

L'érosion des plages

Roland Paskoff

Depuis de nombreuses années, la S.E.P.N.B. défend l'idée que si l'on veut protéger le littoral, il faut avant tout y maîtriser circulations et occupations humaines plutôt que de réaliser à grands frais des ouvrages de protection, le plus souvent aussi coûteux qu'inefficaces. L'article de Roland Paskoff explique simplement, mais avec rigueur, le bien-fondé de cette attitude aujourd'hui largement adoptée par les spécialistes. Chacun y trouvera les arguments pour tenter de convaincre lors des actions que nous menons régulièrement aux quatre coins de la Bretagne. L'homme ne peut semble-t-il accepter qu'une nature indocile lui signifie les limites de sa puissance technologique. Cet orgueil nous coûte très cher. Ainsi allons-nous bientôt voir disparaître une partie du malgre budget du ministère chargé de l'environnement dans les sables du Mont Saint-Michel... en pure perte.

Pen ar Bed remercie Roland Paskoff et la rédaction de La Recherche pour l'aimable autorisation de reproduction de cet article.

M.J.

Il n'y a pas que la pollution qui menace les plages. Problème plus grave encore, jusqu'à présent mal perçu par le grand public, leur existence même est aujourd'hui en question. En France, presque partout, de la mer du Nord à la Méditerranée, les plages sont rongées par les vagues. Elles perdent leurs sables et leurs galets, et elles reculent inexorablement. Des constructions endommagées par les lames de tempête témoignent de cette avancée de la mer. Des stations balnéaires voient leur plage disparaître et, avec elle, leur raison d'exister. Un capital touristique d'une valeur inestimable est en train de se perdre. Même situation critique en Italie où, aussi bien sur la Riviera que sur le rivage d'Emilie-Romagne, la lutte pour la défense des plages est menée avec de grands moyens. Aux Etats-Unis, un groupe de géographes et de géologues, spécialistes de l'évolution des côtes, vient de faire une démarche publique auprès du président Reagan pour informer l'opinion sur la nécessité de mettre en œuvre sans tarder une politique nouvelle d'aménagement et

de protection des plages afin d'essayer de les sauvegarder. L'érosion contemporaine des littoraux meubles constitue un phénomène général à l'échelle de la planète. Quelles en sont les causes ? Peut-on véritablement la juguler ? Des recherches récentes permettent d'apporter des éléments de réponse à ces questions.

Les sédiments déplacés au gré des vagues et des vents

Les plages correspondent à des rivages où la mer dépose des sédiments qui sont plus grossiers que les constituants de la vase. Il s'agit de sables fins à grossiers (0,2 à 2 mm), de granules et de graviers (2 mm à 2 cm), de galets (2 à 20 cm) voire de blocs (plus de 20 cm). Ces matériaux sont mobiles : d'une part, perpendiculairement au trait de côte en raison de leur déplacement par les vagues, mais aussi parallèlement à lui à cause de la dérive littorale. En effet, en dépit de leur réfrac-



Photo J.P. Mathelier

Figure 1. Dans le monde entier, les plages rongées par les vagues perdent leurs sables et leurs galets. En baie d'Audierne, le recul a été spectaculaire. Si l'origine du phénomène a des causes naturelles, la fragilisation des dunes bordières entraînée par certaines interventions humaines en a nettement aggravé les effets.

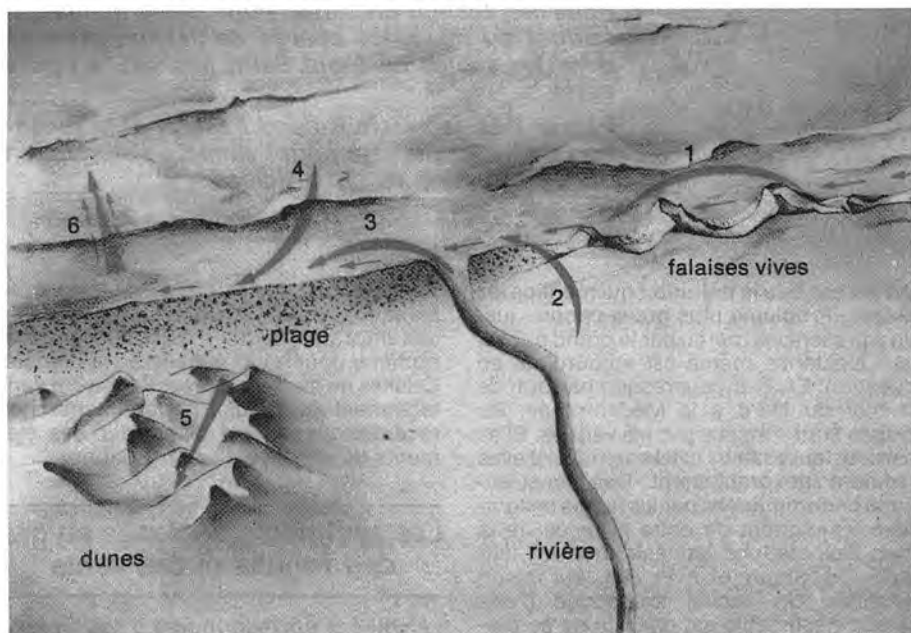


Figure 2. Les sables et les galets qui constituent les plages sont apportés par les vagues et la dérive littorale. Ces matériaux ont des origines diverses : certains viennent de falaises (1) qui reculent sous l'effet de l'érosion marine ; d'autres sont apportés par les vents (2) qui soufflent du continent et par les cours d'eau (3) ; d'autres, enfin, sont fournis par l'avant-côte (4) à partir de laquelle ils sont pris en charge par les vagues. Les apports les plus importants sont dus aux cours d'eau.

Des sédiments peuvent s'échapper définitivement des plages. Les vents qui soufflent du large sont capables de prélever des sables sur les estrans et de les accumuler en champs de dunes (5) qui s'avancent vers l'intérieur des terres. Il arrive aussi que des courants perpendiculaires au rivage, appelés courants sagittaux (6), évacuent des matériaux bien au-delà de la zone de déferlement des vagues et les déposent à une profondeur telle qu'ils ne peuvent plus revenir vers les plages.

tion à l'approche de la côte, les vagues arrivent le plus souvent au rivage avec une certaine obliquité, ce qui donne naissance, dans la zone du déferlement, à un courant parallèle au rivage ; c'est ce courant qui est appelé dérive littorale.

