tendent à compartimenter artificiellement ce segment de côte.

- La province F, enfin, correspond à un archipel volcanique où des criques ne sont alimentées que par l'érosion des falaises entaillées dans des pyroclastites peu consolidées. La fraction biogène y est notable, en l'absence d'autre apport terrigène.
- Plus au sud, s'échelonnent de façon complexe de petites provinces, analogues à B et C.

3 - MESURES DE PRÉVENTION ET D'ATTÉNUATION DE L'IMPACT ANTHROPIQUE

Si le développement de la zone côtière actuelle est dû aux processus naturels, sa détérioration, quant à elle, est surtout anthropogénique; le durcissement du littoral par des ouvrages ainsi que la très grande pression sur l'utilisation de l'environnement côtier tendent à aggraver les problèmes. Ainsi, la régularisation des cours de presque toutes les rivières se déversant dans la Méditerranée a réduit l'apport sédimentaire à la côte de 90% durant les 50 dernières années. En Algérie et au Maroc notamment (Larid, Haida, ce volume), les sables et graviers utilisés pour la construction ont été extraits de la ceinture des dunes côtières, ce qui a entraîné à la fois l'amaigrissement des plages et la destruction des habitats côtiers. Ces matériaux ont été également extraits des rivières pour la construction du réseau d'autoroutes (en Italie), et des plages pour le développement des villes côtières de la plupart des pays méditerranéens durant les 19e et 20e siècles.

Ces interventions ont eu pour effet d'accroître l'énergie des houles le long du littoral, entraînant l'accélération de l'érosion côtière au niveau régional ... accélération aggravée ici et là par la dégradation dramatique – sous la pression conjointe de la pêche au chalut, des mouillages sauvages et de la pollution – des herbiers de phanérogames marines (Posidonies et Cymodocées) qui jouent un rôle-clé dans la dissipation de l'énergie de la houle et dans la stabilisation des fonds.

Il est peu probable que ces pressions s'estompent à court terme. Au contraire les demandes de l'urbanisation, du tourisme, de la pêche, des transports et de l'industrie iront croissant sur le ruban littoral. En effet les côtes sableuses méditerranéennes sont généralement plates, donc facilement constructibles, et constituées de sédiments alluvionnaires, donc faciles à excaver, de telle sorte qu'elles représentent une zone idéale pour le développement des infrastructures. En outre, dans la phase actuelle de transgression, il existe une variété de passes, de lagunes et d'estuaires qui fournissent autant de sites appropriés pour l'habitat humain et pour le développement.

Pour l'ensemble de ces raisons, la réduction de l'espace littoral sous l'effet combiné de l'érosion côtière et de la remontée marine est critique dans de nombreuses régions et cette situation pourrait s'aggraver. Il est donc urgent d'envisager dès maintenant les moyens disponibles ou susceptibles d'être mis en service pour limiter ces désagréments, dans l'attente d'une véritable Gestion Intégrée [lointaine, sinon hypothétique] de la Zone Côtière au niveau national et international. On examine pour cela brièvement ci-dessous les différents types d'impacts que provoque l'occupation humaine des zones côtières, les échelles spatio-temporelles que revêt la pratique de leur gestion et, enfin, les possibilités de résolution des problèmes posés.

3.1. Les impacts de l'anthropisation

En fonction de leurs effets généraux, plusieurs types d'impacts peuvent être inventoriés et un premier type de mesures susceptibles de les atténuer consiste dans leur limitation :

3.1.1. Sur les flux entrants et le stock

- aménagement des bassins versants (calibrage des fleuves, transferts et dérivations)
- barrages
- reforestation et abandon des terres agricoles
- extractions (fleuves, dunes, plages, système des barres d'avant-côte)

3.1.2. Sur la dynamique littorale

- urbanisation
- ouvrages
- installations portuaires (distinction des grands et petits ports)
- pollution, chalutage, mouillages sauvages (destruction des herbiers et d'autres stocks biologiques)

3.1.3. Sur le niveau marin relatif

- changement climatique global
- subsidence de compaction

L'érosion côtière impose en outre une adaptation des activités humaines, et la question doit être traitée en fonction de plusieurs objectifs inscrits dans des cadres de temps différents.

3.2. Les échelles spatio-temporelles de gestion

Trois échelles spatiales de gestion côtière sont considérées ici : locale, nationale et internationale. Aujourd'hui la plupart des problèmes côtiers sont définis et traités à l'échelle locale car ils sont perçus comme représentant des cas particuliers. Néanmoins, la cause de ces problèmes se situe généralement à une échelle nationale, en raison du contrôle du bilan sédimentaire côtier par des événements ayant lieu très en amont dans les bassins versants, principalement la construction des barrages. La construction de ports et d'infrastructures portuaires de grande échelle, en modifiant le transport sédimentaire, peut aussi avoir des répercussions à l'échelle régionale. L'échelle internationale a une importance capitale car elle contrôle les influences globales qui induisent des variations locales. Celles-ci incluent l'élévation du niveau marin, due au réchauffement global et aux changements climatiques (tempêtes) qui influencent les précipitations, les conditions météorologiques et l'exposition du trait de côte aux houles. Ces échelles spatiales intègrent dans une certaine mesure celles qui appartiennent aux processus et celles qui impliquent la gestion.

De même, trois échelles temporelles de gestion côtière peuvent être considérées : *le court terme* (moins de 5 ans), le *moyen terme* (5 à 50 ans) et le *long terme* (plus de 50 ans). Les solutions à court terme sont les plus communes car elles apportent une protection immédiate aux problèmes les plus aigus (érosion de plage, retrait de falaises, etc.). Néanmoins, elles sont généralement de courte durée et ne résolvent pas les causes originelles du problème. Il en résulte que le problème est seulement déplacé dans le temps, ce qui est plus grave, car la solution à court terme peut amplifier les risques futurs. Par exemple, les terrains reconquis sur la lagune de Venise continuent de s'enfoncer de 3 cm/an. Cet échec tient au fait que, pour traiter cette subsidence en maintenant les murs de protection, la probabilité d'inondation a augmenté avec le temps.

Le moyen terme est considéré comme étant une bonne échéance pour la prédiction des analyses de risque et pour la proposition de solutions réalistes. Il représente aussi l'espérance de vie de la plupart des infrastructures côtières et tient compte de l'usage commun actuel de la zone côtière dans les limites de tolérance des impacts des changements climatiques sur cette dernière (élévation du niveau marin et récurrence des tempêtes).

Le long terme représente l'échelle de temps au delà de laquelle la gestion effective de la zone côtière n'est pas envisageable en raison des incertitudes qui pèsent sur l'emploi des modèles de prédiction et aussi du fait de la trop grande brièveté des séries disponibles de données liées à l'évolution et aux processus côtiers. De la même façon que pour les échelles spatiales, ces échelles temporelles représentent une intégration des échelles associées aux processus d'évolution et de celles correspondant à la gestion du milieu.

3.3. Les remèdes

Logiquement l'érosion côtière devrait être traitée en trois étapes successives : le diagnostic, le traitement, enfin la prévention.

3.3.1. *Le diagnostic*

Dans le cas de la Méditerranée, où quelque 45 000 km de côtes sont placées sous l'autorité distincte d'une vingtaine de pays riverains, il est illusoire d'envisager à brève échéance une procédure de diagnostic coordonnée face à un problème aussi complexe et aussi diversifié que l'érosion littorale. L'approche utilisée au Canada pour évaluer les risques côtiers pourrait s'avérer cependant un exemple utile: dans ce pays les caractéristiques définissant "la bonne santé" de la zone côtière ont été réunies par Shaw *et al.* (1988) sous la forme d'un indice de sensibilité du littoral, permettant d'établir les priorités d'intervention au long des 250 000 km de côtes canadiennes. Les critères utilisés se fondent sur les informations immédiatement disponibles pour l'ensemble de la zone considérée, telles : la densité de la population côtière, la morphologie côtière, le type de côte, la pente de l'arrière-pays, les tendances de variation du niveau marin, les vitesses de déplacement du trait de côte, le niveau marégraphique moyen et le maximum de la hauteur moyenne annuelle de la houle significative.

3.3.2. Le traitement du problème

Ainsi que le résume schématiquement la Figure 4, face au problème de l'érosion côtière, deux stratégies de réponse générale sont envisageables: (1) ne rien faire, (2) protéger (voir Tabet, ce volume).

- Ne rien faire consiste à abandonner la zone à la nature, soit parce que la valeur des infrastructures existantes est trop basse par rapport aux coûts de protection, soit parce que l'habitat naturel est de très haute valeur (exemple de création de parc national, de refuge faunistique ou de sites spéciaux d'intérêt scientifique, culturel ou esthétique).
- Si l'on choisit de protéger, quatre options sont envisageables: (i) adaptation, (ii) stabilisation du trait de côte, (iii) avancée du trait de côte (récupération), ou (iv) gestion du retrait.

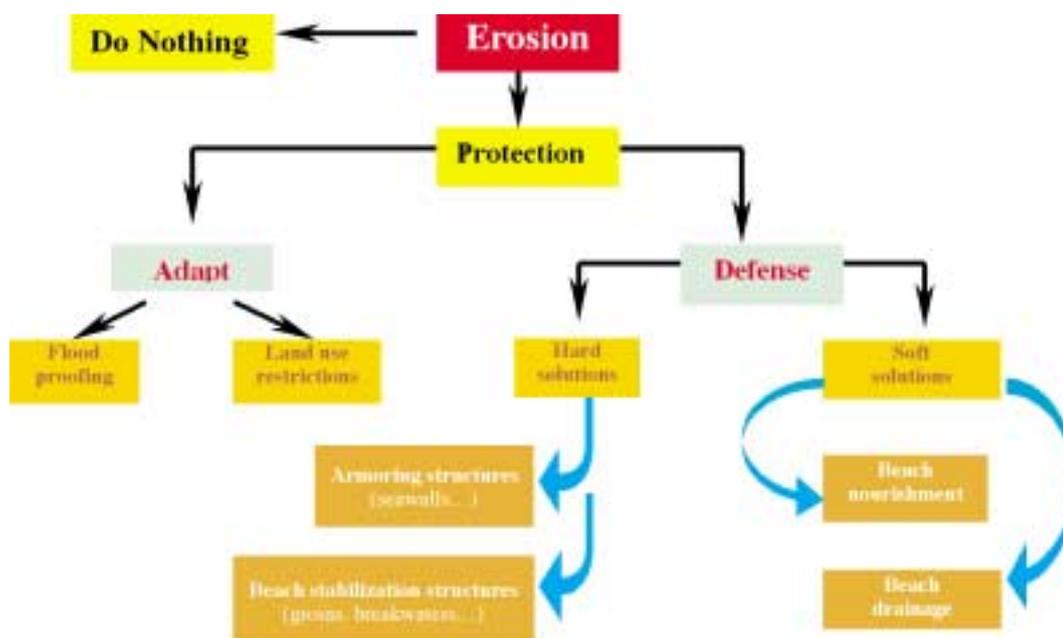


Fig. 4. Différentes stratégies de réponse à l'érosion côtière.

i) L'adaptation consiste à modifier les infrastructures sans interférer avec les processus naturels contrôlant le littoral. Cette démarche inclut l'introduction de règles strictes et de lois sur la limitation de l'utilisation du territoire ainsi que sur la construction à une certaine distance de la plage (zone tampon) en fonction de l'espérance de vie des infrastructures et de la vitesse d'érosion. Très peu de pays méditerranéens ont une politique limitant la construction à proximité de la côte. Mais il existe un mouvement dans ce sens: par exemple en France (Loi sur le littoral de 1986), en Espagne (Loi sur le littoral espagnol, 1988) et plus récemment en Algérie (Loi littorale, février 2002).

ii) Maintenir la ligne de côte consiste à empêcher le retrait du littoral par des interventions douces ou lourdes :

- Les interventions lourdes consistent à construire des murs de protection, des épis et des brise-lames. Elles représentent l'approche traditionnelle de protection utilisée dans le passé. Toutefois, la détérioration de l'environnement dans les secteurs voisins s'est souvent accélérée et les problèmes de diminution de l'apport en sédiments à la côte ne sont pas résolus.
- Les approches douces impliquent la mise en œuvre d'un rechargement de plage. Des exemples nombreux de cette pratique ont été cités (Chiocci, Correggiari, Sánchez-Arcilla, Long, Snoussi, ce volume) autour de l'Italie (Pisa, Emilia-Romagna, Lazio, Pellestrina), de l'Espagne (Catalunya, Valencia, Andalucía) et, plus rarement, dans d'autres pays (Tunisie, Maroc). Cette approche peut être associée avec des défenses lourdes limitées sous forme d'épis ou de brise-lames. La nouvelle technique de drainage de la nappe phréatique semble

donner de bons résultats en terme de stabilisation à Riumar (Delta de l'Ebre, Espagne), sur le Lido di Ostia (Italie) et aux Sables d'Olonne (France). Cette option douce requiert invariablement plus de maintenance que les approches lourdes. Elle dépend aussi de la disponibilité de matériaux de même taille moyenne et même indice de triage que le sédiment originel de la plage.

iii) *Avancer la ligne de rivage* implique un empiétement sur l'avant-côte. Cette approche est généralement utilisée dans les estuaires et les baies où d'importants marais salants ou vasières ont été poldérisés à des fins de construction ou d'agriculture. Par exemple, la lagune de Venise a perdu 90% de ses marais intertidaux au profit de terres agricoles, de la production de sel et de fermes aquacoles durant les 100 dernières années, avec pour conséquence l'appauvrissement de la diversité et de l'abondance des habitats et des espèces. Les terres agricoles récupérées subissent actuellement un enfoncement de 3 cm/an qui est dû notamment à l'oxydation de la matière organique et le niveau des terres est aujourd'hui à -3 m sous le niveau de la mer. Les dégâts potentiels causés par les inondations augmentent chaque année. Avancer la ligne de côte signifie la destruction de précieux habitats littoraux et infra-littoraux.

iv) *Gérer le retrait* consiste en un abandon sélectif ou un démantèlement des défenses lourdes sur des sites stratégiques pour réduire les risques provoqués sur les zones environnantes, ou pour accroître l'abondance des habitats. Le Wash, en Angleterre représente un site typique où la gestion du retrait contrôlé est en cours actuellement, dans le but de re-développer les communautés de marais salants. Les digues des polders ont été récemment ouvertes pour permettre à l'eau salée d'entrer dans les zones anciennement poldérisées. La transformation des terres agricoles en marais salants naturels devrait prendre cinq ans, ce qui représente une solution de moyen terme.

3.3.3. Prévention des problèmes futurs

Dans le passé, les techniques de défense et de prévention ont été trop souvent concentrées sur les symptômes de l'érosion côtière (pertes de plages) et non sur les causes (déséquilibre du bilan sédimentaire). L'illustration de cette approche se retrouve sur la majorité des côtes italiennes du nord de l'Adriatique, où des brise-lames parallèles au rivage ont été construits dans le but de protéger les plages touristiques érodées. De même, un cordon presque continu de murs, d'épis et de brise-lames a été construit le long des côtes espagnoles de Méditerranée. Malheureusement la réduction de l'énergie des houles n'a pas permis la reconstruction des plages, en raison du manque de sédiments disponibles. Qui plus est, la réduction de l'énergie des houles a provoqué l'augmentation de la concentration des polluants et des toxines à l'intérieur des stocks de sable propre, ce qui a eu pour conséquence une diminution rapide de la fréquentation touristique. Ces défenses lourdes sont en cours de démolition ou, comme en Espagne, ont été remplacées sur une grande échelle par des opérations de rechargement.

Il apparaît aujourd'hui plus efficace de se tourner vers des ouvrages de défense souples, travaillant en harmonie – et non plus en opposition – avec les dynamiques naturelles. Pour cela, l'utilisation mixte de réponses techniques diverses (par exemple: plantation d'herbiers, aménagement d'épis stabilisateurs, barrières immergées, récifs artificiels), adaptées aux conditions particulières locales, semble prometteuse.

4 - RECOMMANDATIONS POUR LA RECHERCHE

Trop d'incertitudes demeurent quant à notre connaissance du fonctionnement du milieu littoral; elles conduisent à recommander vivement un renforcement de l'attention portée à son amélioration, ce qui implique notamment:

- de se pencher sur l'étude des côtes sableuses encore à l'abri des aménagements, afin de mieux comprendre la dynamique des milieux côtiers et la part de ce qui est naturel dans l'évolution actuelle des plages;
- d'identifier tous les types de côtes qui ne sont pas encore gagnés par les aménagements, surtout sur la rive sud de la Méditerranée;
- de définir des sites témoins échelonnés le long des côtes de Méditerranée;
- de combler le cruel manque de données pertinentes (débit sableux des fleuves, hydrodynamique littorale, cartographie des herbiers de phanérogames, cartographie des réservoirs fossiles de la plate-forme, analyse de l'apport sédimentaire biogène - coquillier et autre ...);

- de remédier au manque de “profondeur temporelle” des connaissances car les bases de données sont pauvres et doivent être enrichies par des suivis appropriés;
- de doter impérativement les institutions responsables de moyens destinés à combler le déficit technique en équipements convenables : DGPS, dispositifs de sondage, boomers THR, houlographes, courantographes et marégraphes, systèmes de traitement rapide des données...

Contrôles météo-marins et géologiques du bilan sédimentaire des prismes littoraux sableux – Conséquences en matière d'aménagement

Jean-Paul Barusseau et Raphaël Certain

*LEGEM (Laboratoire d'Etudes des Géo-Environnements Marins)
Université de Perpignan, France*

Le golfe du Lion (Méditerranée occidentale) représente un environnement quasi atidal à régime de houles contrastées qui s'étire sur environ 180 m entre la frontière franco-espagnole et le delta du Rhône (Durand, 1999). Ses longues étendues sableuses s'appuient sur des caps rocheux espacés de plusieurs dizaines de kilomètres : le promontoire des Albères, chaînon terminal des Pyrénées, le cap Leucate, le cap d'Agde et le mont Saint Clair, et sur les prodeltas des fleuves pyrénéo-languedociens : Tech, Têt, Agly, Aude, Orb, Hérault, ainsi que sur le vaste delta du Rhône dont un lobe occidental, la pointe de l'Espiguette, marque la limite est du golfe.

Côte de régularisation édifiée à partir de l'achèvement de la transgression post-glaciaire, vers – 6000 ans (Ambert, 1987), le système littoral s'est développé sous la forme d'une unité géomorphologique stéréotypée, assujettie à une position du niveau marin qui a peu varié au cours de cet épisode (Pirazzoli, 1986; Barusseau *et al.*, 1996). On rencontre, du bord vers le large, d'abord une partie émergée, avec un cordon dunaire souvent fort dégradé par une anthropisation commencée au début du siècle dernier, et une plage le plus souvent étroite (quelques dizaines de mètres); ensuite, une partie immergée, caractérisée par l'occurrence permanente d'un système de fosses et de reliefs sédimentaires, parallèles au trait de côte : les barres d'avant-côte. Le plus souvent au nombre de deux, elles sont rectilignes dans la partie est et festonnées dans la moitié sud (Barusseau et Saint-Guily, 1981). Transversalement, l'ensemble du prisme littoral se déploie sur un maximum de 500 mètres entre des altitudes de l'ordre de +2 m pour sa limite terrestre et -8/-10 m pour sa limite marine.

Cette disposition naturelle du prisme sableux est principalement le résultat du forçage hydrodynamique dû à la houle, forçage qui peut être décrit en termes de modifications des ondes présentes dans le milieu littoral, de changements de niveaux, indépendamment de toute cause tidale, et de variations résultantes des vitesses et des directions de courants.

Les tempêtes d'est à sud-est sont responsables des houles dans la région (L.C.H.F., 1984). Tous les autres régimes de vent, y compris les très fréquents et très puissants vents de terre (mistral pour la partie est du golfe et tramontane pour sa partie ouest), n'ont qu'une action limitée sur la génération des vagues à la côte. Seule leur action directe sur le sable des dunes et des plages, exporté vers la mer, est significative; mais elle est encore mal connue car insuffisamment étudiée. Les houles, compte tenu de leur incidence par rapport à la direction variable du rivage, entraînent

une dérive littorale, courant parallèle à la côte qui, en termes résultants, présente deux branches convergentes vers la partie centrale du golfe : l'une sud-nord, au sud, et l'autre est-ouest, à l'est. Dans la zone littorale, l'action de la houle se différencie en fonction des facteurs qu'elle génère par transfert d'énergie vers de plus hautes ou de plus basses fréquences. Ces dernières, les ondes d'infragravité, seraient susceptibles de jouer un rôle dans la configuration hydrodynamique littorale (Bowen et Inman, 1971; Guza et Inman, 1975 ; Masselink, 1997). Leur analyse, par traitement du signal obtenu sur de nombreux enregistrements, montre leur généralité au cours des tempêtes, mais leurs modalités d'apparition et, surtout, leurs modalités d'action sur la structuration hydrodynamique de l'avant-côte doivent encore être explorées *in situ*. Le régime houlographique du golfe du Lion présente une variabilité saisonnière qui oppose globalement une saison estivale dominée par les houles modérées de beau temps et une saison hivernale où des coups de mer de 24 à 92 h peuvent se succéder à intervalles plus ou moins grands (1 à 4 par mois d'hiver). Une très forte variabilité interannuelle de leur intensité et de leur fréquence introduit un élément d'incertitude dans la détermination des conditions moyennes (Akouango, 1997). La définition de ce régime est donc un des sujets sur lequel la recherche doit apporter de nouvelles informations impliquant des suivis sur de longues périodes de temps, à l'échelle du demi-siècle futur.

En dépit de l'absence de marée, des variations de niveau de l'ordre de ± 1 m peuvent être observées à la côte. Rapidement atténuées vers le large (pente de 0,1%), leur périodicité, à logique météorologique et non astronomique, n'entraîne pas de conséquences géomorphologiques. Elles sont cependant responsables de surcotes et de décotes conduisant à des écoulements compensateurs transversaux.

Conjointement, les variations des caractères de la houle et des niveaux induisent dans la zone littorale une distribution courantologique tridimensionnelle. Son analyse suppose une distinction assez complexe entre périodes de beau temps et périodes de tempêtes ainsi qu'entre degrés d'agitation au cours de ces dernières, en tenant compte également de leur espacement dans le temps, c'est-à-dire de l'histoire météorologique immédiate. Elle implique aussi que soient séparés les différents espaces du profil transversal de la zone littorale, où s'opèrent les mutations du champ d'ondes et les variations de niveau. Sans entrer dans ces détails, le bilan courantologique peut être résumé en mettant l'accent sur quelques points essentiels (Certain, 2002) :

- Dans le sens longitudinal, la dérive littorale apparaît comme un élément de premier plan. Elle affecte une étendue plus ou moins large de la zone littorale en fonction de l'intensité du régime météo-marin. Restreinte à une étroite bordure côtière lorsque dominant les petites houles de beau temps, elle se déploie dans toute la largeur du système des barres en période de tempête. Bien qu'elle soit fondamentalement bidirectionnelle, seul son vecteur résultant doit être considéré pour la compréhension des processus littoraux. Selon les secteurs considérés, elle a alors une direction bien déterminée et une intensité que l'on cherche à traduire en terme de transports sédimentaires résultants. Dans le golfe du Lion, si les débits sont généralement faibles en ordre de grandeur ($10000 \text{ m}^3 \cdot \text{an}^{-1}$) leur valeur précise est mal connue à l'échelle locale et son évaluation dans chaque cas est un objectif de recherche (L.C.H.F., 1984).

- Dans le sens transversal, l'analyse courantologique fait apparaître des composantes bidirectionnelles qui sont, en premier lieu, dépendantes du type de temps. Lors des coups de mer, les courants ont ainsi une orientation marquée vers le large ; ils exportent du matériel dont une partie, atteignant la profondeur de fermeture ultime (limite d'action des houles exceptionnelles), peut être définitivement soustraite à la dynamique du système littoral. Lors des périodes de beau temps, ou plus précisément, sur le tombant des tempêtes annonçant le retour du régime de beau temps, le courant de houle lié à l'asymétrie des trajectoires des particules d'eau devient prépondérant et entraîne un écoulement vers la plage qui ramène le matériel sableux du large.

Inscrit, d'une part, dans des limites régionales plurikilométriques mais comportant des objets sédimentaires d'échelle métrique et, d'autre part, subordonné à une histoire plurimillénaire mais aussi à des processus à l'échelle de la seconde, le système littoral du golfe du Lion, comme toutes les zones littorales d'ailleurs (De Vriend, 1991; De Boer, 1992), doit être considéré à différents niveaux scalaires : échelle instantanée du processus, échelle événementielle de la morphodynamique des barres et du coup de mer, échelles annuelle et interannuelle du comportement littoral

(Barusseau *et al.*, 1994), échelle pluri-décennale voire séculaire de la tendance lourde qui entraîne le rivage vers une évolution à laquelle les termes d'érosion, accrétion ou stabilité s'appliquent alors.

L'ensemble des connaissances à ces quatre niveaux constitue une base indispensable mais, quand on considère la place de l'homme dans les zones de rivage et les conséquences de ses entreprises, seuls les deux derniers sont pertinents. Dans le golfe du Lion, la connaissance du sens des évolutions est alors grandement facilitée par l'introduction de deux notions : celle de cellule sédimentaire et celle de disponible sédimentaire.

Le devenir d'une portion donnée du linéaire côtier (par exemple, une plage urbaine) ne dépend pas de ce qui affecte une partie éloignée du golfe. Il est seulement sous la dépendance du bilan sédimentaire d'une unité géographique délimitée, d'extension kilométrique – la cellule sédimentaire – à laquelle appartient cette portion du littoral (Agence de l'eau, 2001). Le golfe du Lion a ainsi été découpé en 30 cellules dont la longueur varie de 1,5 à 15 km (Fig. 1). Pour chacune d'entre elles, mis à part les deux frontières longitudinales – l'une ouverte vers le large et l'autre fermée vers la terre – les limites importantes à considérer sont ses extrémités latérales. Dans le golfe, ces limites sont de nature différente, certaines naturelles (caps, embouchures), d'autres artificielles (ports notamment). Ainsi, les cellules 19 et 20 sont limitées par des embouchures (respectivement Aude, Orb, Hérault), la cellule 14 par un cap (cap Leucate) et par un port (Port la Nouvelle) et la cellule 27 par deux ports (Palavas les Flots et Carnon).

