Panorama des solutions douces de protection des côtes

Réseau Atlantique pour la Prévention et la Gestion des Risques Littoraux

ANCORIM
ATLANTIC NETWORK FOR COASTAL RISKS MANAGEMENT

Galice (Espagne)

SOMMAIRE

Introduction 03

1 - L'érosion du littoral atlantique 07
- Les plages 08
- Les dunes 09
- Les falaises 12
- Les marais maritimes 16

2 - Les solutions douces de protection des côtes 21
- Discussion sur la limite méthodes « dures » et méthodes « douces » 21
- Les méthodes dites « douces » 22

3 - Aide à la décision pour élaborer une stratégie de gestion face à l'érosion côtière 49
- Gérer la protection des côtes 49
- Arbre de décision 53

Conclusion 54

Références 54

INTRODUCTION

Un littoral riche et varié mais fragile et convoité

Le littoral est un espace fragile et mobile à l'interface de la lithosphère, de l'atmosphère et de l'hydrosphère. L'évolution des environnements littoraux dépend de facteurs d'origine continentale (structure géologique), marine (variations du niveau moyen de la mer, processus induits par les vagues, la marée et les courants associés) et atmosphérique (agents subaériens). La combinaison de ces influences modifie aléatoirement la position du rivage et la morphologie des côtes (plages, dunes, falaises, marais maritimes) à diverses échelles de temps et d'espace (cf. figure 1[1]).

Environ 16% de la population européenne vit dans des communes côtières. Cette proportion ne cesse d'augmenter. Cependant, cette présence humaine a eu clairement un impact sur l'environnement littoral. De manière générale, les activités économiques imposent une pression sur les zones côtières (augmentation des ouvrages côtiers, extraction de sédiments sur les plages, usage intensif des côtes pour le tourisme, etc.). L'attractivité résidentielle, touristique et économique progresse régulièrement sur la côte atlantique européenne. Les zones côtières remplissent d'importantes fonctions écologiques, sociales et économiques, il convient de définir un développement durable du littoral passant par la protection des personnes, des biens et des activités, tout en préservant les milieux naturels et leur fonctionnement dans l'écosystème côtier.

L'érosion des plages, des falaises et le recul du trait de côte, ainsi que les risques de submersion des côtes, constituent donc un sujet de préoccupation de plus en plus prégnant pour les communes littorales européennes (20% de l'ensemble des côtes de l'Union européenne sont concernées par ce phénomène), compte-tenu de l'augmentation des enjeux notamment économiques dans des zones soumises à des aléas naturels récurrents.

Galice (Espagne)

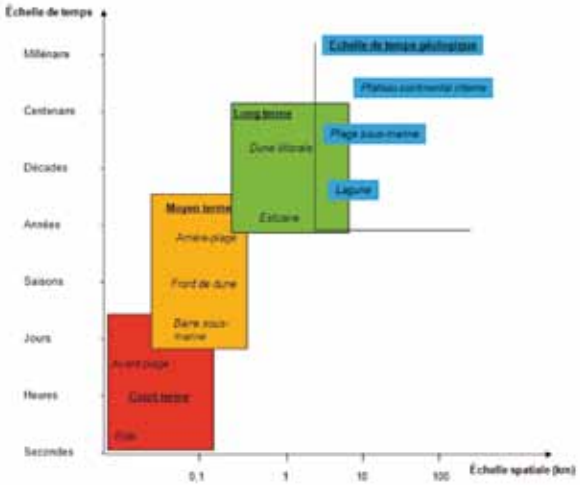


Figure 1 : Concept de temps dans les processus littoraux

[1] Les différents termes sont exprimés dans le chapitre 1.

Quelques notions essentielles

Un aléa est une probabilité d'occurrence dans une région donnée et à une période donnée, d'un phénomène pouvant engendrer potentiellement des dommages. Les littoraux sont principalement concernés par les aléas de l'érosion, de la submersion marine et des mouvements de terrain.
Un enjeu est un ensemble de biens, personnes, systèmes ou autres éléments présents dans les zones de risque et qui sont ainsi soumis à des pertes potentielles.
L'aléa érosion est, par définition, l'ensemble de phénomènes externes qui, à la surface du sol ou à faible profondeur, modifient le relief par enlèvement de matière solide. Elle peut être naturelle ou anthropique[2].
L'érosion côtière se manifeste lorsque la mer gagne du terrain sur la terre à cause d'agents tels que le vent, la houle, les marées, etc. Elle est un processus naturel qui a toujours existé et qui a façonné la côte atlantique européenne tout au long de l'histoire, mais il est aujourd'hui incontestable que son ampleur actuelle résulte aussi de facteurs anthropiques.
Dans de nombreux sites, des solutions pour remédier à ce phénomène, par exemple la construction d'ouvrages lourds de protection, ont aggravé l'érosion sur les zones à protéger et les rivages proches. Ces solutions sont de moins en moins utilisées au détriment de solutions plus douces, qui ont une approche plus environnementale. En outre, les littoraux se présentent comme des infrastructures naturelles littorales dont le rôle majeur est l'augmentation et la préservation de la biodiversité ayant aussi un rôle dans la protection des côtes.

Par ailleurs, l'aléa submersion se révèle particulièrement endommageant pour une côte où la concentration des enjeux ne cesse d'augmenter.

Afin de limiter le phénomène d'érosion inéluctable ainsi que de submersion marine, et donc préserver les espaces naturels et les enjeux, il faut d'une part comprendre l'intérêt et le rôle des infrastructures naturelles littorales telles que les dunes, les falaises et les marais côtiers, et d'autre part envisager des solutions, de préférence, « douces » conçues pour travailler avec la nature en intégrant la dynamique naturelle du littoral et la mobilité du trait de côte. La gestion dynamique du trait de côte est une démarche continue qui varie entre observations et actions et qui durera aussi longtemps que des enjeux seront exposés aux risques côtiers.
Un risque est en effet l'ensemble des pertes attendues (biens, personnes, etc.) en raison d'aléas naturels ou anthropiques pour une zone donnée et une période de référence. Le degré de vulnérabilité[3] et l'exposition d'enjeux socio-économiques ou environnementaux aux aléas sont des éléments clés en considérant la sévérité de risques potentiels.

[2] Anthropique : résultat de l'activité humaine sur le milieu naturel.
[3] Vulnérabilité : voir P49

Comment améliorer la gestion des risques côtiers ?

Le projet européen ANCORIM vise à la mise en réseau d'acteurs publics et scientifiques pour une meilleure prévention et gestion des risques côtiers de l'espace atlantique.

Le projet se structure autour de trois grandes problématiques qui sont :
1) l'érosion et la stabilité du trait de côte,
2) la qualité des eaux côtières et son impact sur les activités économiques,
3) l'aménagement des territoires littoraux ruraux et urbains.

Trois outils pédagogiques ainsi qu'un glossaire sont ainsi réalisés au sein du projet. L'outil n°1 traite des risques côtiers. Le n°2 traite des infrastructures naturelles littorales et des solutions douces de protection des côtes face à l'érosion. Il fait l'objet du présent document et il est à destination des décideurs et gestionnaires. L'outil n°3 aborde la gouvernance et la prise en compte de ces risques dans les activités de planification territoriale.
Le présent document introduit dans un premier temps l'érosion du littoral atlantique; dans un second temps, il présente un panel de solutions douces destinées à protéger les côtes de l'érosion; enfin il conclut sur un chapitre destiné à la gestion du littoral (outil d'aide à la décision). Trois types de littoraux représentatifs de l'espace littoral atlantique européen sont traités : les côtes sableuses, les côtes rocheuses et les marais côtiers.
Cet outil prend comme espace géographique de référence l'espace atlantique du continent européen, en particulier les régions partenaires du projet Ancorim : l'Aquitaine, la Bretagne et le Poitou-Charentes en France, les régions Nord et Centre au Portugal, la Galice en Espagne et la région Border, Midland and Western en Irlande. D'autres exemples ponctuels de régions non partenaires ont pu être inclus à titre illustratif.

Côte rocheuse (France)

Galice (Espagne)

1 - L'érosion du littoral atlantique

Le littoral est un espace riche et fragile d'un point de vue écologique. Il peut connaître des évolutions réversibles ou irréversibles sous l'influence d'agents extérieurs qu'ils soient naturels ou anthropiques à diverses échelles de temps et d'espace.

Son équilibre dynamique résulte principalement des échanges et des transferts de sédiments à l'interface entre milieu marin et milieu terrestre (dérive littorale, érosion des falaises, stockage dans les dunes, etc.).
Sur le littoral atlantique européen, on distingue trois types de littoraux : les côtes sableuses, les côtes rocheuses et les marais maritimes (zones humides incluant les estuaires et les lagunes).

L'érosion côtière est un phénomène naturel (aléa) qui trouve son origine par les effets combinés :

- des agents subaériens : vent, pluie, température;
- des agents marins : houle, marée, courants induits, niveau de la mer (dépend du réchauffement climatique, des effets tectoniques, de la subsidence[4] etc.) ;
- des agents continentaux : notamment l'apport des sédiments du continent vers le littoral par les fleuves. Ces agents sont des processus d'ordre mécanique (induits par des variations de température ou par la variation des teneurs en eau de la roche) ou d'ordre physico-chimique (altération). Les précipitations (écoulement ou filtration) font également évoluer les formes littorales ;
- des agents biologiques : éventuellement un impact érosif de la faune et flore sur des sédiments durs et souples.

L'équilibre dynamique du littoral peut aussi être modifié, par des variations brutales du niveau de la mer (tsunamis, tempêtes importantes…).

Les rivages à côte sableuse proviennent de la sédimentation marine ou de l'activité d'organismes (algues, faunes benthiques tels que les vers). Ils comprennent, sur la côte atlantique, les plages et les dunes, directement liées d'un point de vue paysager et fonctionnel. Les côtes rocheuses sont caractérisées principalement par les côtes à falaises et les zones humides de la façade atlantique comprennent majoritairement les marais maritimes.

St Jean-de-Luz, Aquitaine (France)

Les côtes, également présentées comme des infrastructures naturelles littorales, sont des écosystèmes à l'interface entre le milieu marin et le milieu terrestre offrant en l'occurrence une protection vis-à-vis de l'érosion côtière. Elles possèdent sur l'arc atlantique une identité propre en fonction du type de côte et des conditions environnantes.
Elles participent aux processus dynamiques côtiers, et forment des écosystèmes singuliers à forte valeur patrimoniale, contribuant à la qualité de la ressource naturelle, qu'elle soit halieutique ou terrestre.
Ces infrastructures (principalement les zones humides, les falaises, les dunes) fournissent des services indispensables à la gestion et l'aménagement du littoral, c'est pour cette raison qu'elles doivent être restaurées et préservées.
Les paysages naturels européens sont de plus en plus fragmentés, ce qui à terme représente un problème majeur pour la biodiversité. La notion d'infrastructure verte (d'après le site de la Commission européenne) est utilisée ici car, ces infrastructures aident à la reconnexion de zones naturelles existantes (zones humides, dunes, etc.) et permettent d'améliorer les qualités écologiques d'un milieu. Elles aident aussi à maintenir les services des écosystèmes sur l'environnement.

[4] Subsidence : abaissement du niveau de la terre par mouvement tectonique.

Les plages

> Présentation du milieu

Les plages sont des zones d'accumulation littorale de sédiments (des sables fins aux blocs). La morphologie des plages (cf. figure 2) évolue continuellement dans le temps d'où une variation du stock des sédiments. Les agents dynamiques majeurs sont le vent, les vagues, la marée et les courants associés. On distingue les plages dites « ouvertes », occupant un grand linéaire côtier sableux et le plus souvent associées à des dunes, des plages « de poche » qui sont frangeantes[5] à des falaises rocheuses ou situées en fond de baie.

En partie supérieure, le haut de plage (ou arrière plage) n'est atteint par l'eau que lors des évènements exceptionnels. La ligne de flexion marque le passage au bas de plage (ou avant-plage), situé dans la zone de balancement des marées (l'estran[6]). L'avant-côte (sous-marine) est, continuellement submergée. Elle est marquée par des formes d'accumulations (barres), qui se forment lorsque la pente est faible et les sédiments abondants. Plus au large, au-delà de la limite d'action des vagues de tempête sur les fonds, l'avant-côte cède la place au plateau continental. Les modifications rapides des formes sur la plage et l'avant-côte mettent en évidence l'adaptation d'un milieu littoral meuble peu profond à des conditions hydrodynamiques variables.

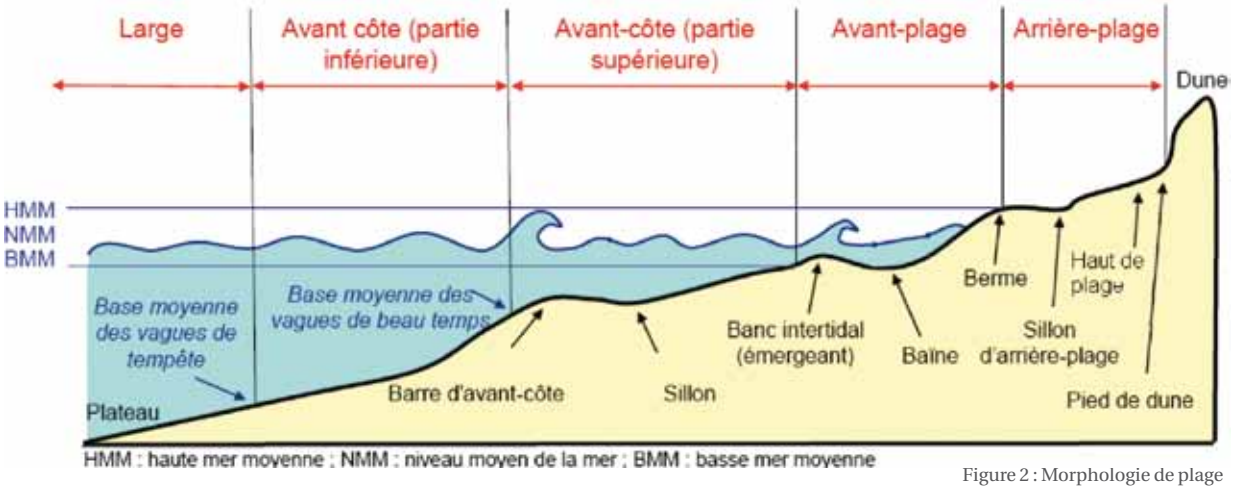


Figure 2 : Morphologie de plage

Le profil d'une plage varie naturellement en fonction des saisons. En période de fortes conditions d'énergie (fortes houles, forts courants,…), l'hiver notamment, le stock sédimentaire transite depuis la plage vers l'avant-côte, induisant un abaissement du profil de plage. A l'inverse, lors des faibles conditions d'énergie (faible houles et courants…), l'été notamment, les sédiments migrent depuis l'avant-côte vers la plage, relevant le profil de plage.

Par ailleurs, les houles du large se propagent à la côte et génèrent des vagues dont la forme et l'action sur les fonds varient en fonction des configurations géomorphologiques du littoral (pente, largeur du plateau continental, etc…). Quand la propagation des vagues est oblique à la côte, la dérive littorale est produite. Ce transport sédimentaire sur l'estran est orienté parallèlement au littoral. La marée joue un rôle important dans l'évolution des plages car elle permet le mouvement continuel de la barre de plage et le transport des sédiments (majoritairement les sables).

[5] Plage frangeante : accolée parallèlement au littoral.
[6] Estran : zone comprise entre les plus hautes et les plus basses mers connues.

> Phénomène de l'érosion et/ou de submersion des plages

Maceda (Espagne)

Les causes naturelles de l'érosion des plages proviennent en premier lieu d'une pénurie sédimentaire, les apports en sédiments provenant des produits des effondrements des falaises et de l'érosion continentale (transportés par les fleuves) étant très limités. La succession rapide d'épisodes climatiques défavorables (tempêtes), par la déstructuration durable de la plage, peut avoir un impact fort sur l'équilibre sédimentaire de celle-ci. La hausse du niveau de la mer qui doit son origine au réchauffement climatique a pour conséquence des inondations permanentes des espaces côtiers mais aussi une érosion accrue des plages et falaises.