Les sédiments qui constituent les plages ont des origines diverses. Certains viennent du domaine marin mais ce ne sont pas les plus abondants (fig. 2). L'érosion côtière ne fournit en général que peu de débris sauf là où de hautes falaises, taillées dans des roches tendres, reculent rapidement. De l'avant-côte arrivent surtout des éléments biodétritiques, en particulier dans les mers chaudes favorables à la vie : ce sont des fragments de mollusques, d'oursins et d'algues calcaires. Mais, le gros des matériaux rencontrés sur les plages est d'origine continentale et, à cet égard, les apports des cours d'eau sont les plus substantiels. Leur volume varie avec les domaines climatiques. Là où la torréalité est forte, la charge est considérable : c'est le cas des rivières méditerranéennes et aussi de celles de l'Asie des moussons. Par contre, le débit solide livré à la mer dans les régions humides, tempérées et équatoriales, est relativement faible car le couvert forestier freine l'érosion. Les côtes des régions arides sont aussi mal alimentées. Cependant, dans ce cas, les vents peuvent prendre le relais lorsque, soufflant de la terre, ils apportent avec eux des particules fines qu'ils jettent dans l'eau. Il faut aussi ajouter que, dans certaines régions polaires, des glaciers poussent leurs moraines jusque dans la mer et que, sur les côtes où le volcanisme est actif, des chutes de cendres peuvent alimenter directement les plages.

Mais le matériel ainsi livré au domaine littoral peut s'en échapper, au moins en partie. Des vents venant du large soulèvent des sables sur l'espace compris entre les plus hautes et les plus basses mers, appelé encore estran, et les mettent en mouvement. Si ces sables s'accumulent juste en arrière de la plage, par suite de l'obstacle que constitue la végétation, ils s'édifient une dune bordière qui reste associée à la plage : les vagues de tempête sont capables de l'atteindre et d'y prélever du matériel pour le ramener sur l'avant-plage. Il arrive aussi que les sables soient exportés au-delà de la bande littorale proprement dite : de grandes dunes se constituent alors qui envahissent les terres. Le domaine côtier perd ainsi définitivement des sédiments. Il en va de même lorsque des

courants littoraux, perpendiculaires au rivage et orientés vers le large, évacuent des sables et parfois des galets, au-delà de la zone du déferlement, jusqu'à des profondeurs telles qu'ils ne peuvent plus être ramenés à la côte par les vagues.

Les plages présentent généralement un profil transversal plus ou moins régulièrement concave. Ce profil est le résultat d'un ajustement, d'une part aux caractéristiques des vagues et de la dérive littorale, d'autre part au volume des sédiments et à leur calibre. Il est perpétuellement mobile car il doit se modifier pour s'adapter aux conditions hydrodynamiques sans cesse changeantes. Suivant les circonstances, une plage peut perdre plus de sédiments qu'elle n'en reçoit et elle démaigrît, ou en recevoir plus qu'elle n'en perd et elle engraisse. Dans le premier cas, le profil s'abaisse ; dans le second, il se relève. Ainsi, à nos latitudes, entre octobre et mars, les littoraux meubles perdent des sables et des galets, au point de laisser parfois apparaître le substratum rocheux. Lors des grandes tempêtes de l'hiver, les vagues, hautes et cambrées, sont destructives. Elles prélèvent du matériel sur l'estran et même dans la dune bordière, pour le transférer sur l'avant-plage où il s'accumule sous la forme de barres immergées. Ces barres sont autant d'obstacles qui forcent les lames les plus hautes à déferler plus tôt à l'approche de la côte, donc à distance de la plage qui est ainsi préservée d'une plus grande érosion (fig. 3).

Pendant la belle saison, les vagues, plus faibles et moins cambrées, sont au contraire constructives. Les matériaux migrent de l'avant-plage vers la plage. Les barres immergées tendent à s'effacer tandis que le profil de l'estran se relève et que la dune bordière se reconstitue. Un nouvel équilibre provisoire est bientôt retrouvé. Si le démaigrissement de l'hiver est compensé par l'engraissement de l'été, la plage est stable.

Les plages vont-elles disparaître ?

A l'heure actuelle, la grande majorité des plages a tendance à démaigrir et à reculer. C'est ce qu'a clairement montré une enquête menée entre 1972 et 1976 dans le cadre d'un groupe de travail organisé sous l'égide de l'Union géographique internationale et animé

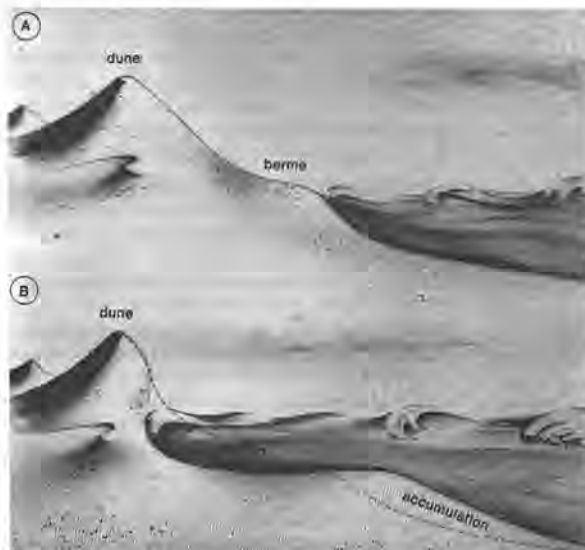


Figure 3. Le profil transversal d'une plage varie au cours de l'année. En hiver (B), les plages des latitudes tempérées, affectées par des vagues de tempête, démaigrissent. Leur profil s'abaisse parce qu'elles perdent des matériaux qui s'accumulent sur l'avant-plage sous la forme de barres immergées. En été (A), les vagues, moins fortes, font migrer les sédiments de l'avant-plage vers la plage dont le profil se relève. Les barres immergées s'effacent et un gradin ou berm apparaît sur la plage qui engraisse.

par E.C.F. Bird¹. Les littoraux meubles, sableux ou graveleux, en cours de progression constituent des exceptions : ce sont des flèches à pointe libre qui continuent à s'allonger, des espaces deltaïques qui gagnent sur la mer, des plages bien alimentées en sédiments pour des raisons locales (proximité de hautes falaises à recul rapide ; apports de débâcles glacio-volcaniques).

La règle générale, c'est la régression des plages. Des exemples significatifs d'une telle situation ne manquent pas en France. De nombreuses plages de Normandie et du Cotentin démaigrissent. En Bretagne, le rivage sud de la baie d'Audierne est affecté par un recul qui, dans la commune de Treguennec, a été de l'ordre de 150 m entre 1952 et 1969. Sur la côte des Landes, la vitesse moyenne de retrait est estimée de 1 à 3 m/an suivant les endroits. On a mesuré 700 à 800 m de recul de la baisse de basse mer à Capbreton entre 1881 et 1922, et des reculs de plus de 10 m/an à Seignosse². Sur les bords de la mer Méditerranée, les secteurs de croissance des rivages de la Camargue sont localisés (fig. 4) : ce sont, d'est en ouest, la pointe de La Gracieuse, l'embouchure du Grand Rhône, la pointe de Beauduc et celle de l'Espiguette. Partout ailleurs, le littoral se replie. En plusieurs endroits l'érosion est active, et la menace sur les aménagements réelle, en particulier à

Faraman et aux Saintes-Maries-de-la-Mer où des taux de retrait de 1,5 à 4 m/an ont été mesurés. Un risque sérieux de disparition pèse sur l'existence de certaines plages de la côte du Var et le Syndicat des communes du littoral de ce département a publié en 1981 une plaquette pour attirer l'attention sur la gravité du problème.