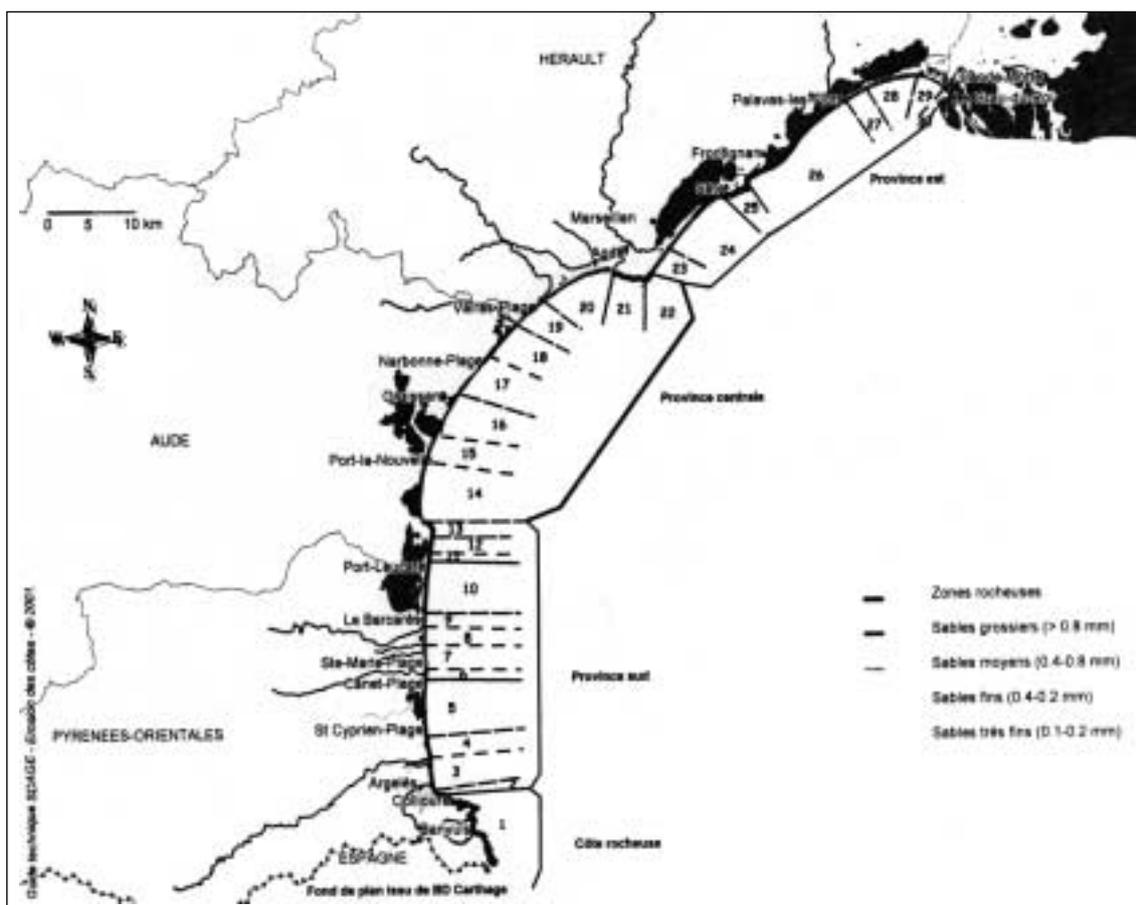


Fig. 1. Découpage en cellules sédimentaires du littoral du golfe du Lion.

Dans une cellule, la dérive littorale résultante est globalement homogène (unidirectionnelle), sauf en des secteurs très limités au voisinage même des limites latérales. Le sens de transport sédimentaire conséquent y est donc dirigé globalement, en année moyenne (mais souvent chaque année), de l'amont de la cellule (zone-source) vers l'aval (zone-puits).

En général, il existe un étroit parallélisme entre érosion et zone-source, accrétion et zone-puits, tandis qu'entre les deux (souvent une étendue importante de la cellule, en fonction de sa longueur), règne plutôt un état de stabilité (Certain, 2002). En fait, le bilan apparaît un peu plus nuancé parce que les limites latérales sont rarement totalement imperméables. Souvent, la dérive littorale dominante entraîne, en effet, un contournement partiel des obstacles latéraux et par conséquent, d'un côté, une légère importation de matériel et, de l'autre, une certaine exportation. Dans le golfe du Lion, ces flux transfrontaliers doivent encore faire l'objet d'une évaluation.

On voit donc que l'évolution d'une cellule est ici sous la dépendance des masses de sable qui y entrent et en sortent. Le sable du prisme littoral du golfe du Lion est actuellement peu renouvelé par des apports issus des bassins-versants. Le Rhône, tributaire essentiel par la quantité des alluvions compatibles avec le sédiment des plages, amenée dans le passé (c'est-à-dire principalement entre - 6000 et - 4000 ans, Arnaud-Fassetta, 1998), ne joue plus ce rôle dans l'ère historique (des preuves archéologiques démontrent un recul du rivage depuis 2000 ans, Tessier *et al.*, 2000). Quant aux autres fleuves, leur débit naturellement moindre et la même carence naturelle qui frappe les alluvions rhodaniennes déterminent un apport, par conséquent, très réduit. En outre, les réductions bien connues des apports fluviaux, en raison des aménagements sur les vallées, contribuent encore à raréfier la délivrance de matériel sableux frais. Cette pénurie s'exprime diversement dans le golfe du Lion en raison de la convergence des dérives est et sud. A l'échelle du golfe, on peut s'attendre à enregistrer des extrémités plus démunies que la partie centrale et, par conséquent, à plus de problèmes d'érosion dans les départements de l'Hérault (à l'est) et des Pyrénées-Orientales (au sud), que dans la partie centrale (le département de l'Aude), où l'accrétion devrait dominer. C'est globalement ce qu'on observe, à la nuance près que chaque cellule répercute, à son échelle, la logique zone-source/zone-puits et qu'en conséquence, une zone-source de la partie orientale du golfe, par exemple, cumule deux handicaps – le sien propre et celui dû à son appartenance géographique à une zone démunie – alors qu'une zone-puits pourra y compenser, au moins partiellement, le déficit dû à sa situation *a priori* désavantagée. Des exemples similaires seraient offerts par la région sud du golfe alors que dans la partie centrale, point d'aboutissement des deux dérives convergentes, c'est le contraire que l'on observe puisque, même en zone de départ sédimentaire à l'amont d'une cellule, le réservoir est globalement alimenté par le flux régional et ne souffre pas de pénurie.

L'idée qui survient alors est de contrôler l'importance volumétrique des réserves sableuses de l'avant-côte qui constitue un capital de matériel, faiblement réapprovisionné : le disponible sédimentaire. C'est lui qui contribue à la stabilité de la plage en participant aux échanges, entretenus par l'hydrodynamique et le vent, entre les parties émergées et immergées du profil. On constate en effet qu'en certains secteurs où des phénomènes d'érosion de la plage surviennent de manière récurrente (Palavas dans la région montpelliéraine, Sète sur la partie nord de l'étang de Thau), le prisme sédimentaire sous-marin est extrêmement mince, voire totalement absent. Un substratum rocheux, constitué le plus souvent par des grès infralittoraux, affleure alors ou forme un plancher peu enfoui qui limite à la base la couche active de sable disponible.

La mesure de son épaisseur a été réalisée en mettant en œuvre des levés par sismique réflexion haute résolution, méthode susceptible de fournir des indications sur la localisation et la profondeur des planchers gréseux, sur la structure des dépôts surincombants et susceptible aussi de fonctionner dans des profondeurs d'eau limitées, comme celles de l'avant-côte jusqu'à -1 m de profondeur. La Figure 2 montre de façon schématique le type de bilan que l'on peut tirer de ce genre d'investigation. Il y a bien cohérence des résultats avec l'organisation des transports sédimentaires dans le golfe du Lion puisque c'est dans la partie centrale du golfe que le disponible sédimentaire, au-dessus du plancher, est le plus volumineux par mètre longitudinal de plage alors que les extrémités sud (à gauche sur le graphique) et est (à droite) affichent des réserves beaucoup plus restreintes. Cette méthode qui démontre que les faibles volumes disponibles caractérisent des zones manifestant des signaux d'érosion répétés alors qu'au contraire, là où les volumes sableux disponibles sont généreux, il n'y a pas d'indices d'érosion préoccupante, peut donc servir d'outil fiable pour éclairer toute politique d'aménagement ou de suivi des aménagements antérieurs, en fournissant un indicateur utile de l'état volumétrique des sables de l'avant-côte.

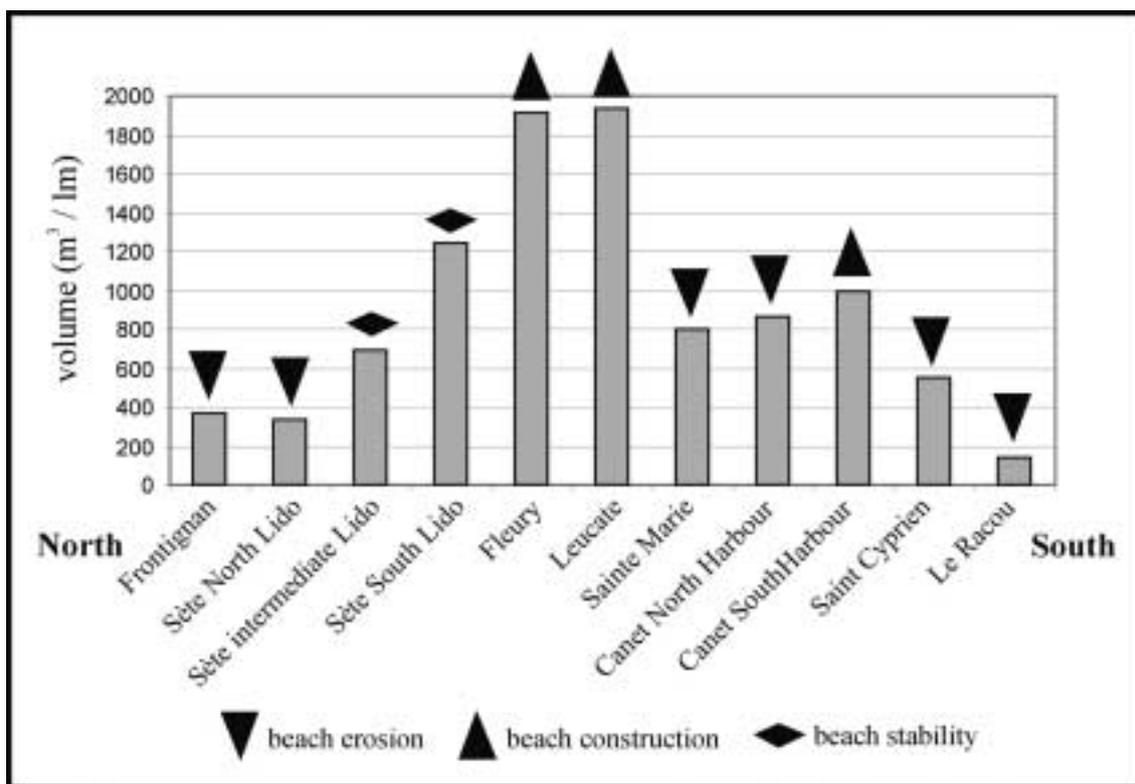


Fig. 2. Variabilité du disponible sédimentaire (volume de sable contribuant aux échanges morphodynamiques) en m³/m pour différentes stations du golfe du Lion.

Coastal dynamics and rehabilitation – the Spanish case

Agustín Sánchez-Arcilla¹ and José A. Jiménez²

¹Laboratorio de Ingeniería Marítima (LIM/UPC), Universitat Politècnica de Catalunya
(DEHMA, ETSECCPB, Barcelona, Spain

²International Centre for Coastal Resources Research (CIIRC), Barcelona, Spain

1. INTRODUCTION

The convergence of “uses” on the Spanish Mediterranean Coast (tourism, harbour and city development, etc.) leads, as in many other countries, to an over-exploitation of available resources. Focusing on “beach” resources, this means a progressive unavailability of beach deposits and an increasing need to artificially protect and/or re-nourish these beaches. These coastal works, however, have often “undesired” or “unexpected” effects which produce an accelerated degradation of valuable coastal assets.

This paper considers three examples of coasts with “problems” and possible interventions for rehabilitation. These examples correspond to beaches with free, impounded and mixed-type long-shore transport conditions. This “classical” approach to classification can also be of value to select a rehabilitation “approach”, since longshore dynamics plays a major role in beach behaviour.

2. THE CASE OF POCKET BEACHES

The case of pocket beaches (Fig. 1) is characterized – in morphodynamic terms – by profile and plan beach oscillations. The latter, also termed basculations, play a major role in pocket



Fig. 1. The pocket beach of Lloret de Mar in Costa Brava (Spain).

beach processes (see e.g. Dean and Dalrymple, 2002) and problems (Fig. 2). The corresponding “interventions” should be addressed to:

- maintaining a beach width above a threshold (determined mainly by cross-shore transport analysis).
- maintaining a beach plan within a range (determined by cross and long-shore transport analysis).



Fig. 2. Sample illustration of some effects due to beach basculations in Lloret de Mar.

3. THE CASE OF FREE-TRANSPORT OR MIXED-TYPE BEACHES

Morphodynamic “problems” in free-transport beaches are normally associated to larger-scale (compared to the former case) modifications of the transport pattern. This can be illustrated by the Montroig case (Fig. 3) which is a classical example of erosion due to up-drift barriers (Sánchez-Arcilla *et al.*, 2001). In any case, the resulting morphodynamic evolution depends (Sánchez-Arcilla and Jiménez, 1997; Jiménez and Sánchez-Arcilla, 1997) on the selected time-scale and cross- plus long- shore transport processes. The corresponding “interventions” should be addressed to:

- maintaining a beach plan within a range (determined by cross and long-shore transport analysis).
- maintaining a sedimentary volume (for the considered coastal stretch) and a “given” output to downdrift beaches (to avoid “translating” the problem down-coast).



Fig. 3. The beach of Montroig (Tarragona, Spain), eroding as a result of (nearly complete) up-drift longshore transport reduction.

This is illustrated by Figure 4 where the barrier beach dynamics reflects the longshore transport gradient in the outer coast (leading to erosion) and the cross-shore transport due to overwash and breaching (leading to bar migration) (Sánchez-Arcilla and Jiménez, 1994).

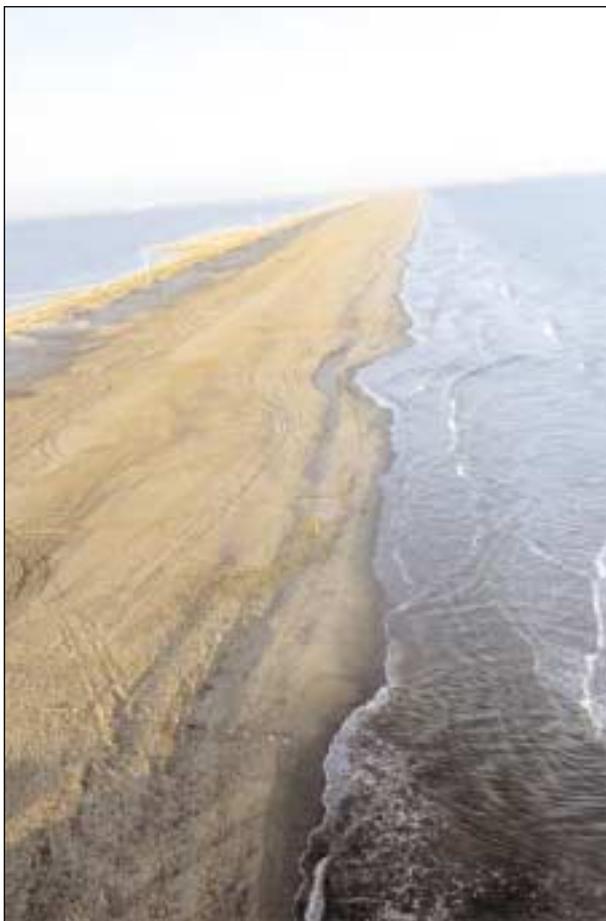


Fig. 4. The Trabucador barrier beach whose dynamics is associated to longshore and cross-shore transport processes.

4. REHABILITATION AND DYNAMICS

The selection of rehabilitation actions depends on the time-scale selected for the project and on the transport mechanisms dominant on that beach at that time-scale. The sustainability (eventually success) of the selected actions is critically linked to the compatibility between coastal engineering works (which are normally addressed to rigidize the coast) and beach dynamics (which is an inherent natural property of coastal systems).

Dynamique côtière et évolution spatio-temporelle de la frange littorale méditerranéenne entre Fnideq et Martil (province de Tétouan, Maroc)

Brahim El Moutchou

Université Abdelmalek Essaadi, Faculté des Sciences, Tétouan, Maroc

INTRODUCTION

La zone littorale se caractérise par son extrême diversité et par la rapidité de son évolution. C'est un environnement dont l'équilibre dépend à la fois de la nature du substratum, de la quantité des apports sédimentaires et des facteurs dynamiques (vents, houles et courants). La majorité des plages se trouve généralement en état d'équilibre avec les conditions dynamiques naturelles d'un site donné. La réalisation d'un aménagement quelconque rompt l'équilibre naturel et il se crée un nouvel état d'équilibre se traduisant par une nouvelle évolution du littoral. L'étude morphodynamique de quelques sites naturels ou aménagés situés sur le littoral méditerranéen entre Tétouan et Sebta (Ports de M'diq, Kabyla et de Restinga Smir) nous a permis d'apprécier les conditions naturelles et l'impact des aménagements portuaires sur les plages avoisinantes.

CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE

De Tétouan à Sebta, le littoral méditerranéen d'une quarantaine de kilomètres est relativement rectiligne selon une direction N-S. D'une pente généralement faible, la plage, limitée à l'Est par la mer Méditerranée et à l'Ouest par la chaîne du Rif, présente une largeur très variable allant de 0 à 100 m. Le climat de la région, de type méditerranéen, est caractérisé par un été chaud et sec et un hiver aux précipitations souvent brutales (El Gharbaoui, 1981).

La température moyenne annuelle est de l'ordre de 18°C. La moyenne des maxima est de 23°C, celle des minima est de 14°C. La température maximale de 35°C est enregistrée en août. La température minimale, de l'ordre de 5°C, est enregistrée entre décembre et janvier. La pluviométrie moyenne de 800 à 1000 mm/an est répartie sur 90 jours entre novembre et mars avec 5 à 6 mois secs. Les vents, assez violents, soufflent principalement du secteur Est (Chergui) de mai à octobre et du secteur Ouest (Gharbi) d'octobre à février. Un régime équilibré entre vents du secteur ENE et WSW s'installe de mars à avril.

Les principaux cours d'eau ont un régime torrentiel et entretiennent de ce fait une vive érosion dans le domaine interne du Rif aux forts reliefs.

Le littoral méditerranéen entre Sebta et Tétouan borde la partie septentrionale du domaine interne de la chaîne du rifaine. Orientée N-S, elle constitue, avec les cordillères bétiques occidentales, l'arc de Gibraltar. Dans ce domaine se rencontrent, de l'Ouest à l'Est et du bas en haut, des terrains essentiellement formés de calcaires triasico-liasiques (Dorsale Calcaire), des terrains

cristallophylliens fortement métamorphiques (Sebtides) et des terrains paléozoïques faiblement métamorphiques (Ghomarides) (Durand-Delga *et al.*, 1960-62; Kornpropst, 1971-74; Chalouan, 1986).

CONTEXTE HYDRODYNAMIQUE

Le contexte hydrodynamique sur le littoral méditerranéen est dominé par les courants induits par les tempêtes et les fortes houles en provenance du secteur E à ENE dont les effets sont accentués par les courants de marée et les courants généraux. La circulation générale est représentée par la superposition de deux masses d'eaux, l'une atlantique superficielle, entrant d'Ouest en Est à des vitesses de 40 à 60 cm/s, l'autre méditerranéenne profonde, sortant d'Est en Ouest à une vitesse de 30 cm/s. Cette dernière, affrontée au substratum rocheux au niveau du Cap de Sebta et de Gibraltar, s'écoule dans le sens opposé, d'Ouest en Est, à une vitesse de 15 cm/s qui, conjuguée aux effets des tempêtes et des houles exceptionnelles, provoque une prise importante de sédiments (Lacombe et Richez, 1982).

L'onde de marée, généralement très faible, provient de l'Atlantique et se propage vers la Méditerranée à travers le détroit de Gibraltar. Elle est de type semi-diurne avec un marnage moyen en vive eau de l'ordre de 0,8 à 1 m. La houle a une amplitude moyenne de 5,5 m et une période variable allant de 5 s à M'diq à 9,5 s. Ces fortes houles proviennent du secteur E à ENE. Elles se combinent à d'autres facteurs hydrodynamiques tels que les courants de marées et les courants de retour sur le fond, notamment en période de tempête, accentuant ainsi l'agitation et déplaçant les limites d'action des vagues (LPEE, 1977; 1985; 1987; 1991).

CARACTÈRES SÉDIMENTOLOGIQUES ET ÉVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE

La frange littorale méditerranéenne entre Fnideq et Martil est caractérisée par une grande variabilité des phénomènes conditionnant son évolution. C'est un environnement dont l'équilibre dépend à la fois du contexte géologique et de facteurs dynamiques spécifiques.

Les sédiments littoraux ont subi une longue évolution marquée pour l'essentiel par la superposition dans le temps des effets de deux dynamiques différentes : marine et fluviale. En effet, du Sud vers le Nord, un gradient décroissant traduit des processus hydrodynamiques constants de faible à moyenne énergie où interagissent les effets des décharges brutales des cours d'eau et ceux des remaniements permanents par les agents dynamiques littoraux.

L'étude de l'évolution de ce domaine littoral a permis d'individualiser deux grandes unités sédimentaires, un secteur septentrional (de Fnideq à M'diq) et un secteur méridional (de M'diq à Martil), dont les vitesses d'érosion sont variables au cours du temps sous l'influence des différents agents dynamiques et des différentes formes d'actions anthropiques (El Moutchou, 1991, 1995; Malek, 1991, 1995), à savoir :

- l'activité néotectonique qui s'effectue le long de failles Nord-Sud et Est-Ouest; il s'agit probablement des mêmes failles qui étaient à l'origine de la formation des grabens, à l'Oligo-aquitainien, dans lesquels se sont développées par la suite les plaines littorales;
- l'élévation du niveau marin, conséquence de l'augmentation de la température suite à l'activation de l'effet de serre par le déboisement et la pollution atmosphérique;
- la consolidation des dunes bordières par la construction de complexes touristiques, l'extraction massive des sables, les aménagements portuaires, l'installation de barrages sur l'arrière pays, constituent autant d'actions anthropiques qui, d'une part ont réduit considérablement le budget sédimentaire et d'autre part ont transformé la dynamique sédimentaire de cette frange littorale.

Le bilan global des différents phénomènes sédimentaires, morphodynamiques et évolutifs (El Moutchou, 1995; Malek, 1995) (évolution spatio-temporelle globale du trait de côte) rendent compte :

- d'une importante perte de sables fins vers le large,
- d'un pouvoir de transport par effet de houle parallèlement à la côte, du Sud vers le Nord,
- d'un apport terrigène très restreint des principaux cours d'eau,

- d'une érosion quasi-totale des deux secteurs, avec un taux d'érosion moyen annuel d'environ -1,5 à -2 mètres linéaires par an,
- d'un engraissement très limité aux plages attenantes aux digues (petites ou grandes) des ports dans le secteur septentrional, avec un gain de terrain d'environ +2 mètres linéaires par an.

Historique de l'évolution de la baie de Tanger et tentatives de réhabilitation

Maria Snoussi¹ et Bernard Long²

¹ Université Mohamed V, Faculté des Sciences, Dept. Sciences de la Terre, Casablanca, Maroc

² INRS "Eau, Terre, Environnement", Québec, Canada

INTRODUCTION

De par sa situation géographique et sa richesse historique et culturelle, la ville de Tanger bénéficie d'une vocation touristique privilégiée. Toutefois, si elle a représenté la première station touristique nationale durant les années 1970-1980, elle a accusé un net recul dans les années 1990, en raison notamment de la dégradation chronique de son littoral. Ainsi, Tanger a perdu 53% de ses nuitées internationales, entraînant ainsi une baisse des revenus touristiques (20 M\$/an), des revenus de l'artisanat (25%) et du transport touristique (40%). Les raisons de ce déclin sont en grande partie liées à la dégradation physique intense de la baie, et notamment à l'amaigrissement, voire la disparition de sa plage. Cet état reflète les conflits générés entre le tourisme et les activités portuaires et industrielles (Berriane, 1992; Snoussi, 1998)

De nombreux travaux ont été réalisés dans la baie de Tanger, notamment par le LCHF (1972a,b,c, 1974a,b), le CBC (1984) et le CID (1995, 1998), et plus récemment par Long *et al.* (1998a,b). Toutefois, pour différentes raisons, les travaux de restauration n'ont pas été entrepris et l'état de la plage reste toujours aussi préoccupant.

CONTEXTE NATUREL DE LA BAIE DE TANGER

Les données hydrologiques et sédimentologiques de la baie sont tirées des références citées plus haut.

Géographie et géologie

Située à l'extrémité occidentale de l'arc rifain, la baie de Tanger représente la partie maritime d'une dépression creusée entre deux pointes rocheuses. Elle est recouverte par des sédiments plio-quadernaires constitués de faciès fluvio-deltaïques et côtiers. L'érosion de ces derniers constitue l'apport majeur en galets, graviers, sable, silts et argiles. La baie est formée de plusieurs entités sédimentologiques dont les estuaires de quatre oueds et le cordon sableux de plage qui s'étend sur environ 5 km de long.

Hydrologie et hydrodynamique

Quatre oueds (Souani, Moghogha, Melaleh et Chatt) débouchent dans la baie de Tanger. Le débit solide annuel de l'ensemble de ces oueds est estimé entre 60 000 et 70 000 t/an dont 5 000 à 10 000 m³ de sables, graviers et galets.

La marée est de type semi-diurne; le marnage des vives-eaux est de 1,8 m et celui des mortes-eaux de 0,8 m. Le niveau moyen de la mer est de +1,4 m.