Les plages (lorsque celles-ci sont adossées à des champs de dunes) sont en échange sédimentaire permanent avec les dunes : la plage alimente la dune et la dune constitue une réserve de sable nécessaire à l'équilibre de la plage.

Les dunes

> Présentation du milieu

La dune naît de la plage, grâce au vent et à la végétation qui freine le mouvement du sable et permet la formation des dunes. Le vent est un agent d'édification, mais aussi de remobilisation des dunes.
Les dunes nécessitent donc une dynamique éolienne suffisante, une source de sédiments disponible et une végétation spécifique pour exister. La dune constitue une réserve de sable qui permet à la plage d'être réalimentée si cette dernière est attaquée par les vagues.
Le système dunaire se décompose ainsi : le haut de plage, l'avant-dune (rôle important dans l'équilibre sédimentaire de la plage), le cordon de dune mobile, l'arrière-dune et la dune boisée (cf. figure 3). Leurs limites ne sont pas fixes, chaque unité écologique se différencie par sa forme et sa végétation.

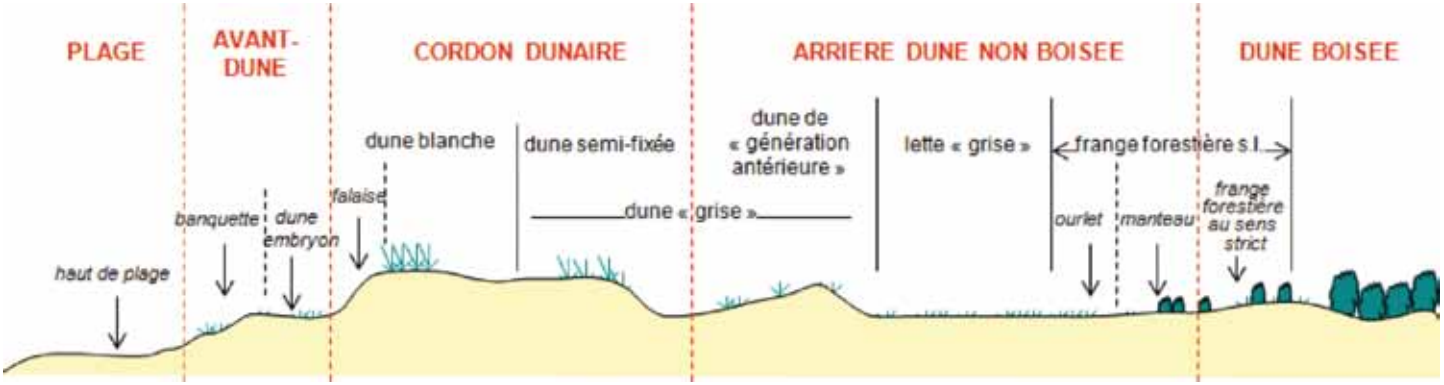


Figure 3 : Le système dunaire

Typologie des systèmes plage/dune

Les dunes littorales sont adossées à des systèmes dunaires antérieurs, le plus souvent d'altitude nettement supérieure à celle du niveau de la mer. On peut distinguer trois grands types de situation :

1. sur les tronçons de côte en déficit sédimentaire, des dunes étroites avec un front en falaise, et dont le volume tend à décroître ;
2. sur les tronçons à bilan sédimentaire équilibré ou légèrement déficitaire, une alternance entre phases d'érosion et phases de répit au cours desquelles de nouvelles avant-dunes se forment, mais restent précaires ;
3. sur les tronçons à bilan sédimentaire positif, des avant-dunes bien établies et volumineuses se forment.

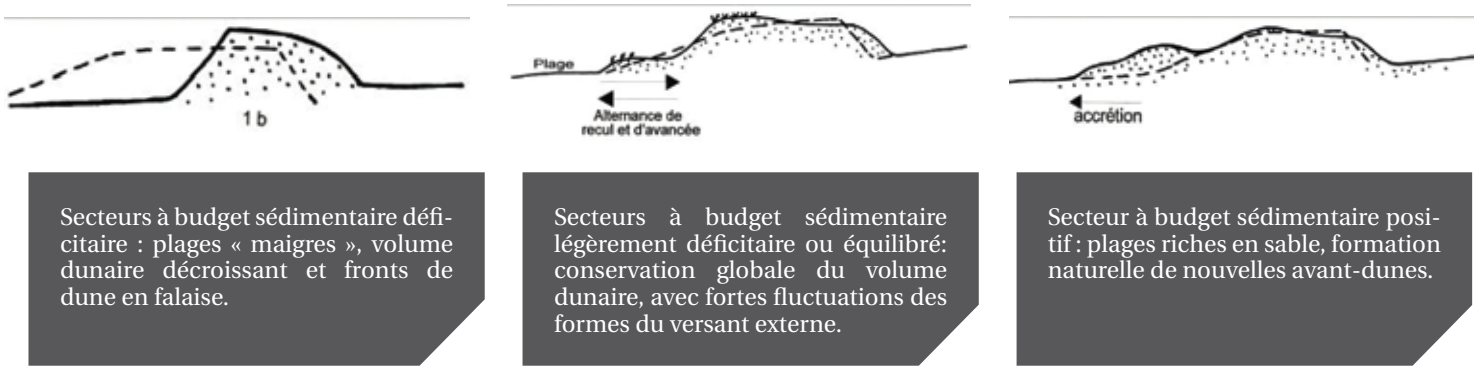


Figure 4 : Typologie des systèmes plage/dune

> Phénomène de l'érosion des dunes

Le système dunaire est déstabilisé par des processus naturels (débordements, siffle-vent[7] principalement), également par des actions anthropiques (piétinement, etc.) et par leur conjonction. Si ces processus peuvent être, « à petite dose », favorables à la diversité de paysages et de faciès, ils peuvent devenir très destructeurs si aucun contrôle n'est entrepris.

L'inquiétude du 21ème siècle est de deux ordres :

- d'une part l'érosion côtière, phénomène ancien, mais qui s'accentue et qui est de plus en plus ressenti du fait de la multiplication des aménagements littoraux ;
- d'autre part, le risque de submersion, qui s'accroît avec la pénurie sédimentaire, et la tendance à l'élévation du niveau de la mer liée au changement global.

Si l'érosion marine est un phénomène dominant sur les côtes meubles, le risque de submersion lui concerne uniquement les secteurs côtiers dans lesquels un cordon étroit précède un arrière-pays de basse altitude (risque de brèche).

Les causes humaines de l'érosion des plages et des dunes sont nombreuses : le nettoyage excessif des plages et l'exploitation intensive des matériaux des dunes, des plages et des avant-plages.

Il se pose aussi le problème de l'urbanisation souvent associée au déboisement. Les impacts négatifs des constructions se traduisent notamment par des blocages sédimentaires : les constructions sont des barrières artificielles qui empêchent les transits des sédiments.

L'artificialisation de ces côtes, en plus de limiter les échanges biologiques et de limiter la naturalité des écosystèmes, entraîne l'apparition de risques pour les biens et équipements créés (risques d'ensablement ou de recul parfois rapide du rivage).

La surfréquentation liée au développement du tourisme balnéaire est également un problème: le piétinement provoque la dégradation de la végétation d'où une remobilisation des sables entrainés par le vent vers l'intérieur des terres et donc perdus pour le système plage-dune.

Dunes et plages sont les deux compartiments majeurs des cellules sédimentaires. De façon constante, les vagues et le vent engendrent des formes de plage et de dune, qui à leur tour interagissent sur ces agents d'érosion. Il en résulte un « équilibre dynamique » qui est le plus apte à amortir l'effet des tempêtes par dissipation de l'énergie. L'adaptation aux changements (résilience[8]) est optimale lorsque le système n'est pas perturbé et dispose d'une largeur suffisante pour s'exprimer.

Une cause majeure, et structurelle, de l'érosion marine est la pénurie sédimentaire du système plage/dune. Dans ce contexte de pénurie aggravé par la tendance à la remontée du niveau des mers, le mode de gestion des dunes mérite d'être adapté.

[7] Siffle-vent : déflation (enlèvement des particules légères et sables fins du sol) qui se produit quand le vent passe entre deux pans de dunes.
[8] Résilience : capacité d'un milieu à résister à des agressions ou à retrouver son intégrité.

> Le système plage/dune en tant qu'infrastructures naturelles

Lorsque les dunes précèdent des zones basses, situation peu fréquente en Aquitaine, mais bien identifiée sur d'autres parties de la côte atlantique, elles peuvent aussi avoir un rôle assimilable à celui des digues : elles jouent un rôle de défense contre les risques de submersions.
Les dunes ont ainsi joué un rôle historique : au cours de plusieurs périodes de l'histoire, elles ont été aménagées par l'homme (plantations de forêts) pour se protéger des incursions sableuses dans les terres, en tant que « piège à sable ».
Constituant une partie du précieux stock sédimentaire, les dunes jouent plusieurs rôles au regard des risques d'érosion marine et de submersion :

- amortissement souple de l'énergie marine (le système plage/dune est un dissipateur naturel de l'énergie) ;
- réalimentation de la plage après les tempêtes;
- digue, et premier « fusible » en cas de submersion etc.

Le contrôle souple des dunes répond principalement à la problématique de l'érosion éolienne, il doit être complété pour répondre aux risques liés à la mer… Les investissements à réaliser sont beaucoup plus lourds que ceux du seul contrôle de la mobilité liée au vent.

Adaptation des interventions sur les dunes pour répondre à ces nouvelles attentes, le concept de « dune-digue »
A priori, les dunes ne sont pas considérées juridiquement comme des digues, cependant, dans certaines situations, elles sont, ou seront, impliquées dans des logiques d'actions visant la protection contre les risques d'érosion marine et de submersion. Plusieurs types de situation se présentent, elles sont illustrées et schématisées ci-dessous (cf. figure 5):

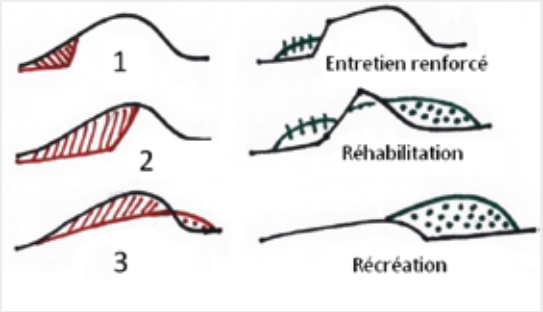


Figure 5: Types de situation en vue des interventions sur les dunes

Cas 1 : L'érosion marine entaille une falaise qui ne remet pas en cause la stabilité de l'ouvrage.

Cas 2 : Très forte érosion marine qui supprime les capacités du cordon de dune à jouer son rôle de digue.

Cas 3 : L'érosion marine érode le cordon en quasi-totalité.

Au-delà de ces travaux de réhabilitation, il est nécessaire de mettre en place un processus de suivi et d'alerte : cartographie de l'état des cordons de dune qui jouent un rôle de défense face au risque de submersion et protocoles de mesure dans les zones sensibles de façon à alerter la puissance publique lorsque des travaux sont nécessaires au maintien de l'efficacité de ces dunes au rôle de digue.

> Enjeu écologique des écosystèmes dunaires

La position des dunes à la jonction entre terre et mer est source de diversité des paysages et des espèces. Des rudes conditions de vie animale et végétale (salinité, mitraillage du sable…) résultent une forte spécialisation des espèces et un fort endémisme. Citons par exemple la petite bourrache du littoral (cf. photo 1) ou la linaire à feuilles de thym (cf. photo 2), toutes deux endémiques du littoral français. Certaines de ces espèces permettent le maintien du sable et donc du cordon dunaire. Mais cet écosystème linéaire est étroit, ce qui réduit sa capacité d'adaptation au recul des rivages, et accroît sa fragilité face à la pression anthropique.
Un fort taux d'endémisme[9] reflète la haute valeur patrimoniale des dunes. Les dunes littorales non boisées d'Aquitaine (France) recèlent de nombreuses espèces endémiques, telles que l'Alysson des sables, l'Astragale de Bayonne, l'œillet des dunes, etc.
Pour effectuer de façon optimale ses différents « services écologiques[10] », le système dune littorale/plage doit pouvoir se développer sur une largeur suffisante à l'expression des différents processus et faciès.

Omphalodes littoralis

Linaria thymifolia

[9] Endémisme : caractérise la présence naturelle d'un groupe biologique exclusivement dans une région géographique délimitée.
[10] Services écologiques : processus naturels utiles et nécessaires aux populations sans qu'elles aient à agir pour les obtenir.

Les falaises

> Présentation du milieu

Les falaises (sous-entendues rocheuses) constituent un cas particulier de versant qui recule parallèlement à lui-même laissant devant lui une plate-forme rocheuse doucement inclinée vers la mer. Il existe trois types de falaise : les falaises vives (instables et régulièrement battues par la mer, d'où leur aspect d'escarpement raide), les falaises stabilisées et les falaises mortes (lorsqu'elles ne sont plus atteintes par les vagues, leur évolution est similaire au versant continental).

Les falaises se distinguent par leur forme, leur structure et leur vitesse d'évolution. Les falaises de l'arc atlantique sont caractéristiques d'une importante diversité de milieux géologiques (calcaires, marneux, granitiques, etc.), offrant une grande richesse écologique des milieux et des paysages variés.

La nature des roches joue un rôle primordial dans la forme des falaises : les formations peuvent être meubles et donc fragiles (sables, limons, argiles, marnes, craie), laissant des formes « adoucies » ou les formations peuvent être dures (calcaires, grès, roches volcaniques, granitiques, métamorphiques), donc moins érodables, donnant généralement des formes plus proches de la verticale. Dans les formations meubles, on retrouve généralement des glissements (ou coulées boueuses) alors que dans les formations dures, les éboulements et chutes de blocs sont majoritaires.

Les courants de marée influencent les dépôts de sédiments et la turbidité de l'eau.

Miramar, Biarritz, Aquitaine (France)

> L'érosion des falaises

Les falaises sont instables en raison de l'interaction de nombreux facteurs, qui sont :

- d'une part, les processus marins en pied de falaise par l'action des vagues qui entraîne une érosion sous-marine (estran) et aérienne (impact de la houle sur la falaise). A cela s'ajoute l'impact sur ces processus de la hausse du niveau marin. Cette dynamique marine peut engendrer des sous-cavages[1]. L'océan (houle et courants côtiers) aggrave ce phénomène d'instabilité, en déblayant les matériaux éboulés et en empêchant l'arrangement d'une butée stabilisatrice de pied.
- d'autre part, les processus subaériens (vent, précipitations, infiltrations, météorisation des roches, haloclastie[12], etc.) qui agissent sur la face de l'escarpement et au sommet de falaise. Ces processus peuvent provoquer par actions chimiques, physiques et mécaniques, des glissements de terrain, éboulements, effondrements, ravinements etc. Ces processus ont lieu en raison de la nature des roches et/ou de leur structure.

L'érosion des falaises permet l'alimentation en sédiment comme source positive indispensable à l'équilibre de la cellule sédimentaire et des plages avoisinantes (ex : les altérites du Pays Basque qui peuvent alimenter certaines plages de poche). L'érosion de la falaise, le déplacement de la plage et l'érosion de la plage intertidale et sous-marine (rabotage de l'estran) sont des phénomènes indissociables.

St-Jean-de-Luz, Aquitaine (France)

[11] Sous-cavage : entaille réalisée au pied d'une falaise par le déferlement des vagues sous un surplomb.
[12] Haloclastie : processus de désagrégation de la roche lié à la cristallisation de solutions salines. Processus de météorisation efficace dans les milieux très riches en sels (zones côtières).

L'érosion est accentuée par les impacts anthropiques :

- en haut de falaise, l'urbanisation peu dense de type lotissement s'accompagne d'une hausse du toit de la nappe phréatique (irrigation des jardins, fuite des piscines, etc.) Le piétinement sur des sentiers a aussi un effet déstabilisateur;
- sur les pentes de la falaise, l'aménagement de routes perturbe l'équilibre du versant par le creusement de tranchées et l'accumulation de déblais ;
- en pied de falaise, l'exploitation des galets entraîne un appauvrissement des cordons littoraux naturels qui ont un rôle de protection du pied de la falaise (cas en Haute Normandie) et la création d'ouvrages de protection de la falaise, par exemple les barrages, perturbe les transits littoraux.