En Italie, beaucoup de plages, dont le bilan sédimentaire était encore excédentaire jusqu'au début du XX^e siècle, manquent maintenant de matériaux. C'est en particulier le cas de celles d'Emilie-Romagne et de celles du golfe de Tarente où des vitesses de récession allant jusqu'à 4 m/an ont été enregistrées depuis 1950. Sur les côtes du Danemark, l'érosion l'emporte sur l'accumulation. Le fait est particulièrement frappant le long du rivage occidental du Jutland du Nord où des dunes sont attaquées en falaises. En Amérique moyenne, du Mexique à la Colombie et au Venezuela, 10 % seulement des plages sont en cours d'engraissement ; 10 à 20 % sont stables : tout le reste perd de sa substance.

Les cas les plus démonstratifs du démaigrissement contemporain des plages sont fournis par de longs littoraux bas, souvent précédés par des crêtes sableuses d'avant-côte émergées et tronçonnées en îles-barrière qui isolent des lagunes du côté de la terre. Ce type de rivage se rencontre dans le sud-est des Etats-Unis, en Afrique, de la Côte-d'Ivoire au Nigéria, mais aussi en Angola et au Natal, sur la façade occidentale de la péninsule malaise, dans le sud-est de l'Australie. Sur toutes ces côtes, d'énormes volumes de sédiments

¹ E.C.F. Bird, in *Coastal dynamics and scientific sites*, E.C.F. Bird et K. Koike (eds.), Komazawa University, Tokyo, 5, 1981.

² IV^e Centenaire du détournement de l'Adour (1578-1978), Soc. Sc. Lettres et Arts de Bayonne, vol. Spécial, 1979.

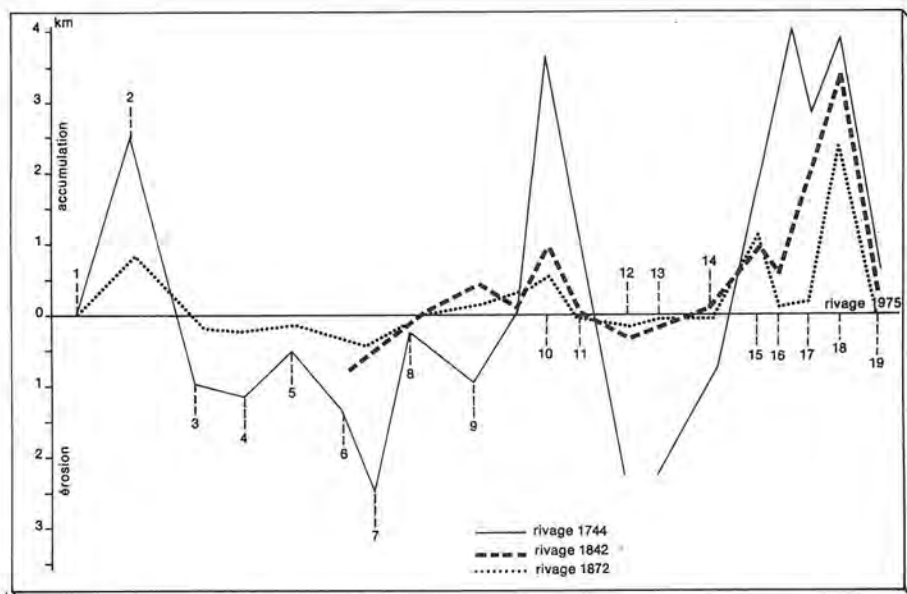


Figure 4. Le littoral de la Camargue a considérablement évolué au cours des deux derniers siècles, comme le montre cette figure où la base des abscisses représente l'état du rivage en 1975. Le tracé de la côte en 1744 est connu par la carte de Cassini, celui de 1842 et celui de 1872, par des cartes du service hydrographique et océanographique de la Marine. En ordonnées + et - figurent les aires gagnées par sédimentation ou perdues par érosion en liaison avec des modifications des bras du Rhône dans son delta et une diminution de la charge solide du fleuve par suite des aménagements dont il a fait l'objet depuis le XIX^e siècle. 1: Grau-du-Roi; 2: Espiguette; 3: Rhône Vif; 4: Épave, Petite Camargue; 5: Grand-Radeau, Petite Camargue; 6 - 7: Petit Rhône-Grau-d'Orgon; 8: Saintes-Maries-de-la-Mer; 9: Galabert; 10: Pointe de Beauduc; 11: Grau-de-la-Dent; 13: Faraman; 14: Piémansan; 15: Grand-Rhône; 16: Napoléon; 17: Balancelle; 18: La Gracieuse; 19: Bégoulier, (d'après J.J. Blanc, *Recherches de sédimentologie appliquée au littoral du delta du Rhône, de Fos au Grau-du-Roi*, CNEXO, 1977).



Figure 5. Le schéma montre l'évolution classique d'une plage au cours des derniers millénaires. Une série de crêtes dunifiées, accolées les unes aux autres, a été édifiée pendant une première époque caractérisée par une fourniture abondante en sables et en galets qui permettait une progression du rivage. Par la suite, la tendance s'est inversée, conséquence d'une diminution de l'alimentation en sédiments et d'une élévation du niveau de la mer. Les crêtes représentées en pointillés ont été érodées et les matériaux enlevés par les vagues transférés sur l'avant-plage (d'après E.C.F. Bird, in *Coastal dynamics and scientific sites*, E.C.F. Bird et K. Koike (eds.), Komazawa University, Tokyo, 5, 1981).

meubles ont été déposés pendant les trois ou quatre millénaires qui ont suivi la fin de la transgression postglaciaire. Des systèmes dunaires étendus témoignent de ces grandes accumulations

ainsi que, preuve irréfutable d'une accrétion continue, la présence de crêtes de plage accolées les unes aux autres (fig. 5). Dans l'île Saint-Vincent, en Floride, sur les bords du golfe du

Mexique, on a dénombré une centaine de crêtes de plage qui se sont formées au cours d'une période commencée il y a environ 4000 ans : quelque 2 km² de terres étaient gagnés chaque siècle en cette période d'abondance en sable. Depuis environ 300 ans la croissance est stoppée, fait qui témoigne d'une diminution de l'alimentation en matériaux. Non loin de là, à Dog Island, la crise érosive a débuté puisque l'on note un recul du rivage de l'ordre de 1 m/an. Plus à l'ouest, au Texas, dans la péninsule de Matagorda, la récession a commencé plus tôt, il y a près de 1500 ans, avec une vitesse moyenne de 1,3 m/an qui s'est accélérée légèrement (1,9 m/an) depuis le milieu du XIX^e siècle. En Afrique, sur la côte du Nigéria, entre la frontière avec le Bénin et Lagos, le recul apparaît généralisé et rapide : sa vitesse varie, suivant les endroits, de 4 à 7 m/an³.