Les courants de marée du détroit de Gibraltar n'affectent que modérément la baie de Tanger, excepté le long du brise-lames où ils seraient supérieurs à 0,4 m/s. Dans la baie, les courants mesurés à l'aide de dériveurs (LCHF, 1972a) sont de 0,3 à 0,5 m/s en vives-eaux entre le port et le Cap Malabata. Dans la zone abritée par le brise-lames, les vitesses de courant sont très faibles (0,1 à 0,2 m/s). L'onde de marée est déformée près du littoral, car le flot porte à l'Est alors que le jusant porte à l'ouest.

La baie de Tanger subit l'influence du régime des houles du secteur ouest et du régime des vagues du secteur NE. Les houles de secteurs W à NW ont des périodes observées de 5 à 17 s avec des hauteurs significatives qui peuvent être supérieures à 5 m et une fréquence d'apparition de 14%, soit 51 jours par an (CID, 1995).

Après réfraction, les houles du NW atteignent la baie perpendiculairement à la côte. Les vagues de NE sont dues à des mers de vent locales; elles sont caractérisées par des périodes courtes (4 à 9 s) et des hauteurs estimées en moyenne de 0,5 à 2 m dans la baie, et des hauteurs maximales de 2 à 3 m au large. Leur fréquence d'apparition est de 17%, soit 61 jours par an; elles abordent la plage avec une incidence de 20 à 30 degrés.

Sédimentologie

Les faciès sédimentaires de la baie de Tanger sont caractérisés par la succession de sables fins sur le littoral, très fins entre 0 et -2 m et par des silts et argiles à partir de -3 m. Les sédiments fins sont surtout concentrés dans la zone de protection du port où ils peuvent atteindre des épaisseurs supérieures à un mètre.

Dans toute la baie, entre -10 et -15 m les algues calcaires créent des zones importantes d'encroûtement qui traduisent le faible échange sédimentaire entre le littoral et ces fonds.

La partie Est de la plage est le siège d'une importante concentration de galets qui proviennent tant de l'érosion de l'ancienne terrasse que des apports de l'oued Chatt.

L'origine des sédiments est locale et provient du lessivage des bassins versants (60 000 t/an dont 50 000 à 55 000 t/an d'éléments fins) et de l'érosion du littoral Est dont la quantité est inconnue.

Le bilan sédimentaire établi par le LCHF (1972a) estime que le transit littoral résultant dans la direction ouest est de 35 000 m³/an, le transport éolien de 5 à 10 000 m³/an et l'apport fluvial de 5 à 10 000 m³/an.

HISTORIQUE DES AMÉNAGEMENTS DU PORT ET DE L'ÉVOLUTION DE LA PLAGE

La plage de Tanger a évolué en réponse aux modifications hydrodynamiques induites par les extensions et aménagements successifs du port, réalisés à différentes étapes depuis la création de ce dernier en 1905 (LCHF 1972a; CID 1995 et 1998).

- Le premier port de Tanger était constitué par une jetée courbe de 300 m de longueur, un terre-plein et un wharf de 108 m.
- Entre 1925 et 1933, la deuxième phase a conduit à l'extension du brise-lames courbe sur 1040 m et à la construction d'aménagements internes.
- Entre 1948 et 1950, de nouveaux aménagements portuaires ont été réalisés sans extension du brise-lames.
- Entre 1954 et 1956, la nouvelle phase d'extension du port a conduit à un prolongement du brise-lames courbe de 200 m et à un aménagement intérieur des bassins et à une extension du terre-plein.
- Entre 1960 et 1964, de nouveaux travaux ont conduit à l'extension du brise-lames sur 100 m et à un réaménagement interne.

Ces aménagements ont entraîné une modification de la propagation des houles du secteur NW, et par suite une érosion de la zone Est et une accumulation dans la zone à l'abri des digues de protection. Le recul du littoral entre les oueds Moghogha à l'est et Ghandouri à l'ouest est estimé

entre 2 à 3 m par an et son avancée le long du môle Est du port à 5 m par an. Le recul a été aggravé par la déflation éolienne qui représente 30% de l'érosion totale (Charrouf, 1991).

Cet état préoccupant de dégradation a incité les pouvoirs publics à entreprendre des études et à proposer des mesures de réhabilitation et de protection de la baie. Le site étant situé sur une côte à faible transit littoral et à forts mouvements dans le profil, les protections de haute plage du type mur vertical en gabions se sont avérées mal adaptées à ce type de problème et n'ont pu résister aux attaques des houles de tempêtes plus d'une année (Charrouf, 1991).

Les études du LCHF (1972a,b,c) ont proposé un avant-projet comprenant plusieurs variantes de protection par épis et brise-lames et ont permis de retenir une protection portant sur quatre épis et trois brise-lames, d'un rechargement de sable entre les épis avec du matériel provenant de la zone de dépôt située près du port et d'une protection contre l'érosion éolienne. Ce projet n'a été que partiellement réalisé entre 1984 et 1985 (CBC, 1985) et a consisté seulement en l'implantation de deux épis et d'un brise-lames.

Depuis la création de ces ouvrages, le sable a disparu et seuls les galets forment l'ossature sédimentaire du littoral. En 15 ans, la perte sableuse est estimée à 180 000 m³ au lieu de 105 000 m³ prévus sans protection et 12 000 m³ prévus avec la construction des ouvrages.

Devant l'ampleur de cette dégradation, les ministères de l'Équipement et du Tourisme ont décidé en 1998 de lancer l'étude d'un plan de réhabilitation de la plage. Cette étude a été entamée par Long *et al.* qui, après deux missions de terrain (avril et décembre 1998) ont rapporté que le littoral montre toujours sur sa partie Est des signes d'érosion très sévère, et que la majorité des profils sont devenus réfléchifs entre la plage de Ghandouri et l'oued Moghogha, alors que la zone proche du port continue de piéger les sédiments, notamment entre l'oued Souani et le port où la reprise par l'action éolienne forme des dunes le long des murs du port. Ils ont donc convenu d'entreprendre une campagne de mesures en janvier 1999 et de préparer un plan d'action dont la première étape consisterait à effectuer un rechargement de haute plage, et la deuxième étape à un rechargement mixte au large et à la côte.

PROJET DE RÉHABILITATION PROPOSÉ

Après l'étude de l'état actuel des plages et de l'évolution bathymétrique de la baie, B. Long et son équipe proposent en 1998 un projet intégré de réhabilitation globale (Fig. 1). Ce projet comporterait deux phases distinctes qui prennent en compte tant les impératifs socio-économiques de la région concernée que les impératifs techniques pour stabiliser le littoral.

- La première phase a pour but de recharger la haute plage de la partie Est avec les sédiments accumulés sur la partie ouest de la baie entre le port et le km 1,5. Ce rechargement temporaire rapportera du sable sur la plage Est, ce qui permettra de déterminer le transit sédimentaire en direction de l'ouest sous l'effet des houles. Ce rechargement est déterminé à partir du comportement physique et sédimentologique du littoral, ainsi que des données socio-économiques existantes. Il a nécessité les études suivantes :

- évaluation de l'érosion des plages ; celle-ci a été réalisée à partir des profils de plages levés tous les 100m perpendiculairement au rivage et dont l'analyse a permis de déterminer le profil d'équilibre ainsi que les volumes sédimentaires en excès dans les profils en sédimentation ou en moins dans les profils en érosion;
- détermination des cubatures pour le rechargement ; elle est calculée à partir du volume de sable nécessaire pour créer le profil d'équilibre;
- détermination des cubatures d'emprunt ; elle a été réalisée en déterminant les volumes sableux accumulés sur la partie ouest de la plage.

- La deuxième phase devrait stabiliser la plage en reconstruisant son profil d'équilibre. Le projet comporte les méthodes de rechargement et les différents travaux de réalisation. L'accent est mis sur le fait que la réussite de ces opérations est conditionnée par l'arrêt immédiat des emprunts illicites de sable, la mise en place des protections contre le transport éolien, ainsi que la mise en place d'un plan de suivi et de mesures.

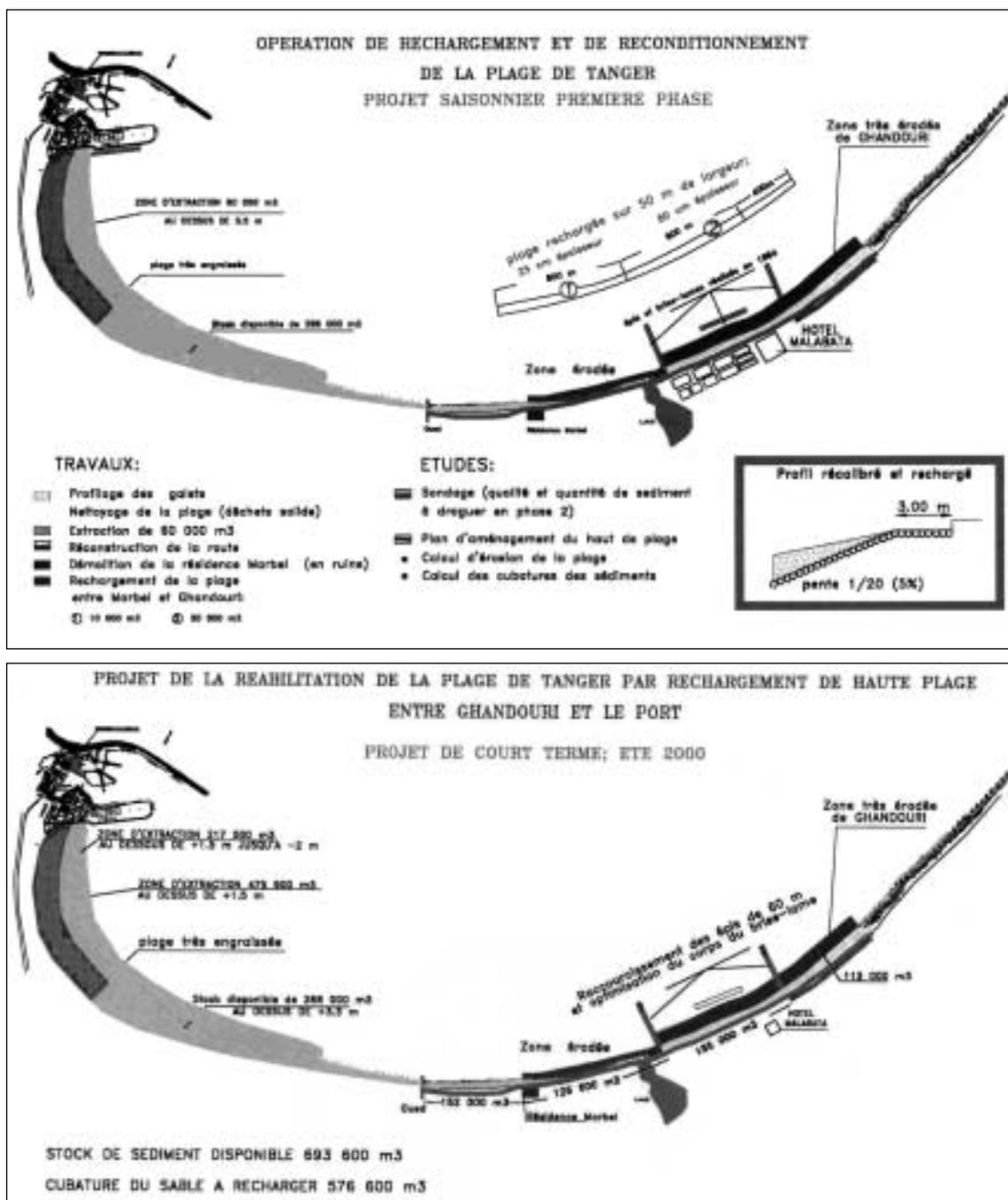


Fig. 1. Projet de réhabilitation de la baie de Tanger proposé par B. Long *et al.* (1988).

CONCLUSION

Depuis plus d'un siècle, la baie de Tanger souffre des effets pervers des ouvrages portuaires. Elle continue en effet d'évoluer dans un contexte d'érosion et de sédimentation qui menacent la pérennité de ses plages et peuvent compromettre irréversiblement l'avenir touristique de la baie si aucune intervention de réhabilitation intégrée et de protection n'est envisagée à brève échéance. L'échec des tentatives précédentes est dû à plusieurs facteurs, dont notamment le manque d'engagement de l'Etat, la non-réalisation de toutes les phases des projets retenus et le manque de suivi des opérations de maintenance.

Erosion de la baie de Tanger

**B. El Moumni, A. El Arrim, M. Maâtouk, I. El Hatimi,
M. Wahbi et A.A. Tribak**

Université Abdelmalek Essaadi, FST-Tanger, Maroc

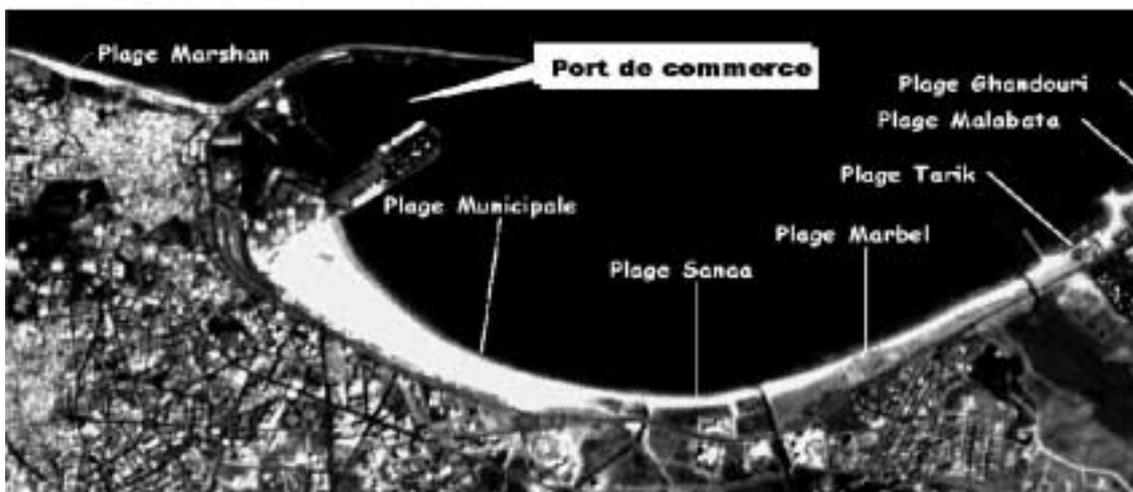
Le choix de la ville de Tanger pour la venue de cet atelier a matière de symbole. En effet, à l'image d'autres zones côtières méditerranéennes, le littoral de la marge méditerranéenne marocaine connaît une érosion plus ou moins accentuée sur toute la côte, mais de manière spectaculaire au niveau de la baie de Tanger.

MORPHOLOGIE

Entre les deux pointes rocheuses délimitant la baie de Tanger (Kasbah à l'Ouest et Malabata à l'Est), la baie se compose d'un ensemble de plages sableuses qui constituent un atout touristique incontestable. D'Est en Ouest on distingue les plages suivantes (Fig. 1) :



Fig. 1. Situation géographique de la baie de Tanger et ses différentes plages.



- Plage Ghandouri, entre la maison Ghandouri et le premier épi situé à l'est de la baie. Au niveau de cette plage, large de 240 m et longue de 100 m, subsiste en haut de plage un cordon de galets incapable de bloquer l'effet érosif des houles du secteur est. La route de bord de mer est fortement endommagée.
- Plage Malabata, s'étalant entre le premier épi et le brise-lames sur 420 m. Le haut de cette plage à caractère réfléchif est constitué d'un cordon de galets.
- Plage Tarik, située entre le brise-lames et le deuxième épi, d'environ 360 m. La plage sableuse est quasi-absente; le haut de plage est constitué d'un enrochement installé le long de l'hôtel Tarik pour assurer la protection de cet établissement.
- Plage Marbel d'une étendue de 780 m, elle est située entre l'oued Melaleh et la résidence Marbel. La plage existe sur l'ancien cordon qui sépare l'estuaire vaseux de l'oued Melaleh de la mer. Le haut de plage est constitué d'un mélange de sable et de galets qui surmonte une formation argileuse indurée et stratifiée. Cette dernière affleure sur une dizaine de mètres de largeur au niveau de haut de plage en érosion;
- Plage Sanaa, s'étalant sur une longueur de 480 m entre canal Mghogha et l'oued Souani, elle est généralement en équilibre. Le haut de plage est formé de dunes sableuses tabulaires.
- Plage municipale, d'une longueur de 2200 m depuis l'oued Souani jusqu'aux installations portuaires. Son haut de plage est formé de dunes sableuses qui sont alimentées par des vents de NE en formant une zone abritée par le mur du quai du port et le mur de clôture de la plage.

STADES D'ÉVOLUTION

Ce littoral présente un équilibre instable, sujet à des modifications permanentes qui l'affectent depuis le début du XXe siècle. Actuellement, il se trouve dans une phase évolutive intense, matérialisée par une extension portuaire et des aménagements réalisés en amont et en aval de la frange côtière. L'analyse des différents stades évolutifs de la morphologie côtière, ainsi que l'étude de la dynamique sédimentaire en terme de bilan érosion-sédimentation, a permis de préciser les facteurs et les phénomènes qui interviennent dans la stabilité du littoral et dans l'évolution de du trait de côte.

Cette évolution a été reconstituée à partir des photos aériennes (Fig. 2), couvrant la période 1958-1996, des cartes topographiques au 1/50 000 ; 1/25 000 et des documents et rapports (LCHF, 1972, 1974; Long, 1998-1999). Elle est bien marquée dans le secteur Est de la baie de Tanger, où la ligne de rivage a subi une érosion estimée à 3 m/an pour la période 1988-1997. En même temps, et pour la même période, ce même secteur a connu localement une avancée du trait de côte estimée à 0,3 m/an à proximité des ouvrages de protection réalisés pour la protection de certains établissements touristiques. Dans la partie occidentale de la baie et sur une longueur de 1,8 km, il y a eu accumulation de sédiments et une avancée du trait de côte de 30 à 60 m soit une vitesse moyenne de l'ordre de 3,2 à 6,6 m par an (El Arrim, 2001).

La synthèse réalisée à partir des différentes photographies aériennes (1958-1996) met en évidence (Fig. 3) le degré d'érosion dans la partie orientale et l'accumulation en sables dans la partie occidentale de la baie.

ESTRAN ET PLAGES SOUS-MARINES

En milieu marin, la morphologie actuelle de l'estran et de la plage sous marine montre en général une côte plate avec une profondeur évoluant progressivement vers le large. A l'ouest de la plage Ghandouri, les isobathes entre 1m et 6 m sont assez réguliers et parallèles au rivage (pente douce) alors qu'à l'est de cette plage, les isobathes situés entre 1 et 10m suivent les alignements rocheux qui prédominent (pente forte).

Une dépression en forme de vallée prolonge oued Melalah à partir d'une profondeur de 6 m. L'évolution de l'estran et de la plage sous marine, par analyse des isobathes 3 m, 5 m et 10 m (LCHF, 1972) a permis de mettre en évidence dans la partie occidentale (zone d'engraissement) et à l'est (zone d'érosion) les constatations suivantes.

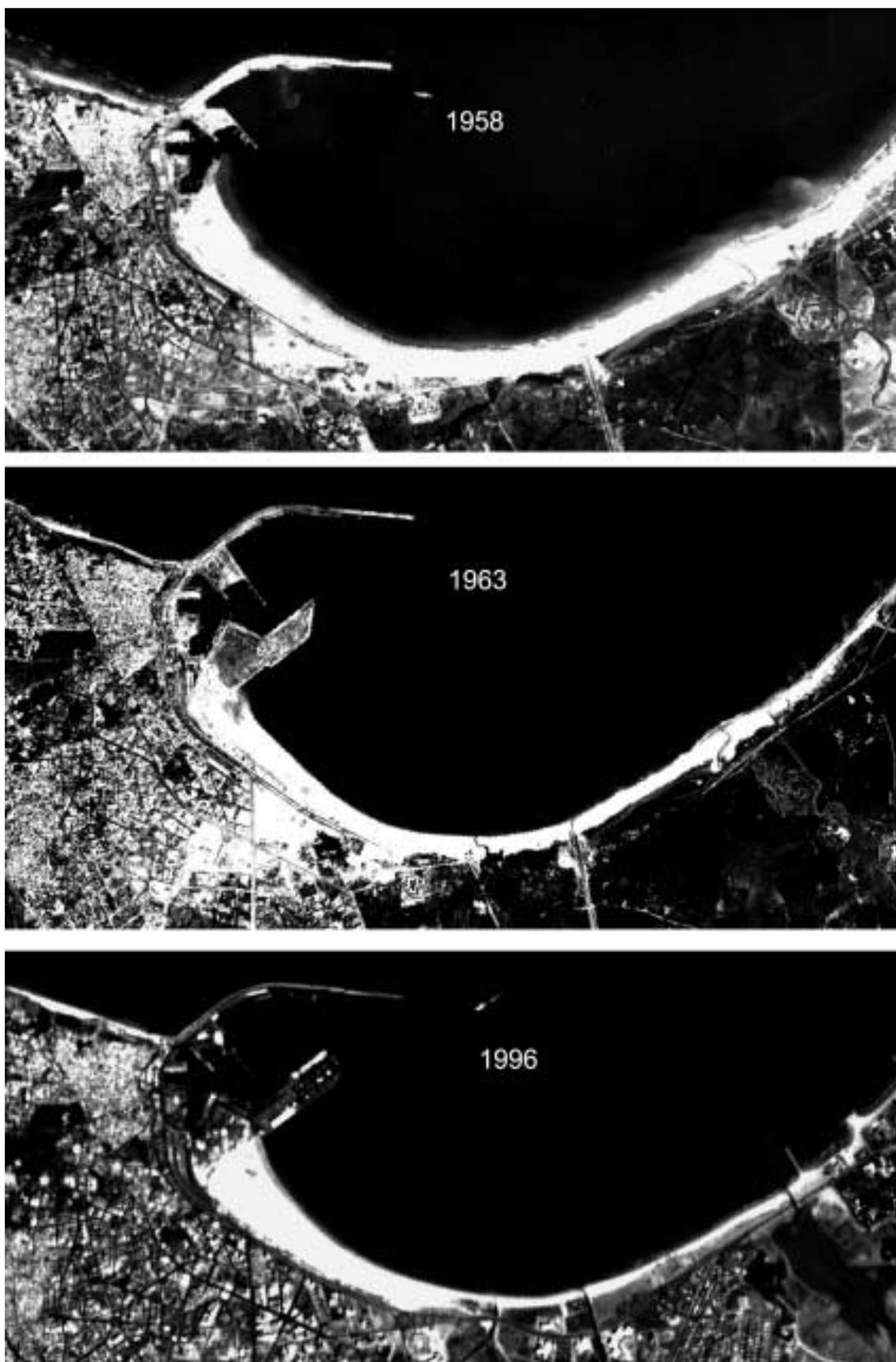


Fig. 2. Evolution du trait de côte de la baie de Tanger entre 1958 et 1996.

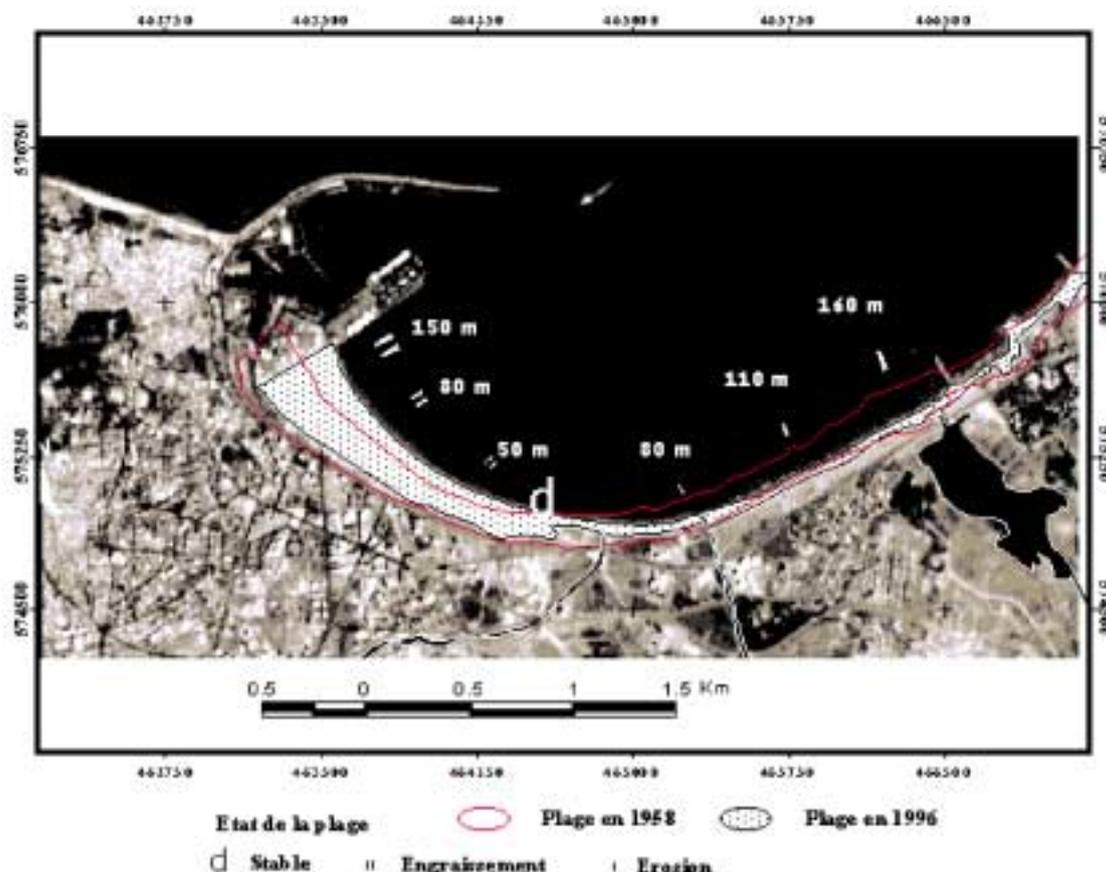


Fig. 3. Dégradation des plages dans la partie Est de la baie de Tanger entre 1958 et 1996 (à partir de photographies aériennes).