Sur l'ensemble des littoraux atlantiques, la variabilité des côtes rocheuses est très importante. La fragilité des matériaux et le contact avec la mer entraînent des variations de formes, de structures et de végétation dans tous les compartiments, de l'estran jusqu'à la frange continentale.

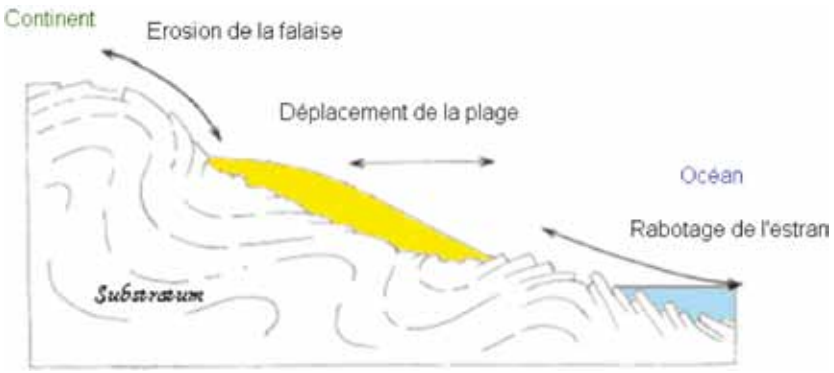


Figure 6 : Lien entre érosion de la falaise, déplacement de la plage et érosion de la plage intertidale et sous-marine

Falaises de Moher (Irlande)

> Les falaises en tant qu'infrastructures naturelles

Les falaises de par leur hauteur, servent tout d'abord de barrières naturelles contre les risques de submersions marines. Le platier rocheux dissipe l'énergie mécanique des vagues ce qui permet de limiter l'érosion en pied de versant. De plus, les matériaux provenant des mouvements de terrain (les glissements, les éboulements etc.) servent d'apports sédimentaires pour les plages avoisinantes, ce qui permet leur accrétion.

> Enjeu écologique des écosystèmes des falaises

Les côtes rocheuses atlantiques, malgré leur aspect minéral accidenté, sont des milieux très riches grâce à la grande mosaïque d'habitats présents.
L'étagement des peuplements littoraux est directement lié aux conditions hydrodynamiques : marée, courants de marées, vagues et exposition de la côte aux houles.
Le phénomène des marées conditionne l'installation des organismes littoraux, pour la quasi-totalité d'entre eux d'origine marine. Ainsi, dans la frange supra-littorale[13], atteinte par la mer uniquement lors des pleines mers de vives eaux[14], très peu d'organismes supportent les conditions d'émersion quasi permanentes. Plus bas, dans la zone intertidale, le substrat est largement peuplé. Enfin, sous les basses mers de vives eaux[15], c'est l'étage infralittoral. Les peuplements se modifient et comportent des espèces qui supportent très mal l'émersion.

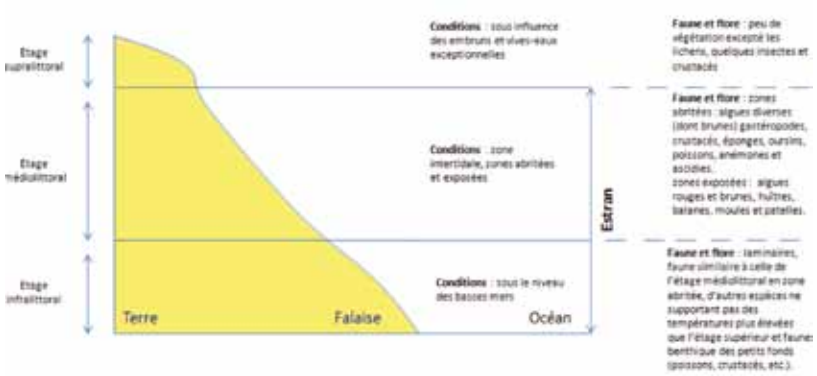


Figure 7 : Ecologie sur l'estran rocheux

Morus bassanus (France)

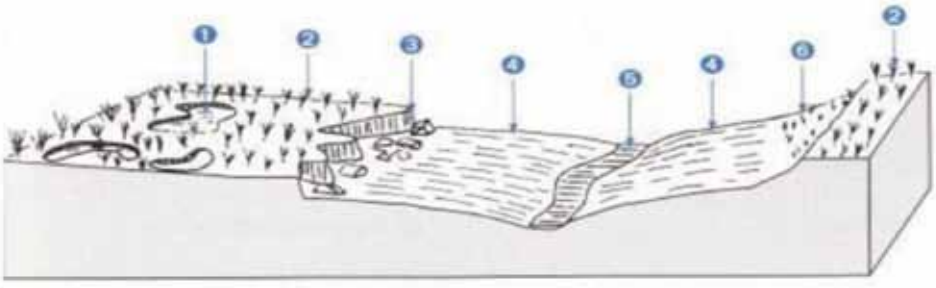
L'estran rocheux possède un rôle essentiel dans les cycles biologiques marins. Il permet le maintien de chaînes alimentaires complexes depuis les poissons jusqu'aux mollusques, crustacés et algues. La présence d'éléments rocheux de formes et de tailles diverses offrent des abris pour ces organismes benthiques.
Les falaises, au-dessus des zones à lichens de l'étage supra-littoral, sont généralement pauvres en végétaux, sauf sur des matériaux meubles, ou sur leur marge supérieure ou dans des zones de fissures ou de replat colmatés par de la terre fine. Sur ces zones, se développe une végétation herbacée typique appelée pelouse aérohaline[16], à haute valeur patrimoniale. C'est sur les espaces en retrait de la falaise (la lande formée de buissons bas puis la forêt) que l'on trouve une grande diversité floristique et faunistique. Mais la faune emblématique des falaises est bien sûr l'avifaune[17]. Sur l'estran rocheux et dans les falaises, de nombreux oiseaux (goélands, hirondelle de rochers, etc.) profitent de la nourriture et des gîtes offerts par les côtes rocheuses.
Les côtes rocheuses sont des milieux très riches et très variés, depuis l'étage marin jusqu'aux espaces périphériques terrestres. Sur l'estran, la qualité du substrat rocheux permet l'installation d'une végétation abondante à la base de nombreuses chaînes alimentaires littorales. La végétation caractéristique des falaises rocheuses abrite une grande partie de l'avifaune nicheuse littorale. Enfin, les landes et forêts des franges littorales sont aussi des habitats naturels très variés à l'interface entre peuplements littoraux et espèces « continentales ».

[13] Supra-littorale: zone située au-dessus de la marée
[14] Basse mer de vives eaux : basse mer à très fort marnage, c'est-à-dire lorsque l'amplitude de la marée passe par un maximum
[15] Pleine mer de vives eaux : pleine mer à très fort marnage, c'est-à-dire lorsque l'amplitude de la marée passe par un maximum
[16] Aérohaline: soumis aux vents salés.
[17] Avifaune : ensemble des espèces d'oiseaux d'une région donnée.

Les marais maritimes

> Présentation du milieu

Les marais maritimes sont des zones humides sous forte influence marine.
Ils naissent de la confrontation des eaux douces et salées dans des secteurs relativement protégés des houles. Les vagues de vent et les tempêtes peuvent affecter et éroder les marais maritimes. Bien que situés sous le niveau des pleines mers de vives eaux, ces espaces sont rarement submergés par l'eau salée, car l'homme est largement intervenu pour annexer ces terres au continent, en les endiguant notamment.
Les estrans des marais sont des zones basses faites d'alluvions récentes, zones de transfert entre milieu marin et terrestre : schorres et wadden. Les marais sont très fortement dépendants des courants que génère la marée. Les parties végétalisées, atteintes uniquement lors des grandes marées sont appelées le schorre. Cette zone est riche en végétation, notamment en plantes halophiles « herbu » qui amortissent les courants, piègent les particules fines en suspension et les fixent avec leurs racines.
Dans la zone intertidale, les wadden sont des étendues à forte sédimentation, composées de sédiments fins : vases (zones appelées slikkes), tangues (sédiment calcaire à forte proportion de débris coquilliers) ou sables.
Dans ce document, le terme de marais maritime, regroupe l'ensemble fonctionnel de cette forme de côte, depuis l'estran, jusqu'à la marge continentale.



1. Cuvette
2. Schorre
3. Microfalaise
4. Slikke
5. Chenal de marée
6. Haute slikke

Figure 8 : Morphologie d'un marais maritime en région de climat tempéré

La pente générale d'un marais est très faible, elle peut être dirigée vers la mer ou vers le chenal principal de drainage naturel. Le marais est alors dit « conforme » : il est constitué surtout de sédiments fins argileux, déposés par décantation en eau calme.
Mais la pente peut aussi être dirigée vers la bordure continentale. Le marais est alors dit « contraire » : il est sédimenté par des eaux plus turbulentes.

Delta d'Arcachon, Aquitaine (France)

> Phénomènes des aléas érosion et submersion marine

Les marais maritimes étant des zones côtières humides basses, ils sont naturellement et régulièrement soumis à des submersions marines d'intensité et de fréquence (ou périodes de retour) variables. Cet aléa est à prendre en considération dans les nombreuses zones endiguées qui abritent des activités agricoles anciennes ou actuelles et parfois des zones urbanisées.
Ce type de littoral sensible subit une pression anthropique liée au développement résidentiel, à l'agriculture, la chasse et la pêche, et aux activités portuaires et industrielles.
En effet, pour les besoins de l'agriculture (aménagement de polders[18]) et pour limiter les inondations des terrains, de nombreuses digues de protection ont été réalisées, isolant les marais de la mer (cf. photo 6). Des bassins de drainage ont été ajoutés afin de contenir les eaux continentales, lors des périodes de crue. Mais cette structuration est remise en cause aujourd'hui du point de vue de la protection écologique, la limitation de la circulation des eaux entraînant la perturbation des flux biologiques.

La conservation de ces espaces passe par une meilleure gestion de la mosaïque d'habitats naturels, en particulier par une remise en eau de terres endiguées, technique appelée dépoldérisation.

Marais endigué, domaine de Certes (France)

> Les marais maritimes en tant qu'infrastructures naturelles

Ces milieux présentent un rôle physique de protection de la côte. La présence des wadden et des schorres limite l'action des vagues sur les rivages. Les digues sont un rempart important contre la submersion marine, à condition qu'elles soient bien calibrées et bien entretenues. Les marais maritimes jouent aussi un rôle important de filtration des eaux polluées transitant du milieu continental au milieu marin.

> Enjeu écologique des écosystèmes des marais maritimes

Ces terres humides, plus ou moins végétalisées, plus ou moins ennoyées suivant leur position dans l'estuaire, sont des habitats essentiels pour le déroulement des cycles biologiques de très nombreux poissons, crustacés et oiseaux.
Ces marais maritimes abritent aussi des activités humaines : conchyliculture, pêche, chasse, activités portuaires, agriculture,… qui ont parfois accéléré l'évolution naturelle et favorisé le colmatage, la progression des prés salés ou l'érosion des rivages.
La flore de ces espaces intertidaux dépend du niveau des marées, des sols et de l'action de l'homme. La rudesse des conditions écologiques entraîne une biodiversité limitée mais la faiblesse de la compétition entre espèces favorise une richesse en individus considérable. Et ces milieux ont une production primaire parmi les plus élevées de la planète.
Les diatomées, algues unicellulaires, colonisent la surface des slikkes. Les plantes à fleur colonisant les parties les plus basses sont les zostères (cf. photo page suivante). Elles couvrent de vastes étendues en herbiers marins. Sur les hautes slikkes, on rencontre essentiellement les salicornes (cf. photo page suivante) et les spartines.

[18] Polder : (mot néerlandais) terre cultivée, conquise sur la mer par endiguement et assèchement.

Ecological zostera marina stake of tidal marsh ecosystems

Salicorne

De nombreuses activités agricoles traditionnelles utilisent les ressources de cet estran (ostréiculture, conchyliculture, pêche à pied, ramassage des algues,…).
Sur le schorre, la flore se diversifie (puccinelle, asters, fétuque,…) offrant des habitats très favorables à de nombreux insectes.
La flore des digues est généralement représentée par le Tamaris et de plus en plus par le séneçon en arbre, espèce très invasive.
La répartition de la faune est très dépendante de la fréquence de submersion et donc du niveau d'eau (marine et douce), de la salinité et de la nature du substrat. Les espèces les plus communes des sédiments vaseux sont des petits crustacés détritivores alors que les plus communes des sédiments sableux sont les arénicoles marines et les néréides.
Les coquillages sont aussi très nombreux dans ces sédiments : coques, palourdes, praires, et la conchyliculture assure une présence marquée des moules et huîtres creuses ou plates.
Les poissons présents dans ces milieux doivent s'adapter aux variations importantes de salinité et de températures.
Les marais maritimes, surtout dans leurs parties hautes (marais endigués et schorres) renferment aussi de nombreux insectes, amphibiens, reptiles, mammifères et surtout des oiseaux.
Beaucoup d'oiseaux migrateurs utilisent ces milieux, gîtes d'étape obligatoire entre l'Europe du Nord et l'Afrique.
La végétation étagée et la diversité de milieux depuis les chenaux et canaux aux marais endigués, la variation des niveaux d'eau et de la salinité font de ces zones des espaces assurant le développement ou la reproduction de nombreuses espèces animales aquatiques (crustacés, mollusques, poissons,…) et terrestres (insectes, oiseaux, mammifères, amphibiens et reptiles).
La survie de ces espèces et de ces écosystèmes passe par le maintien des fonctionnements hydrauliques, la limitation du colmatage, et la maîtrise des activités humaines.
Le littoral est un système ouvert, il convient d'appréhender son équilibre au travers de l'analyse de son bilan sédimentaire au sein d'une « cellule sédimentaire[19] ».

[19] Cellule sédimentaire : portions de côte homogènes, cohérentes en termes de morphologie et de fonctionnement, indépendantes de toute structure administrative.

Il existe une forte interdépendance entre les processus d'une même cellule (érosion/accrétion[20] etc.). Les cellules sédimentaires peuvent être fermées (ou semi fermées), par exemple dans une baie entre deux caps rocheux, mais le plus souvent, des échanges ont lieu entre cellules voisines. Elles représentent des unités d'analyse dont le budget sédimentaire peut être établi : soit entre la cellule et ses voisines; soit au sein de la cellule (volume érodé, volume transporté par la dérive littorale, volume stocké dans l'avant-dune et la dune, volume échangé entre la plage et la dune, etc.).
Le budget sédimentaire de l'estran s'exprime par les apports provenant de la dérive littorale (le déferlement et les courants de marée interagissent pour déplacer en masse les sédiments côtiers), des rivières et de l'érosion des falaises et des dunes mais également, par les pertes de la dérive littorale et des canyons au profit du plateau continental et du transport éolien (cf. figure 8).

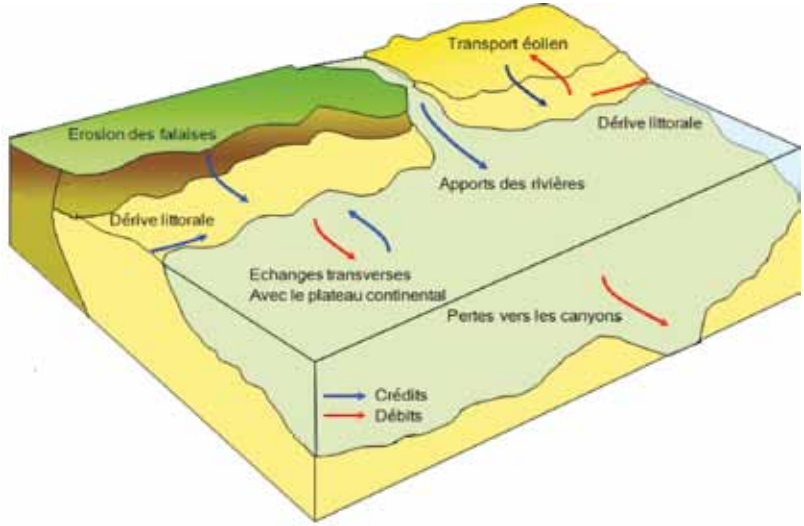


Figure 9 : Schéma explicatif de la notion de budget sédimentaire

Ces littoraux sensibles subissent une érosion naturelle et anthropique très forte. Il advient de les protéger dans la mesure où des enjeux importants sont présents à proximité. Les solutions dites « douces » offrent des possibilités de protection respectueuses de l'environnement et dont l'usage se répand plus fréquemment actuellement.