Comment expliquer cette période de crise que connaissent actuellement les plages (fig. 6) ? Parce que l'érosion ne s'est pas déclenchée partout au même moment, parce qu'elle affecte aussi bien des littoraux peu humanisés que des rivages peuplés et aménagés, parce que les vitesses de démaigrissement ne sont pas identiques, on doit penser à la fois à des causes naturelles et à des causes induites par l'intervention humaine.

³ A. Guilcher, *Norais* 100, 551, 1978.

Une stabilité menacée par des causes naturelles

Les plages représentant une forme littorale d'accumulation, leur érosion actuelle implique une modification de leur budget sédimentaire. De positif, il est devenu négatif. C'est cette inversion de tendance qu'il faut essayer de comprendre. L'attention des chercheurs a d'abord été retenue par la disproportion criante qui existe entre les gigantesques quantités de matériaux meubles déposés sur certains littoraux et les volumes modestes de sédiments apportés à la mer par les principaux fournisseurs que sont les fleuves. Le fait est particulièrement flagrant dans les régions tropicales humides où existent souvent de grandes plages de sable alors que les rivières, dans les conditions actuelles, apportent seulement des limons et des argiles, à l'origine de vasières dans les parties abritées de la côte. On a ainsi été amené à considérer que les matériaux accumulés sur les plages constituaient avant tout un héritage dont on s'est efforcé de retracer les vicissitudes à la lumière de l'évolution des littoraux depuis 15 000 ans.

Au cours de la dernière grande glaciation du globe, qui a duré environ 70 000 ans et dont le maximum de refroidissement se place vers 18 000 ans avant le



Photo B. Hallegouet

Figure 6. Construit sur la dune pendant la dernière guerre, ce blockhaus se retrouve aujourd'hui loin sur la grève de la baie d'Audierne : il n'a pas bougé, c'est la dune qui a reculé.

présent, le niveau marin se situait autour de -100 m par rapport à sa position actuelle, à la suite d'un prélèvement d'eau dans les océans et les mers, et de son stockage sous forme de glace sur les continents, tout spécialement dans le nord de l'Amérique et en Scandinavie. Ce que nous appelons la plate-forme continentale, c'est-à-dire le bord immergé des continents, était alors émergée et sur elle s'accumulaient des sédiments apportés par les agents de dénudation du relief — l'eau, la glace, le vent — dont les actions érosives étaient exacerbées par la crise climatique.

La fonte des grandes calottes glaciaires continentales, les inlandsis, qui s'amorce vers 15 000 ans avant le présent fait remonter le niveau de la mer (fig. 7). Celle-ci submerge progressivement la plate-forme continentale et repousse devant elle, au fur et à mesure qu'elle s'élève, les matériaux détritiques — fluviatiles, glaciaires et éoliens — qui s'y étaient déposés pendant la régression⁴. Ces sédiments, aisément mobilisables cessent d'être déplacés lorsque, il y a 5 ou 6000 ans, le climat ayant achevé de se réchauffer, le niveau de la mer se stabilise, tout en continuant à osciller légèrement, dans sa position actuelle. Sables et galets s'entassent alors sur certains rivages. De vastes plages se forment, de grands champs de dunes se construisent⁵. Cette période d'abondance dure jusqu'à ce que la réserve sous-marine de sédiments soit tarie et que l'équilibre littoral soit réalisé, ce qui peut demander un temps plus ou moins long suivant les endroits. Commence ensuite, et elle dure encore, ce que l'on peut appeler, par comparaison, une époque de restriction en matériaux puisque les apports se limitent désormais aux seuls produits directs de l'érosion continentale et marine. C'est là une situation précaire. Si d'autres facteurs naturels générateurs de déséquilibre interviennent, on conçoit qu'une évolution régressive puisse alors affecter les plages.

Dans cet ordre d'idées, il est important de noter que le niveau de la mer est actuellement en train de s'élever lentement⁶. Le dépouillement des enregistrements de quelque deux cents marégraphes installés un peu partout sur le globe montre que, depuis environ un

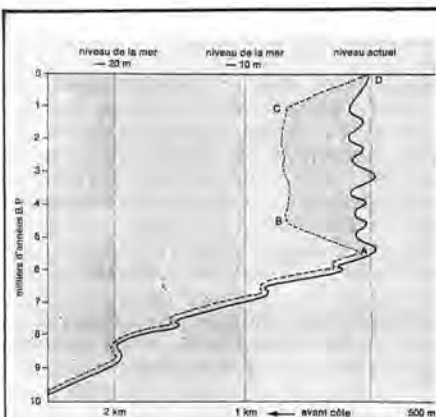


Figure 7. Nous essayons ici d'interpréter les variations verticales et horizontales du trait de côte pendant les dix derniers millénaires.

La courbe en trait plein représente schématiquement les variations du niveau de la mer au cours de ce laps de temps. La transgression provoquée par la fonte des grands inlandsis canadien et scandinave a commencé vers 15 000 ans avant le présent et s'est terminée il y a 5 ou 6000 ans. Le niveau de la mer s'est ensuite stabilisé, tout en oscillant autour de sa position actuelle.

La courbe en trait interrompu montre la position du tracé du rivage qui, jusqu'à la culmination de ce dernier a déterminé sur les côtes une phase d'accumulation (AB) de sédiments. Ceux-ci avaient été déposés par les agents d'érosion sur la plate-forme continentale émergée pendant la régression glaciaire, puis balayés par la transgression postglaciaire. C'est alors que se forment de grandes plages. Une fois épuisée cette réserve de matériaux, commence une période de stabilité (BC) des plages, désormais parcimonieusement alimentées, à laquelle succède une époque de récession (CD) qui continue jusqu'à aujourd'hui. En réalité, le recul des littoraux meubles n'a pas commencé partout au même moment mais il est actuellement général, sauf exceptions localisées. Il s'explique à la fois par des causes naturelles (élévation du niveau de la mer, peut-être aussi accroissement de l'énergie des vagues) et humaines (aménagements côtiers mal conçus, générateurs de déséquilibre).

(d'après E.C.F. Bird et R. Paskoff, in *Proceeding of the 1978 International Symposium on Coastal Evolution in the Quaternary*, São Paulo, Brésil, K. Suguio et al. (eds), (São Paulo, 29, 1979).

⁴ R.J. Russell, *Geogr. Annaler*, 49A, 299, 1967.

⁵ W.F. Tanner et F. Stapor, *International Geography*, 2, 1020, 1972.