L'isobathe 3 m connaît dans la partie occidentale de la baie une avancée vers le large traduisant ainsi un engraissement de l'ordre de 56 m, soit une vitesse estimée à 1 m/an. A l'est (Ghandouri), le même isobathe recule sur une distance de 120 m, soit une vitesse d'érosion estimée à 2 m/an environ. La même remarque reste valable pour l'isobathe 5 m, avec une vitesse d'érosion dans sa partie orientale de l'ordre de 2 m/an. Enfin l'isobathe 10 m qui à son tour a connu une avancée vers le large dans la partie occidentale, alors qu'à l'est, cet isobathe a reculé de manière spectaculaire avec une vitesse estimée à 3,3 m environ.

FACTEURS NATURELS ET ANTHROPIQUES MIS EN CAUSE

Les facteurs naturels ayant agi sur cet équilibre sont les mêmes rencontrés plus à l'est (El Moumni *et al.*, 1999), se résumant par l'action des houles perpendiculaires à la côte et le transit littoral (mouvement parallèle à la côte), la réduction du stock sédimentaire disponible pour alimenter les plages (sédiments marins ou apports terrigènes), avec comme caractéristique de la baie de Tanger une surexploitation de sables accompagnée localement par la destruction du cordon littoral et son rôle protecteur. Le Tableau I, en tenant compte des directions abondantes des houles avec les fréquences annuelles, met en évidence une estimation du transit littoral moyen annuel le long de la côte de la baie de Tanger.

Le vent assez fréquent dans le secteur permet à son tour une érosion avec un débit solide variable en fonction de sa vitesse. Le transport éolien devient de plus en plus important vers l'ouest du littoral; la plage ouest de la baie semble être un piège à sédiments. Elle recevrait un volume moyen annuel de sable de l'ordre de 36 m³/m/an. Ces résultats confirment un transport éolien dominant de l'Est vers l'Ouest.

Les facteurs anthropiques se résument par l'impact des aménagements côtiers, portuaires, l'urbanisation balnéaire et les différents ouvrages de protection construits. Ces facteurs, comme

Site	Obliquité de la houle en degré	Débit moyen journalier (m ³ /j)	Débit moyen annuel (m ³ /an)	Débit moyen annuel total (m ³ /an)
plage Ghandouri-Malabata	25°	7200	25380	28900
	30°	8000	29200	
	35°	8800	32120	
Plage Marbel-Canal Mghogha	30°	8000	29800	31633
	35°	8800	32120	
	40°	9200	33580	
Plage ouest de la baie	35°	8800	32120	34066
	40°	9200	33580	
	45°	10000	36500	

Tableau I : Estimation du transit littoral moyen annuel le long de la côte de la baie de Tanger

partout en Méditerranée occidentale, ont favorisé des modifications hydrodynamiques et généré des zones à érosion accélérée et des zones à forte accumulation.

CONCLUSION

Les suggestions proposées ci-dessous permettraient, entre autres choses, d'aider les décideurs à prendre des décisions relatives à la réhabilitation et la restauration de la baie de Tanger :

- rétablissement du transit littoral WE partout où il a été perturbé, en alimentant de manière artificielle des plages déficitaires par des sables à caractéristiques adéquates;
- édification des barres sous-marines au large (plage sous-marine), afin d'atténuer l'impact de la houle est;
- surveillance continue des côtes en procédant à des levés réguliers;
- limitation des secteurs urbanisés dans des zones à risque de dégradation par l'érosion;
- interdiction des emprunts illicites de sable.

REMERCIEMENTS. Ce travail a bénéficié du soutien du Ministère Marocain de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche Scientifique et de la Formation des Cadres (PARS SDU 80 et réseau REMER).

Problèmes d'érosion du littoral méditerranéen marocain et techniques de réhabilitation

Souad Haïda¹ et Maria Snoussi²

¹ Université Ibn Tofail, Faculté des Sciences, Kénitra, Maroc

² Université Mohamed V, Faculté des Sciences, Rabat, Maroc

INTRODUCTION

S'étendant sur environ 512 km, le littoral méditerranéen marocain recoupe successivement les différentes unités de la chaîne rifaine. Il est traversé par de nombreux cours d'eau dont les principaux sont la Moulouya et le Nekor à l'Est et les oueds Smir, Martil, Emsa, Laou, Ghiss et Kerte à l'Ouest (Fig. 1). A côté des principaux ports polyvalents (Nador, Al Hoceïma, Tanger), des ports de pêche et de plaisance ainsi que de nombreux villages de pêche artisanale jalonnent la côte. La

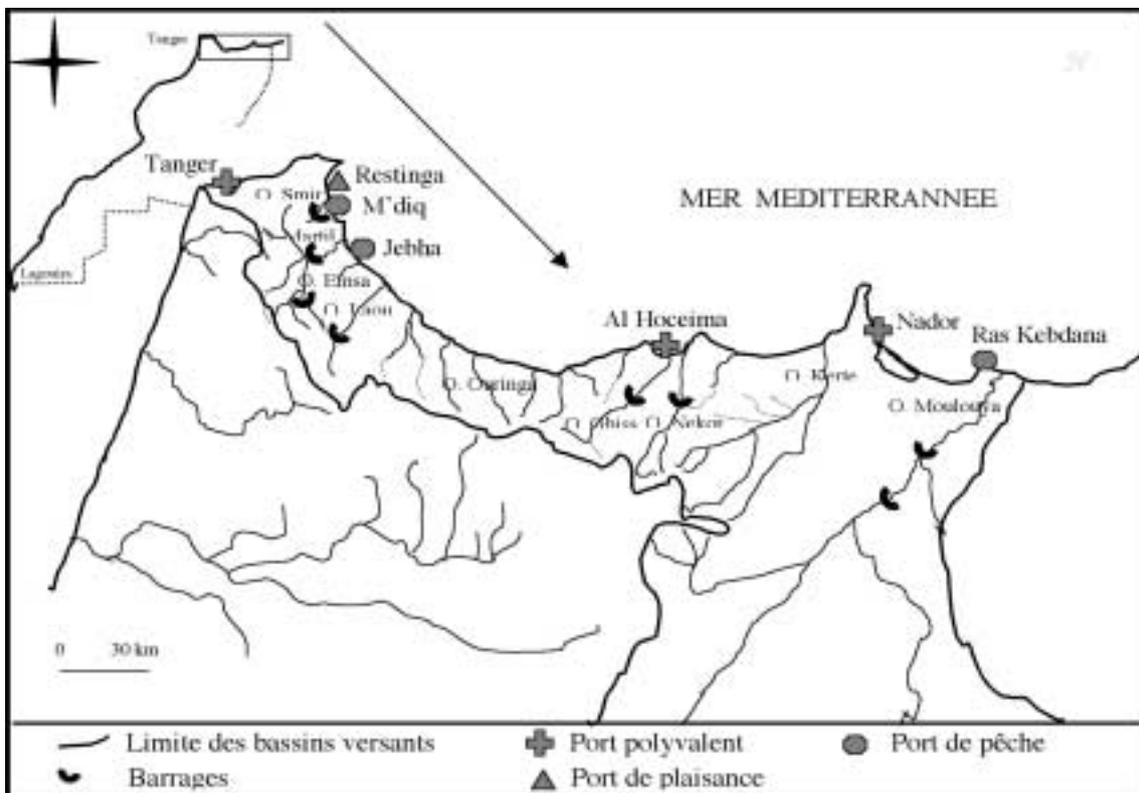


Fig. 1. Aménagements (barrages et ports) dans le versant méditerranéen marocain.

géomorphologie du rivage est très irrégulière (Snoussi, 1998): la côte est accidentée et constituée de caps et de criques à l'Ouest, puis devient basse et marécageuse. Entre l'Oued Laou et l'embouchure de l'Oued Nekkor, le littoral est dominé par de hautes collines et des falaises abruptes qui ne dégagent que des plages étroites de galets et de petites plaines alluviales (Fig. 2). Enfin dans sa partie orientale, la côte est plus ou moins hétérogène; Saidia constitue la plage sableuse la plus étendue (16 km) de cette façade et probablement l'une des plus importantes de la Méditerranée.

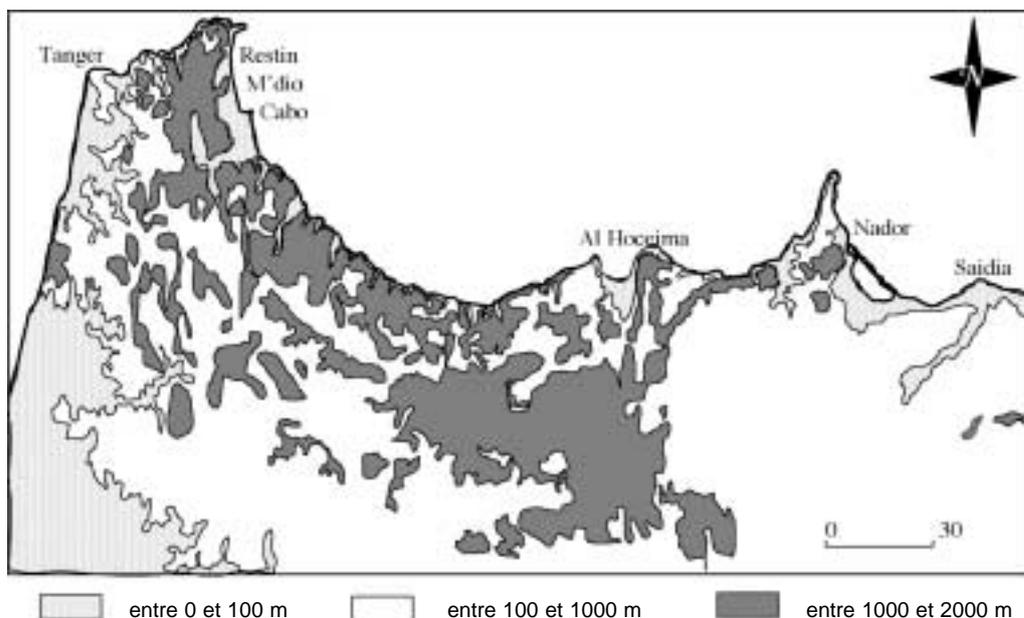


Fig. 2. Carte hypsométrique simplifiée de la frange méditerranéenne marocaine.

Cette frange littorale se caractérise par une exposition directe aux influences marines occasionnant des conditions d'énergie relativement forte. Les plages constituant ce littoral sont étroites et en perpétuel remaniement sous l'action de divers facteurs naturels (géomorphologiques, hydrodynamiques, néotectoniques) et anthropiques.

CAUSES DE L'ÉROSION

Facteurs naturels

Le littoral méditerranéen est principalement constitué (80%) de falaises rocheuses qui ne laissent dégager que des plages étroites de galets et de sables dans les baies de Tanger et d'Al Hoceïma et à l'embouchure des cours d'eau. Certaines plages se forment aux débouchés des oueds (Martil et Negro) où apparaît une barre sableuse qui ferme leur sortie lorsque les transports marins et l'énergie de la houle l'emporte sur celle des crues. Le budget sédimentaire côtier dépend principalement des conditions hydrodynamiques de la région, qui se caractérisent en gros par un transit littoral en général faible (S.A.T, 1994) orienté selon la direction préférentielle des houles de tempêtes; les plus fortes houles proviennent du secteur Est et Est-Nord-Est et l'intensité maximale du courant peut atteindre 68 cm/s dans la baie de M'diq (Orbi *et al.*, 1998).

Ce littoral est par ailleurs soumis aux effets de la néotectonique qui semble contrôler l'évolution globale récente du rivage comme dans le secteur occidental compris entre M'diq et Oued Laou (El Moutchou, 1995).

Ces caractéristiques naturelles traduisent une grande vulnérabilité du littoral méditerranéen à l'érosion, phénomène qui est amplifié par les aménagements et l'urbanisation grandissante de cette frange littorale.

Activités humaines

D'autres causes beaucoup plus insidieuses, dues aux activités humaines, interviennent dans l'évolution du trait de côte en modifiant l'équilibre du budget sédimentaire. Les exemples les plus évidents sont liés à la construction des barrages et des ports. En effet, la présence de barrages sur

la majorité des oueds (Moulouya, Nekor, Smir, Martil, Laou et Ghiss) a entraîné une réduction de près de 70% de la superficie qui devrait normalement alimenter la zone côtière en eau et en sédiments (Fig. 3). Ces barrages sont caractérisés par un fort taux de piégeage des sédiments (93 à 96%). On peut citer le cas de la Moulouya qui exportait à la Méditerranée avant la construction du barrage Mohammed V un flux de matières solides en suspension évalué à 12×10^6 tonnes/an (avec 10% de sables soit environ $1,2 \times 10^6$ tonnes/an). Après la construction de ce barrage ce flux a diminué d'environ 92% (soit seulement 960 000 tonnes/ an) (Snoussi *et al.*, 2002). La réduction des apports continentaux aura donc pour conséquence un renforcement de la dynamique marine, et par suite un remaniement intense des corps sableux.

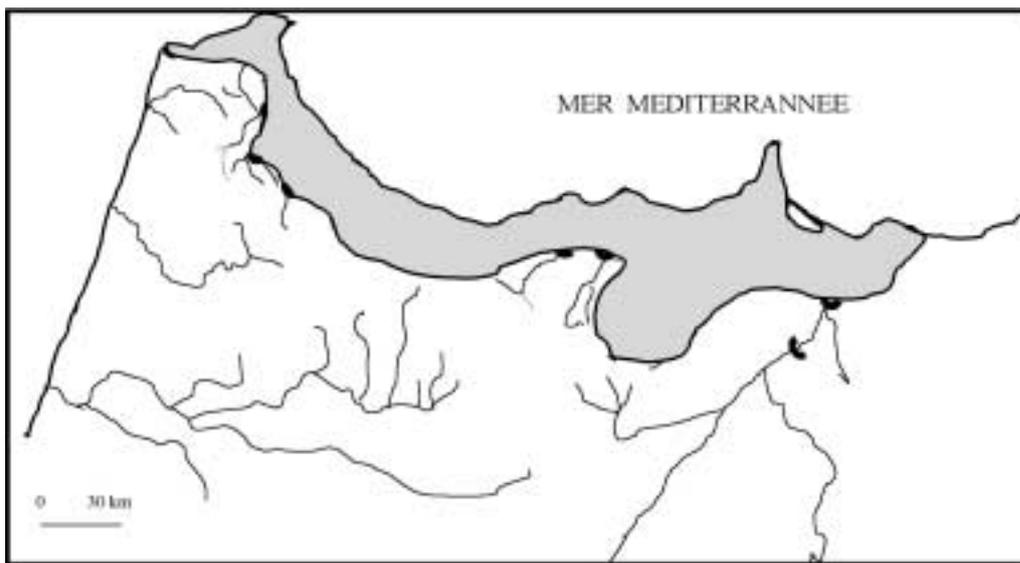


Fig. 3. Réduction de la surface de drainage alimentant le littoral du fait de la présence des barrages.

Les aménagements et extensions portuaires ont également induit des modifications hydrodynamiques et généré des zones sévères d'érosion et des zones d'accumulation de sable. (S.A.T, 1994; El Moutchou, 1995; Malek, 1995).

La pression de la population sur la ligne de côte, traduite par une urbanisation dense et anarchique sur la haute plage et les dunes bordières (Martil, Capo Negro, M'diq, Fnideq et Saïdia) a aussi contribué à la dégradation des plages.

En plus de l'impact de ces aménagements, les plages et les dunes bordières de la côte méditerranéenne sont soumises à une extraction abusive, souvent illicite des sables et des galets. On peut citer les emprunts de sables sur les oueds Martil et Mellah qui ont atteint respectivement 1 875 000 tonnes depuis 1981 et 1 350 000 tonnes entre 1986 et 1992. Ce phénomène ne fait qu'aggraver le déficit du stock en matériaux et renforcer par conséquent l'érosion, surtout au niveau des plages de Martil, Azla, Emsa et oued Laou.

PROPOSITION DE QUELQUES MESURES DE PROTECTION ET DE RÉHABILITATION DU LITTORAL

En raison de la complexité et de la diversité géomorphologique et socio-économique du littoral méditerranéen marocain, la démarche de réhabilitation environnementale des littoraux érodés sera différente d'une situation à l'autre en fonction de la nature du problème posé, de la nature et qualité des données disponibles, des contraintes en termes de temps, moyens financiers et compétences techniques et enfin de la volonté politique affichée. Il n'est cependant pas inutile d'inventorier les outils et méthodes utilisables pour optimiser l'élaboration d'un diagnostic, ainsi que les différentes techniques de protection et réhabilitation des plages érodées.

Elaboration du diagnostic

Elle se fera en 3 étapes :

- analyse du trait de côte du site replacé dans son contexte régional;

- mise en évidence des contraintes et des potentialités;
- élaboration de scénarios d'aménagements et définition d'un programme d'intervention.

La construction de ce diagnostic devra tenir compte des échelles de temps, des moyens et des compétences disponibles.

Méthodes de protection et de restauration

i) structures dures

Les structures rigides de protection face au recul du trait de côte (murs, épis, brise-lames, enrochement, etc.) ont été largement utilisées de part le monde, mais sont l'objet de sévères critiques en raison de leur coût trop élevé et des nombreux effets négatifs qu'elles génèrent sur l'ensemble du littoral concerné.

ii) méthodes douces :

- L'alimentation artificielle des plages (*beach nourishment*)

Elle a pour but de corriger un déséquilibre sédimentaire sans perturber le jeu naturel des processus en action sur une côte. (Paskoff, 1994). A condition de disposer d'un stock suffisant de sable dont la nature est très proche de celui érodé, et dont l'extraction ou le dragage ne perturbe pas les échanges sédimentaires, cette méthode ne présente pas de grosses difficultés techniques; elle est cependant relativement coûteuse, si elle doit être renouvelée fréquemment.

- La fixation des dunes bordières

Les techniques utilisées pour la fixation et la restauration des zones dunaires relèvent de deux grandes catégories :

- les interventions mécaniques dont le principe est de rétablir ou de rectifier le profil du bourrelet dunaire littoral pour favoriser l'écoulement laminaire du vent. Parmi ces techniques on peut citer les brise-vent naturels (les plus utilisés) ou synthétiques et les re-profilages qui sont plutôt à éviter en raison de leur impact sur la végétation dunaire.

- les plantations de végétaux dont le principe est de maintenir en profondeur les sables du cordon dunaire et favoriser le piégeage des sables apportés par les vents. Le choix des plantations (oyats, vétiver, tamaris, ligneux, etc.) doit tenir compte de la salinité et de la sécheresse du milieu dunaire (Allag-Dhuisme et Le Dain, 1986).

- Les récifs artificiels

La construction de récifs artificiels, qui se fait généralement à partir de matériaux divers (véhicules cassés, vieux navires, etc.), pourrait jouer un rôle dans l'atténuation de l'énergie des vagues; ces récifs sont donc supposés protéger la plage contre l'érosion. Il semblerait toutefois qu'ils sont plus utiles pour fournir un habitat additionnel pour les organismes marins que pour protéger la plage adjacente.

D'autres techniques comme le drainage des plages (*beachface dewatering*), la mise en place de varech artificiel ont été expérimentées sur certaines côtes sans toutefois de résultats très prometteurs à long terme.

CONCLUSION

Le littoral méditerranéen marocain constitue de plus en plus un enjeu économique futur de première importance. Cependant, vu l'évolution récente des données démographiques, économiques et environnementales, la dégradation des plages qui constituent une ressource touristique importante, réclame des décideurs une intervention urgente pour restaurer les zones érodées. Le choix de la technique de réhabilitation la plus appropriée sur le plan environnemental et économique nécessite des études préalables sérieuses et un suivi régulier du site.

Le recul des plages en Algérie : problèmes et perspectives

Mohamed Larid

Institut des sciences de la mer et de l'aménagement du littoral, Alger, Algérie

LE CONSTAT

A l'instar de ce qui est observé au niveau mondial (Bird, 1985; Paskoff, 1993) le recul du rivage, et notamment celui des côtes sableuses, est ressenti au niveau global. Le long du littoral algérien, une forte proportion des plages sont aussi en érosion. Ce phénomène s'accroît de plus en plus. Des approches globales et des travaux sur des sites apparaissant comme représentatifs, ont été effectués (thèses de doctorat, travaux de Magister, mémoires d'ingénieurs, projets de recherche). Des études diachroniques ont été réalisées à l'aide de la photo interprétation, l'analyse cartographique et les relevés de terrain (profil du trait de côte). Il en ressort une tendance générale au recul, notamment au cours des trente dernières années. En rapport avec les années de réalisation des missions de photos aériennes, quatre périodes d'évolution ont été considérées et 26 sites ont été traités. Ils se répartissent comme suit: Région littorale Ouest (3), Région littorale Centre (21) Région littorale Est (2).

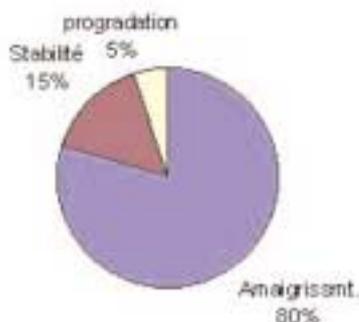


Fig. 1. Etat d'évolution générale des plages.

Le tableau général établi selon quatre périodes, depuis la première mission aérienne de 1960 jusqu'aux dernières effectuées en 1996 et 1997, fait ressortir des différences spatio-temporelles de ce phénomène. Entre 1959 et 1993, selon les sites, le recul moyen annuel varie entre 0,30 m et 10,4 m. On constate une accélération du taux moyen depuis le début des années 1980, particulièrement dans les plages situées plus ou moins à proximité des zones urbanisées. Un recul spectaculaire est constaté dans la région du littoral Est, à Bédjaia Plage, entre l'extrémité de la digue portuaire et l'embouchure de l'Oued Soummam. Sur un linéaire de 4,5 à 5 km, le trait de côte a considérablement régressé. L'analyse des photos aériennes indique près de 350 m de recul entre 1959 et 1996.

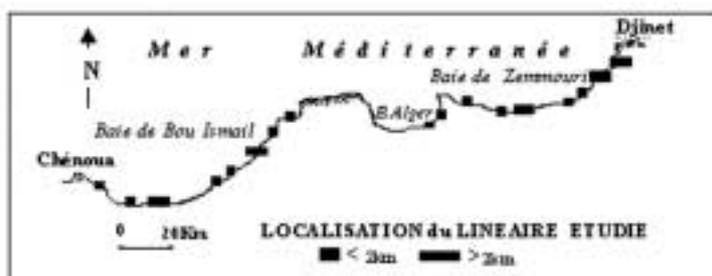


Fig. 2. Plages étudiées dans la région du littoral Centre, entre le promontoire du Chenoua et le cap Djinet, sur un linéaire côtier d'environ 150 km.

LES CAUSES

La situation naturelle globale est aggravée en Algérie par les activités humaines et les aménagements réalisés au niveau des bassins versants, des zones sublittorales et du rivage proprement dit.

a) La diminution des apports continentaux

Elle est provoquée par le piégeage des sédiments au niveau des barrages et des retenues collinaires (envasement), ainsi que la baisse des apports liquides, résultats du déficit pluviométrique constaté ces derniers temps. Les données hydrologiques (ANRH) montrent la relation entre les apports solides et liquides. Les graphiques ci-dessous indiquent une évolution en baisse des débits solides (en suspension) et liquides totaux des oueds Kébir, Soummam, Sebaou, Mazafran et Tafna pour la période 1981-1990.

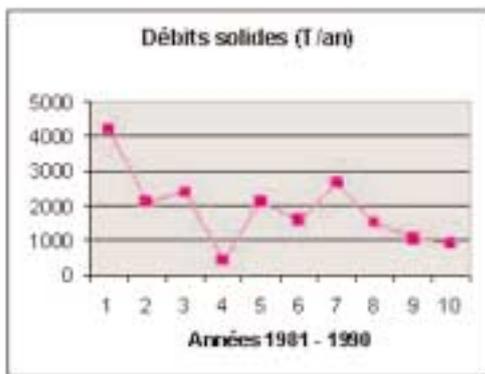


Fig. 3

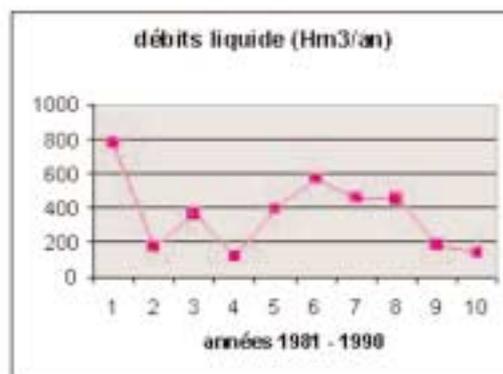


Fig. 4

D'autre part des volumes importants de sédiments sont piégés au niveau des principaux barrages algériens. La diminution des transits littoraux est à mettre en rapport avec la rétention de ces matériaux par ces ouvrages hydrauliques. L'envasement total des barrages existants en 1962 était de l'ordre de 219 000 000 m³. Durant la trentaine d'années suivantes (jusqu'en 1991), la quantité de sédiments piégés par les 39 principales retenues est estimée à 264 200 000 m³, soit l'équivalent moyen annuel de 9 110 000 m³ de matériaux piégés.

b) La perturbation des transits littoraux

Les infrastructures portuaires et les ouvrages annexes, sont à l'origine des modifications du cheminement naturel des matériaux alimentant les plages (envasement et ensablement des ports voir Fig. 5). A propos de cette interruption du transit littoral, le cas le plus remarquable est celui du port de Jen-Jen (Jijel) où a été piégée entre 1977 et 1997 une quantité de sédiments estimée à près de 180 000 m³ (Allag et Yaici, 2000). Ceci s'est fait au détriment d'un linéaire de plages d'une vingtaine de km, vers le littoral Est, qui affiche une importante tendance au recul.

c) l'extraction de matériaux

Pour répondre aux besoins du secteur de la construction et des travaux publics, des sites d'extraction de matériaux se sont démultipliés. Les sablières sont abusivement exploitées notamment sur les nappes alluviales des principaux oueds côtiers (Macta, O. Sebaou, Soummam, O. Kébir...), sur les zones de dépôts éoliens récents au niveau du sublittoral (espaces dunaires de la Macta, du

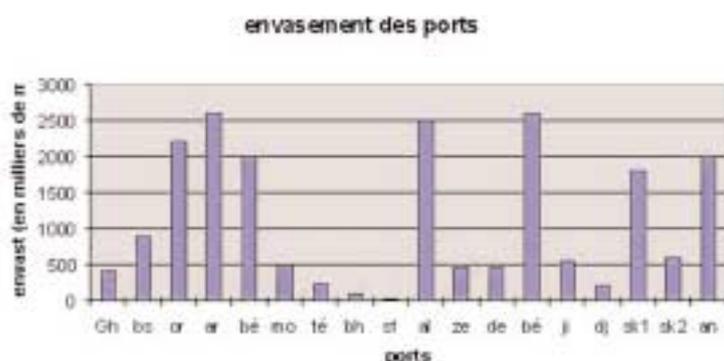


Fig. 5.