Comté de Westport (Irlande)

[20] Accrétion : progression de la ligne de rivage vers la terre par accumulation de sédiments.

St Jean-de-Luz, Aquitaine (France)

2 - Les solutions douces de protection des côtes

La prise en compte des aléas côtiers (érosion, submersion, mouvements de terrain) dans l'aménagement du littoral, en vue notamment de préserver des enjeux, peut se décliner en quatre types de solutions (voir p. 51) : le recul stratégique, la non intervention, l'intervention limitée (emploi de solutions douces) et le maintien du trait de côte (emploi de solutions dures et/ou douces).

Parmi ces solutions, deux méthodes de protection des côtes face à l'érosion se distinguent. L'une a pour conséquence de fixer le trait de côte, il s'agit de la méthode dite « dure » ou « rigide ». L'autre a une approche plus environnementale, il s'agit de la méthode dite « douce » ou « souple ». Cependant, selon les cas étudiés, il est difficile de fixer la limite entre les solutions « dures » et les solutions « douces », et parfois les deux méthodes peuvent s'avérer complémentaires.
Les méthodes « dures » (épis, digues, perrés, etc) ont pour rôle principal de protéger des enjeux immédiats et de fixer le trait de côte. Si les ouvrages ou technologies employés répondent généralement à ces objectifs de protection, ils présentent cependant et malheureusement de nombreux aspects négatifs à moyen terme. En effet, ces interventions modifient les dynamiques de fonctionnement du milieu aggravant souvent l'érosion côtière à proximité de la zone protégée, et elles sont généralement très coûteuses mais ont une grande espérance de vie.
Les méthodes « douces » sont conçues pour « travailler avec la nature » en intégrant la dynamique naturelle du littoral et la mobilité du trait de côte (rechargements de la plage en sédiment, travail sur la végétalisation, etc.). Elles ont une durée de vie limitée, sont réversibles et dépendent de leurs caractéristiques propres et des évolutions de l'environnement à l'échelle globale (changement climatique) ou locale (aménagement, fréquentation). L'efficacité du choix de ces méthodes doit être par ailleurs évaluée face au niveau des processus de dynamique côtière (énergie des houles, etc.) et par conséquence à la résistance et «durée de vie » de l'équipement.

Discussion sur la limite méthodes « dures » et méthodes « douces »

Avant tout, il est important de rappeler que toute mise en œuvre d'ouvrages, qu'ils soient durs ou doux, présente des impacts négatifs lors des travaux sur le milieu environnant (transport sédimentaire et budget, nuisance sonore, trafic routier abondant, utilisation récréative interrompue, perturbation de la biodiversité littorale etc.).
Il est primordial de connaître le besoin réel (connaissance de l'aléa et des enjeux) de protection et l'impact sur l'environnement des différentes techniques. La réponse face au risque peut aussi être modulée dans le temps, ou être combinée entre solution douce et solution dure.
Par ailleurs, la distinction entre solutions "dures" et "douces" n'est pas toujours aisée. Si l'on prend pour exemple les falaises, intervenir uniquement sur une zone instable par l'intermédiaire d'une technique « dure » ou d'une parade géotechnique peut être perçu comme une méthode « douce » en raison de la faible emprise spatiale que représenterait cette zone par rapport à toute la côte. Evidemment, ce n'est pas valable pour tous les secteurs. Cela dépend de l'emprise de la zone à traiter mais également de celle que représente toute la falaise par rapport à toute la côte rocheuse d'une région donnée (valable aussi pour les plages).
Sur les falaises, il est généralement conseillé de combiner plusieurs parades géotechniques entre elles et de les associer à une méthode plus « souple » telle que la végétalisation. L'application de cette méthode n'a pas comme objectif de lutter contre l'érosion mais d'accompagner les processus naturels et d'augmenter la sécurité.
On peut également prendre en considération la nature des matériaux utilisés afin qu'ils s'intègrent dans le milieu environnant.
La réversibilité d'un ouvrage permet également de différencier les solutions « douces » des solutions « dures ». En effet, une technique «douce» (appliquée à une petite surface) reste une technique facilement réversible (peu de conséquences) contrairement aux ouvrages lourds, qui perturbent souvent fortement le milieu environnant et présentent un coût très élevé en cas de suppression (digues par exemple).

Les coûts de ces techniques sont très variables (de quelques milliers d'euros à plusieurs centaines de milliers) en fonction des variantes techniques et locales, d'où le recours à une analyse coût-bénéfice indispensable avant toute intervention (voir p. 49).

Vieux Boucau, Aquitaine (France)

Les méthodes dites « douces »

> Les plages

Il existe de nombreuses parades face à l'érosion des plages. La distinction entre méthodes « douces » et « dures » se fait essentiellement selon les critères d'impact sur la dynamique sédimentaire naturelle et la réversibilité des ouvrages. Ces critères étant eux-mêmes dépendants du choix des matériaux utilisés, de la souplesse des ouvrages, de leur emprise spatiale, de l'impact visuel, etc. Les paragraphes suivants présentent quelques solutions habituellement caractérisées comme « douces », avec leurs avantages et inconvénients.

• Les ouvrages en géotextiles

Ouvrages en géotextiles (France)

Description
Ils visent à maintenir le sable et peuvent être déployés perpendiculairement (ex. : épis lorsque la dérive littorale domine) ou longitudinalement par rapport au rivage, par exemple pour armer le cœur d'un bourrelet dunaire à l'arrière d'une plage. Ils sont constitués de toiles perméables en fibres synthétiques sous forme de sacs ou de boudins. Ils sont remplis de sable par une pompe refoulante.

Avantages
L'impact visuel des ouvrages en géotextiles est souvent moins agressif que d'autres structures de type épis, brise-lames, etc., d'autant plus qu'ils sont souvent recouverts de sable. Lorsqu'ils sont dissimulés et disposés pour former des casiers, les sacs peuvent être utilisés pour le maintien du sable en lui servant d'ancrage (par exemple après le rechargement artificiel sur un estran). Ils sont réversibles et la structure de dernière génération est perméable, souple, résistante aux UV et favorise l'installation de la végétation. La mise en place de ces ouvrages est rapide est reste moins onéreuse que des ouvrages lourds (en enrochements par exemple). Ils perturbent peu l'écosystème littoral.

Inconvénients / limites
Les ouvrages en géotextiles présentent les mêmes inconvénients que les ouvrages lourds (ex. : épis, brise-lames), face à la dynamique sédimentaire. Leur rôle étant de limiter les transits sédimentaires, ils entrainent des déficits en sédiments des zones non protégées voisines, accentuant l'érosion. Ayant un rôle limitant la circulation de l'eau, ils peuvent éventuellement entrainer des complications au niveau des aires de baignade notamment en présence de pollution. Comme tout type d'ouvrage, ceux constitués en géotextiles nécessitent un entretien régulier, en particulier face à d'éventuelles dégradations de la part des usagers (notamment en période estivale).

• Les récifs artificiels

Récifs artificiels, Narrowneck (Australie)

Description
Disposés sur l'avant-côte ou l'avant-plage, les récifs artificiels ont pour objectif de diminuer l'action des vagues sur les plages. Ils ralentissent la dérive littorale et favorisent l'engraissement de l'estran, limitant ainsi l'érosion. Ils agissent comme des brise-lames immergés et sont constitués le plus souvent de sacs ou de boudins en géotextiles, mais d'autres types de matériaux peuvent être utilisés comme du sable, des gros blocs, du béton ou des matériaux tout-venant.

Avantages
Sur une côte à marnage[21] faible, ils demeurent invisibles, ce qui ne dénature pas le paysage. Contrairement aux brise-lames, ils permettent le maintien d'une agitation de l'eau aidant à son autoépuration et donc sa qualité pour la baignade. Ils participent également à enrichir la biodiversité littorale (faune et flore).

Inconvénients / limites
Les rivages à fort marnage ne sont pas propices à l'implantation des récifs artificiels. En effet, afin qu'ils limitent l'action des vagues à marée haute, leur structure doit être massive et surélevée, engendrant un impact visuel fort lors des marées basses ainsi qu'un coût trop élevé. Le contexte géomorphologique idéal correspond aux côtes microtidales ou aux plages de fond de baies constituant à elles seules un compartiment sédimentaire.

• Les pieux hydrauliques

Description
Les pieux hydrauliques sont constitués de pieux en bois plantés verticalement dans le sédiment (sable ou vase) suivant un espacement régulier. Ils peuvent être implantés parallèlement ou perpendiculairement au rivage sur l'estran, souvent sur plusieurs dizaines de mètres Ces ouvrages perméables sont utilisés pour dissiper l'énergie des vagues sur la plage, limitant ainsi le transport de sédiments et favorisant la stabilité de la plage.

Avantages
Les pieux hydrauliques étant perméables, la circulation des sédiments, bien que modifiée, est maintenue, limitant les impacts négatifs de part et d'autres de l'ouvrage. Ils sont relativement faciles à mettre en œuvre et peu onéreux.

Inconvénients / limites
L'efficacité avérée de ces ouvrages n'est pas systématiquement garantie selon les types de plages, elle est en général assez limitée. Il faut donc établir un suivi régulier pendant une période de temps suffisante pour estimer leur rôle. De plus, ils peuvent constituer des obstacles pour les usagers des bords de mer (promeneurs…) et dangereux pour la navigation maritime s'ils sont détruits et emportés au large.

Pieux hydrauliques transversaux, Cap Ferret, Aquitaine (France)

Pieux hydrauliques transversaux, Mimbeau, Cap Ferret, Aquitaine (France)

[21] Marnage : dénivellation entre le niveau de la pleine mer et celui de la basse mer.

• Le drainage des plages

Description

Le système de drainage des plages permet d'abaisser le toit de la nappe aquifère et l'eau déposée par le flux des vagues (ou jet-de-rive[22]) et donc de créer une zone non saturée sous la surface de l'estran, près du trait de côte.

Une ou plusieurs canalisations filtrantes sont installées en profondeur (de l'ordre du mètre sous la surface) parallèlement au trait de côte, elles récoltent ainsi l'eau et la transfèrent par gravité vers un puits. A partir de là, une station de pompage renvoie l'eau vers la mer ou si possible vers des installations de recyclage. Le but principal étant de drainer le toit de la nappe aquifère afin de favoriser le dépôt de sédiment, l'eau descendante s'infiltre en partie et donc elle perd de son énergie. Un autre objectif peut également être de drainer la zone de jet-de-rive pour certains types de morphologie de plage. De cette façon, l'apport de sédiment par la mer est plus élevé que la quantité de sédiment qu'elle enlève (cf. figure 10).

Avantages

L'impact paysager est nul (excepté lors des travaux) et le sable s'assèche plus rapidement, ce qui est fort apprécié pour les activités récréatives. L'écosystème littoral est peu perturbé (excepté lors des travaux et la nappe souterraine peut éventuellement modifier l'écosystème benthique[23]). Le système de drainage a un rôle efficace lorsque la circulation des eaux continentales (nappes superficielles) participe à l'érosion. Le coût énergétique peut être amorti en utilisant l'eau recueillie par les installations de recyclage (alimentation de bassin aquacole, piscine d'eau de mer etc.).

Inconvénients / limites

L'utilisation de cet ouvrage reste cependant limitée à certains types de plage. En effet, les sédiments sous l'estran doivent être perméables et épais (entre 0,1 à 0,5 mm) pour permettre la mise en place des canalisations et éviter tout colmatage. De même, il est préférable d'avoir une pente relativement faible (de l'ordre de 1/10 à 1/50). La zone doit être exposée modérément mais régulièrement aux vagues et il faut de faibles variations saisonnières (été/hiver) au niveau du profil de plage. Le rôle des nappes superficielles doit être dominant sur le transport de sédiment (phénomène de thixotropie[24]) par rapport aux autres agents d'érosion. Le drainage affaiblit l'un des processus de l'érosion mais ne résout pas le problème de déficit sédimentaire, en conséquence il convient mieux aux plages de fond de baie (formant à elles seules un compartiment sédimentaire). Il faut enfin prêter attention (suivi) au système électrique de la station de pompage.

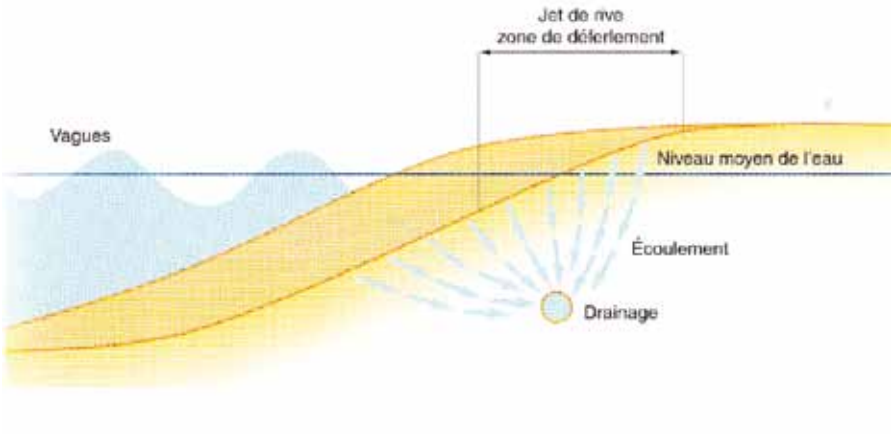


Figure 10 : Système de drainage d'une plage

[22] Jet-de-rive : limite supérieure de la propagation des vagues sur la plage.
[23] Benthique : qualifie les organismes et processus ayant un lien avec le fond de la mer.
[24] Thixotropie : capacité de certaines substances sédimentaires de se transformer en liquides dans lesquelles les particules viennent en suspension (comme les sables mouvants).

• Le by-passing

Description

Le by-passing (ou by-pass), aussi appelé pontage sédimentaire, a pour objectif de rétablir le blocage de la dérive littorale en permettant le franchissement artificiel du transit sédimentaire d'un obstacle naturel (ex. : cap rocheux, débouché de cours d'eau) ou anthropique (épi, digues portuaires, etc.) qui s'oppose à lui (cf. figure 11). Il existe différentes méthodes de by-passing :

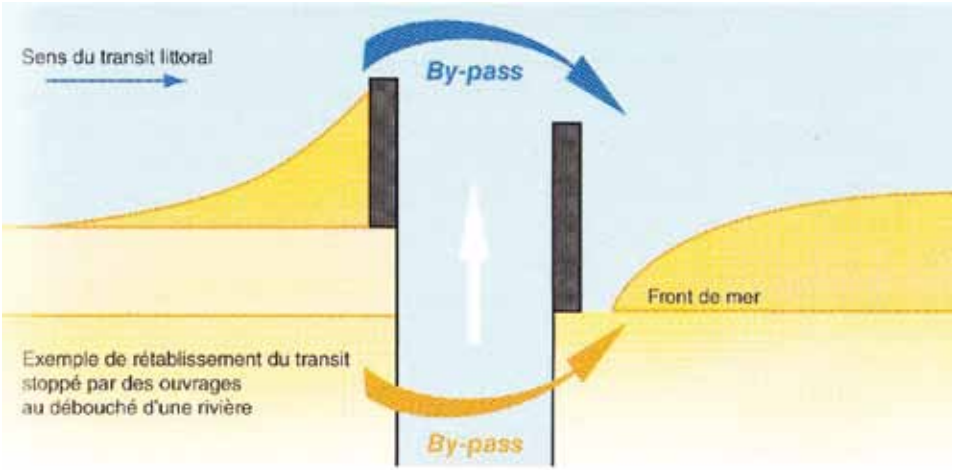


Figure 11 : Système de by-pass

Avantages généraux

Le by-pass permet de rétablir la dynamique naturelle des sédiments. Il peut être facilement mis en œuvre s'il est mécanique (par camion) et représente une solution intéressante de gestion à moyen terme.