⁶ V. Gornitz et al., *Science*, 215, 1611, 1982.

siècle, se produit une légère submersion des côtes, de l'ordre de 1,2 à 1,5 mm/an. Ce mouvement transgressif semble devoir être mis en rapport avec les signes d'instabilité que donne présentement la calotte glaciaire de l'Antarctique occidental, par suite d'un réchauffement des températures de la basse atmosphère. Ce dernier phénomène est expliqué par l'augmentation contemporaine de la teneur en CO_2 de l'air, consécutive à l'utilisation croissante par l'Homme de combustibles fossiles. Cette élévation actuelle du niveau de la mer, vu sa faible vitesse, n'est sensible que sur les côtes relativement stables. Elle n'apparaît pas sur les littoraux en voie de soulèvement rapide, comme sur ceux du Canada et de la Scandinavie où le rajustement isostatique déclenché par la fonte des inlandsis, à la fin de la dernière époque glaciaire, n'est pas encore terminé. Par contre, elle est accentuée là où les rivages marins ont tendance à s'affaisser comme c'est le cas, également pour des raisons isostatiques, sur la façade orientale des États-Unis ou sur la façade atlantique de l'Europe occidentale.

Or, il a été constaté qu'une élévation du niveau de la mer déclenche un démaigrissement et un recul sur une plage en état d'équilibre. Le profil transversal de la plage migre parallèlement à lui-même vers la terre par érosion de la partie haute de l'estran. Le matériel ainsi enlevé s'accumule sur l'avant-plage de telle sorte que l'épaisseur de la tranche d'eau littorale reste constante (fig. 8). Il semble bien que, dès le début des années cinquante, des chercheurs soviétiques travaillant sous la direction de V.P. Zenkovich avaient mis en évidence le phénomène. Mais, celui-ci est

connu, dans les pays occidentaux, sous la dénomination de principe de Bruun⁷, du nom du scientifique qui, en 1962, l'a pour la première fois clairement énoncé. Ce principe a été vérifié en laboratoire sur modèle réduit⁸ et sur le terrain. Par exemple, sur les plages de la baie de Chesapeake, en Virginie, où le niveau de la mer s'élève en moyenne de 2 mm/an, on a noté que le recul moyen observé du littoral (0,94 m/an) est seulement inférieur de 3 % au recul calculé (0,98 m/an) en se fondant sur le principe de Bruun⁹.

Un accroissement de la fréquence et de la force des tempêtes a été aussi invoqué pour rendre compte de l'érosion contemporaine des plages¹⁰. Comme les conditions climatiques de la planète changent (*la Recherche*, n° 128, p. 1354, décembre 1981), il est permis de penser que des modifications dans la circulation atmosphérique générale, donc dans le régime des vents, ont des effets sur les conditions hydrodynamiques des rivages marins. Par exemple, le traitement des observations que l'on possède sur les caractéristiques des vagues dans les océans et les mers, indique pour la période 1880-1960 une augmentation de leur hauteur, donc de leur énergie. On a vu que ce sont les époques de mauvais temps qui sont destructives pour les littoraux meubles. On conçoit donc qu'une répétition rapprochée des ondes de tempête à nos latitudes, des typhons ou des hurricanes aux latitudes

⁷ P. Bruun, *J. Waterways and Harbors Div.*, 88, 117, 1962.

⁸ M.L. Schwartz, *Journ. Geol.*, 75, 76, 1967.

⁹ P.S. Rosen, *Marine Geol.*, 26, 7, 1978.

¹⁰ J.L. Davies, *Australian Journ. Science*, 20, 105, 1957.



Figure 8. Sur une plage en état d'équilibre (trait plein), toute élévation du niveau de la mer détermine une modification du profil transversal (trait interrompu) qui migre parallèlement à lui-même vers l'intérieur des terres, par érosion. Le matériel enlevé à la plage s'accumule sur l'avant-plage dont le relèvement est égal à l'élévation du niveau de la mer. Ainsi l'épaisseur de la tranche d'eau sur l'avant-plage ne varie pas. C'est le principe de Bruun établi il y a une vingtaine d'années et aujourd'hui accepté sans réserve.

tropicales, accompagnée d'un raccourcissement de la belle saison favorable à l'effacement des effets des lames déchaînées, ait pour conséquence une érosion et un recul des plages. Mais, les données chiffrées disponibles à cet égard sont encore insuffisantes pour vérifier que la période actuelle correspond réellement à une phase de plus grande agressivité des vagues sur les rivages meubles.

Nette diminution de la quantité de sables et de galets mobilisables sur les côtes, lente élévation du niveau de la mer, accroissement possible du pouvoir destructeur des vagues, autant de causes qui, prises séparément, sont sans doute insuffisantes pour expliquer l'érosion généralisée dont souffrent actuellement les plages. Mais, ensemble, elles créent à tout le moins une conjoncture défavorable qui met sérieusement en danger leur stabilité; elles introduisent des éléments de déséquilibre qui ouvrent la voie à une évolution régressive. A une époque où l'emprise de l'Homme s'est considérablement accentuée sur les rivages marins, les aménagements ajoutent souvent des effets perturbateurs qui accélèrent la récession des plages.

Les travaux réalisés un peu partout dans le monde sur les fleuves ont réduit leur rôle de pourvoyeurs des côtes en matériaux solides, donc aggravé le déficit sédimentaire dont souffrent les littoraux. A cet égard, les barrages représentent des pièges à sédiments très efficaces. On les a multipliés, au cours des dernières décennies, dans les régions de la Terre à tendance sèche, pour étendre les superficies cultivées et accroître les rendements grâce à l'irrigation. Il se trouve que ce sont justement les fleuves de ces régions qui transportent une charge solide importante jusqu'à la mer parce que, pour des raisons climatiques, l'érosion est active dans leur bassin-versant. Le colmatage rapide des barrages en donne la preuve. Ainsi, le barrage, inauguré en 1954, sur l'oued Mellègue, affluent de la Medjerda, en Tunisie du Nord, avait arrêté après 21 ans de fonctionnement quelques 48 millions de m³ de sables et de galets, soit le cinquième environ de sa capacité de retenue en eau. Ce sont autant de matériaux dont les plages du golfe de Tunis ont été privées.

Les aménagements et les équipements du Rhône et de ses affluents ont fait pas-

ser la charge en alluvions livrées à la mer par le fleuve d'environ 40 millions de tonnes au XIX^e siècle à 12 millions de tonnes dans les années soixante et à 4 ou 5 millions de tonnes actuellement. Dans de telles conditions, on comprend sans peine l'érosion des plages de la Camargue dont l'alimentation en sédiments a été ainsi drastiquement réduite.

Le barrage d'Assouan, responsable de la retraite du delta du Nil

C'est la côte du delta du Nil qui donne le meilleur exemple du recul généralisé d'un littoral à la suite de grands travaux qui ont profondément modifié le régime hydrologique ainsi que la capacité de transport du fleuve¹¹. Depuis l'achèvement du grand barrage d'Assouan, le front du delta, long de 245 km, bat en retraite partout, alors qu'il n'avait cessé de progresser dans l'ensemble jusqu'au XIX^e siècle.