Mazafran, du Sahel algérois, de Zemmouri, de Béjaia Est, et des cordons littoraux de Annaba), sur les parties supérieures des plages et parfois même sur les estrans (Salamandre, Azur Plage, Boumerdès, Mandoura, Soummam, ...) et dans certains cas sur les parties des plages sous-marines (Bordj El Kiffan Zemmour, ...).

Des observations et études sur les sablières ont été réalisées. L'estimation des volumes extraits s'appuie sur le recoupement de plusieurs sources : analyse des profils établie sur cartes et photos aériennes, recours à des relevés sur site et utilisation des données établies dans les rapports officiels (inspections de l'environnement, direction des travaux publics, ...). Sur les plages de Chénoua à Cap Djinet, on estime à environ 5 000 000 de m³ les prélèvements de matériaux.

d) L'occupation du rivage

L'urbanisation incontrôlée, les constructions et les aménagements anarchiques à proximité de la ligne de rivage accentuent l'érosion marine et accélère l'amaigrissement des plages. Les aménagements effectués sur les dunes bordières de Moretti, La Madrague (El-Djemila), Club des pins et du front de mer de Bou-Ismaïl sont édifiants à ce propos. D'une manière générale, la dégradation des plages est d'autant plus importante que l'urbanisation de l'espace côtier est plus forte.

LES RÉPONSES

Des efforts ont certes été consentis pour la préservation des plages, mais par rapport aux enjeux environnementaux et économiques, on constate globalement qu'il reste encore beaucoup à faire. On peut présenter en trois volets l'expérience algérienne en matière de réhabilitation des plages: les systèmes de défense contre la mer, les dispositifs de protection juridique et la recherche méthodologique pour la gestion intégrée des plages.

a) Les systèmes de défenses contre la mer

Pour diverses raisons les dispositifs lourds de défense contre la mer, de type enrochements, épis et brise-lames ne se sont heureusement pas généralisés. Sur tout le littoral national, un linéaire négligeable est concerné par le système de défense lourde. Là où ces ouvrages ont été installés (Moretti, Bou-Ismaïl), les résultats obtenus sont très loin de ce qui était attendu (Boutiba, 1996). Un rechargement artificiel a été improvisé par les pouvoirs locaux sur la plage de Stamboul (littoral algérois). A la suite de quoi, une approche plus rationnelle a été élaborée. Elle est basée sur les paramètres morpho-sédimentaires du site, pour l'évaluation des rechargements initiaux et des apports. Une proposition de rechargement artificiel combiné aux ouvrages de protection a été proposée pour la plage de Bou-Ismaïl.

b) Le dispositif juridique

Depuis le début de l'année en cours, un texte fondamental protège juridiquement les plages contre l'érosion et la dégradation. La loi n° 02-02 du 5 février 2002 relative à la protection et à la valorisation du littoral, notamment par ses articles 16, 19, 20 et 21 régleme strictement l'occupation, la fréquentation et l'extraction des matériaux des plages.

c) Les outils de gestion des plages

Pour répondre aux besoins thématiques de la recherche (analyse de durabilité), nous avons mis au point et proposons une méthode pour l'évaluation environnementale globale en zone

côtière. Elle s’inspire et tente un enrichissement des travaux antérieurs concernant la dynamique et l’anthropisation des bords de mer (Hallegouet *et al.*, 1997), ainsi que l’évaluation des terri- toires (Eckert, 1996).

Pour les plages on considère qu’on peut articuler cette méthode autour de trois principales questions : quelle est l’appréciation de leurs conditions et patrimoine naturels ? Quelles sont leurs relations avec les usagers ? Comment se fait leur mutation ?

Ces questions peuvent être cernées à l’aide de trois principaux agrégats : la naturalité, l’an- thropisation, l’altérité. Chaque agrégat ou critère de qualification (Cq) est déterminé par un nom- bre de paramètres (Pn) choisis pour qualifier l’état et l’évolution globale d’une plage. Le but est de positionner dans un triangle la combinaison de ces trois agrégats. Pour y parvenir il s’agit de construire et de remplir une matrice avec en lignes les éléments (Pn) et en colonnes les cotations des éléments, celles-ci variant de 1 à 5.

PARAMETRES	COTATIONS				
	1	2	3	4	5
Naturalité					
1 – Largeur (estran)	<5m	5 à 15 m	15 à 30 m	30 à 50 m	> 50 m
2 – Linéaire (côtier)	< 1 km	1 à 2 km	2 à 5 km	5 à 7 km	> 7 km
3 – Pente	> 8 %	8 à 4 %	4 à 2 %	2 à 1 %	< 1%
4 – Sublittoral (Ar. côte)	< 10 m	10 à 50 m	50 à 150 m	150 à 300 m	> 300 m
5 – Déferlement (distance)	< 2 m	2 à 10 m	10 à 100 m	100 à 500 m	> 500 m
6 – herbier d’avant côte (L)	0 m	0 à 10 m	10 à 50 m	50 à 100 m	> 100 m
7 – Transit littoral (Milliers m ³)	< 50	50 à 500	500 à 1000	1000 à 2000	> 2000
8 – Bed rock (position)	< 1m	1 à 2m	2 à 4 m	4 à 6 m	> 6 m
9 – Engraissement (an)	0	0 à 1 m	1 à 2 m	2 à 6 m	> 6 m
Anthropisation					
10 – Fréquentation (p/m ² /estran)	< 1	1 à 5	5 à 10	10 à 15	>15
11 – Prélèvements (Milliers de m ³)	0	0 à 5	5 à 10	10 à 50	> 50
Altérité					
12 – Erosion (Rec. Côte. m/an)	0	0 à 2	2 à 4	4 à 6	> 6
13 –Qualité eaux (<i>E.coli</i> /100 ml)	< 500	500 à 1000	1000 à 5000	5000 à 10000	> 10000
14 –Taux d’occupation (pl. active)	0	0 à 0,35	0,35 à 0,75	0,75 à 0,95	0,95 à 1
Σ COTATIONS	Co1	Co2	Co2	Co2	Co5

A partir de la matrice, il s’agit de déterminer pour chacun des 3 agrégats (Cq) :

- Sa cotation de référence Cr, soit $C_r = \frac{\sum_{i=1}^n p_n}{n}$, c’est la Cotation maximale
- Sa cotation observée Co, soit, $C_o = \frac{\sum_{i=1}^n p_n}{n}$ (Ni étant la valeur réelle de chaque paramètre)
- Son évaluation globale $C_q = \frac{C_o}{C_r}$

On peut combiner les trois agrégats (naturalité, anthropisation, altérité) pour avoir des indica- tions sur les potentialités globales et la situation générale d’une plage. Dans cette combinaison, il s’agit d’évaluer l’indice de chaque agrégat (Ia) par rapport l’ensemble selon l’expression :

$$I_a = \frac{C_q}{\sum_{i=1}^3 C_q}$$

La valeur en % de chacun des trois agrégats peut se positionner sur l’une des médianes d’un triangle équilatéral, graduées de 1 à 100 (Fig. 6). L’intersection des trois perpendiculaires abais- sées de chacune des valeurs (Ia) sur les médianes définit le positionnement de l’état général de la

plage selon les zonations établies dans le triangle. Une analyse diachronique peut indiquer sur le triangle les tendances au basculement d'une plage d'un état à un autre.

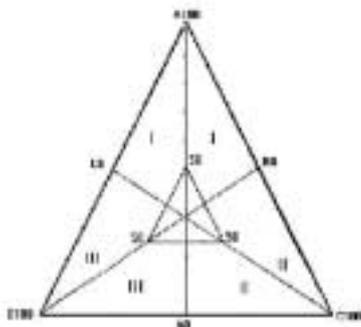


Fig. 6. Représentation triangulaire

A0 – A100 : axe de naturalité, B0 – B100 : axe d'altérité, C0 – C100 : axe d'anthropisation

Zone I : forte naturalité Zone II : Forte anthropisation Zone III : Forte altérité

Erosion destructrice et érosion réparatrice : le cas des Kneiss en Tunisie

Ameur Oueslati

Faculté des sciences humaines et sociales, Tunis, Tunisie

Les idées relatives au problème de l'érosion marine en Tunisie ont été développées essentiellement grâce à des observations effectuées sur les côtes à plages sableuses, notamment celles qui ont fait l'objet d'aménagements importants. Or, les manifestations de l'érosion apparaissent dans différents types de rivages, y compris ceux encore à l'abri des aménagements.

La région des Kneiss, encore largement à l'abri des interventions humaines, offre une illustration significative du poids, qu'il n'est pas toujours aisé de détecter dans les espaces aménagés, des processus naturels à l'origine de risques ou de faiblesses dans les milieux côtiers. Elle permet aussi de voir que l'érosion peut, dans un environnement peu ou non anthropisé, se solder par un bilan plutôt positif pour le milieu naturel et n'entraîne pas toujours une dégradation.

C'est tout l'intérêt de l'étude des littoraux non aménagés et des formes littorales autres que les plages. Elle peut être riche d'enseignements, permet de mieux comprendre le comportement des milieux côtiers et de dégager les tendances de leur évolution à l'état naturel. Ceci fournit des éclairages très utiles à leur gestion et à la bonne définition de leurs aptitudes à l'aménagement.

CADRE GÉNÉRAL

Située au fond du golfe de Gabès, en Tunisie du Sud-est, la région des Kneiss appartient à un milieu méditerranéen semi-aride et montre parfois sur le plan morphologique une grande monotonie à cause surtout des faiblesses topographiques.

L'arrière-pays immédiat a une topographie basse faite essentiellement de plaines et de bas plateaux. La morphologie du rivage montre une différence assez nette entre d'une part, une partie septentrionale où domine le modelé de côtes basses avec une place importante pour les terres humides et d'autre part, une partie méridionale à falaises. L'avant-côte se caractérise par des hauts-fonds qui portent l'archipel des Kneiss et qui se distinguent par leur grande platitude, leur forme qui évoque une flèche littorale submergée et leur bathymétrie extrêmement faible. Les fonds sont très souvent à moins d'un mètre, voire quelques décimètres avec des bancs étendus à fleur d'eau. Cette originalité est doublée par l'importance de la marée et l'existence d'un réseau hiérarchisé et complexe de chenaux sous-marins ou "oueds" (Oued Ed Dem, Oued El Baa, Oued Rjef Ben Sehil, Oued Boukhlef, ...). A marée basse, des superficies impressionnantes sont exondées et la navigation devient impossible sauf dans les grands "oueds".

Dans ce cadre, malgré le contexte qui lui est plutôt défavorable (faiblesse de la bathymétrie et des vagues), agit une érosion marine active. Ses effets se manifestent le plus dans les îlots dont certains ont déjà perdu une partie importante de leur substance et sont parfois menacés de dispa-

rition. Du côté du continent, les falaises sont exposées à la fois à l'action des vagues et à celle des eaux courantes, mais avec une certaine prépondérance pour ces dernières si on considère leur impact sur la dynamique du rivage. Ici, les effets de l'attaque par les vagues sont souvent masqués par les apports de l'érosion hydrique qui sont parfois même à l'origine de la mise en place de géosystèmes particuliers.

UN ARCHIPEL MENACÉ DANS SON EXISTENCE

Cet archipel correspond à une guirlande d'îlots qui émergent à peine des hauts-fonds : El Bessila, El Hjar, El Laboua (dit aussi îlot de Sidi Salah du nom du marabout qu'il renferme ou El Oustaniya, c'est-à-dire celui du milieu) et enfin El Gharbia.

El Bessila, l'îlot le plus septentrional, le moins petit et le moins bas, a une forme grossièrement circulaire avec un diamètre maximal de l'ordre de 2,5 km. L'altitude y est le plus souvent inférieure à deux mètres sauf dans la partie septentrionale qui culmine à 7 m et où se situerait son premier noyau dont la constitution correspondrait, si l'on se réfère aux autres îlots, à un lambeau de grès marin eutyrrhénien. La plus grande partie est occupée par des sols salés de sebkhas ou de chotts sur des terrains meubles sablo-limoneux à sablo-argileux parfois remaniés par le vent. Les parties méridionale et occidentale, les moins exposées à la houle, sont occupées par un vaste schorre à surface découpée par une multitude de chenaux de marée.

El Hjar (l'îlot rocher, l'îlot du rocher ou l'îlot rocheux), El Laboua (l'îlot de la vase ?) et El Gharbia (l'îlot de l'Ouest) sont beaucoup moins étendus. Le premier est le plus petit de tous avec à peine 10 m de diamètre et une hauteur de l'ordre du mètre. Sur le plan géologique, tous ces îlots ont une ossature de grès marin typique de la formation Rjiche maintenant bien connue sur les côtes tunisiennes et attribuée à l'Eutyrrhénien (environ moins 120 000 ans), épisode transgressif du dernier interglaciaire au cours duquel le niveau de la mer était supérieur à l'actuel d'une dizaine de mètres. Le rivage proprement dit correspond à une micro falaise devancée par un platier rocheux à surface affectée par de nombreuses formes de corrosion et jonchée de débris de grès provenant de sa destruction ou arrachés à la micro falaise. On reconnaît aussi des fragments de roches allogènes et de céramiques issus des ruines antiques qu'on trouve dans les différents îlots.

UN VISAGE SENSIBLEMENT DIFFÉRENT DE CELUI QU'ONT CONNU LES ROMAINS

C'est dans les îlots rocheux de l'archipel que l'appréciation du recul du trait de côte et de ses conséquences est la plus aisée. Car, outre les indices morphologiques on dispose de repères archéologiques et de données recueillies dans des textes historiques de différentes époques.

Les eaux marines agissent à la fois par des processus mécaniques et biochimiques. L'importance du démantèlement est attestée, outre la multitude de formes de corrosion, par des vestiges archéologiques antiques taillés par une micro falaise et dont les traces, parfois en place, sont visibles même dans l'avant côte.

De fait, arguments de terrain et textuels indiquent que la tendance générale a été pour le tronçonnage et la réduction de la superficie des différents îlots, surtout ceux du Sud. Les îlots d'El Hjar, d'El Laboua et d'El Gharbia ont très vraisemblablement continué à être unis jusqu'à l'époque historique, probablement jusqu'aux tout derniers siècles pour El Laboua et El Gharbia.

Des investigations géoarchéologiques (Troussat *et al.*, 1992) ont permis de confirmer l'idée selon laquelle les traces du monastère dans lequel s'était retiré Saint Fulgence, (abandonnant sa dignité d'abbé vraisemblablement en l'an 503, 504 ou 505, pour se consacrer à la prière et aux travaux manuels) existent dans l'îlot d'El Laboua. Or, cet îlot est aujourd'hui minuscule ; il n'a que 45 m de long sur 44 m de large et ne peut contenir une communauté de moines aussi importante que celle ayant accompagné le saint homme. C'est qu'en réalité il a été, depuis, amputé d'une partie importante de sa substance.

Par ailleurs, en 1587, F. Lanfreducci et J.O. Bosio, dans leur *Costa e discorsi di Barbaria*, mentionnent les Friscioli qui sont les îles Kneiss, comme "*deux petites îles avec des bancs*". Il s'agit sans doute d'El Bessila d'une part et des trois autres îlots qui formaient une seule entité d'autre part. La même idée se dégage chez d'Avezac (1948) qui avait remarqué que divers por-

tulans catalans du Moyen Age et de la Renaissance ne cartographiaient sous le nom de Frixols que deux îles.

Une telle évolution, en particulier l'efficacité avec laquelle a opéré l'érosion marine, peut paraître énigmatique compte tenu du cadre naturel qui ne favorise pas une grande agitation des eaux marines. La hauteur des vagues est le plus souvent inférieure à 1 m et ne montre une certaine importance qu'à l'occasion des grosses tempêtes. Même dans ce dernier cas, elle n'excède presque jamais 2 m. Les hauts-fonds sont à l'origine d'une séparation naturelle importante entre le large d'une part et la côte d'autre part. D'ailleurs, l'appellation arabe traditionnelle "SurKneiss" (le rempart des Kneiss) par laquelle sont désignés les bancs et les îlots qu'ils portent est fort expressive; car ces bancs constituent une espèce de digue, une barrière de protection contre la houle venue de l'Est mais qui devait aussi assurer à la côte une protection contre les envahisseurs depuis le large.

L'explication est à chercher surtout dans la tendance qui a marqué le comportement du niveau marin et la tectonique régionale au cours des temps récents. Si la mer a réussi à gagner autant d'espace, c'est à cause de l'élévation historique du niveau marin maintenant attestée, sur les côtes tunisiennes, par de nombreux vestiges archéologiques submergés et dont la valeur se situe entre 20 et 40 cm. Dans la région des Kneiss, ses effets ont été amplifiés par un affaissement sensible du sol côtier suite à une activité subsidente continue. Ceci est confirmé par exemple par l'analyse des enregistrements marégraphiques du port de Sfax qui indiquent pour le vingtième siècle une variation positive du niveau marin de 5,7 mm/an (Pirazzoli, 1986), vitesse quatre à cinq fois plus rapide que la moyenne avec laquelle se fait l'augmentation du niveau de la mer à l'échelle plannétaire.

C'est donc un terrain qui doit être considéré comme à haut risque en cas d'une Elévation Accélérée du Niveau Marin (E.A.N.M.) comme celle que prévoient les scénarios de l'I.P.C.C. Une telle élévation entraînerait, en plus de l'accélération de l'érosion marine, une progression de la salinisation aux dépens des plaines alluviales qui les bordent suite à l'intrusion des eaux marines. Des îlots comme El Hjar ou même Laboua risquent de disparaître ainsi que le patrimoine archéologique qu'ils renferment.

DANS LES FALAISES : UNE ÉROSION HYDRIQUE RÉPARATRICE POUR L'ESTRAN

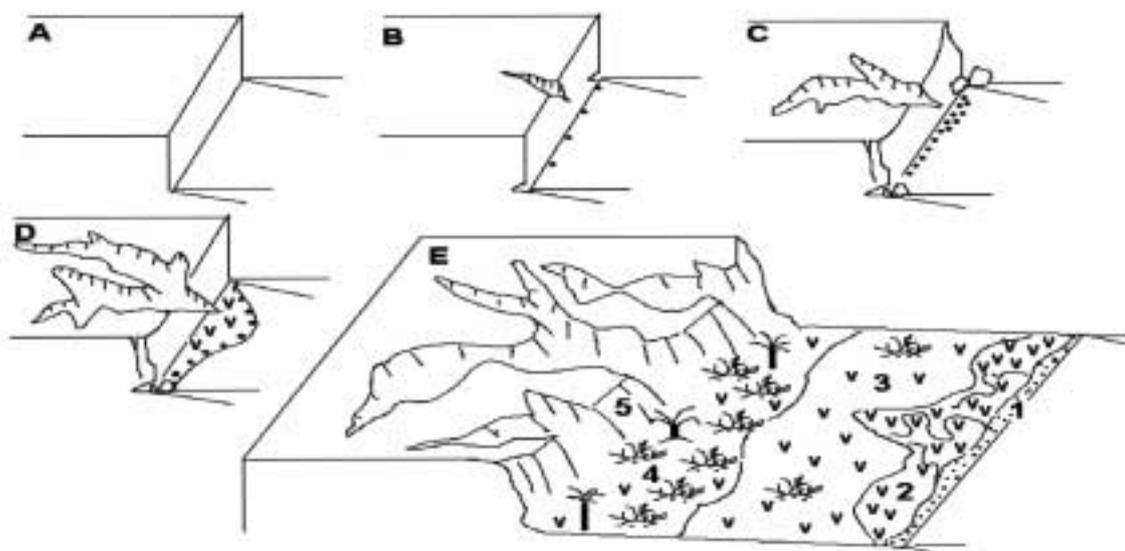
Les falaises deviennent l'élément le plus apparent de la morphologie littorale dans les secteurs méridionaux, surtout à partir du port de Skhira El Gdima. Elles se détachent bien dans le paysage grâce à leur commandement souvent compris entre 10 et 20 m et surtout grâce à leur teinte rosâtre qui reflète en fait la couleur la plus caractéristique des argiles gypseuses mio-pliocènes.

L'érosion marine agit par un mécanisme encoche-éboulement. La fréquence des cicatrices au-dessus des encoches et les nombreux éboulis dont certains atteignent quelques dizaines de m³ de volume témoignent de l'importance d'une telle évolution qui a sans doute déjà entraîné un retrait important du trait de côte. On ne dispose pas de repères récents pour quantifier ce recul mais on peut voir qu'immédiatement au Sud de Borj Ennadhour il a amputé un site archéologique antique d'une partie importante de sa substance. Le Borj lui-même n'est plus qu'à une quinzaine de mètres du sommet de la falaise.

Ces falaises sont en fait soumises à une double attaque : l'érosion marine à la base et l'érosion hydrique plus haut. Celle-ci a réussi à créer un réseau de ravins parfois très dense et profondément encaissé. Le phénomène est initié par de petites cicatrices qui évoluent à la fois par érosion linéaire, latérale et surtout régressive. C'est une évolution relativement rapide ainsi que le laisse croire par exemple le déplacement répété des pistes qui passent à proximité des têtes de ravins.

La contrepartie de ce démantèlement est une progradation parfois remarquable de l'estran. Si bien que la tendance dominante est, à la différence de ce qui marque la plus grande partie du littoral tunisien et de ce qui se passe dans les îlots, un gain de terrain aux dépens de la mer. Dans plusieurs endroits où les eaux marines sont très peu profondes, le rivage a même été repoussé au point de mettre les falaises à l'abri de toute attaque directe par les vagues. En fait, plusieurs situa-

tions existent allant de l'apparition de la petite plage, accompagnée ou non de dunes, à la plaine alluviale de largeur plurihectométrique. Elles illustrent les différentes étapes d'une évolution dont la connaissance peut être très instructive sur le plan morpho-sédimentaire mais aussi pour la dynamique de l'environnement côtier dans son ensemble. Car au fur et à mesure que ces espaces gagnés sur la mer évoluent, des formes de vie, végétale et animale, font leur apparition.



Différentes étapes de la mise en place des plages, des marais et des sebkhas de pied de falaise : le scénario commence par l'apparition d'une petite plage pour évoluer vers un espace parfois large de plusieurs hectomètres. Au fur et à mesure, s'installent une végétation et une faune adaptées. L'évolution a, par endroits, conduit à une zonation déroulant de la mer vers l'intérieur : une plage sableuse (1), un schorre (2), une sebkha ou un chott ponctués par de petites dunes (3), une zone à nebkas buissonnantes (4) avec parfois quelques palmiers, une falaise morte découpée et ravinée par les eaux courantes (5).

Dans un tel contexte, il est recommandé de ne pas encourager une multiplication des aménagements à proximité du sommet de la falaise. Toutefois, la distance à garder variera beaucoup d'un point à un autre et sera définie non seulement en fonction de l'évolution du front de cette falaise, mais aussi en considérant le comportement de l'estran en rapport, en particulier, avec l'alimentation sédimentaire que lui assurent les ravins locaux. D'un autre côté, toute intervention pour lutter contre l'érosion hydrique ou pour occuper les terrains situés en arrière de la falaise doit être avertie des conséquences sur la dynamique du rivage. Une fois engagée, elle obligera à réviser la distance précitée.

Réhabilitation du littoral Nord-Est de Jerba, Tunisie

Bernard Long¹ et Barbara Karakiewicz²

¹INRS-ETE, Québec, Canada

²UQAR-ISMER, Canada

La réhabilitation d'un littoral fortement dégradé passe par la connaissance de l'état du site afin de diagnostiquer son évolution naturelle, son évolution anthropique et déterminer l'approche de réhabilitation utilisée. Cette approche doit redonner au site son aspect naturel d'avant le développement touristique.

L'ÉTAT ACTUEL DU SITE

La plage Nord-Est de Jerba représente un littoral sableux de 8 km de longueur qui subit actuellement un profond processus d'érosion qui se traduit par la disparition progressive des stocks sédimentaires des plages visible et sous-marine et un transport sédimentaire préférentiel en direction de l'Ouest. Sur toute la partie Est, le substratum rocheux affleure sur l'estran à partir des lignes de marée haute à l'Est et de mi-marée à l'Ouest. Le sable ne forme plus qu'une mince pellicule de surface qui remplit les dépressions situées entre deux niveaux durs. Plus à l'ouest, la plage qui était contrôlée jadis par une morphologie modelée par les agents hydrodynamiques devient une plage modelée par le substratum rocheux. Au large, les herbiers de posidonies toujours présents débutent à des profondeurs de 5 à 6m.

LES RÉSULTATS DES ANALYSES DE TERRAIN

Au large, quatre faciès morphologiques ont été distingués sur la zone d'étude :

- Les herbiers peuvent être continus ou interrompus par des taches sableuses non colonisées dans lesquelles le transport sédimentaire limité reste négligeable dans le bilan sédimentaire total dû au transport littoral.
- Les platiers rocheux représentent les prolongements en mer des pointements rocheux terrestres. Ils sont particulièrement développés à l'est et au centre du site où ils débutent à 1 m de profondeur. Ils présentent des mini-falaises sous-marines, orientées NW-SE qui peuvent créer des surplombs de 1 à 2 m de hauteur. Ces mini falaises sont parallèles entre elles et peuvent créer des couloirs préférentiels de transport par charriage.
- Les zones sableuses sous-marines forment un mince cordon entre la plage et la limite du platier rocheux. La première barre est pratiquement constante mais les autres barres, au large, dépendent de la quantité de sable dans le système et sont alors soit présentes soit absentes.
- La plage visible subit actuellement un profond processus d'érosion. Sur les plages, le sable ne forme qu'une mince pellicule de surface soumise à un processus d'érosion. Cette érosion résulte d'un transport des sédiments dans le profil sous l'effet des courants engendrés par les vagues et d'une dérive littorale le long de la côte en direction de l'ouest.