Inconvénients / limites généraux

Les systèmes de by-pass peuvent perturber la biodiversité littorale des zones de prélèvements (destruction des habitats, augmentation de la turbidité de l'eau etc.), et des zones de clapage ou de déversements sur les plages (impacts possibles sur les organismes benthiques.). Ce qui peut éventuellement à terme atteindre un écosystème plus large (dunaire ou proche littoral). Au droit des zones portuaires, les sédiments accumulés peuvent être pollués. Dans ce cas, ils ne doivent pas être réinsérés dans le circuit sédimentaire.

- Le by-pass hydraulique

par l'installation d'un système de succion d'un mélange de sable et d'eau dans la zone de dépôt (en amont de l'obstacle) et de refoulement en aval de l'obstacle, dans une conduite hydraulique. Le système peut être fixe (permettant un fonctionnement continu) ou mobile (activité modulable dans le temps et l'espace).

Avantages

Il rétablit le transport naturel des sédiments en équilibrant les zones d'accumulation et d'érosion, sans apport de matériaux exogènes. L'impact négatif sur l'environnement est faible. Le système fixe permet une utilisation continue adaptée aux cycles saisonniers et aux besoins.

Inconvénients / limites

Mal adapté au déplacement des galets et coûts très élevés.

- Le by-pass mécanique
par l'acheminement par camion des sables et galets d'une zone à l'autre.

Avantages
Coût relativement faible et moyens techniques facilement mobilisables.

Inconvénients / limites
Lors des travaux, cela entraine de multiples nuisances (par exemple sonores) pour les riverains et pour la voirie, des coûts proportionnellement élevés à la distance des zones d'apport.

- Le by-pass maritime
par l'utilisation de moyens nautiques (ex dragues). Cela consiste à prélever, transporter et claper les sédiments à marée haute dans les petits fonds et sur l'estran, là où il y a un déficit sédimentaire.

Avantages
Il convient à tous types de sédiments et à des opérations périodiques.

Inconvénients / limites
Le site de prélèvement doit être facile d'accès et proche de la zone à traiter (dans le cas contraire, cela peut générer des coûts élevés). Les manœuvres nautiques sont rendues difficiles dans les zones fortement battues par la mer, notamment le clapage dans la zone de déferlement des vagues.

• L'alimentation artificielle des plages en sédiments (ou rechargement des plages)

Description
Les rechargements de plage ont pour objectif de compenser le déséquilibre du littoral dû à l'érosion naturelle et/ou aux impacts anthropiques (présence d'ouvrages de défense). Le but est d'alimenter les plages en matériaux (sables, galets) qui sont exogènes de la cellule sédimentaire, par camion, dragues en mer, etc. Les sédiments sont étalés sur la plage par des machines de terrassement. Cette méthode est couramment pratiquée sur de nombreuses façades maritimes aux Etats-Unis, aux Pays-Bas, sur la côte adriatique de l'Italie, sur la côte méditerranéenne de l'Espagne, etc. Les rechargements peuvent être ponctuels dans le temps ou se faire régulièrement, après chaque hiver par exemple. Chaque intervention doit être adaptée en fonction de l'analyse de la nature et la taille des matériaux, la bathymétrie, les peuplements des petits fonds, le régime des houles, les courants littoraux, etc. Il faut aussi connaître la vitesse moyenne annuelle de recul du trait de côte. Des modèles numériques (exemple GENESIS[25] aux Etats-Unis) et des méthodes empiriques (méthode privilégiée aux Pays-Bas) permettent d'estimer le volume de sédiments nécessaires.

Alimentation de la plage en sable

Avantages
Le rechargement de plage permet de rétablir un profil d'équilibre de la plage, la protection vis-à-vis des agents d'érosion telles que les vagues de tempête (effet de «zone tampon »), le maintien d'estrans larges et par conséquent la préservation des usages (activités de récréation) et des enjeux. En outre cette méthode n'a pas de conséquences néfastes pour les plages voisines, à contrario d'autres méthodes, et peut les alimenter de manière indirecte par l'apport de sédiments. Le réensablement permet également de rehausser la pente de la plage, dans un but de prévention contre l'élévation du niveau de la mer. L'impact paysager est nul.

Inconvénients / limites
Les matériaux prélevés doivent être situés proche du site de dépôt pour limiter les coûts. De plus, le volume du gisement doit être suffisamment important pour toutes les opérations d'alimentation (rechargements réguliers). Une bonne qualité des sables ou galets est primordiale (ne pas apporter des sédiments pollués ou plus fins que ceux de la plage rechargée). Certaines configurations se prêtent mal à ces méthodes (fortes houles, difficultés d'accès, granulométrie des sables, etc.). Le rechargement en galets est plus rare car les moyens techniques sont plus lourds et plus coûteux. Les dragages et les déversements peuvent perturber la biodiversité locale des zones de prélèvement et de dépôt (destruction des habitats, augmentation de la turbidité de l'eau etc.).

[25] Generalized model for simulating shoreline changes.

Alimentation de la plage en sable

Remarques

L'étude Eurosion[26] (2004) recommande d'identifier les « réserves stratégiques de sédiments » disponibles pour l'alimentation artificielle des plages. Ces réserves peuvent être localisées sur d'autres plages (et choisies logiquement par rapport à la dérive littorale), dans les terres (dunes, carrières) ou au large.

Le profil de rechargement est également important. Il peut se déterminer par les connaissances des profils de plage ou par l'utilisation d'un modèle mathématique (Dean, 2000).

Il faut aussi prendre en compte les saisons : mieux vaut effectuer le rechargement à la fin de la « mauvaise » saison (après l'hiver). Cette méthode n'est pas définitive. Il convient souvent de prévoir un premier rechargement massif suivi par d'autres apports moins importants après une ou plusieurs saisons. Le budget doit donc se prévoir sur plusieurs années. C'est pourquoi il est nécessaire d'effectuer un suivi de la plage (analyse topo-bathymétrique) pendant et après travaux sur une durée de l'ordre de quatre à cinq ans. Ceci dans le but de caractériser la mobilité du trait de côte et de quantifier les volumes de sédiments à prévoir pour les futurs rechargements.

• Cas d'étude : le système de by-pass de Capbreton, Landes, Aquitaine (France)

Domaine d'application

L'élargissement rapide (environ 200 m) de la plage située sur le côté nord de la digue du chenal du Boucarot, correspond au transit sédimentaire (environ 100 000 m3 /an) orienté vers le sud. Sans intervention, les sables contournent l'ouvrage et bouchent l'entrée du chenal. Les conséquences de cet ouvrage bloquant la dérive littorale ont été un accroissement de l'érosion (déjà naturellement présente) sur les plages au sud. La réaction a consisté dans un 1er temps à renforcer les ouvrages lourds (perrés, épis, enrochements de haut estran). De 1983 à 2007, 15 000 m3 /an de sable ont été prélevés au nord du chenal par la municipalité de Capbreton afin d'alimenter les plages au sud (acheminement par camion).

Démarche

Un système de by-pass hydraulique a été mis en place en 2008 afin de remplacer le système par voie terrestre (nuisances supprimées et volume de sable déplacé augmenté) (cf. figure 12): les sédiments, mélangés à de l'eau (prise dans le chenal du cours d'eau nommé le Boucarot), sont prélevés mécaniquement au niveau de la plage nord pour ensuite être déversés sur les plages au sud dans une conduite rigide enterrée et équipée de bouches de sortie espacées pour répandre le sable sur les estrans.

Bilan et perspectives

Le coût de l'installation est estimé à 1,2 - 1,3 million d'euros HT. Le projet prévoit un apport initial de 100 000 m3 de sable et des recharges annuelles de l'ordre de 75 000 m3 étalées sur 12 à 15 semaines dans les mois précédant la saison estivale (d'après R. Paskoff & C. Clus-Auby, 2007).

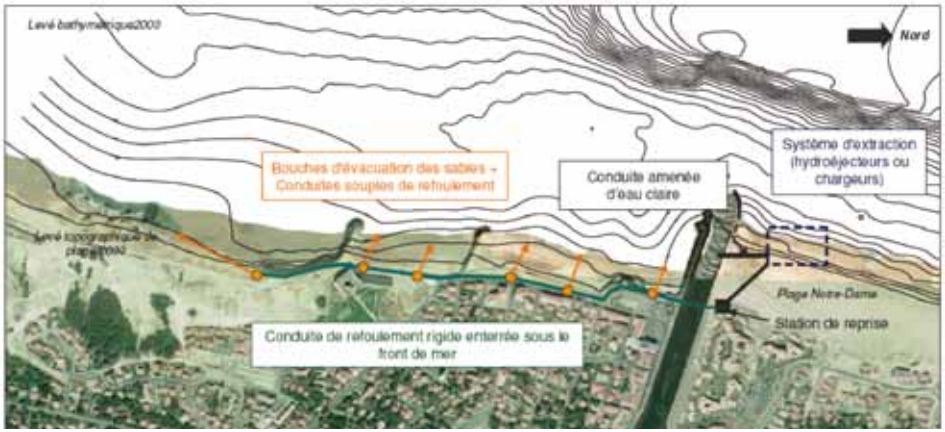


Figure 12 : Le système de by-pass hydraulique

[26] Eurosion (2004) Vivre avec l'érosion côtière en Europe – Espaces et sédiments pour un développement durable. Conclusions de l'étude Eurosion. 21p.

> Les dunes

Il est question ici de gestion plutôt que de protection. Aujourd'hui, les dunes ne sont plus considérées uniquement comme une source de risques d'ensablement, mais comme un paysage de haute valeur patrimoniale et un ouvrage de protection souple des littoraux sableux. L'objectif de gestion est multifonctionnel, il s'agit à la fois de protéger l'arrière-pays, de conserver un écosystème rare et original, d'économiser une ressource sédimentaire limitée, et de participer à la prévention des risques d'érosion et de submersion.

Les travaux de contrôle de la mobilité des dunes littorales s'appuient sur une connaissance fine des situations locales et s'inscrivent dans la logique des processus naturels. Il s'agit d'un contrôle souple.

La volonté de conserver des écosystèmes typiques, fonctionnels et diversifiés implique le maintien des processus naturels qui contribuent à la genèse et au fonctionnement des dunes, l'exclusion des reboisements de dunes grises et de toute introduction d'espèces exogènes, et enfin un usage très limité des remodelages mécaniques.

L'objectif de protection de l'arrière-pays requiert cependant une modération de l'érosion éolienne pour éviter une remise en mouvement généralisée du système risquant de menacer les biens et les personnes (ensablement).

Les dunes sont principalement concernées par le transport éolien qui peut être contrôlé par des méthodes douces de protection. Remplir efficacement un rôle d'amortisseur de l'érosion marine nécessite le maintien de la solidarité transverse entre dune et plage. En effet, la dynamique dunaire est dépendante de la dynamique marine qu'elle peut influencer à son tour. Une partie de l'alimentation sédimentaire des plages est assurée par des prélèvements en pied de dune.

Le choix de souplesse implique la possibilité de translation vers l'intérieur des terres en cas d'érosion marine chronique. Ce recul éventuel pourra se faire sans dommages si la largeur des dunes sans enjeux urbains est suffisante ; une largeur minimale de 300 et 500 mètres est nécessaire.

L'expérience montre que les entretiens réguliers sont nettement moins coûteux que de lourdes restaurations périodiques.

Les choix d'action s'appuient sur un écosystème de référence. Pour les dunes du littoral atlantique, il correspond à la succession la plus complète possible des faciès écodynamiques[27]. C' est cette mosaïque paysagère qui donne aux dunes une meilleure résilience[28] face aux perturbations (naturelles ou anthropiques) et qui génère des paysages attractifs et variés.

Le contrôle souple s'appuie sur la réduction de la vitesse du vent et la création de conditions favorables au développement du tapis végétal des espèces locales. Les principales techniques de base de ce contrôle sont les couvertures de branchage, les brise-vents et les plantations.

Cependant, cette précédente méthode a montré ses limites : remise en cause brutale du tapis végétal, réduction drastique de la géodiversité[29], manque d'adaptation aux différents contextes dynamiques…

Actuellement, ces remodelages sont réservés à des situations particulières dans lesquelles le choix de souplesse n'est plus possible, notamment en front de zones urbanisées.

Les Cantines, Aquitaine (France)

[27] Ecodynamique : paramètres permettant la caractérisation d'un écosystème et de sa dynamique ou évolution dans le temps.
[28] Résilience côtière : capacité naturelle du milieu à se reconstituer et adaptation du milieu face aux changements provoqués par exemple par la hausse du niveau marin.
[29] Géodiversité : diversité géologique (roches, minéraux, fossiles), géomorphologique (formes du relief) et pédologique (sols), générées par les processus dynamiques.

Pyla, Aquitaine (France)

• Les couvertures de débris végétaux

Description

Elles provoquent une accumulation des sédiments. Les deux types les plus répandus sont les couvertures planes de branchages fins (buissons de Genêt, de Bruyère à balais…) étalés manuellement et les couvertures mécaniques de gros branchages (Pin maritime, Chêne vert…).

Messange, Aquitaine (France)

Cap-Ferret, Aquitaine (France)

Matériaux

La plupart des débris et branchages végétaux sont efficaces pour freiner la vitesse du vent. Cependant, le souci de conserver au milieu un grand degré de naturalité réduit les possibilités. Les matériaux suivants doivent être exclus :

- les branchages verts susceptibles de bouturer;
- les branchages qui introduisent des espèces exogènes indésirables (déchets de jardin, exemple : Yucca) ;
- les branchages trop grossiers et les souches, dont l'action n'est pas optimale (points durs), et qui créent des nuisances paysagères.

Avantages

Les couvertures de branchages réduisent fortement la vitesse du vent au niveau du sol, ce qui modère -ou supprime- l'érosion éolienne. Dans les zones de transit sableux, elles provoquent une accumulation, ce qui permet de combler des zones déprimées pour reconstituer des profils aérodynamiques.

Par ailleurs, cet apport de matière organique favorise la reprise et le développement des communautés végétales (nutriments et humidité). Les couvertures de branchages peuvent aussi avoir un effet dissuasif limitant la fréquentation et le piétinement.

Inconvénients / limites

Cette technique est efficace dans toutes les situations d'érosion (déflation[30]) ou de déflation-transit. Les zones d'accumulation n'ont pas à être couvertes, leur dynamique sera contrôlée par le traitement amont des zones en érosion. Cependant on doit absolument limiter l'extension des couvertures, soit pour des raisons écologiques (les couvertures sont source de rudéralisation[31], le transport par engins engendre des dégradations…), soit pour des raisons paysagères, soit pour des raisons économiques.

[30] Déflation : enlèvement de particules légères et sables fins du sol.

[31] Rudéralisation : dégradation d'un milieu naturel sous l'influence humaine (se traduisant par un apport d'azote essentiellement), favorable aux plantes rudérales (qui préfère les sols riches en éléments nutritifs) et défavorables aux plantes originelles.

• Les brise-vents

Description

Ils réduisent la vitesse du vent à proximité du sol, ce qui limite la déflation et provoque le dépôt du sédiment transporté.
Ce sont des obstacles verticaux de perméabilité et de hauteur variable.
L'utilisation de rideaux brise-vent dans la lutte contre l'érosion éolienne est ancestrale, avec des matériaux très diversifiés.
Les brise-vents sont légers, à base de palissades de végétaux (bruyère à balais, lattes de châtaignier, ...) ou de treillis plastiques. Les matériaux naturels utilisés sont biodégradables telles que les ganivelles de châtaignier, puis les filets en fibres de coco.
Les rideaux brise-vent sont opérationnels dans les zones de transit sableux où ils peuvent rapidement se charger de sable. C'est principalement en zone frontale, pendant les phases de répit de l'érosion marine, que la pose de brise-vents est fréquente, et efficace.