La tentation était grande, à une époque d'augmentation vertigineuse des besoins en sables et en graviers pour la construction (béton) et les grands travaux (remblais), de recourir non seulement aux réserves des lits des cours d'eau mais aussi à celles, facilement accessibles, du domaine côtier. Ainsi, s'est accélérée, surtout depuis le début de ce siècle, un peu partout dans le monde, une exploitation désordonnée, souvent sauvage et effrénée, des matériaux meubles des dunes, des plages et même des avant-plages. Or, ce sont là les trois éléments indissociables d'un même ensemble. Toucher à l'un a nécessairement des répercussions sur les deux autres. Et, en période de pénurie en sédiments sur les littoraux, l'extraction de matériaux ne peut qu'aggraver le déficit du budget sédimentaire des plages, donc accélérer leur démaigrissement et leur recul.

Les herbiers qui se développent dans l'étage infralittoral jouent un rôle important dans l'équilibre des rivages meubles. Par exemple, sur les côtes méditerranéennes, les prairies sous-marines à Posidonies constituent un lacs à mailles serrées de feuilles rubanées, de rhizomes et de racines qui piège les matériaux déplacés par les courants

¹¹ G. Orlova et V. Zenkovich, *Geoforum*, 18, 68, 1974.

côtiers et les fixe¹². Les plantes croissent verticalement au fur et à mesure des progrès de l'ensablement. Ainsi se forment des « matras » qui, non seulement surélèvent les fonds, mais aussi freinent l'énergie des vagues en jouant un rôle de brise-lames naturels. Or, ces prairies à Posidonies sont sensibles au rejet en mer, à proximité du rivage, de matériaux solides et surtout de polluants chimiques. Elles régressent alors rapidement et leur rôle protecteur disparaît. On l'a constaté sur des plages du Var dont le démaigrissement a suivi la dégradation de l'herbier sous-marin, suite à la contamination des eaux littorales. Toujours à propos des Posidonies, leurs feuilles mortes, poussées par les vagues, s'amoncellent sur les estrans qu'elles mettent à l'abri de l'impact direct du déferlement. Peu appréciées des touristes, ces accumulations végétales sont systématiquement enlevées sur les plages des stations balnéaires qui sont ainsi privées d'une protection naturelle.

Des pompes exagérées d'eau phréatique dans le domaine littoral pour des besoins domestiques et industriels sont à l'origine d'affaissements de la topographie dont les effets sur un rivage sont les mêmes que ceux, déjà décrits, d'un relèvement du niveau de la mer. A Venise, où la submersion mesurée depuis 1908 est de 22 cm, on estime que la part de l'exploitation de l'eau souterraine est de l'ordre de 10 cm. A Ravenne, à l'extraction de l'eau s'ajoute celle du gaz pour expliquer, concurremment avec des phénomènes naturels de subsidence, un affaissement très marqué de la surface du sol, de l'ordre de 3,67 cm/an depuis 1950¹³.

Des travaux portuaires, sur une côte affectée par une dérive littorale prédominante et chargée en sédiments, risquent de perturber gravement le transit des matériaux et de modifier de façon appréciable l'évolution du rivage. Des atterrissements se forment contre les jetées qui arrêtent le courant côtier tandis que les secteurs situés à l'aval, par rapport à ce courant, démaigrissent et reculent car ils sont privés d'apports sédimentaires. Les brise-lames ont des effets comparables à ceux des jetées. En créant une zone de calme entre eux et le

trait de côte, ils freinent la dérive littorale qui dépose sa charge ; au-delà, l'arrêt de l'alimentation en sables et en galets déclenche une vague d'érosion.

Trop d'aménagements ont inconsidérément empiété sur le domaine strictement côtier. Des villas, des immeubles, des promenades en front de mer ont été construits en bordure même du rivage, sur l'emplacement de la dune bordière, voire sur le haut de plage. Or, une plage ainsi amputée, voit l'équilibre de son profil rompu. On a déjà insisté sur la solidarité qui unit les divers éléments qui la composent. En particulier, la dune bordière est une pièce essentielle car elle constitue à la fois une réserve en sable et un pare-chocs lorsque déferlent les vagues de tempête. D'autre part, en réduisant la largeur de l'estran, on diminue son pouvoir de dissipation de l'énergie des vagues. Aussi faut-il bientôt protéger de l'attaque de la mer les constructions imprudemment implantées trop près du trait de côte (fig. 9). Pour essayer de les mettre à l'abri, on élève des murs dont l'effet de réflexion renforce la turbulence des vagues, donc favorise l'enlèvement du sable sur le bas de la plage. Le résultat final est souvent la disparition complète de la plage.

Naturalistes contre ingénieurs

Depuis longtemps les ingénieurs ont proposé la mise en place d'ouvrages de défense pour protéger les côtes sableuses attaquées par l'érosion (fig. 10)¹⁴. Ils recommandent parfois de construire des épis qui sont des ouvrages en bois, en pierre ou en béton, disposés plus ou moins perpendiculairement au rivage. Les épis représentent des obstacles pour la dérive littorale qui se trouve freinée, déviée et contrainte à déposer une partie de sa charge. Leur rôle est donc de piéger des sédiments en transit. Pour surélever et élargir une plage en cours de démaigrissement, il est nécessaire d'aménager une série d'épis échelonnés. Si leur conception a été soigneusement étudiée et si leur entretien est régulièrement assuré, les épis peuvent donner, au moins localement, dans le cas où le transfert sédimentaire littoral est suffisamment abondant, des résultats satisfaisants. Ils

¹² J. Blanc et A. Jeudy de Grissac. *Recherches de géologie sédimentaire sur les herbiers à Posidonies du littoral de la Provence*, CNEXO, 1978.

¹³ L. Carbognin et al., in *Proceedings Eng. Found. Conf. on evaluation and prediction of subsidence*, 254, 1978.

¹⁴ A. de Rouville, *Travaux*, 265, 575, 1956.