LE PROJET DE RÉHABILITATION

Le projet de réhabilitation du littoral Nord-Est de Jerba doit redonner à la plage son aspect naturel qui a été à l'origine du développement touristique. Les rechargements doivent tenir compte des impératifs physiques et économiques afin de concilier l'évolution naturelle du site et les différentes activités humaines.

Actuellement, au niveau mondial, cinq méthodes sont proposées :

- *Le rechargement par le haut de plage* correspond à l'approche la plus ancienne et consomme une quantité importante de sable car la dispersion est importante. L'entretien est constant car la perte est de 20%/an.
- *Le rechargement à partir du large* consiste à reconstruire le profil sous-marin. Cette approche suit la dynamique normale d'une plage et favorise l'atténuation des houles à la côte en diminuant la dispersion. Dans ce type de rechargement, la perte observée est de 5 à 10% par an.
- *Les rechargements mixtes* consistent à recharger simultanément tant la plage aérienne que l'avant-plage. Cette approche diminue la période de reconstruction du profil et met en évidence immédiatement la reconstruction de la plage visible. Elle n'est pas moins coûteuse que la précédente car la dispersion du sable de la plage visible est substantielle mais se produira moins rapidement que dans le premier cas.
- *Les rechargements sur tout le profil aérien et sous-marin* consistent à étendre la même quantité de sable sur tout le profil. Cette approche est efficace, mais utilise une plus grande quantité de sédiments que dans le cas du rechargement mixte, d'où un intérêt limité.
- *Les rechargements de dunes* consistent à nourrir la dune et rétablir le profil par érosion de cette dune. Cette technique ne peut s'appliquer que dans le cas où le site est encore vierge.

LE PLAN DE RECHARGEMENT

L'approche proposée est celle du rechargement mixte. Le profil de la plage est déterminé à partir du profil développé par Dean (1990) et du modèle de Boczar-Karakiewicz *et al.* (1986, 1987, 1997 et 2001) qui a été mis en application en Australie (Boczar-Karakiewicz et Jackson, 1990) et proposé pour Tanger (Long *et al.*, 1999). Ce profil permet de rehausser la plage au-dessus des niveaux de surcotes.

Les travaux devront être menés par tronçons de un kilomètre. L'opération ne devrait pas durer plus d'un mois par tronçon de plage pour pénaliser le moins possible les activités touristiques. La plage pourra être réutilisée huit jours après la fin du rechargement du tronçon. La plage sera élargie ce qui ne provoquera pas de perturbation, et elle retrouvera sa largeur d'antan.

Le rechargement des barres d'avant côte sera effectué simultanément au rechargement de la plage visible. Les matériaux utilisés pour le rechargement, ne doivent contenir aucune particule inférieure à 0,04 mm et avoir un grain moyen de 0,25 mm.

Cubature de matériel à recharger

Afin de calculer la quantité de sédiments nécessaire aux opérations, les calculs de cubatures ont été réalisés sur des cellules de 500 m de rivage en calculant une plage visible de 50 m de largeur et les barres d'avant côtes associées.

Pour reconstituer la plage visible, les calculs de cubatures ont été réalisés sur des cellules de 500 m de rivage à partir de la terminaison ouest en calculant une plage visible de 50 m de largeur. Le rechargement inclut la plage visible et les barres d'avant côte qui sont reliées dans un même dépôt. Le volume total pour la plage visible est de 570 000 m³ et de 650 000 m³ pour la barre au large, soit un total de 1 115 000 m³ de sable devant être déposé sur la plage Nord-Est.

Impact du rechargement de la plage sur les biotopes

L'impact majeur d'une opération de rechargement de plage est le recouvrement d'un biotope et de sa biocénose en place par d'énormes quantités de sédiments. Ce risque est important au niveau du littoral immédiat. Par ce recouvrement, l'environnement en place est détruit mais cet épisode sera court si le sédiment importé est de même nature que celui qui était présent. En effet, le faciès sédimentaire supportant le biotope originel reste le même et ce nouvel environnement sera recolonisé par la suite, par l'arrivée des larves. Par contre, si le type de sédiment est drama-

tiquement différent de celui existant, la biocénose originelle sera remplacée par une autre biocénose plus adaptée à cette nouvelle source sédimentaire. Dans la zone touristique de Jerba (plage Sidi Mehrez), trois principaux biotopes sont déterminés :

- sur la roche en place, la biocénose des algues photophiles,
- sur les sables fins, la biocénose des sables fins bien calibrés,
- au large, l'herbier de posidonies.

• *La biocénose des algues photophiles* : le recouvrement en sédiment du platier rocheux détruira la biocénose des algues photophiles qui constitue la biocénose de substitution mise en place après la dégradation de la plage. Ce changement permettra de revenir aux conditions initiales du site, avant le développement hôtelier. L'ichtyofaune est peu abondante et dominée par des espèces itinérantes, capables de se déplacer très rapidement entre les posidonies et le site. Ces espèces vont se déplacer durant la période de ré-ensablement pour venir fréquenter épisodiquement le site par la suite.

• *La biocénose des sables fins bien calibrés* représente le biotope le plus important. Ce biotope était, avant l'érosion du littoral, le biotope principal de ce secteur. Le rechargement permettrait donc de revenir à l'état initial. L'impact sur la pêche est négligeable car la faune ichtyenne est très itinérante et migre en permanence entre l'herbier de posidonies et le littoral.

• *L'herbier de posidonies* et les pelouses représentent le biotope le plus fragile qu'il faut préserver. L'herbier de posidonies représente une zone importante de ponte et recrutement. Dans le cas présent, le nuage durera moins de 24 heures, ce qui est comparable aux nuages turbides de tempêtes; de plus, le rechargement se produira à des profondeurs inférieures à celles du début des herbiers. Néanmoins l'opération de rechargement ne doit pas recouvrir une partie de l'herbier.

Il faut éviter si possible de recharger pendant les périodes de recrutement des principales communautés ichtyennes.

Impacts sur le milieu physique

Les opérations de rechargement ne vont pas avoir d'impacts néfastes sur l'environnement physique. Elles ont pour but de rétablir le profil de la plage pour diminuer les effets destructeurs des assauts de la mer durant les tempêtes.

PROTECTION DU MILIEU ET DE L'INDUSTRIE TOURISTIQUE

La portion de plage (500 m) subissant les opérations de rechargement sera interdite aux touristes durant un mois en utilisant des moyens nautiques. La période de fermeture temporaire de la plage sera mise à contribution pour effectuer les travaux paysagers nécessaires en haut de plage. Pendant le rechargement une gestion de la plage disponible sera entreprise afin de ne pas pénaliser les hôtels placés en avant du chantier. Cette gestion sera d'autant plus facile à organiser au fur et à mesure que la plage sera élargie. Après le rechargement, l'impact deviendra positif car la plage sera élargie. Par la suite, l'entretien de la plage devra s'effectuer en conservant la pente de la plage, et les opérations de suivi indispensables à la réussite du projet s'effectueront pendant et après les opérations de rechargement. Pendant le rechargement, le nuage turbide doit décanter rapidement, or les sédiments sableux ont des vitesses de chute importantes.

Les mesures à entreprendre durant et après les opérations de rechargement doivent comprendre :

- un contrôle des concentrations de sédiments en suspension tant dans la zone de rechargement que sur l'herbier adjacent;
- un contrôle de la bathymétrie et de la topographie;
- un contrôle sédimentaire afin de vérifier si le sable répond aux normes requises.

“Free” artificial nourishment : linking beach erosion in highly exploited shores with relict sand bodies on the sea-shelf

Francesco Latino Chiocci

Dip. Scienze della Terra, Università “La Sapienza”, Roma, Italia

COASTAL EROSION AS THE EFFECT OF UNWISE COASTAL ZONE MANAGEMENT

Many shores of the Western Mediterranean are experiencing – at least since World War II – variable amount of littoral erosion, with increasing economic and social loss for coastal communities. Climate-driven sea level rise has been invoked to be part of the problem but, as witnessed by concentration of erosion in the most populated and economically exploited areas, the main causes are due to anthropic factors, among which :

- reforestation and slope stabilisation (which reduce slide/subaerial erosion and sediment production) for land use and flood prevention;
- dam construction on rivers (which reduces or completely stop sediment transport) for power production and water resource management;
- intensive urbanisation of the coastal zone for tourism/recreation with construction of infrastructure close to the shoreline (which hardens the littoral belt, preventing natural fluctuations) and dune destruction (which prevents beach auto-restoration);
- subsurface water and gas extraction (which causes strong localised subsidence).

Such phenomena are due to unwise management of the coastal zone, producing short-term benefit at the cost of long-term loss, usually an order of magnitude greater than any earlier benefit. This unfavourable context is reflected in the case for beach protection against coastal erosion : due to the difficulty of removing anthropic causes of erosion, defence from coastal erosion has been almost completely based on the construction of breakwaters and groins to attenuate wave-energy and control longshore transport.

Actually, from a multi-decade perspective the remedy has been worse than the disease. Construction of rigid defences only moved the erosion problem in space and in time, displacing coastal erosion downdrift, with a negative feed-back process that has left whole stretches of coast, as in the Adriatic Riviera completely armoured by concrete structures.

RESTORATION STRATEGY FOR NO-COUNTER EFFECT GENERATION

Ideally one would aim toward the re-establishment of the pre-existing natural situation, but in the real world coastal infrastructures which has given rise to a widespread and strong network of economic/social initiatives, cannot be removed. Unfortunately, this also results in the loss of beaches, i.e. the loss of the basis of the economic chain.

A possible solution, producing no long-term counter-effects, is the massive and repetitive artificial “free” nourishment of eroding beaches. This is not the only solution but it is probably the best one if one can find a sufficiently large source of sand to be regularly quarried (see later) and an economic beneficiary able to cover the cost of the operation. If this is the case, a positive feedback can be established, i.e. the intensive exploitation of some parts of the littoral will cause erosion but will also produce the economic resource for beach nourishment. The nourishment will offset the loss of beach without creating any alteration to the natural transport/wave energy distribution, so that the sediment will feed not only the highly exploited coast but will also have positive effects on the whole coastal compartment, or littoral cell (see *Synthèse des discussions*).

In this perspective, the “free” nourishment (i.e. without any hard protection) has to be regarded as the first option because of the lack of any obvious counter effects. Indeed, when beach erosion is mainly due to coastal zone urbanisation (i.e. on a coast not directly fed by rivers), beach nourishment can bring a long-term re-establishment of the “natural” condition with the shoreline moved seaward sufficiently. By contrast “protected” nourishment schemes, although a remedy for most of the short-term damage created by breakwaters and groins (such as landscape and sanitary impact), will behave as any other hard protection because they will alter longshore transport, moving the erosion problem elsewhere.

ARTIFICIAL NOURISHMENT PROJECT

Massive and repetitive beach nourishment programs can only be organised by institutions capable of making decisions at a regional scale, as there is a need for:

- long-term evaluation of economic losses and benefits for coastal communities, in estimating the net balance between negative effects along a stretch of coast with larger positive effects on another stretch of coast;
- a global perspective to evaluate and conciliate different social, economic, legal, environmental, bureaucratic needs and interests, dealing with all the institutions involved in the problem;
- a decision network to co-ordinate resources and needs, to find economic support for large-scale projects and to keep the price of the sand low enough for economic viability.

RELICT SHELF DEPOSITIONAL BODIES AS A SOURCE OF SAND FOR NOURISHMENT

The need of sand is very large and can be effectively satisfied by quarrying relict sand bodies lying on continental shelves.

In fact these are enough large (tens to hundreds of million of cubic meters) to be massively exploited in a long-term perspective; they are made up of beach sand usually similar in composition and grain size to the modern beach sand; they have a lower cost (if quarried in large quantities) with respect to “terrestrial” sand; finally their exploitation has a lower environmental impact with respect to “terrestrial” sand, not only as far as landscape and hydro-geologic damage are concerned, but also because their quarrying, transport and displacement is much “softer” than terrestrial counterparts.

The search for sand bodies on continental shelves will mainly use high-resolution seismics to depict subsurface geometry and vibrocoring to ground-truth seismically-defined targets and to characterise the sediment. Possibly multibeam bathymetry, side scan sonar imaging and grab sampling may play a complementary role in the search for sand. No matter which method is used, the understanding of the paleogeographic, paleomorphologic and paleoenvironmental evolution of the continental shelf during (at least) the last eustatic cycle is essential since relict sand bodies are in fact quite rare, can be small in dimension, often seismically opaque and ill-discernible from other shelf deposits. The investigations have to cover the whole shelf, as the stratigraphy of the outer shelf is usually clearer than the stratigraphy of the areas closer to the coast, where the information may eventually be extended from deeper areas.

The network of seismic profiles has to be narrow enough to detect bodies that can have an extension in the order of a few km but are able to yield tens of millions of m³ of good quality sand. Very high-resolution seismics is also needed, to discriminate geometry and seismic facies of depositional bodies as thin as a few meters.

The proposed research strategy will follow steps of increasing detail :

- first, a collection of all the pre-existing information, including re-interpretation of available seismic lines; a GIS based database could be set up, to host geo-referenced information on morphology, stratigraphy and sedimentology of the seafloor;
- second, a regional survey should be carried out, covering the whole area of interest from the inner shelf to the shelf-break; the survey should avoid those areas that according to pre-existing information are unsuitable for sand body formation/preservation or that are covered by a mud blanket that is too thick; the result of the survey will be an inventory of all possible sand deposits, and an estimate of their accessibility, volume, and character as well as the possible environmental problem that their exploitation would create;
- at this point a decision-making protocol is needed, that takes into account all the social, economic and environmental interests that are affected by the nourishment project;
- finally, after having established a list of priorities, a third extremely high-resolution survey should be carried out in selected areas to highlight short-distance variations of stratigraphy and sediment characters and to guide quarrying activities by definition of the area, mud cover, presence of obstacles, dredging strategies, etc.

CASE HISTORY FROM ITALIAN COASTS

In Italy, the sandy coasts (some 3200 km) are retreating for 40% and protected for a further 10%. In some stretches of coast the whole economy of coastal communities is founded on littoral-related activities (Adriatic Riviera, part of Latium and Campania, Versilia, Liguria, Sardinia). There, because of the very high tourist exploitation of the littoral zone, both coastal erosion and economic pressure to relieve it are very high.

A first attempt to use shelf sand for beach nourishment was made in the nineties for Pellestrina and Cavallino beaches (Venice coast) (Fig.1). There a sand sheet a few decimetres thick was quarried extensively over a 20 km² area, to dredge some 7 million of m³ of sand over a period of a decade, to nourish a stretch of coast of some 20 km. There a protection of the nourishment was performed, with shore-normal groins connected by a shore-parallel submerged breakwater.

The first unprotected massive beach nourishment project was realised in summer 1999 on the Ostia beach at the Tiber River Mouth. There a span of coast of 3.5 km was fed with one million

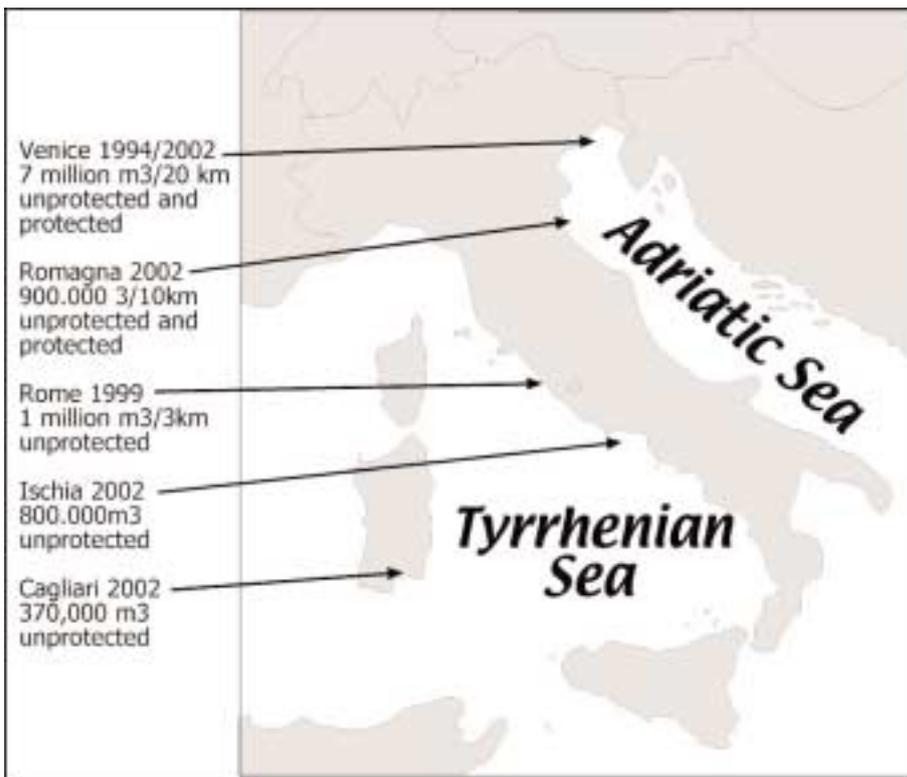


Fig. 1. Beach nourishment projects in Italy.

m³ of sand, quarried at 45-m water depth as far as 45 km from the nourishment site. From the same site in 2003 two other million m³ of sand will be quarried to nourish further Laticum beaches. In addition unprotected beach nourishments have been realised in 2002 on Ischia (Campania), Cagliari (Sardinia) and Emilia-Romagna (Adriatic) beaches, while search of sand is ongoing in Marche-Abruzzi (Adriatic), Tuscany and Liguria (Tyrrhenian) continental shelves (Fig. 1).

THE OSTIA FREE NOURISHMENT PROJECT

The deposit that was exploited is a transgressive beach, lying at 45-m water depth at the foot of a structural high offshore from Anzio Cape. The acceleration of the geostrophic current around the Cape and the distance from the Tiber River mouth cause the highstand shelf mud to be absent and the relict sand to outcrop on the seafloor. The presence of the structural high gives rise to environmental concerns as the shoal had to be protected from possible disturbance, so that no dredging was allowed within a distance of 1500 m from the shoal.

The deposit was first discovered by high-resolution seismics that depicted a depositional body with a flat base and a convex-upward top, an inner configuration slightly progradational and a medium-transparency acoustic facies (Fig. 2). The body was first depicted on the outer shelf where it lies on the erosional surface created during the Würm sea level lowstand. Its top is reworked by the most recent sea level rise that gave rise to a ravinement surface. From the outer

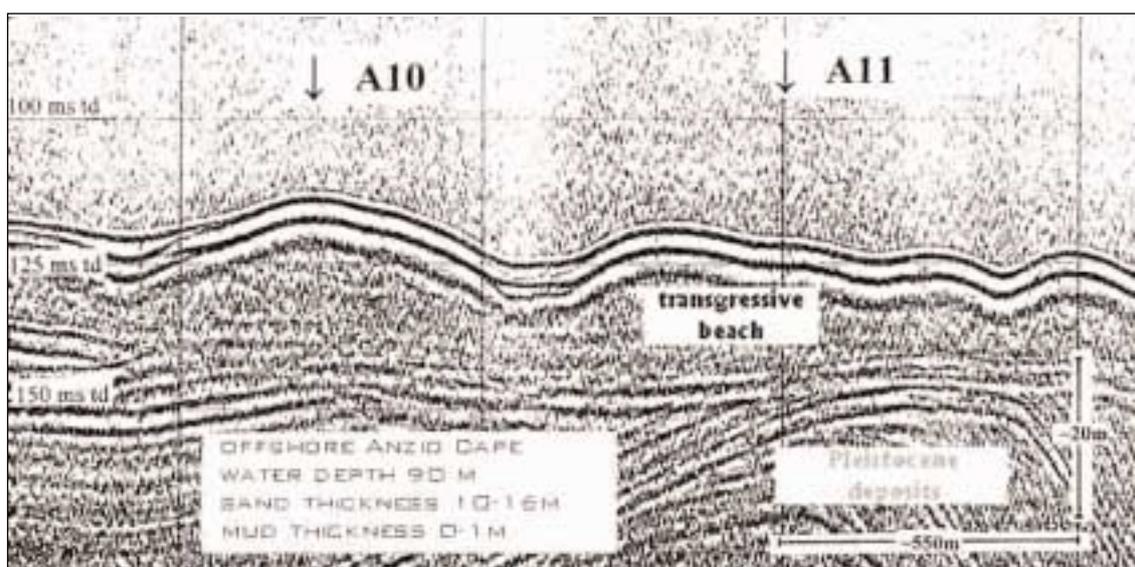


Fig. 2. High-resolution seismic (sparker) profile in the outer shelf offshore Capo d'Anzio.

shelf, the deposit was then extended for some 400 km² accounting for a total volume of almost two billions of cubic meters. Actually the available volume is one or two order of magnitude lower, as the body is buried under a blanket of highstand mud of variable thickness (up to tens of meters). The deposit was traced by careful seismic interpretation into shallower water and a side scan sonar survey was used to define an area where the mud was nearly absent. Vibrocoring depicted the stratigraphy of the deposit, showing, below a thin veneer of mud (where present) a decimetres-thick transgressive lag made up of bioclastic gravel and sand, overlaying a fine- to medium-sand deposit, with rare cross-lamination, interpreted as nearshore facies.

After the definition of the area and environmental studies, seafloor dredging was performed with a 133 m long trailing suction hopper having a capability of 9,000 m³ of sand. The hopper that quarried the sand was then moved 45 km to the nourishment site, finally pumping the sand to the beach through a 3,000-m long pipe. The sand was then shaped on the beach by bulldozers. An area of nearly 1200x300 m was quarried, leaving a depression about 3 m deeper than the surrounding seafloor (Fig. 3).

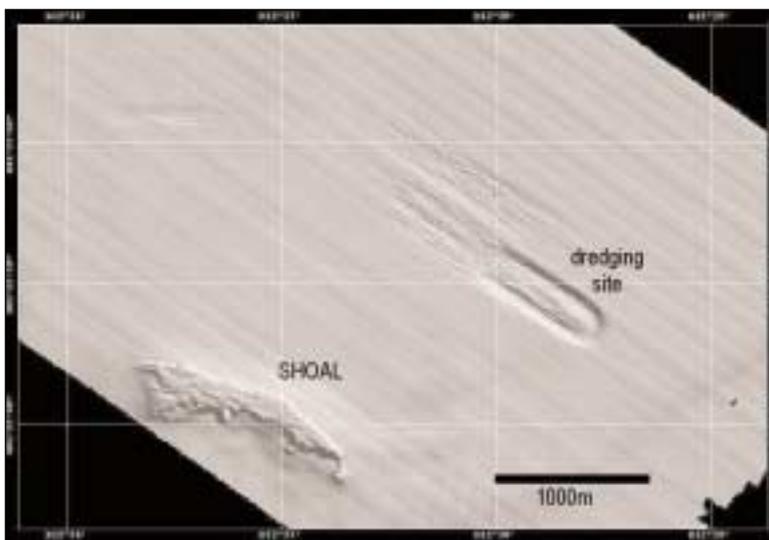


Fig. 3. Multibeam bathymetry in the dredging area (shaded relief). The shoal is the morphologic expression of the structural high that allowed the creation/preservation of the transgressive beach.

The one million m³ nourishment project took place in a 4-month period during summer 1999 with very little interference with tourist activities (Fig. 4)



Fig. 4 Nourishment area summer 1999. The ongoing restoration with sun bathing and swimming nearby.

The evolution and stability of tidal flats in Venice Lagoon, Italy

C.L. Amos¹, G. Umgiesser², M. Bonardi², and S. Cappucci¹

¹ Southampton Oceanography Centre, Empress Dock, Southampton, Hampshire, UK

² Consorzio Nazionale della Ricerca Istituto, Grande Masse, Venezia, Italia

The Lagoon of Venice is situated at the head of the Adriatic Sea. It forms part of a tripartite ecosystem: the drainage basin, the lagoon, and the upper Adriatic Sea. The lagoon is about 100 km long, 50 km wide and has an average depth of 1.2 m. It is described as a coastal wetland in a state of continual change due to opposing natural and artificial forces. It is the most important survivor of a chain of natural lagoons of the northern Adriatic Sea. The drainage basin of the lagoon is 1870 km² of highly cultivated coastal plains, and Alpine foothills. Four major rivers (the Sile, Piave, Brenta and Bacchiglione) drained into Venice Lagoon bringing abundant supplies of fresh water, sediment and organic matter. The largest river in Italy (the Po) debouched immediately south of the lagoon bringing large quantities of sediment to the coastal zone, much of which silted the navigation channels surrounding the city of Venice.

Venice is subject to one of the largest tides in the Mediterranean Sea: 1 m at springs. It is bordered by a wide expanse of reclaimed land, by aquaculture developments, and by a long barrier island that separates the lagoon from the sea. The lagoon morphology consists of shallow mud banks, mud flats, salt marshes, islands, and a dense network of channels which have evolved naturally over a period of about 10,000 years. During early post-glacial times, the region of the lagoon was a flat fluvial/lacustrine marsh infilled with organic-rich mud: *the alluvial phase*.

Sea-level rose 20 m between 10,000 and 5,000 years BP transgressing these fresh water marshes and reworking coastal material into clean sand that was pushed landwards to form a veneer that underlies the present lagoon: *the transgressive phase*. At 5,000 years BP, sea-level had reached its present position and the concentrated effect of wave reworking at the fixed shoreline built a series of sand barrier islands that enclosed the lagoon and provided the sheltered environment for the formation of the key lagoonal sub-environments: mud flats (barene), salt marshes (palude) and tidal channels (canale): *the lagoon building phase*.

Early settlements of the lagoon date to ca. 400 AD. Fears of invasion from Attila's hordes, as well as the ravages of malaria, caused these settlers to move from the fringing salt marshes to a mud bank in the centre of the lagoon. Between 1,300 and 1,800 AD, the Venetian Empire (the Serenissima Republic of Venice) flourished and the city of Venice, as we see it today, was built. Every stone, every tile, and all merchandise from which this remarkable city was created were brought by shallow-draft boats and then hand-carried through the labyrinth of lanes (Calli). The canals of Venice were dug by hand and the mud excavated was used as the foundations for the buildings and palaces of the city: *the coastal development phase*.

Venice Lagoon is host to perhaps the most famous coastal issues: inundation (subsidence), siltation, pollution, and environmental degradation. This is the consequence of almost 2,000 years of human intervention and modification of the natural lagoon. About 170,000 people live around the lagoon, of which 70,000 live in the City. As well, a growing tourist industry (3,000,000 tourists each year) and a growing economy have placed further stresses on the lagoon. The main industries of Venice are: tourism, trade (expanding container port), petro-chemical processing, ship building and maintenance, and aquaculture.