Avantages

Cette technique est bien adaptée pour combler des zones déprimées que l'on souhaite surélever.
La pose de brise-vents peut être associée à d'autres techniques, par exemple couvertures de branchages dans une zone déprimée lorsqu'une altitude satisfaisante est obtenue, ou bien plantation d'Oyat (et/ou d'Agropyron), qui complète, et « naturalise » l'action des brise-vents.

Exemples de construction

C'est en zone frontale, dans les secteurs de côte qui connaissent une alternance entre phases d'érosion marine et phases de répit, que l'usage de brise-vents est le plus fréquent (voir photos)

Inconvénients / limites

On doit éviter le choix de cette technique dans différentes situations telles que :

- zones de déflation dominante, les couvertures y sont plus efficaces ;
- siffle-vents trop étroits : déchaussement par dessous et aux extrémités ;
- secteurs chaotiques : difficultés de pose et déchaussement partiel ;
- secteurs très fréquentés : difficultés de maintenance ;
- fortes pentes : difficulté de mise en œuvre, et dominance de la déflation ;
- proximité du trait de côte en secteur d'érosion marine chronique etc.

• Plantations

Description

Sur les dunes régulièrement entretenues et ne subissant pas une fréquentation excessive, la dynamique naturelle suffit en général pour assurer une couverture végétale satisfaisante en recouvrement et en diversité. En dehors des chantiers de réhabilitation des dunes, les plantations sont peu étendues.

Avantages

Les végétaux utilisés permettent de fixer les sédiments à leurs racines, ce qui limite la perte de sédiments provoquée par l'action du vent. Cette méthode peut être associée à d'autres techniques (voir les brise-vents ci-dessus).

Inconvénients / limites

Le nombre de végétaux utilisés est réduit, la principale espèce est l'Oyat en France (le Gourbet des aquitains), poacée (graminée) cespiteuse[32] dotée de fortes adaptations au milieu : très grande résistance à l'ensablement, tolérance au mitraillage par le sable et à une salinité modérée etc. Au Portugal, l'espèce étudiée est le lichen.
D'autres végétaux indigènes peuvent être plantés ou semés sur les dunes (Armoise, Immortelle…), cependant, c'est l'Agropyron (Agropyron junceum) qui a connu le plus grand développement au cours de la période récente en France. Cette graminée caractéristique des avant-dunes, très résistante à la salinité, est mieux adaptée que l'Oyat en pied de versant externe des cordons dunaires.

[32] Cespiteuse : qui forme à sa base une touffe compacte.

• Pratiques du contrôle souple modulées selon le contexte géographique et dynamique

Les stratégies d'intervention sont à adapter aux conditions locales. C'est principalement le budget sédimentaire des différents tronçons de côte qui impose des modalités d'intervention diversifiées :

- **dans les secteurs en recul fort et constant:** limitation de l'étalement des sables vers l'intérieur. Cette modération des processus permet aux communautés végétales de l'arrière-dune de s'adapter progressivement aux nouvelles conditions ;
- **dans les secteurs d'alternance de phases d'érosion marine et de phases de répit :** mode de fonctionnement fréquent sur la côte atlantique. Pendant les phases de répit de l'érosion marine, des travaux peuvent être engagés pour stocker une partie du sable au plus près de sa source et favoriser le développement des avant-dunes et d'un versant externe aérodynamique ;
- **dans les secteurs en accrétion nette** (peu fréquents) : de nouveaux cordons se développent à l'avant des anciennes dunes blanches[33] qui se stabilisent progressivement. Ces secteurs offrent une opportunité de laisser se développer sans entrave la dynamique éolienne. Sous réserve d'y empêcher le piétinement, les travaux de contrôle peuvent y être de très faible ampleur.

La bonne gestion des dunes ne peut être déconnectée de celle des plages : l'échange continu d'énergie et de matière entre ces deux compartiments est à la base de la vitalité, et de l'efficacité, du système plage/dune. La rupture de ces échanges entraîne la perte de tout ou partie des services rendus, d'où l'intérêt des plans de gestion des sédiments préconisés par le programme « Eurosion » (2004).

Tous les actes de gestion des plages doivent tenir compte des divers rôles des plages : accumulation sédimentaire en constant réajustement pour un bon amortissement de l'énergie incidente, lieu de vie d'une faune et d'une flore très originales etc. Le système estran et barre intertidale par exemple, joue un rôle important dans la dissipation de l'énergie des vagues le long de la côte. Intimement liées avec le haut de plage et la dune, les barres intertidales doivent être préservées si la protection naturelle contre l'érosion est exigée.
Les nettoyages de plage doivent éviter l'extraction de sédiments, leur impact peut être considérablement limité en développant des politiques de nettoyage sélectif qui laisse en place la matière organique.

Arcachon, Aquitaine (France)

[33] Dunes blanches : zone de forte accumulation sableuse (présence forte de végétaux), obstacle entre la plage et l'arrière-dune

• Cas d'étude d' Algarve, secteur de Quarteira – Cacela, côte sud du Portugal

Localisation et contexte naturel

Le secteur côtier de Quarteira – Cacela se situe sur la côte sud du Portugal entre le bord de mer de Quarteira à l'extrême ouest du secteur et la plage de Manta Rota à l'extrême est du secteur. Il s'étend sur 63 km le long de la côte, sur la majeure partie du système d'île barrière, Ria Formosa. Le secteur de l'arrière-plage change de l'ouest à l'extrême est : tout d'abord une falaise, suivie par un système dunaire des îles et péninsules de Ria Formosa. Le système de baies est situé derrière l'île barrière et comprend des marais salés, des estrans et un réseau complexe de chenaux naturels et partiellement dragués, tous inclus dans le domaine du Parc Naturel.

Le système d'îles barrières comprend cinq îles et deux péninsules, séparées par six passes : deux artificiellement repositionnées (Ancão et Fuseta), deux artificiellement ouvertes et maintenues par des structures côtières fixées (Faro-Olhão et Tavira) et deux passes naturelles (Armona et Lacém).

Désordres observés

Une partie de la côte située sur la partie ouest du secteur est soumise au processus d'érosion depuis plusieurs décennies. Ce phénomène s'est accéléré avec la construction des jetées de Vilamoura marine, celles du port de pêche à l'est et le champ d'épis protégeant Quarteira. Cette série d'ouvrages « durs » transversaux au rivage interrompt le transport sédimentaire, causant un appauvrissement sédimentaire vers l'est de Quarteira et par conséquent le recul des falaises rocheuses. Toujours à l'est de Quarteira, un autre site est concerné par une forte érosion locale en raison de l'impact négatif des ouvrages anthropiques : la plage de Faro. En effet, la construction d'infrastructures avancées et la limitation conséquente de l'expansion naturelle du profil de plage a causé la diminution de la largeur de la plage, le recul du trait de côte et des épisodes fréquents de débordements de la dune pendant les tempêtes maritimes. Dans la partie est du secteur, qui comprend l'est du système d'îles barrières, les endroits majeurs d'érosion sont localisés vers l'est des jetées qui ont été construites pour fixer les deux passes Faro-Olhão et Tavira. Le processus naturel de transport sédimentaire associé à l'appauvrissement des dépôts de sédiments cause l'affaiblissement du front de dune. Les récents évènements de tempêtes maritimes provoquent ainsi des épisodes de débordements et parfois des brèches du front de dune.

Forte Novo – rechargement de l'estran Garrão, 2010 (Portugal)

Port de pêche de Quarteira et épis, vers l'est de Vilamoura marine (Portugal)

Pressions et actions de gestion

La côte sud du Portugal est un secteur phare pour le tourisme local et l'économie du pays. C'est pourquoi le recul des falaises et des dunes, la diminution de la largeur de la plage et parfois la destruction d'infrastructures, nécessitent des mesures de protection et de gestion côtière par les autorités locales. Bien que la stratégie actuelle soit de fixer la position du trait de côte (en limitant le recul des falaises, la dégradation et le débordement des dunes), dans certains secteurs à enjeux significatifs (de forte valeur naturelle ou économique, comme des lieux de vacances), il a été décidé de laisser faire le recul du trait de côte. Cette décision fut prise malgré la forte pression exercée par la population locale qui refuse toute délocalisation (dans de nombreux cas, les habitations s'étendent jusqu'aux dunes) et qui exige une protection de la côte par l'intermédiaire d'ouvrages lourds.

Afin de faire face à cette pression, les autorités locales ont mis en œuvre des mesures de protection et de réhabilitation de la plage. Les interventions récentes de protection sont basées sur le rechargement des plages devant les falaises ou également par la réhabilitation du système dunaire des îles barrières. Les sources sédimentaires disponibles sont des stocks sous-marins et les dépôts de dragage provenant des baies. D'autres mesures de gestion et de réhabilitation des dunes sont mises en œuvre telle que les plantations de végétaux.

> Les falaises

Afin de réduire les instabilités des falaises rocheuses vives, deux types d'actions sont possibles (méthodes combinées).
Le premier mode d'action concerne **la protection du pied de la falaise** par des parades géotechniques limitant l'érosion marine et stabilisant le pied de talus (ex : cordons d'enrochement). Les parades géotechniques et méthodes peuvent être passives de manière générale (elles n'empêchent pas l'instabilité mais cherchent à éviter qu'elle atteigne l'enjeu ou tout du moins à en limiter l'impact sur celui-ci) ou actives (elles empêchent directement le mouvement de se produire ou le provoquent de manière préventive).
L'autre type de solution consiste en **une stabilisation du versant** contre les actions continentales. Pour ce faire, il est possible de mettre en œuvre des parades lourdes ou des solutions plus « douces » (ex : végétalisation). Les méthodes de stabilisation de falaise, mises en œuvre sur le versant, prennent en compte le type d'instabilité (caractérisation des événements par leurs volumes, leurs fréquences, les matériaux concernés « rocheux » ou «meubles»,…), la nature des enjeux à protéger, les conditions d'accès, la géométrie de la falaise, le régime hydraulique et les forces mécaniques appliquées à la falaise.

Il est important de noter que la stabilisation des falaises s'oppose à leur évolution naturelle qui est de reculer (par érosion progressive ou mouvements de terrain). De plus, ces désordres peuvent permettre soit la création d'un pied stabilisateur de la falaise, soit le remblayage par l'océan qui permet le rechargement des plages aux alentours. Il est donc préférable de traiter uniquement les falaises où les enjeux socio-économiques sont importants, ne serait-ce que pour limiter au maximum les perturbations du transit sédimentaire. Les parades géotechniques classiquement utilisées ne sont pas des solutions douces proprement dites, mais leur utilisation limitée et leur combinaison avec les méthodes douces (végétalisation) permet de limiter les impacts négatifs.
Il faut également savoir qu'une méthode efficace n'est pas définie sans études géotechniques détaillées (causes d'instabilité d'une falaise) et sans analyses préalables (contraintes financières, stratégie la mieux adaptée en termes de sécurité et d'études coût/efficacité, impacts environnementaux). De même, l'application d'une seule méthode ne suffit souvent pas, il faut généralement avoir recours à la combinaison de plusieurs parades pour stabiliser une falaise.

Falaises de Moher (Irlande)

• Végétalisation

Description

Les rôles de la végétation dans la stabilisation des milieux rocheux sont reconnus et multiples. La végétalisation est bien adaptée aux falaises meubles.
Gérer la végétation en place, exploiter son potentiel de reconquête dans les espaces dégradés, sont souvent suffisants pour cicatriser les altérations du milieu (ampleur des instabilités modérée et fréquence pas trop forte) et réduire l'érosion régressive. La plantation de végétaux se fait également sur la falaise afin de limiter les risques de départ d'instabilités (les racines peuvent retenir les terrains). Cela peut passer par la création de banquettes reboisées (manuelles, à l'engin mécanique, etc.), de fossés d'évacuation des eaux, etc.
Dans les faciès mobiles les racines de plantes très spécialisées (espèces à croissance rapide et enracinement profond) agrippent le substrat et préviennent les mouvements rocheux; dans les secteurs plus stables le tapis végétal continu génère un profil pédologique qui fonctionne comme une sorte de « peau » protectrice.
Les végétaux permettent aussi de freiner la vitesse du ruissellement des eaux continentales et favorisent ainsi l'accumulation des sédiments fins. Ils permettent également de limiter les phénomènes érosifs et les infiltrations en faveur de l'évapotranspiration[34].
Lorsque des ouvrages de stabilisation sont nécessaires, le génie écologique permet de limiter les interventions en déployant des techniques dont les coûts sont sans commune mesure avec ceux des actions de génie civil nécessaires pour résoudre des situations plus dégradées.
Enfin, ces techniques douces dont l'impact paysager et environnemental est généralement faible, bénéficie d'une image très positive auprès des usagers du littoral.

Avantages

Ce procédé est économique. Il présente l'avantage d'être « naturel », cependant, il faut faire attention au type de végétation utilisée (pas de plante invasive, privilégier les essences locales) car il dépend du sol, de la surface de la roche et du site étudié.

Inconvénients / limites

Cette technique douce est uniquement réalisable sur des petites parcelles. C'est une solution non pérenne (remplacement des arbres morts ou détruits). Il faut également entretenir les fossés éventuels. La croissance du système racinaire peut provoquer un effet balancier (entraîne des fracturations dans la roche, ce qui peut provoquer des déstabilisations).

[34] Evapotranspiration : transfert d'humidité vers l'atmosphère par évaporation des plantes.

• Rechargement des cordons littoraux (sable/galets) en pied de falaise

Description

Les rechargements de cordons littoraux ont pour objectif de compenser le déficit sédimentaire du littoral dû à l'érosion marine naturelle et/ou aux impacts anthropiques (présence d'ouvrages lourds).
Le rechargement des cordons littoraux en pied de falaise s'opère suivant les mêmes règles que celles des plages sableuses. Il concerne généralement des estrans dont le transit littoral est insuffisant.

Avantages

Cette méthode, dont l'impact paysager est peu significatif, permet de limiter l'érosion du pied de la falaise contre les actions marines (réduction de l'efficacité de l'action des houles) et d'avoir un effet stabilisateur du pied de la falaise.

Inconvénients / limites

Les inconvénients et les remarques restent les mêmes que celles concernant les plages sableuses (voir p.26).

• Reprofilage de la falaise (parade géotechnique)

Description

C'est une méthode adaptée aux falaises meubles.
Des travaux de terrassement, de reprofilage sont susceptibles d'améliorer les conditions de stabilité d'une falaise ; cependant, cela nécessite une bonne connaissance de la structure géologique et des conditions d'infiltration de l'eau. Cette méthode consiste à améliorer la stabilité générale de la falaise en lui donnant une géométrie (pente) plus adéquate (abaissement de la pente générale) et en éliminant éventuellement les blocs instables dangereux. Dans certains cas, des terrasses (redans[35] ou gradins) peuvent être crées à divers niveaux (cf. figure 13).

Avantages

Le coût des travaux reste peu élevé si le terrassement n'est pas important. Les études de projet sont relativement simples. C'est une solution durable. Il permet de traiter des zones sur lesquelles les volumes en jeu sont potentiellement importants.

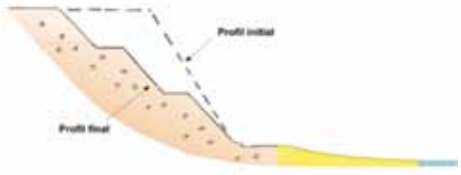


Figure 13 : Schéma montrant le reprofilage d'une falaise

Inconvénients / limites

La technique peut induire un recul plus ou moins important en sommet de falaise, donc cela nécessite à la fois l'absence de zones urbaines ou enjeux (proche de la bordure de la falaise) et une maîtrise foncière. Ce procédé peut perturber la biodiversité littorale (destruction des habitats principalement). Il faut un espace suffisant entre le pied et le sommet de la falaise (non adapté aux falaises rocheuses car dures). Cette technique ne peut être appliquée à tous types de falaises (notamment dans le cas de grands versants fortement inclinés). L'impact visuel est plus ou moins important en fonction des travaux.