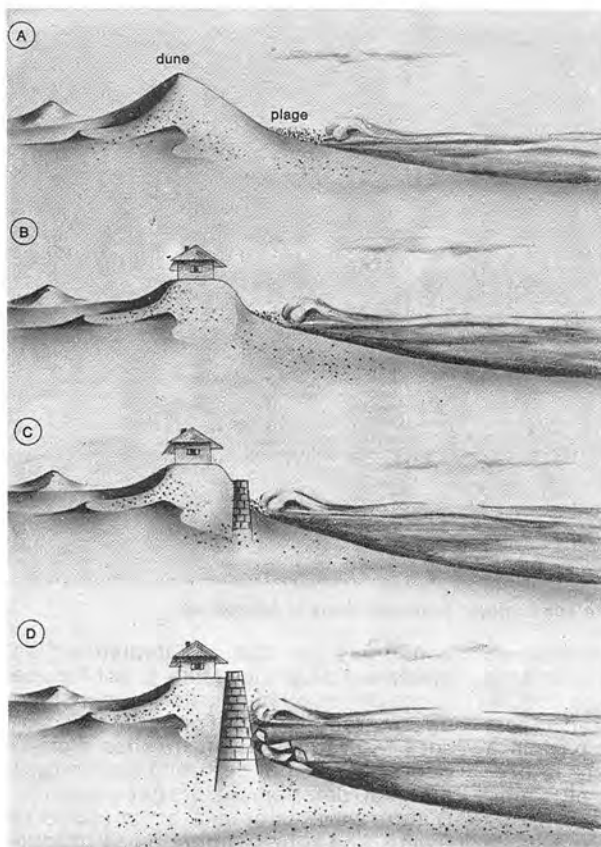


Figure 9. La séquence montre les effets dommageables, pour la conservation d'une plage, d'une construction en bordure du rivage. Au départ existent une plage et une dune bordière en état d'équilibre dynamique (A). On édifie une maison sur la dune bordière pour être à proximité même de la plage (B). Le sort naturel d'une dune bordière est d'être érodée lors des tempêtes et progressivement restaurée pendant les périodes de beau temps. Pour mettre la maison à l'abri de l'action destructive des vagues, un mur de protection est érigé. Il a pour effet, d'une part d'interdire tout échange de matériaux entre la dune et la plage, d'autre part de renforcer la turbulence de l'eau déferlante, donc son pouvoir de dispersion des sédiments. Il s'ensuit un démaigrissement et un recul de la place (C). Le mur de protection étant bientôt soumis à l'impact direct des vagues, il faut le renforcer tandis que la plage finit par disparaître (D).

Photo M. Le Pennec.



Figure 10a. Protéger les constructions imprudemment implantées très près du trait de côte.



Photo M. Le Pennec.

Figure 10b. Route sur la dune bordière dans le Morbihan.

stabilisent les plages qui prennent un aspect segmenté en compartiments arqués. Mais, leur désavantage fondamental est d'aggraver la situation à l'aval du secteur qu'ils réussissent parfois à protéger (fig. 11). Ils déplacent le problème en le rendant souvent plus aigu ailleurs.

Il existe aussi des ouvrages de défense qui sont parallèles à la ligne de rivage. C'est le cas des murs de protection qui sont érigés pour essayer de mettre à l'abri de l'attaque par les vagues des constructions ou des voies de communication, imprudemment implantées trop près de la mer. De fait, lorsqu'ils sont solidement bâtis et bien entretenus, ils assurent correctement le rôle qui leur est assigné et ils prolongent l'existence des édifices menacés. Cependant, ils présentent l'inconvénient majeur d'aggraver le mal qui est à l'origine de leur mise en place. Sur une plage, ils s'opposent aux échanges de sable entre la dune et l'estran, échanges bénéfiques au bon équilibre du système : ils réduisent la largeur de l'estran ce qui a pour effet de concentrer l'énergie du déferlement : enfin, ils augmentent la turbulence de l'eau. Aussi accélèrent-ils l'ablation de la plage.

Les brise-lames sont également des ouvrages longitudinaux par rapport au tracé de la côte, mais, à la différence des murs de protection, ils se situent en avant du rivage. On préfère en général les brise-lames à profil trapézoïdal,

constitués par des accumulations de matériaux de grande taille, gros blocs de roche dense ou pièces de béton du type des tétrapodes. Ils ont pour but de « casser » les vagues avant qu'elles n'atteignent l'estran qui ne subit plus l'impact direct du déferlement lors des tempêtes. D'autre part, ils créent, entre eux et le rivage, une zone d'ombre où se produisent des atterrissements dus au freinage de la dérive littorale. Il y a là un avantage supplémentaire pour la plage que l'on veut protéger, mais, dans le secteur immédiatement adjacent à l'aval, le déséquilibre sédimentaire déclenche ou accentue les phénomènes d'érosion.

Les ouvrages de défense ont été largement utilisés. Ainsi, en France, pour 4471 km de côtes, on compte en moyenne 97 m de longueur d'ouvrage par kilomètre. Cependant, ils font aujourd'hui l'objet de sévères critiques. Ils sont chers et laids et, s'ils peuvent localement ralentir le démaigrissement des plages, ils l'aggravent ailleurs, car ils ne s'attaquent pas à la racine du mal qui est un déficit sédimentaire côtier. D'autre part, en stabilisant le rivage, ils s'opposent à son recul, recul qui est naturel puisque le niveau de la mer est en cours d'élévation. Cette évolution contrariée accroît le déséquilibre, renforce l'érosion et appelle de nouveaux ouvrages de défense. On entre ainsi dans un engrenage sans fin.

Une nouvelle approche du problème paraît nécessaire. Les plages, en effet,

ont été considérées jusqu'ici comme des positions à défendre coûte que coûte par la mise en place d'ouvrages relevant de l'ingénierie. L'appel lancé en 1964 par le Corps des ingénieurs de l'Armée qui, aux Etats-Unis, prend en charge la défense côtière est significatif à cet égard. On peut y lire : « Notre campagne contre la mer doit être menée avec autant de détermination que celle qui serait de mise contre tout autre

ennemi menaçant nos frontières ». Cet état d'esprit est aujourd'hui mis en question par de nombreux géographes et géologues, spécialistes de l'évolution des littoraux. Des controverses surgissent dans les journaux scientifiques américains entre ingénieurs et naturalistes¹⁵.

¹⁵ O.H. Pilkey et al., *Géotimes*, 19, 1981 : R.A. Kerr, *Science*, 214, 428, 1981.