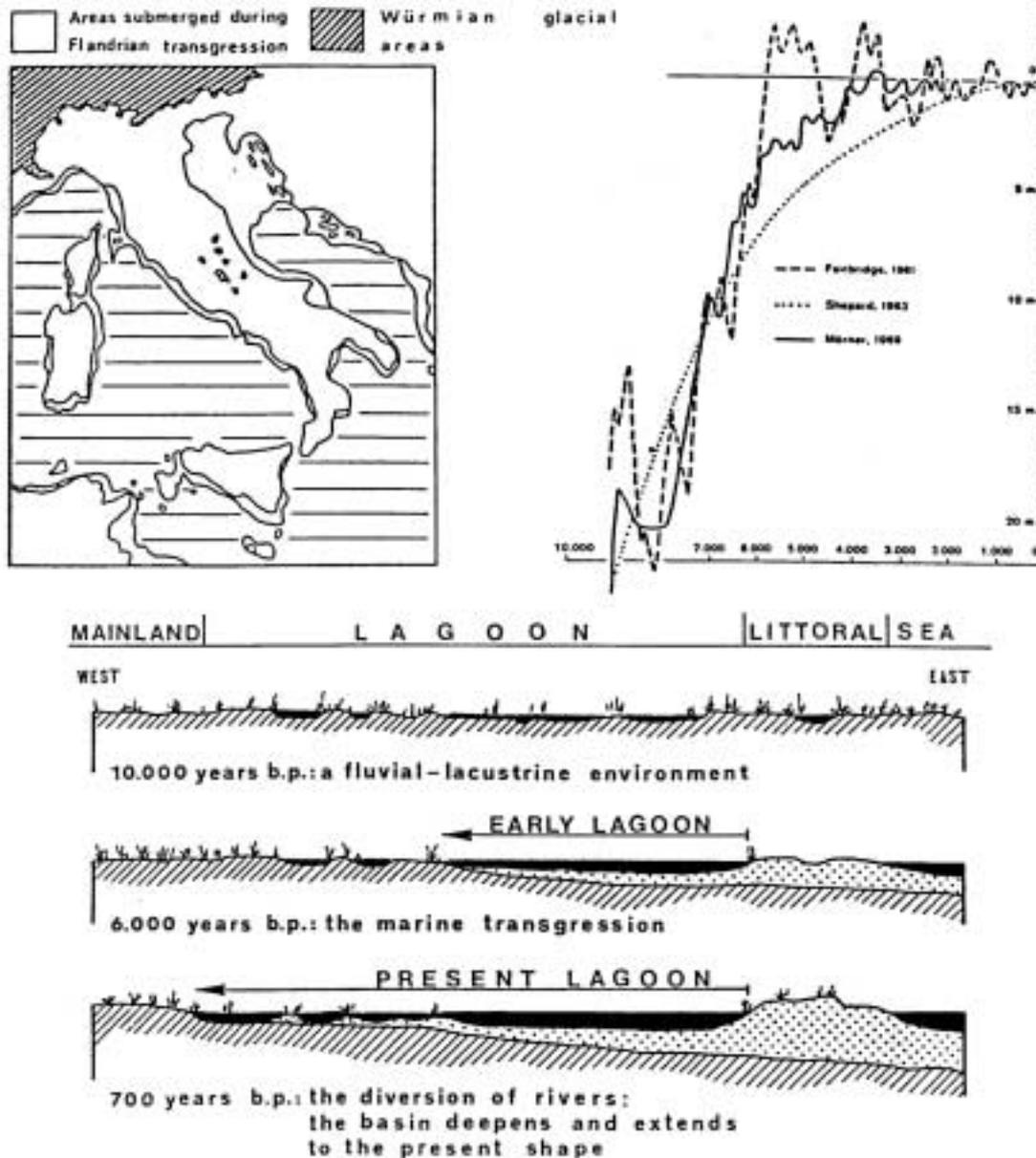


Fig.1. Sea-level rise and post-glacial evolution of Venice Lagoon (Carbonin and Cecconi, 1997).

INUNDATION (SUBSIDENCE)

Three factors control inundation: natural subsidence, man-induced subsidence, and eustacy. Natural subsidence occurs because the fine-grained materials which underlie Venice undergo the process of natural consolidation. This has caused the lagoon to sink due to the weight of overburden at a rate of 1.3 mm/year during the Holocene. This has slowed to a rate of 0.4 mm/year during the 20th century due to river diversion and a reduction in the addition of overburden. Man-induced subsidence has resulted because of pumping of ground water, for industrial purposes,

from sandy layers interbedded with silty-clay that form a 1,000 m thick Quaternary sequence of soft sediment. This has caused the city of Venice to subside 22 cm during the 1900's; this is five times the natural rate (Fig. 2). The subsidence due to ground water extraction began in 1925 and became critical in 1969 at which time it was stopped. The water table has recovered since this time with a resulting 2 cm rebound of the lagoon (15% of the previous losses). Subsidence is now reduced to natural levels. Eustasy has resulted in a relative rise of sea-level at a rate of 1.27 mm/year. This rate is likely to increase due to predicted effects of global warming (up to 50 cm in the next century).

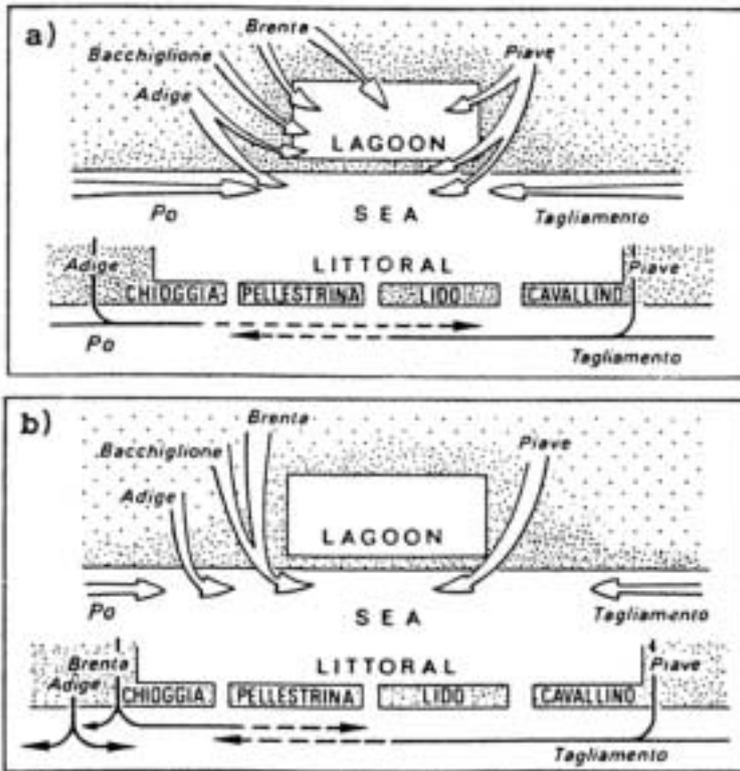


Fig. 2 The sediment budget of Venice Lagoon (a) before and (b) after human intervention (Carbonin and Cecconi, 1997).

The impact of subsidence has been a steady increase in flooding of Venice (*acqua alta*). At the beginning of 1900's, the main square of St. Marco flooded about twice/year. Today this square floods about 50 times/year. Flooding takes place when high tides coincide with strong winds from the SE (Sirocco). The resulting storm surges are the product of greater storminess, deeper channels (overcoming wall resistance), and an overall deeper lagoon due to subsidence. The storm surge enters the lagoon through three main entrances in the barrier island (Lido, Malamocco, and Chioggia, Fig. 3). Storm surge gates have been designed to protect the City from such flooding.

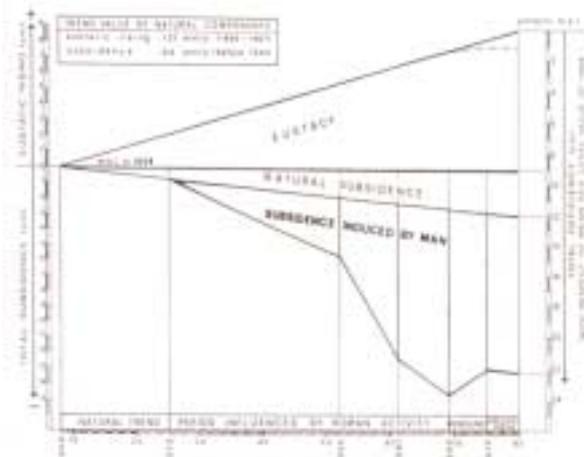


Fig. 3 Subsidence in Venice since 1900. Notice the dominating effects of water extraction over natural subsidence and sea-level rise (Carbonin and Cecconi, 1997).

However there has been a strong outcry against building them on environmental grounds. The debate hinges on the merits of soft solutions *versus* hard engineering. The former attempts to use natural processes and natural materials; the latter uses construction to suppress the effects of nature.

SILTATION AND EROSION

The dominant evolutionary trend in Venice Lagoon has been one of silting up. Venetians have applied considerable technical and scientific effort to prevent the City from becoming land-locked and therefore strategically vulnerable and difficult to maintain. Prior to 1500, the rivers entering the lagoon brought 700,000 m³ of fine-grained material most of which was deposited to form fringing salt marshes and mud flats. As well, 300,000 m³ of sand entered the lagoon from the sea to form flood tidal deltas. By 1650, all rivers had been diverted and the import of fluvial material was eliminated. In 1609, the Po river was channelised and diverted about 90 km to the south. Jetty construction along the barrier island, and entrainment of the entrances stopped the import of material from the sea. Now the sediment budget is negative: there is an export of 1.1 million m³/year resulting in net erosion. The lagoon floor is becoming deeper, flatter and less diverse (dominated by the macroalgae *Ulva rigida*, *Chaetomorpha aerea*, *Cladophora* sp., and *Enteromorpha* sp. and the rooted plants *Zostera marina*, *Zostera noltii*, *Cymadisia nodosa*, and *Spartina maritima*). The fertile salt marshes and tidal flats (which are fundamental to the local ecosystem) have diminished from 72 km² in 1930 to 48 km² today. At present rates of loss the marshes will have disappeared by 2050. Much of the material eroded from the tidal flats ends in the navigation channels of the lagoon which were dredged (13.5 million m³/year) and the material dumped at sea. Measures have been taken to use the dredged material to re-charge the tidal flats behind wooden/cloth fences created to reduce wave erosion.

River diversion has resulted in a reduction of sand supply to the coastal barrier islands fronting the lagoon of Venice. This littoral erosion is of great concern as the barrier protects the lagoon, and indeed Venice, from the destructive forces of the waves in the northern Adriatic (which reach 5 m in height). Strong longshore currents sweep the sand southwards thus eroding the beaches and steepening the foreshore. Intervention began in 1800 by construction of inlet jetties. These jetties enhanced coastal erosion downdrift by further reducing the supply of sand through coastal trapping. Over the last 10 years beach nourishment from offshore resources have widened the barrier (though steepened the offshore) and rock groynes have been built to reduce longshore sand transport. The aeolian dunes on the coastal barrier have been stabilized with wind fences and through plantation of grasses and public access has been restricted to board-walks.

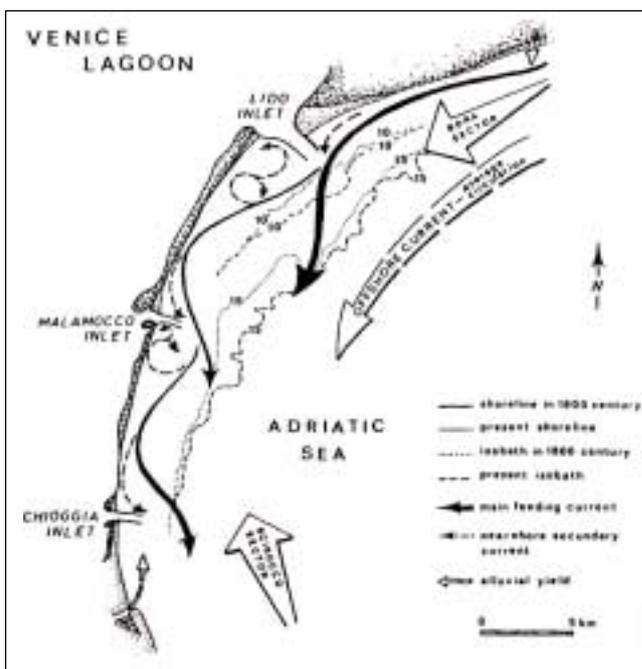


Fig. 4. Coastline dynamics and sand transport pathways off Venice Lagoon (Consorzio Venezia Nuova, 1996).

POLLUTION

Pollution is intense in the waters and sediments of the central basin of Venice Lagoon. There are three main sources of pollution: industrial development (principally Porto Marghera), sewage discharge (principally the City of Venice), and river effluent (principally due to commercial fertilisers). The region influenced by industry is subject to low alkalinity due to acid waste and is high in toxic metals. There is also thermal pollution taking place due to the hot-water discharges from the region. Free discharge of industrial wastes was stopped in 1972. However, the sediments in the vicinity of Porto Marghera are still highly toxic and above levels for legal dumping at sea. Nitrates, nitrites, total phosphorus and ammonia are all high (hypertrophic). This is surprising considering the residence times of the lagoon waters which is about 1 day. Eutrication has taken place, but it is not related to peaks in nutrient discharge from rivers; it has been linked to seasonal blooms of the broad-leafed macrophyte *Ulva rigida* which smothers other species through oxygen consumption and reduces light penetration to rooted benthic communities.

Contaminated dredged material is no longer dumped at sea but is contained within sealed artificial islands such as Incinerator Island (near Venice). Also the creation of wetlands for phytopurification of freshwater discharge has reduced nutrient loading to the lagoon. Reduction in area of the wetlands, of course, means a reduction in the capacity of the lagoon to deal with pollutant loading.

ENVIRONMENTAL DEGRADATION

The loss of biotopes and habitats since 1930 has been dramatic. The consequence of this on the local fisheries and aquaculture industry will be far-reaching as the productivity of the lagoon is in jeopardy. Each year, more than 10 million tons of crude oil and petroleum products pass through Venice Lagoon. The potential for oil spill is thus large. As well, the bow wave and wake region undercut the channel banks enhancing the problems of erosion. There are proposals being discussed to move this traffic elsewhere and construct a pipeline to a port outside the lagoon.

The fish farms are separated from the lagoon by solid embankments. The water quality in these farms is hence very good. Measures are planned to open these wetland areas to the lagoon to help improve water through enhanced phyto-purification. A pilot project is underway to assess the possible impact on the local mariculture.

Offshore sand for beach restoration: North Adriatic shelf examples

Correggiari A.¹, Cattaneo A.¹, Carra' D.¹, Penitenti D.¹,
Preti M.², and Trincardi F.¹

¹ Istituto di Geologia Marina, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Bologna, Italy

² ARPA Regione Emilia-Romagna, Ingegneria Ambientale, Bologna, Italy

INTRODUCTION

Several factors may cause beach erosion, most of which are natural. Beaches are constantly moving, building up here and eroding there, in response to oceanographic factors (waves, winds, storms, relative sea level change and supply fluctuation). Some beaches are also destroyed by human activity when harbors or any other structure disrupt the fragile balance of erosion and deposition in the coastal environment.

On much of its extent the Adriatic coast has been steadily eroding in the recent past. Sediment transport by the Po and other Apennine rivers between 1960-1980, was reduced to about 30% of its previous values (AQUATER, 1982; 1984), due to the hydrogeological control of the catchment areas and to dam construction (artificial lakes, etc.) accompanied by intense quarrying of gravel and sand from riverbeds. These factors have led to an enhanced erosive activity in the coastal environment. The decrease of land erodibility resulting from reforestation of the Italian peninsula after the second World War contributed to a reduced sediment supply to the sea.

Growing shores are “nourished” by material that has been eroded from somewhere else. Any attempt to reduce coastal erosion in one area will result in reduced deposition elsewhere, “starving” another shoreline. Erosion and accretion are therefore two faces of the same process, and their balance may change at extremely slow rates or make dramatic changes in the shoreline within a human lifetime. Sand bedload that used to flow down rivers contributing to beach maintenance is no longer reaching the coast, resulting in a substantial narrowing of the beach area thereby affecting also the recreational opportunities. Since the 1960s several strategies to prevent beach erosion have been applied on the Italian coasts. Attached and detached breakwaters, groins, jetties built on the coast have changed the natural physiography of the shoreline partially inhibiting the flow of beach sand by longshore drift. These features may actually accelerate erosion or change the ways in which the shoreline can be used. In fact in some areas of the north Adriatic coast, the breakwaters installed to stop beach erosion have been so effective that the beach has become a mud flat with severe environmental pollution problems (Correggiari *et al.*, 1992).

Along the Adriatic coast, in addition to the construction of stable beach protections, nourishment operations contributed to preserve beaches from erosion. Protective structures occupy about 35% of the 1630 km of the Italian Adriatic coast and large supply of suitable sand used for beach-

es accretion was mined from riverbeds until 1984 when this activity was forbidden (EUR 13289, 1998). In a period of decreasing sediment supply a good strategy is to search an alternative source of sand outside the coastal and river system. In Italy only in the recent years has offshore sand become the main source for beach nourishment.

Recent projects of beach nourishment have been carried on for the Adriatic on the Venetian and Emilia-Romagna coasts. The barrier-island system protecting the Venice Lagoon has been re-established from erosion with a combination of sand nourishment, construction of groins and restoration of dunes environment. About 8.3 millions of cubic meter of sand taken from offshore deposits have been used for beach accretion (Consorzio Venezia Nuova, 2000; Correggiari *et al.*, 1996a).

EMILIA-ROMAGNA BEACH NOURISHMENT PROJECT

The Emilia-Romagna coast, in the north Adriatic sea south of the Po delta, benefited from the first project of beach nourishment using offshore sand in the first part of 2002 with about 1 million of cubic meter of sand (Regione Emilia Romagna – ARPA, 2001). Beaches of the Emilia-Romagna region have been renourished in nine different locations, five of which protected with existing hard structures, such as groins or breakwaters, built to trap sand or to reduce waves energy at a specific location.

The sand used for beach nourishment belongs to transgressive deposits laying in patches on the Adriatic shallow shelf some 30 nautical miles offshore and at 40-42 m water depth. During the late glacial maximum (LGM) the Adriatic shelf was an alluvial plain that was drowned during the last transgression (from 18 to 6 ka BP; Trincardi *et al.* 1994). The coastal plain, deltas and barrier lagoonal deposits show a backstepping arrangement and remnants of these deposits drowned and reworked in marine environment, constitute part of the present Adriatic shelf sea floor. Due to the anticlockwise water circulation, modern muddy deposits are banked on the western side of the Adriatic basin constituting the late-Holocene prodelta wedge fed by the Po river and other Alpine and Apennine rivers. This muddy wedge, up to 35 m thick, deposited after the maximum marine ingression (around 5.5 - 6 ka BP), distally drapes the drowned transgressive bodies (Trincardi *et al.*, 1994; Correggiari *et al.*, 1996b; Chiocci, this volume). The exploitable transgressive sand bodies comprising old beach deposits are outcrop only in the axial part of the basin far from the recent muddy sediment deeper than 38 m w.d. (Figs. 1 and 2). The grain size compatibility of this ancient beach sediment with the modern beaches is high and the mineralogical composition is similar.

The lateral continuity of these sand bodies, constituting the potential borrow sites, is a function of their original dimension and the intensity of erosional processes during transgression. The ravinement surface, a peculiar sedimentary signature in the transgressive deposit, forms through waves erosion as relative sea level rises and the shoreline moves landwards, causing reworking of both older and newly deposited sediment on the shoreface, and separating non-marine (below) from marine (above) deposits (Fig. 3). The ravinement surface is typically associated to shelly sands and hash deposits largely made up by mollusc remain sourced from paralic to fully marine environments. In the transgressive sand deposit used for nourishment this bioclastic lag may create some problems during dredging operations: the high shells concentration can block the fluidized sediment during the pumping process.

Compilation of the surficial marine geological maps, using high-resolution seismic profiles, previously obtained in the Adriatic case by IGM-CNR (Fabbri *et al.* in press), with the addition of new sediment cores in targeted locations, is an effective way to evaluate potential borrow sites on any continental shelf (Fig. 2).

Offshore sand resources must be managed on a long-term, large scale, wide basis to ensure that environmental damage will not occur as a result of continual and prolonged use. Sand sources that are to be used repeatedly may require additional biological and physical monitoring to avoid unacceptable impacts to the marine and coastal environments. For these reasons it is necessary to address future efforts through monitoring protocols to evaluate the long-term impact of offshore dredging operations on the marine environments.

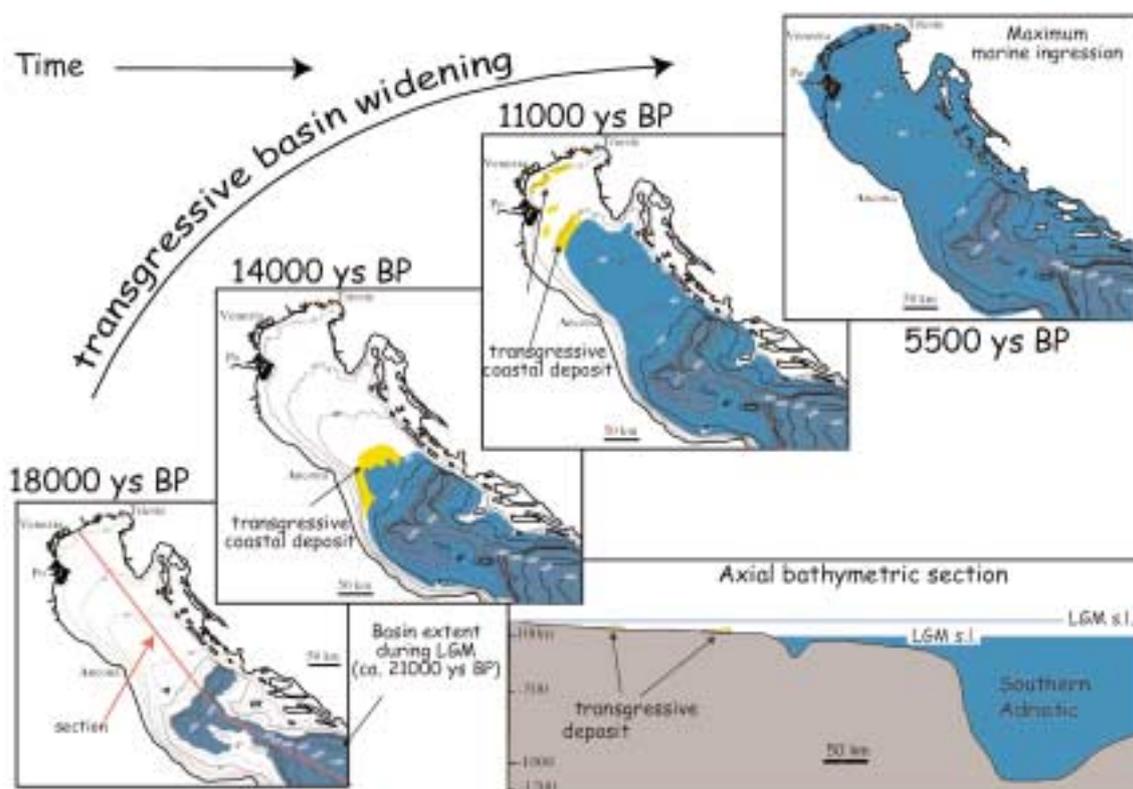


Fig. 1. Progressive widening of the Adriatic basin during the last sea level rise. Transgressive deposit outcropping in patches in the axial part of the basin have been studied as potential borrow sites for sand beach nourishment.

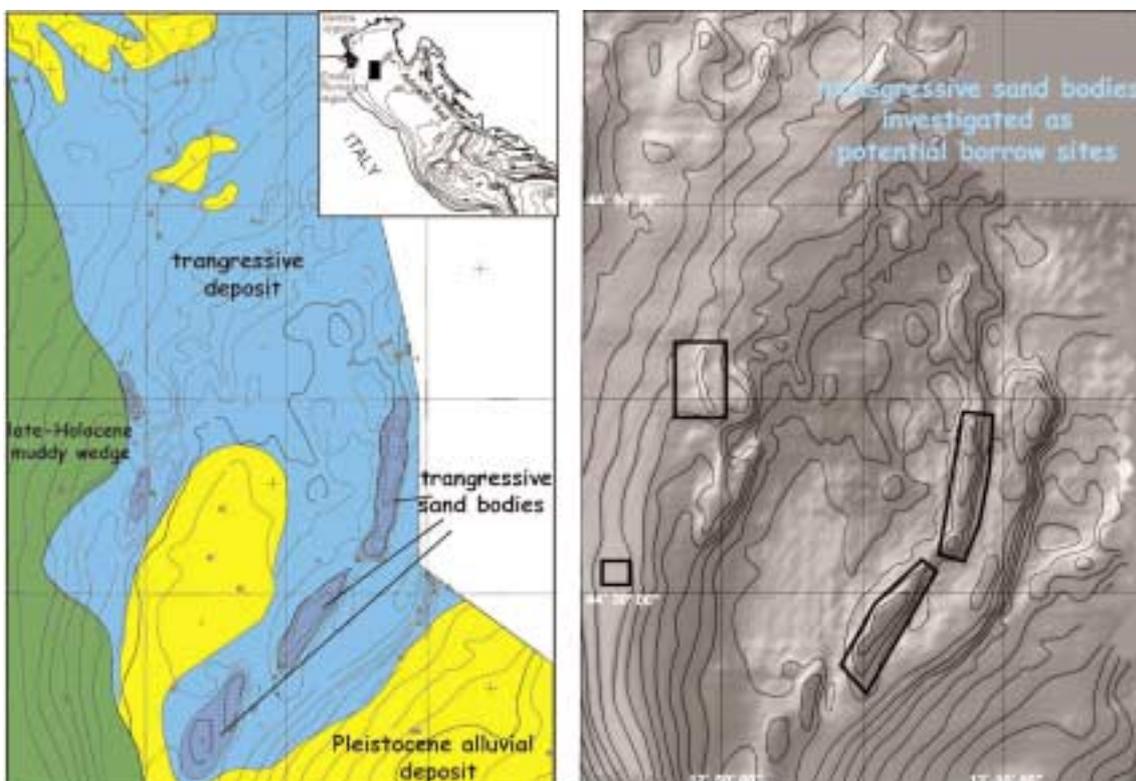


Fig. 2. Detailed geologic map of transgressive deposit in the northern Adriatic shelf where the sand bodies are highlighted with dotted pattern (left; Fabbri *et al.*, in press) and shaded relief map of the same area where potential borrow sites are located (right; Regione Emilia-Romagna ARPA, 2001).