[35] Redans : ressauts élaborés de distance en distance.

• Systèmes de drainage (parade géotechnique)

Le drainage consiste à éliminer les ruissellements et infiltrations superficielles au droit de la falaise ou à permettre un rabattement de la nappe.
Il existe différents procédés, certains sont mis en place pour collecter les ruissellements, limiter autant que possible les infiltrations et ainsi maîtriser les nappes superficielles ; d'autres s'appuient sur la mise en place de drains profonds.

Système de drainage par rigole drainante

Description
Le système par rigole drainante (bitume, film plastique etc.) consiste à recueillir et évacuer les eaux de ruissellement avant infiltration. Ce système entraîne la création de fossés en sommet de falaise et/ou dans la pente de la falaise. Cette méthode est adaptée aux phénomènes de volumes assez limités, d'instabilités rocheuses ou glissements favorisés par écoulements superficiels.

Avantages
Cette méthode a l'avantage d'être peu onéreuse et de ralentir la dégradation de la roche.

Inconvénients / limites
L'inconvénient de cette méthode sur un versant instable est que ce dispositif reste fragile (système par rigole) et nécessite un entretien continu. L'impact paysager dépend du type de matériau utilisé pour les rigoles mais également de la répartition de celles-ci sur l'ensemble de la falaise.

Système de drainage par drains subhorizontaux

Description
Certaines formations contiennent des nappes aquifères qui jouent un rôle important dans la dégradation de la roche. Des méthodes permettent d'intervenir sur ces nappes par captage profond.
Dans le cas de milieux perméables, il s'agit des drains subhorizontaux (cf. figure 14). Ce sont des tubes de petit diamètre (métal ou plastique) inclinés vers l'extérieur afin de permettre l'écoulement de l'eau recueillie au sein du terrain. La mise en place se fait depuis la surface du versant par forage et introduction d'un tubage drainant ou par tubes métalliques perforés. Chaque nappe comporte un ou plusieurs drains.

Avantages
L'impact paysager est faible. Les études de projet sont généralement simples mais il faut avoir recours à des entreprises spécialisées. C'est une solution durable. Ce système est bien adapté aux sites de glissements d'ampleur conséquente, afin d'éviter « à moindre frais » d'avoir recours à des techniques plus «lourdes» (inclusions rigides).

Inconvénients / limites
L'inconvénient de ce type de procédé est le risque de colmatage à plus ou moins long terme des drains, d'où la nécessité d'un entretien régulier (méthode par soufflage). Cette méthode permet d'espérer un ralentissement sensible de l'activité, pas nécessairement de la stopper suivant le site.

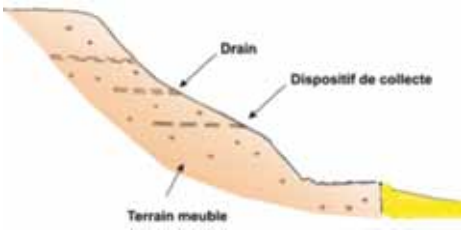


Figure 14 : Schéma montrant le procédé du système de drainage par drains subhorizontaux

• Ancrages et boulonnage (parade géotechnique)

Description

Ces techniques améliorent la stabilité de falaise de type meuble vis-à-vis de masses rocheuses localisées et de volumes relativement limités. Pas adapté « en tant que tels » contre les glissements, sauf si la paroi est clouée ou stabilisée selon une méthode analogue. Ces méthodes sont surtout utilisées pour la protection d'enjeux en aval et s'il y a des instabilités en tête de paroi. Le principe est d'ancrer les éléments instables dans la roche saine en arrière par mise en place de boulons ou de tirants (cf. figure 15).

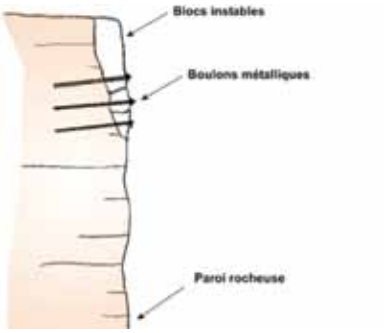


Figure 15 : Schéma montrant le procédé des ancrages par boulons métalliques

Avantages

C'est une solution durable mais qui nécessite des inspections régulières pour vérifier l'état des inclusions. Le traitement de surplombs est possible.

Inconvénients / limites

Cette méthode n'est adaptée que pour des stabilisations ponctuelles et pour des volumes assez limités. Le domaine d'application de cette technique concerne uniquement les éboulements petits à moyens ainsi que les chutes de blocs moyens à gros. La mise en œuvre peut être complexe et donc coûteuse. Cette méthode nécessite également un entretien régulier. Cette technique ne s'applique pas à tous les types de falaises.

• Géogrille renforcée (parade géotechnique)

Description

Ce procédé permet la stabilisation superficielle du talus par une grille polymère renforcée. Celle-ci est fixée au talus par des ancrages courts. L'intérêt majeur de cette technique consiste à éviter de lancer des travaux lourds (cf. figure 16). Le domaine d'application est essentiellement de type escarpement « meuble » de hauteur assez limitée.

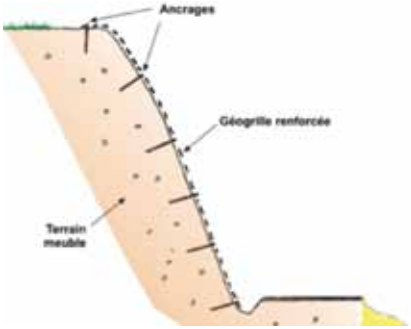


Figure 16 : Schéma montrant le procédé d'une géogrille renforcée

Avantages

Cette méthode favorise la végétalisation et constitue une alternative à des techniques plus lourdes et ce à coût restreint. Les études de projet sont simples mais il faut cependant avoir recours à des entreprises spécialisées de génie civil. C'est une solution durable.

Inconvénients / limites

Cette solution n'est pas adaptée aux glissements profonds, seulement à des petits glissements superficiels. Elle nécessite une surveillance périodique afin de vérifier l'état du système. Les gros blocs instables doivent être supprimés.

• Filet plaqué (parade géotechnique)

Description

Cette technique permet surtout de maintenir en place les blocs instables. Ces méthodes sont surtout utilisées pour la protection d'enjeux en aval. Les filets ou grillages plaqués à la paroi par ancrages courts, permettent d'emmailloter les éléments instables afin d'empêcher des éboulements. Seules les instabilités rocheuses de volume assez restreint sont traitées.

Avantages

Cette solution durable permet de bien traiter certains problèmes de surplombs rocheux. Le plaquage d'un compartiment peut contribuer à éviter la déstabilisation d'un pan de falaise plus conséquent.

Inconvénients / limites

Les études préalables peuvent être complexes, d'où un recours nécessaire aux entreprises spécialisées. Des inspections régulières sont recommandées. L'impact paysager reste fort malgré l'intervention localisée. Il faut éviter d'avoir des problèmes d'instabilités massives.

• Cordons d'enrochements

Description
Il s'agit d'enrochements percolés au béton ou non en pied de falaise, à la base du versant. Ce procédé a également comme conséquence d'atténuer l'érosion par l'action marine en pied de falaise (cf. figure 17). Cette méthode se rapproche de la méthode de rechargement des cordons littoraux. Elle permet cependant de reconstituer une butée stabilisatrice en pied de falaise.

Avantages
Les études de projets restent simples et il faut avoir recours à des entreprises de génie civil classiques. C'est une méthode durable et peu onéreuse. Cependant, la simplicité des études et les coûts peuvent varier en fonction du site.

Inconvénients / limites
Cette technique s'oppose le plus souvent au développement de glissements plans peu profonds dans des versants à inclinaison moyenne et peut être également utilisée dans le cas de glissements d'ampleur assez limitée en partie inférieure de falaise. Elle n'est donc pas adaptée aux instabilités en partie haute de falaise. Les enrochements doivent être dimensionnés par rapport aux conditions de tempête. Cette méthode peut stopper les apports sédimentaires dus au recul de la falaise. Une surveillance périodique est nécessaire. L'impact paysager est relativement fort et sauf intervention limitée dans l'espace, cette technique doit être considérée comme une méthode « lourde » (cf. discussion entre méthode « lourde » et « douce » p. 21).

• Contrefort béton ou maçonné (au droit des zones rocheuses sous-cavées) (parade géotechnique)

Description
Il s'agit d'un soutènement en béton armé ou maçonné au droit des zones rocheuses sous-cavées qui peuvent à terme provoquer des instabilités (cf. figure 17). Ce procédé peut être mis en place dans la falaise (sous-cavage par érosion différentielle) ou en pied (érosion marine).

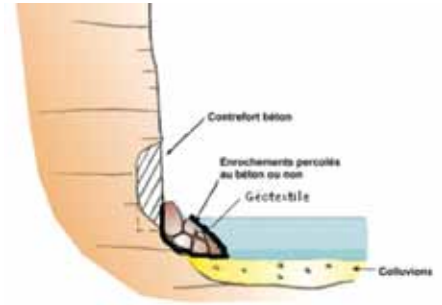


Figure 17 : Schéma montrant la combinaison de deux parades géotechniques : enrochements et contrefort béton

Avantages
L'intervention reste simple en pied de falaise mais délicate dans la pente. Cependant dans certains cas, il convient d'avoir recours à des entreprises spécialisées. Cette technique est durable.

Inconvénients / limites
Non adaptée aux instabilités meubles. Adaptée aux compartiments rocheux uniquement petits à moyens. L'impact paysager reste moyen à fort malgré l'intervention localisée et l'entretien doit être régulier.

Les techniques de stabilisation, les coûts et les entretiens restent élevés d'où la priorité aux falaises à enjeux importants comme les littoraux urbanisés. Ces techniques sont employées uniquement pour des sites d'intérêt exceptionnel (disparition probable et délocalisation impossible).
Les falaises, de par leur hauteur, servent de barrières naturelles contre les risques de submersion marine. D'autre part, le platier rocheux, en dissipant l'énergie mécanique des vagues, permet de limiter l'érosion en pied de versant.
Le sort des falaises étant de reculer, les méthodes par recul stratégique ou tout simplement « laisser faire » sont à privilégier.

• Cas d'études

Les cas d'études suivants se situent en France, le but étant de caractériser les aléas et solutions « douces » envisagées de chaque grand type de falaise de l'arc atlantique. C'est ainsi que pour les roches meubles, les falaises crayeuses et marneuses ont été choisies, tandis que pour les roches dures, les falaises à flysch et calcaires ont été privilégiées.

Côte d'Albâtre, Haute Normandie (France)
Falaise crayeuse

Biarritz, Aquitaine (France)
Falaise marneuse

Saint-Jean-de-Luz, côte basque, Aquitaine (France)
Falaise à flysch et altérites

Pointe Saint Martin, Biarritz, Aquitaine (France)
Falaise calcaire

Morphologie de types de falaises rencontrées sur l'arc atlantique	Types d'aléas rencontrés et solutions	Exemple de localisation et enjeux rencontrés
Falaise à craie blanche (bordée de cordons de galets)		
	Aléa : 1 Solution : K et possibilité pour B	Côte d'Albâtre (Haute Normandie, France) Enjeux socio-économiques : zone urbaine moyenne (plusieurs habitations proches bordure de falaise)
Falaise marneuse (présence d'alluvions au sommet)		
	Aléa : 2b Solutions : H et J	Plage de Marbella (Biarritz, France) Enjeux socio-économiques : zone urbaine moyenne (proche camping et tourisme de plage)
Falaise à flysch marno-calcaire et altérites		
	Aléa : 2b Solutions : aucune mais possibilité de placer des panneaux préventifs, de mettre des enrochements, etc.	Falaise de la pile d'Assiettes (Saint-Jean-de-Luz, la côte basque, France) Enjeux socio-économiques : aménagement d'un parcours sportif
Falaise calcaire (alternance bancs calcaires et marnes gréseuses, présence d'alluvions au sommet)		
	Aléa : 1b Solution : 1	Pointe Saint Martin (Biarritz, France) Enjeux socio-économiques : zone urbaine faible (jardin public, phare)

Aléas répertoriés / désordres liés à l'aléa érosion

1/ Éboulements / écroulements / chutes de blocs

2/ Glissements de terrain

a. Glissements bancs sur bancs

b. Glissements circulaires

Parades géotechniques/solutions douces et autres

a. Végétalisation

b. Rechargement des cordons de galets/sable

c. Reprofilage / terrassement

d. Drains subhorizontaux

e. Ancrages et boulonnage

f. Géogrille renforcée

g. Filets plaqués

h. Cordons d'enrochements

i. Contrefort béton ou maçonné

j. Panneaux préventifs (gestion fréquentive)

k. Recul stratégique (enjeux humains, socio-économiques et environnementaux)

Solution adaptée en cas d'aléas

Figures 18 : d'après Genna et al., 2004

Comté de Mayo (Irlande)

> Les marais maritimes

Les marais maritimes en tant qu'infrastructures naturelles, présentent une contradiction forte dans leur rôle de protection des côtes : la lutte contre l'érosion sur les franges littorales se fait par la présence d'obstacles à la houle (vasières des marais maritimes dissipent l'énergie des houles), tandis que la protection de la biodiversité passe par la préservation des conditions hydrodynamiques (énergie des houles, etc.) et la limitation du colmatage (accumulations sédimentaires importants, notamment de vase et sable fin).
La majeure partie de ces sites a été protégée par des digues à la mer cloisonnant des marais endigués souvent utilisés par l'agriculture. La problématique principale reste l'entretien de ces digues face aux fortes tempêtes et la gestion de ces ouvrages par rapport à la remontée actuelle du niveau marin.
L'élévation du niveau de la mer peut entraîner (de manière indirecte) de multiples conséquences telles qu'une modification de direction des vagues et des courants qui peut avoir des conséquences géomorphologiques, des modifications hydrogéologiques des écoulements de la nappe phréatique. Ces conséquences sont sensibles dans les régions de polders et de marais. Ces derniers présentent de nombreux enjeux écologiques et socio-économiques, et contribuent à protéger les milieux urbains des submersions marines. Ainsi, plusieurs méthodes de défense lourdes sont envisagées selon les cas :

- élévation et renforcement des digues de mer et restauration des digues dormantes ;
- réaménagement des ouvrages (écoulements à la mer) ;
- pompage garantissant le drainage.

Cependant, ces méthodes contrôlables restent coûteuses. De plus, les zones humides présentent un intérêt écologique majeur pour le maintien de nombreuses espèces animales, servent de barrière naturelle passive contre les submersions marines et de filtre naturel dans le transfert des eaux continentales (parfois polluées) vers le milieu marin. C'est pour ces raisons que la méthode de retour partiel ou total à la mer des terres endiguées (dépoldérisation) ainsi que la reconstitution d'étendues submersibles est de plus en plus envisagée. Les solutions douces de protection de ces littoraux s'orientent donc plus vers une approche environnementale à travers une gestion durable des différents milieux naturels s'étageant de l'estran aux marais endigués.

• La dépoldérisation

Description

La technique de dépoldérisation varie en fonction de l'objectif à atteindre. Il existe de nombreuses alternatives à la destruction totale d'une digue. Ce phénomène est de plus en plus à prendre en considération de nos jours. Dépoldériser modifie le milieu car il permet de resaliniser ce dernier et permet également de reconstituer l'écosystème maritime (détruit par l'endiguement antérieur), slikke et schorre, ce qui permet la création de nouveaux lieux d'accueil pour l'avifaune, de favoriser la circulation hydraulique et le drainage des eaux, l'élévation des zones de schorres utiles à la lutte contre l'érosion marine et les submersions et l'augmentation de la biodiversité sur les différents faciès de ces milieux. Pour exemple, le schorre permet, grâce à sa végétation halophile, l'accumulation de sédiments apportés par la mer indispensable à son développement. Ce phénomène entraine donc une élévation de la topographie permettant ainsi le ralentissement de l'emprise marine.