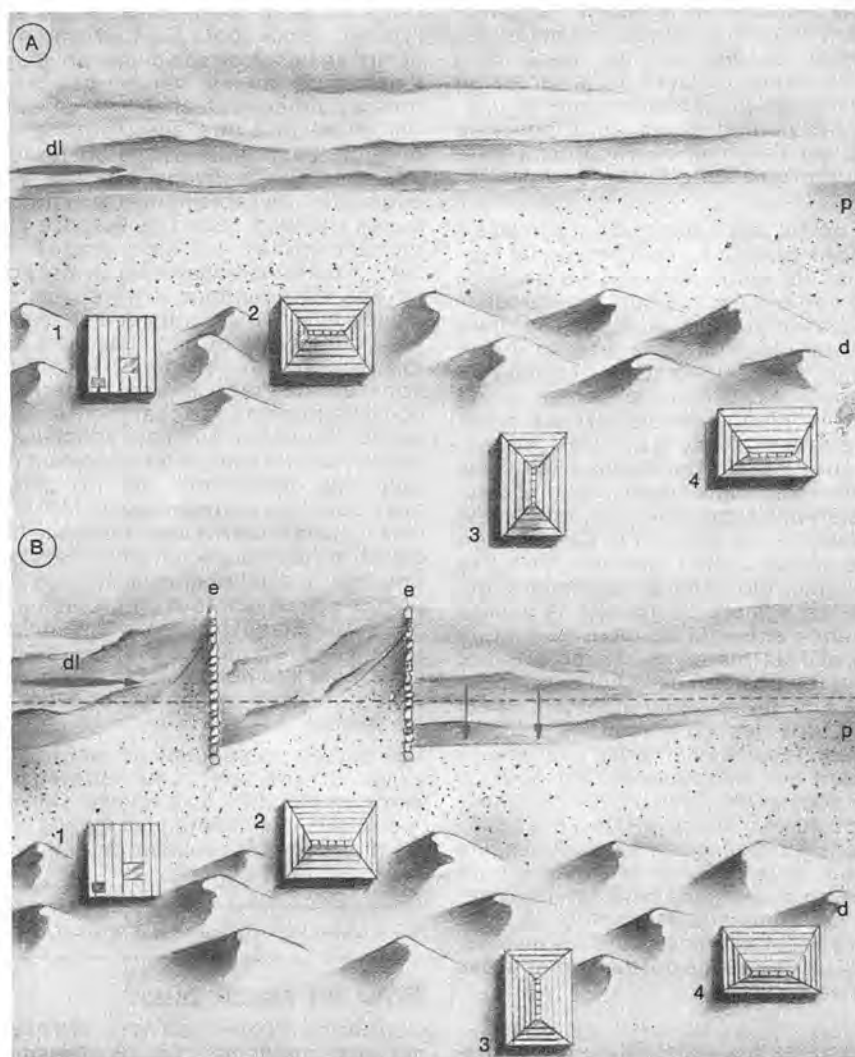


Figure 11. Les maisons 1 et 2, inconsidérément construites sur l'emplacement de la dune bordière (d), sont menacées par les vagues de tempête, ce qui n'est pas le cas de celles (3 et 4) installées en arrière (A). Afin de mettre à l'abri de la destruction les maisons en danger, on décide d'élargir la plage (p), par l'implantation d'épis (e). Les épis freinent la dérive littorale (dl) et l'obligent à déposer une partie de sa charge. Le résultat est un déficit de sédiments immédiatement à l'aval, d'où un recul de la plage qui mettra à la portée des vagues des maisons jusque-là hors de leur atteinte (B). Pour les protéger, il faudra alors construire des épis en face d'elles, épis qui en appelleront bientôt d'autres à côté. Le problème, dû à une imprudence humaine, n'est pas résolu mais simplement déplacé (d'après O.H. Pikey et all, *From Currituck to Calabash*, North Carolina Science and Technology Research Center, 1978).

Les naturalistes, en s'appuyant d'une part sur les coûts, d'autre part sur les résultats limités, parfois même nocifs à moyen terme, des ouvrages de défense, affirment que les méthodes de lutte proposées jusqu'ici par les ingénieurs pour juguler l'érosion des plages doivent être reconsidérées. Ils soutiennent qu'une nouvelle approche du problème s'impose, approche fondée sur la constatation que le démaigrissement et le recul des rivages meubles sont des événements inéluctables puisqu'il y a actuellement une pénurie de sédiments sur les côtes et une élévation du niveau de la mer. Au total, pensent-ils, la récession actuelle des plages représente un phénomène naturel et il y aura moins de déboires à essayer de s'adapter à cette évolution qu'à s'efforcer de la contrarier.

Que préconisent donc les naturalistes ? D'abord, partout où cela est encore réalisable, ils recommandent de déclarer zone *non aedificandi* tout l'espace côtier au sens le plus large, de la dune bordière à l'avant-plage ; à cette mesure il faut ajouter bien évidemment l'interdiction de toute extraction de sables et de galets. L'intangibilité de l'espace côtier doit être assurée par la Loi. Il est impératif d'en finir avec la mode des villas et des hôtels « pied dans l'eau » qui, on l'a vu, accélèrent l'érosion. A cet égard, une expérience en cours en Caroline du Nord mérite d'être rapportée. On a fixé une ligne, éloignée de la plage d'une distance égale à trente fois la vitesse moyenne annuelle du recul du trait de côte, et il est interdit de bâtir entre elle et la mer. La position de la ligne est appelée à être revue périodiquement. Il est prévu que les constructions édifiées immédiatement en arrière de cette ligne devront être abandonnées au bout de trois décennies. Cette limitation dans le temps du droit de propriété a des implications juridiques et économiques. On le voit, à la défense obstinée contre l'érosion des vagues telle que les ingénieurs l'ont menée pendant longtemps, tend à se substituer aujourd'hui un recul stratégique planifié qui tient compte des réalités naturelles.

Mais, cette nouvelle politique qui préconise le *better to move than to protect* ne saurait s'appliquer partout, difficilement en tout cas là où, par exemple, d'énormes investissements sont en jeu. On peut alors avoir recours à l'alimentation artificielle des plages. Cette méthode consiste à corriger le déficit sédimentaire en renforçant la charge solide apportée par la dérive littorale. On contrecarre ainsi le démaigrisse-

ment et le recul sans perturber le jeu normal des processus littoraux en action. Cette méthode, que l'on peut qualifier de douce, est largement utilisée aux Etats-Unis et elle s'est généralisée ailleurs dans le monde. En Union Soviétique, sur le littoral caucasien de la mer Noire, de Sotchi à Soukhoumi, les géographes V.P. Zenkovich et A. Kidnadze¹⁶ organisent, avec succès, l'alimentation artificielle à grande échelle de plages sévèrement menacées par l'érosion, dans une des rares régions de l'Union douée pour le tourisme balnéaire en raison de son climat privilégié. L'opération ne se heurte pas à de grosses difficultés techniques. Le matériel utilisé doit être aussi proche que possible, par la taille et la nature de celui qui constitue le rivage que l'on veut engraisser. Le sable peut être extrait de dunes situées à l'écart de l'espace proprement côtier, ou bien dragué sur l'avant-côte, mais assez loin en mer pour ne pas déséquilibrer encore plus les plages que l'on veut justement restaurer. Pour les grèves de galets, on a parfois recours à des carrières : les pierres sont concassées à une dimension convenable, la mer se chargeant ensuite de leur donner un ébroué satisfaisant. Les sédiments ainsi obtenus ne sont pas répandus directement sur les plages mais déversés à l'amont de la dérive littorale qui les nourrit, ceci pour que leur dépôt se fasse aussi naturellement que possible. L'alimentation artificielle des plages pose avant tout un problème de coût. Aux Etats-Unis, on estime qu'elle revient actuellement à plus de 600 000 dollars par kilomètre de côte. Or l'opération doit être recommencée périodiquement.

Les plages constituent un patrimoine exigü et précaire. Leur sauvegarde lance un défi difficile à relever. Ce sont là des faits maintenant bien établis dont les plans d'aménagement des littoraux devraient tenir compte.

¹⁶ V.P. Zenkovich, *Geogr. Journ.* 139, 460, 1973.

Pour en savoir plus :

J. Blanc, *Protection des littoraux sableux, méthodes d'étude, l'exemple de la Camargue*, CNEXO, 1979.

W. Kaufman et O. Pilkey. *The beaches are moving: the drowning of America's shoreline*. Anchor Press/Doubleday, 1979.

P.D. Komar, *Beach processes and sedimentation*, Prentice Hall, 1976.

R. Paskoff, *L'érosion des côtes*, PUF, 1981.