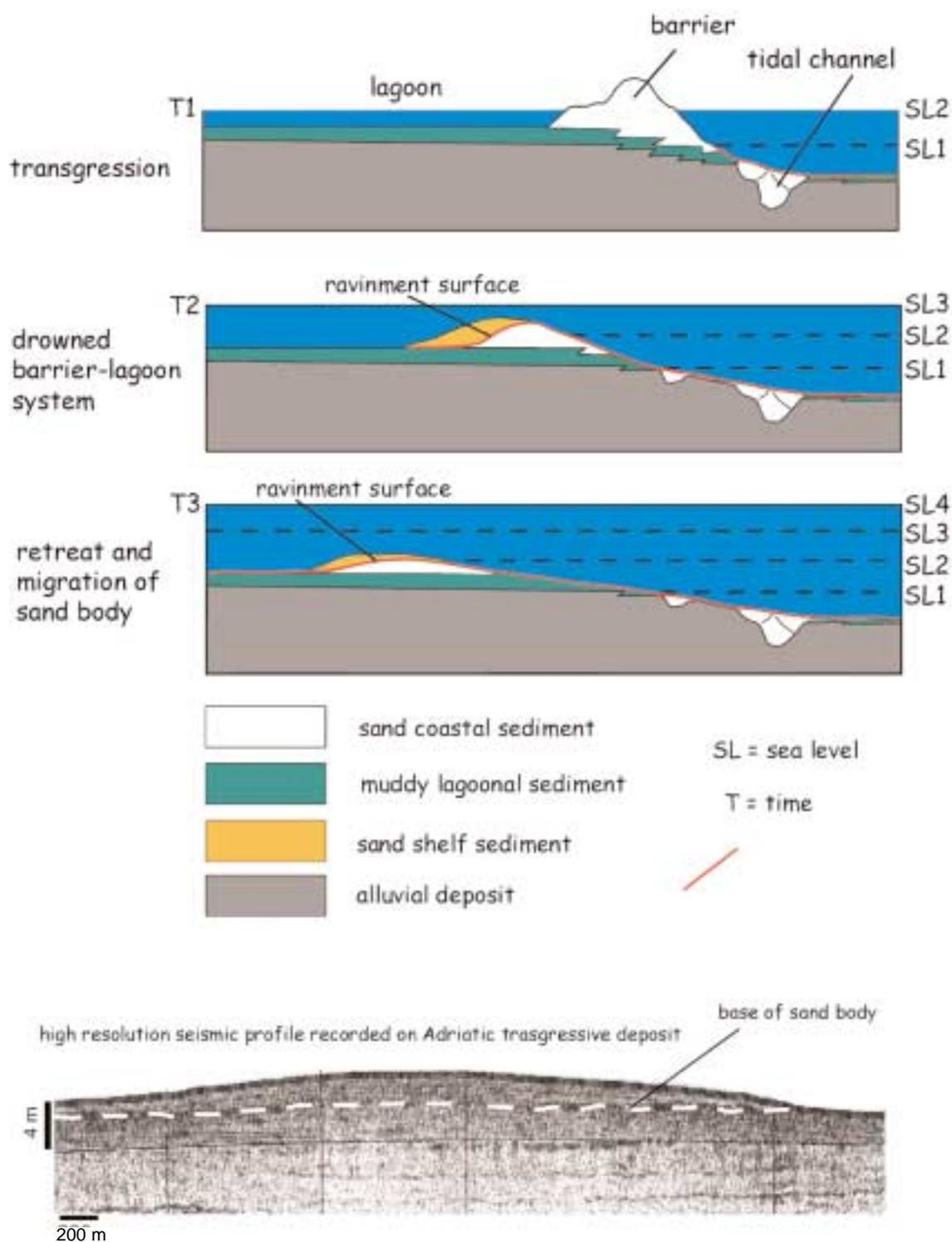


Fig. 3. Schematic evolution of a barrier lagoon system during transgressive erosional processes. Below an example of high resolution seismic profiles acquired in an area used for dredging sand for nourishment in Emilia-Romagna coastal region. It is important to note that while the majority of potential Adriatic borrow deposits identified consist of ridges and remnants of barrier lagoonal system, in the future it is likely that the range of deposit types will be expanded to include paleo-channels, paleo-deltas, and other buried sand deposits.

Les moyens techniques de défense contre l'érosion côtière

Hafid Tabet

Ingénieur Conseil, expert consultant, Professeur associé, Université du Havre, France

La population dans la zone côtière est inégalement répartie le long des cinq cent mille kilomètres du linéaire côtier autour du globe. La Méditerranée avec seulement 7% de ce total abrite de l'ordre de 15% de la population côtière et produit plus de 15% des richesses mondiales. C'est aussi le lieu par où passent plus de 16% des échanges commerciaux mondiaux (CEFI, 1993).

L'attrait de la zone côtière méditerranéenne a été toujours très important tant pour la population urbaine que pour le développement du tourisme et des activités industrielles.

Cette pression anthropique devrait continuer à croître en particulier dans les régions méridionales où est attendue la part la plus importante du taux de croissance de la population et où le développement du tourisme et des activités industrielles demeure un axe souvent prioritaire de la politique des pays concernés.

En effet, il est prévu que les populations des régions côtières méditerranéennes devraient croître à l'horizon 2025 de l'ordre de 50 à 55% par rapport à 1985, avec plus des trois-quarts de cette croissance pour les pays du Sud et de l'Est (Montoya and Galofré, 1995). De plus, le tourisme, première activité productive de la région, drainait déjà près d'une centaine de millions de personnes en 1990. Il représente bon an mal an entre 30% et 40% du marché mondial du tourisme. Les tendances attendues pour le futur prévoient un doublement, voire un triplement dans les trente prochaines années.

La conséquence d'une telle évolution sera une densification vigoureuse d'une grande partie du littoral méditerranéen, plaçant les conflits d'utilisation de l'espace et des ressources marines parmi les problèmes les plus aigus. Le taux d'urbanisation actuel est de l'ordre de 60% en moyenne. Il passerait de 70 à 80% à 2025 avec des maxima dépassant les 96% dans certaines zones à fortes densités touristiques ou industrielles, comme l'Espagne ou le Nord de l'Italie.

LES PRINCIPALES CAUSES DE L'ÉROSION CÔTIÈRE

L'équilibre naturel de la zone côtière est de plus en plus fragilisé. Les problèmes d'érosion sont le plus souvent la conséquence de l'état de déséquilibre dû à un déficit dans le budget sédimentaire de la zone (Fig. 1).

Les causes peuvent être d'origine :

- naturelle : vents, courants, houle, surélévation du niveau moyen, topographie et/ou nature des fonds marins;
- anthropique : aménagements côtiers, aménagements fluviaux, prélèvement de sédiments, déficit en apports de sédiments.

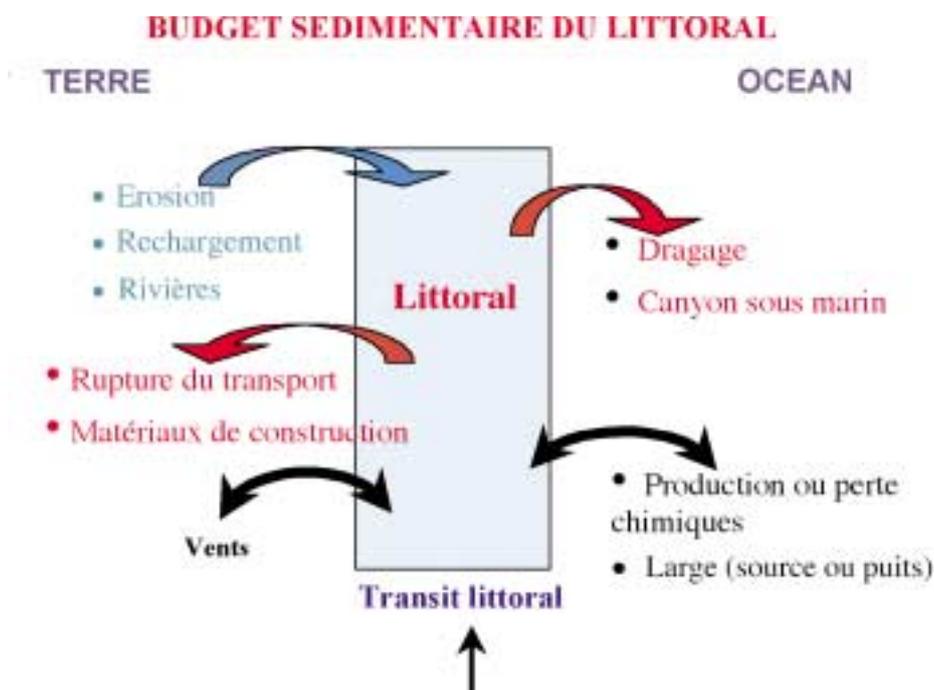


Fig. 1.

LES MOYENS TECHNIQUES DISPONIBLES POUR LA PROTECTION CÔTIÈRE

Approche du problème

Les ouvrages de défense des côtes sont conçus pour contrecarrer ou bien réduire les effets du transport des sédiments. La conception de tels ouvrages doit être faite tenant compte des aspects suivants :

• Aspects scientifiques et techniques des phénomènes

Les phénomènes naturels interagissant sur le littoral, interface entre l'hydrosphère, la lithosphère et l'atmosphère, sont complexes.

L'action de la houle, par exemple principal agent responsable du transport sédimentaire le long et à travers le rivage, dépend :

- des caractéristiques propres à la houle (hauteur, période, direction, fréquence d'apparition);
- des déformations en cours de la propagation (réfraction, diffraction, réflexion, déferlement);
- du type de littoral (nature, taille et densité du sédiment ainsi que les forme et pente du rivage);
- des autres paramètres tels que le vent ou la marée.

Pour assurer le maintien de l'équilibre naturel ou le retrouver, il est indispensable de disposer de la meilleure connaissance des phénomènes naturels (morphologie de la côte, types de sédiments, houles, vents, courants, marée, etc.), le cycle temporel dépassant souvent la saison, l'année voire même quelque fois la décennie.

Il s'agit à chaque fois de chercher à comprendre les interactions très complexes entre les forces hydrodynamiques, dues à ces phénomènes d'occurrence aléatoire pour la plupart et la mobilité des matériaux côtiers.

• Impacts sur l'environnement

Il est important de noter que l'aménagement d'un ouvrage sur le rivage crée des perturbations dans l'équilibre naturel établi. Les fonds proches et le rivage vont évoluer de manière à retrouver un nouvel état d'équilibre. Il est donc indispensable de bien prévoir les effets induits.

De même l'impact sur les organismes benthiques ou sur l'habitat naturel de la faune doit être évalué de manière à ajuster les phases de construction ou même restaurer le cas échéant les zones humides.

- *Aspects institutionnels et réglementaires*

Les cadres institutionnel et réglementaire diffèrent beaucoup d'un pays méditerranéen à l'autre. La définition du Domaine Public Maritime et la délimitation de la zone *non aedificandi* mériteraient d'être élaborées d'une manière plus cohérente, avec des moyens pour les faire respecter plus efficaces.

De même, l'extraction sauvage (parfois tolérée) de volumes très importants de sable de plage et des dunes côtières est à l'origine du déséquilibre du budget sédimentaire et donc d'érosion souvent dramatique de la côte. La réglementation interdisant de telles pratiques est dans certains pays méditerranéens inexistante ou n'est pas accompagnée de moyens suffisants pour son application stricte.

- *Aspects esthétiques*

L'Homme a tendance à penser que les paysages naturels sont beaucoup plus plaisants que ceux artificiellement modifiés. Il arrive néanmoins que l'alternative de l'aménagement d'ouvrage de défense puisse être préférée à la solution de ne rien faire, lorsque les aspects esthétiques sont bien pris en compte.

- *Aspects économiques*

Les coûts d'investissements pour de tels ouvrages ainsi que les bénéfices attendus sont à analyser au cas par cas. En France, par exemple, où la longueur totale des ouvrages de protection représente près de 400 km (10% du linéaire côtier), les coûts unitaires de réalisation de tels ouvrages sont évalués de l'ordre de 3000 à 6000 euros/m.

Les différents types de réponses disponibles

Les sédiments proviennent soit de l'érosion du rivage ou d'apports fluviaux ou telluriques.

Les lois donnant lieu à des solutions exactes d'état d'équilibre demeurent assez mal connues. Cependant il est possible grâce à l'utilisation d'un certain nombre d'instruments scientifiques et techniques d'analyser et quantifier les phénomènes physiques à l'origine des mouvements sédimentaires dans les cas relativement simples.

Dans les cas plus complexes, l'appel à l'expérimentation sur modèles physiques et/ou mathématiques permettra à partir de la reproduction approchée de situations passées du site, la prévision des états d'équilibre que l'on pourrait retrouver avec tel ou tel type de défense.

Les moyens techniques disponibles pour faire face à l'érosion peuvent être :

- *protection dure* : maintien (ou gain) du trait de côte par la mise en place de cordons d'enrochements ou de murs longitudinaux parallèles à la côte;

- *protection modérée* : ralentissement du taux d'érosion avec des épis ou des brise-lames détachés;

- *les solutions dites "douces"* de rechargement de plage par :

- apport de sédiments : solution classique de rechargement de plage éventuellement combinée avec un système de protection avec des épis ou brise-lames détachés,

- stabilisation de la plage par drainage (brevet Stabeach de DGI, Danemark) surtout intéressant pour augmenter la durée de vie du rechargement de plage. Deux sites en Méditerranée ont été expérimentés. Il s'agit du site de Riumar (Delta de l'Ebre, Espagne). C'est une zone de marais salants où le système semble avoir bien fonctionné, même si le problème de rejet des eaux de drainage refoulées continue à poser des problèmes au maître d'ouvrage. Un autre site en Italie (Lido di Ostia, Rome) a été expérimenté en 2001. Un élargissement d'une dizaine de mètres a été constaté.

- *la prévention du risque* en adaptant les aménagements et en renforçant le cadre réglementaire

- *l'alternative "ne rien faire"* en s'abstenant de toute intervention sur le milieu

Exemples de système de protection

Différentes expériences connues (CERC, 2001; Fanos, 1990; Landouer, 1990; Migniot, 1994; Snoussi et Tabet, 2000) tentées en Méditerranée (France, Espagne, Algérie, Egypte) ou dans d'autres régions du monde (USA, Canada, Japon) permettent de réfléchir sur les mesures néces-

saires à la prise en charge des problèmes de défense et de protection des côtes et sur les besoins de renforcement du cadre réglementaire et/ou institutionnel.

Une indication intéressante sur la tendance actuelle allant vers les investissements sur des solutions dites douces ou éventuellement combinées est donnée par l'étude récente faite par le CERC, montrant que durant les dernières décennies l'essentiel des investissements dans la protection et défenses des côtes aux USA a été dirigé vers de telles solutions.

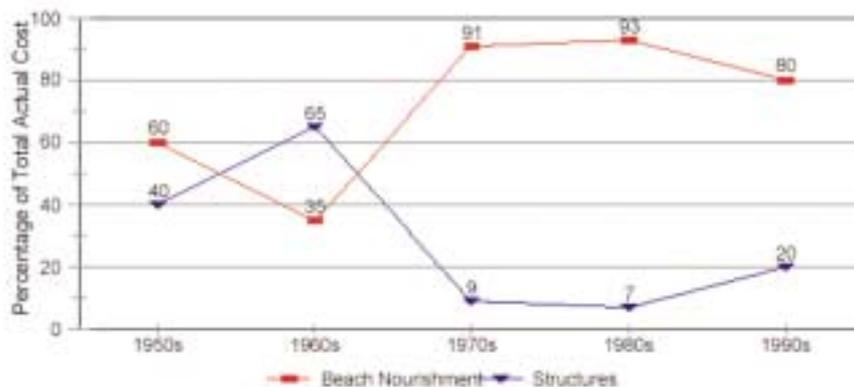


Fig. 2.

Coastal erosion: new concepts, policies and examples

Jordi Serra Raventós¹ and Carlota Montori²

¹*Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, Spain*

²*EUROSION team (<http://www.euroasion.org>)*

One quarter of the European Union's coast – 16 000 km of coastline – is currently eroding despite the development of a wide range of measures to protect shorelines from eroding and flooding. The prospect of further sea level rise due to climate change and the heritage of mismanagement in the past imply that coastal erosion will be a growing concern in the future. In particular, European Mediterranean coast is eroding at a great rate, in special zones depending on river sediment discharge and urbanized areas. This motivated the Directorate General Environment of the European Commission to launch early 2002 the EUROSION project (<http://www.euroasion.org>) a new initiative which aims to assess coastal erosion status and trends throughout Europe and develop new coastal erosion policy recommendations. The expected policy recommendations will mainly build upon shoreline management experiences gained in different places in Europe, especially along the Mediterranean Sea, where certain areas, described further in this paper, will act as pilot zones.

Information from the pilot zones must be made available at the physical, the technical/engineering and the socio-economic and financial level with the aim to provide a basic description, and as much as possible a complete and objective picture of the situation. This picture will be analysed and presented at the “information level”, through the use of analytic and presentation techniques (such as “local information systems”). In order to present planners and decision makers with a sufficient understanding to allow them to prepare, implement and monitor coastal erosion management policies, information must be presented in a transparent way. However, policy making is not only based upon objective information but also on public perception and stakeholder communication (e.g. lobby), usually based upon socio-economic and non-economic interests.

COASTAL EROSION AS A PHYSICAL PROCESS

Erosion and inundation brought about by river flows, tides, winds and rain are among the most important natural processes which determine the shape and dynamic character of the coastline. Sedimentary coastal systems are constantly changing (not always in the mean of urbanism technicians) and periods of accretion may alternate with periods of erosion and inundation. These processes are not only influenced by day to day or hour to hour changes in climatic variables and anthropic activity, but also over longer timescales as sea-level and climate change. Through the combination of wind, wave action, tidal movements and marine circulations (currents) and storm surges, sediments are constantly being transported, both under water and on sand flats, beaches and sand dunes. At individual locations the difference between the incoming sediment volume,

the outgoing volume and the forces acting upon the habitats which are created, determine whether the coastal section is stable (in equilibrium), eroding or accreting.

Sediments and geomorphological processes are fundamental to the ability of a coastline to accommodate change. Wide beaches, saltmarshes and tidal flats can absorb wave energy, and dunes and shingle bars move in response to changing sea levels and storms. The amount of sediment on- and off- shore, including the volume held within sedimentary systems such as beaches, dunes, saltmarshes and intertidal flats help to determine the capacity of the coast to resist erosional forces. The “resilience” of the coast is also a product of the inherent strength of the features themselves. The extent to which these systems are maintained and allowed to respond to changes in environmental and climate conditions is crucial both to their continued well-being as natural habitats and to their ability to aid coastal defence.

THE POLICY RESPONSE

In Europe, erosion problems and flood risks are dealt with at local, regional and national levels. Not all countries have adopted coastal defence policies at a national level, and the management of erosion problems is often left to the local and regional authorities. Several countries have developed elaborate coastal erosion management policies and adopted national legislation. Countries that have seen extensive seafront development for tourism have also implemented significant coastal defence works. In the 1970s Spain developed a national programme aimed at the protection of tourist infrastructure including the nourishment of eroding tourist beaches, especially in the Mediterranean. In France, Italy and Greece coastal defence and restoration works are carried out at a more local and *ad hoc* level, and the same is true for Poland. In Portugal erosion problems are serious because of the scattered and uncontrolled nature of seafront development in especially sensitive areas such as on sand dunes and above rapidly eroding soft rock cliff edges. These effects have been made worse in some areas by the recent construction of harbour piers, groynes and other defences which have helped to accelerate erosion on the adjacent unprotected coasts. The international scope for the exchange and collaboration on coastal defence in Europe is relatively recent compared to the way federal approaches have developed in countries such as the United States of America and Australia. In these countries a two-tier system is in place combining federal and state legislation and programmes.

A review of policy options used in the various EU Member States identified a suite of generic policies defined by the UK Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA) which are felt to be particularly relevant to the EUROSION project. The five generic policies are as follows:

- hold the line,
- move seaward,
- managed realignment,
- limited intervention,
- do nothing.

THE TECHNICAL RESPONSE

There is a wide range of techniques available to monitor and manage the many types of erosion and flooding that affect the coast. Detection and monitoring techniques include: visual observations, aerial surveys and remote sensing images, topographic and bathymetric surveys. Coastal protection and sea defence options include the artificial replenishment of sediment supply, construction of groynes, offshore breakwaters, seawalls and revetments, etc.

These coastal protection and flood defence techniques can be described in relation to the development of what are termed “hard and soft” engineering techniques. The hard engineering techniques involve the construction of solid structures designed to fix the position of the coastline, while soft techniques focus on the dynamic nature of the coastline and seek to work with the natural processes, accepting that its position will change over time.

Applying various techniques, which can be hard or soft, or a combination of both, provide the means of dealing with the problems. The solutions vary according to the local situation, but ultimately the aim is to identify the best option or options, which secure the coastline both in the

interests of the environment and of people, in the most efficient and cost effective way. The overall objective is to provide policy-makers and managers with information on the available options to aid the decision-making process in order to identify the coastal defence or other management technique most appropriate for each problem area.

SOCIO-ECONOMIC AND FINANCIAL ASPECTS

Throughout Europe, especially along the shores of the Mediterranean, inappropriate siting of infrastructure, facilities for the urban, industrial, transport and tourism sectors has provided the most significant challenge to coastal management. In most European regions there has been a tendency for seafront development. The first ports and marinas were inevitably located in and around estuaries and other coastal locations. However, the desire for a “sea view” only minutes from the beach resulted in developers building many hotels and apartments right on the coastal margin. The protection afforded by the beaches was lost and as a result, numerous boulevards and even hotels were protected against collapse through the construction of dykes, groynes and revetments. This in turn has in many areas also helped to deplete the remaining beaches of sediment: today, thousands of tourist beaches are artificially nourished, restored and/or protected with groynes.

The sand for beach nourishment was often taken from the near shore seabed. This also led to the foreshore being undermined and included loss of seagrass beds, themselves part of the natural features that ensure the stabilisation of the seabed.

In order to improve the quality of Mediterranean tourism resorts, increasing numbers of marinas were built, especially after 1975. Older urbanisations from the 1960s and ‘70s also felt the need to improve their quality by adding marinas. Given that in many areas the land had already been completely developed new marinas provided the only opportunity for expansion. The dykes and piers that are needed to protect marinas from storms cut off the longshore drift and have resulted in coastal erosion away from the marina on the down-drift side of the development. This has happened in many Mediterranean regions where the effect on the sediment system has been to increase the number of eroding beaches, many of which are important areas for tourism.

Erosion has become a serious problem in many areas where private seafront development for tourism has been allowed in vulnerable coastal zones. Costs of erosion control have considerably increased over the last decades and they are usually borne by the state budget. As a result, several EU member states have had to increase their budgets for coastal defence.

The means of achieving sustainability is through the mechanism of Integrated Coastal Zone Management (ICZM) policies which can develop at a variety of levels. This might include individual sites (such as a whole estuary or a sand dune) or covering a subject (pollution, sea defence) which operates over a wider geographical area. Within the context of these initiatives coastal protection and management will not only involve the need for a continuation of the traditional approach coastal defence, but also :

- recognition of the dynamic nature of coastal habitats and the importance of change in their sustainability;
- a more positive approach to understanding the wider implications of human activities on the coastal environment and the effect these have on the response of the coast to changing environmental conditions;
- acceptance that in areas where the “coastal squeeze” has reduced the ability of the coast to adjust to changes in the natural environment, restoration of the natural coastline will play a significant part in its long term protection.

EXAMPLES OF WESTERN MEDITERRANEAN SEA

Responses against coastal erosion in the Mediterranean region have followed the successive useful tools developed by engineers with a general criteria in the “Hold the line” option because of the high tourist or urban value. Nevertheless, in the last few years new actions on the four other possibilities (Move seaward, Managed realignment, Limited intervention or Do nothing) have acquired more importance with the ICZM application.

Hold the line examples exist in all the EUROSION Mediterranean pilot zones. One of the more impacting is in the Tuscany coast, where a high percentage of the coast is protected with hard coastal defences (groins, sea walls and dikes). In this case, the impact is increased by the white colour of the marble of Carrara which the protections are made (Fig. 1). New actions to eliminate some of the hard defences and built beaches with gravel (also from marble) are under experimentation (Fig. 2).



Figures 1 and 2. Tuscany coastal protection (groins and dykes) made with marble blocs and gravel.

The other western Mediterranean sites, are in urban or tourist areas of high value, Sitges (Spain) and Giardini-Naxos (Sicily), where problems in beach stability or erosion have led to install groins and dikes, and following that to renourish with sand. In the first example, Coastal authority from the Spanish Ministerio de Medio Ambiente has proposed a project to reshape the beach and the Boulevard with coastal dynamics criteria. Social response did stop that project because the loose of part of the boulevard (Fig. 3), used to recover the stable beach profile. The only action done till now and after a high stormy winter (2001/2002) has been light nourishment works with sand dredged (40,000 m³) at the entrance of the Marina north of Sitges (Port Ginesta). In the Giardini-Naxos Bay, the low stability of the beach sand has led to built groins and dikes with poor results (Fig. 4). More than a half of the bay beach has disappeared and studies to renourish the beach are under way.



Figures 3 and 4. Sitges beach and Boulevard (left), projected to be modified to obtain a better stability of the coast. Giardini-Naxos Bay (right) showing the loss of sand on the northern protected side.

If we take into account the whole western Mediterranean bassin, clearly the “Hold the line” option begins to be less applied, with other options such as realignment, limited intervention or do nothing taking its place. The more representative examples can be seen in deltaic coasts, where coasts are highly vulnerable. One recent example is in the Ebro delta where all the parts – local, regional and state authorities and stakeholders – agreed in realignment at the northern hemidelta (Marquesa beach).