Les dépoldérisations englobent quatre grands objectifs (Goldner - Gianella, 2008) :

- environnemental (objectif souvent combiné à d'autres) : dépoldérisation de polders abandonnés (définitivement ou à long terme) dans un contexte d'agriculture littorale fragile ;
- juridique : dépoldérisation pour compenser les surfaces de marais maritimes perdues à cause de travaux (construction de digues par exemple) ;
- défensif : dépoldérisation afin de recréer des marais qui ont un rôle de protection face à la mer (nouvelle technique d'adaptation à l'élévation du niveau de la mer) ;
- touristique : dépoldérisation pour favoriser le développement local misant sur l'intérêt environnemental et paysager.

Une dépoldérisation réussie passe avant tout par une étude « des paramètres physiques extérieurs et intérieurs aux sites qu'on souhaite rendre à la mer » mais également, par une recherche sur l'aspect socio-économique. Cela doit être suivi par des observations (topobathymétrie, écosystème, risque, etc.).

Avantages

Permettre à moindre coût une amélioration de l'état environnemental des écosystèmes, et une réponse « douce » à l'aléa submersion marine.

Inconvénients / limites

Demande une gestion fine des niveaux d'eaux dans les zones ennoyées. Action limitée sur l'aléa submersion. Nécessite d'importantes concertations avec les usagers et éventuels riverains situés en retrait.

• La restauration des marais maritimes

Description
La restauration des marais permet d'assurer une protection efficace des défenses intérieures contre la mer. L'énergie des vagues est amortie lorsqu'elle traverse une étendue de schorres. Cette dernière permet de limiter l'érosion et donc de limiter les submersions marines (accumulation des sédiments). Cette restauration passe donc par une gestion de la fréquentation touristique et une limitation des activités de pêche, de chasse, etc. afin de permettre le bon développement de la végétation sur ces zones.

Avantages
La restauration des marais permet une amélioration à moindre coût de l'état environnemental des écosystèmes et une réponse « douce » aux aléas submersion marine et érosion. Elle permet également d'améliorer la qualité de l'eau. Cette méthode présente aussi l'avantage d'augmenter la biodiversité et la production de matières organiques qui alimentent ensuite le milieu marin littoral.

Inconvénients / limites
Action limitée sur l'aléa submersion.

Depuis une trentaine d'années s'est opérée une prise de conscience générale de la valeur écologique, patrimoniale et paysagère de ces milieux, amenant progressivement à une gestion collective orientée vers un développement durable, alliant préservation des écosystèmes et maintien des activités traditionnelles.

• Cas d'étude : les estuaires d'Essex, Angleterre (Eurosion, 2004)

Localisation et contexte naturel
Le Comté d'Essex se trouve dans le sud-est de l'Angleterre. La ligne de côte de sa frange sud-est est découpée, mais basse, en raison de la présence de différents estuaires, du Stour au nord à la Tamise au sud. La côte est une grande source de richesse avec d'importantes activités économiques et industrielles, mais aussi de vastes zones de marais salants, des vasières, des prés salés, etc. La plupart de ces zones sont protégées des submersions par des remblais de terre, des digues et murs en béton. L'espace compris entre la digue et la mer est occupé par des marais salés qui sont inondés lors des marées hautes et qui constituent une protection contre l'attaque des vagues. L'Essex est une des régions d'Angleterre les plus menacées par les inondations de la mer. Dans toute la région, plus de 1,8 millions de résidences et 180 000 propriétés commerciales sont en danger ; 5 millions de personnes et 1,4 millions d'hectares de terres cultivables sont potentiellement concernées. La valeur totale des biens menacés est estimée à plus de 350 billions Euro. Des signes d'érosion sont présents sur tous les estuaires de l'Angleterre et une baisse générale des niveaux des plages est supposée. Ce phénomène est encore plus vraisemblable dans les marais maritimes : au nord, la cause serait attribuée à la diminution des apports sédimentaires venant du nord, déviés vers le large par les infrastructures du port de Harwich. La perte de marais maritimes dans le sud-est de l'Angleterre est causée par la poldérisation et l'utilisation pour l'agriculture.

Prés salés de Grove Country Park (Angleterre)

En plus de son exposition aux processus d'érosion côtière (naturelle ou provoquée par l'homme), l'Essex doit faire face à une nouvelle menace : l'élévation du niveau de la mer. Une conséquence majeure est la diminution des marais maritimes, qui offrent un haut niveau de protection en absorbant l'énergie des vagues pendant les tempêtes. Certaines évaluations suggèrent que sans marais maritime à l'avant, une digue doit être quatre fois plus haute et pourrait coûter dix fois plus cher qu'une digue se trouvant face à un marais maritime large de 80 mètres.

Les stratégies actuelles de gestion côtière

La perte de certains habitats, l'évolution dans la perception des conséquences de l'élévation du niveau de mer ainsi que le coût pour maintenir des défenses dures ont contribué à passer d'une politique de « protection à tout prix » à une politique de « repli programmé » qui admet que des terres se perdront dans la mer. Ceci est réalisé en combinaison avec l'utilisation de solutions plus « douces » (rechargement des plages). Cependant, cela n'est pas acquis dans tous les secteurs à protéger. En effet, il y a plusieurs zones où la protection est souhaitable et rentable en raison des enjeux à proximité. L'identification des méthodes les plus aptes à gérer le risque le long des côtes pour les 50 années à venir a été réalisée par les Plans de Gestion de la Ligne de Côte (PGLC) au niveau de chaque cellule sédimentaire, à l'initiative du Département pour l'Environnement, l'Alimentation et les Affaires Rurales (DEFRA) et de l'Agence pour l'Environnement. Il apparaît clairement dans l'analyse de la situation de l'Essex qu'une élévation du niveau de la mer impose de sévères restrictions quant à la capacité de choisir l'option « Maintenir la ligne de côte » à moyen ou long terme. Les inondations récentes en Europe suggèrent que, quelle que soit la somme que l'on dépensera pour l'édification et l'entretien des structures de protection côtière, des événements extrêmes vaincront toujours ces défenses. Il est trop tôt pour savoir si le repli programmé à long terme de la côte pourra garantir une approche plus soutenable et plus rentable de la défense des côtes. Cependant, la restauration des vasières et des marais salés est possible, et des bénéfices considérables en seront tirés pour la conservation de l'environnement. L'objectif principal est de préserver les ressources naturelles de la côte, aussi bien en mer que sur terre, afin de continuer à soutenir l'économie liée à cette zone (tourisme, activités maritimes, agriculture…), la faune sauvage et le développement durable des populations côtières et des zones naturelles.

• Cas d'étude : un complexe dunaire comme protection naturelle – une terre source de dilemme pour le comté de Mayo, Irlande

Un village côtier

Louisburgh est un village rural (pop. 314) situé à 1km des côtes. Il s'attend à doubler de taille d'ici 2022. L'économie locale est supportée par une petite usine, avec quelques activités agricoles, commerciales et de distribution. La plupart des habitants du village se rendent à l'extérieur du secteur pour travailler. Les maisons de vacances s'ajoutent aux activités économiques pendant les mois d'été. Il est prévu que le tourisme soit omniprésent dans les futurs développements de ce secteur.

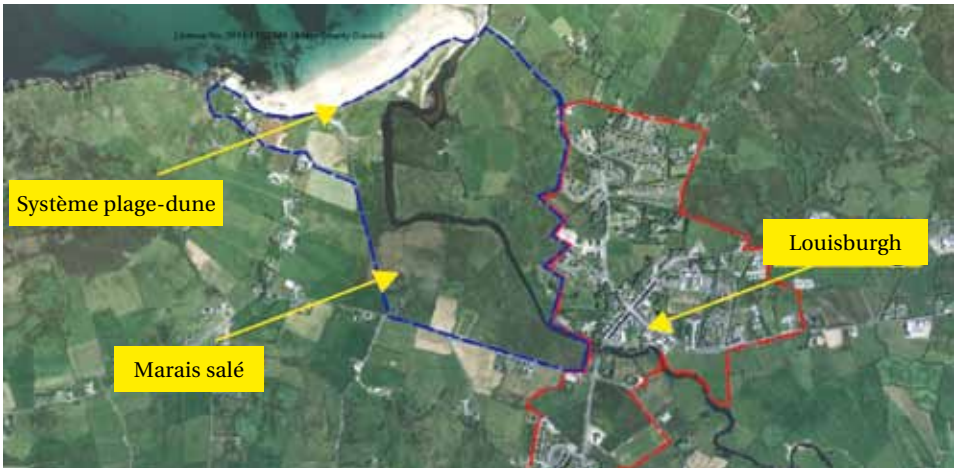
Un environnement côtier pour protection

Bien que l'influence de la marée s'étende du haut de la rivière Bunowen au village, l'inondation n'est pas actuellement considérée comme un problème. Cette situation, cependant, pourrait changer si l'environnement côtier était altéré. Le village est protégé sur son côté de bord de mer par un complexe dunaire côtier, avec un marais salé occupant la terre basse au milieu. Pendant les tempêtes, cet environnement offre un amortisseur aux niveaux élevés des eaux atteignant Louisburg. Tandis que des récents efforts afin de gérer et stabiliser le complexe dunaire ont été retenus tout en conservant la biodiversité, les décideurs pensent qu'il serait prudent d'inclure cette terre dans les plans de développement futur – en raison de sa fonction comme protection naturelle contre les submersions marines. Malheureusement, ceci peut être contre-productif.

Le dilemme des décideurs côtiers

Scénario 1 – Si la terre **n'est pas** incluse dans le plan de secteur local (frontière rouge sur la carte): le secteur est actuellement présenté comme Secteur d'Héritage Naturel. Cela lui permettrait d'offrir un certain degré de protection lors du développement de la ville, mais ne garantissant pas la protection requise. Ce scénario pourrait consolider le développement autour du cœur de la ville.

Scénario 2 – Si elle **est** incluse dans le plan de secteur local (incluant la frontière bleue) : ceci pourrait offrir la reconnaissance du rôle du système dunaire et du marais qui permettrait de protéger Louisburgh des submersions marines. Il y a cependant un danger à ce que le secteur soit divisé en zones inappropriées. En effet, bien que les décideurs proposent le zonage des terres dans le plan qu'ils produisent, la décision finale sur le zonage est faite par des représentants élus – ouvrant la possibilité pour les politiques locales de jouer un rôle dans le zonage de la terre.



Carte de localisation des différents systèmes

> Tableau de synthèse des solutions

Type de littoral	Solutions "douces"	Avantages (+)	Limites (-) / Entretien
Plage	Les ouvrages en géotextiles	maintien du sable derrière l'ouvrage, réversible, structure souple, perméable, résistante aux UV, favorise l'installation de la végétation	entretien régulier, impact sédimentaire équivalent aux ouvrages lourds (épis, brise-lames), limitation de la circulation de l'eau, déficit sédimentaire en zones non protégées
	Les récifs artificiels	diminution de l'énergie des vagues, ne dénature pas le paysage, enrichissement de la biodiversité, maintien de l'agitation de l'eau	ne convient pas au rivage à fort marnage, suivi régulier
	Les pieux hydrauliques	dispersion de la houle, répartition équivalente du sable retenu sur chaque côté (pieux perméables)	obstacles pour les promeneurs, risque pour la navigation (si détruit par l'érosion), en expérimentation d'où un suivi régulier, efficacité limitée selon le site
	Le drainage des plages	abaisse le toit de la nappe aquifère donc réduit l'érosion, impact paysager nul, apprécié pour les activités récréatives, coût amorti en recyclant l'eau	limité à certains types de plage, entretien régulier du système
	Le by-passing	rétablit le blocage de la dérive littorale, systèmes fixes ou mobiles	le site doit être facile d'accès et proche de la zone à traiter, entretien régulier, coûts variables en fonction de type de système, perturbation de la biodiversité littorale
	L'alimentation artificielle des plages en sédiments (rechargement des plages)	compense le déséquilibre du littoral, impact paysager nul, espace récréatif suffisant, limite les submersions, non néfaste pour les plages avoisinantes	rechargements réguliers, nombreuses études préalables, entretien régulier, côuts des entretiens peuvent être importants, prélèvement des matériaux doit être proche du site
Dune	Les couvertures de débris végétaux	accumulation des sédiments, limite l'érosion éolienne, limite les dommages liés au piétinement, développement des communautés végétales, solution durable	extension des couvertures limitée, surveillance périodique
	Les brise-vents	favorisent le dépôt sédimentaire transporté par le vent, mise en place simple, peut être combiné à d'autres méthodes, biodégradable, solution durable	à éviter dans des zones trop fréquentées, à forte pente, secteurs chaotiques, etc, surveillance périodique, matériaux synthétiques polluants (si détruit par érosion)
	Les plantations	principale espèce : Oyat, très résistante à l'ensablement, tolérance au mitraillage, salinité modérée, etc et coût amorti, solution durable	dunes régulièrement entretenues, fréquentation non excessive

Type de littoral	Solutions "douces"	Avantages (+)	Limites (-) / Entretien
Falaise	Végétalisation	réduit l'érosion des sols, impact paysager faible et peu coûteux (coût amorti)	applicable sur des petites parcelles, végétaux non invasifs, entretien fréquent, système racinaire peut provoquer un effet balancier, solution non pérenne
	Rechargement des cordons littoraux	compense le déséquilibre du littoral, impact paysager faible, stabilisation du pied de talus	coûteux en mise en place et suivi, suivi et entretien réguliers, prélèvement des matériaux doit être proche du site
	Reprofilage	améliore la stabilité de la falaise meuble, étude simple, solution durable	pas de zones urbaines ou enjeux en bordure de falaise et maîtrise foncière, non adapté sur les falaises rocheuses, surveillance périodique, coûts peuvent être élevés en fonction de l'importance du terrassement (impact paysager) et perturbation de la biodiversité littorale
	Système de drainage par rigole drainante	peu onéreux, permet de ralentir la dégradation de la roche	dispositif fragile, entretien continu, impact paysager dépend du matériel utilisé et de la répartition des rigoles sur la falaise
	Système de drainage par drains subhorizontaux	évacue les eaux continentales, études de projet simples, bien adapté aux sites de glissements d'ampleur conséquente, solution durable	risque de colmatage, entretien régulier, permet d'espérer un ralentissement sensible de l'activité, pas nécessairement de la stopper suivant le site
	Ancrages et boulonnage	améliore la stabilité de la falaise, solution durable, traitement de surplombs est possible	technique complexe, entretien régulier, technique impose des coûts élevés, ne peut être appliqués à tous types de falaise (notamment rocheuse), adapté pour stabilisations ponctuelles et volumes limités
	Géogrille renforcée	améliore la stabilité superficielle de la falaise, favorise le développement de la végétation, études de projet simples, solution durable	non adapté aux glissements profonds, seulement aux glissements superficiels, surveillance périodique, suppression des gros blocs
	Filet plaqué	maintien des blocs instables, problèmes de surplombs rocheux bien traités	études complexes et des entreprises spécialisées peuvent intervenir d'où un coût important, entretien régulier, impact paysager fort, éviter d'avoir des problèmes d'instabilités massives
	Cordon d'enrochement	améliore la stabilité de la falaise et dissipe l'énergie des vagues, études simples, solution durable et peu onéreuse	non adapté aux instabilités en partie haute de falaise, peut stopper les apports sédimentaires, surveillance périodique
	Contrefort béton ou maçonné	améliore la stabilité de la falaise, intervention simple, solution durable	non adapté aux instabilités meubles, impact paysager fort, entretien régulier
Marais	Dépoldérisation	permettre à moindre coût une amélioration de l'état environnemental des écosystèmes, et une réponse « douce » à l'aléa submersion marine	demande une gestion fine des niveaux d'eaux dans les zones ennoyées, action limitée sur l'aléa submersion, nécessite d'importantes concertations avec les usagers et éventuels riverains situés en retrait
	Restauration du milieu (schorre)	permettre à moindre coût une amélioration de l'état environnemental des écosystèmes, et une réponse « douce » aux aléas submersion marine et érosion	action limitée sur l'aléa submersion

Arguin, Aquitaine (France)

3 - AIDE À LA DÉCISION POUR ÉLABORER UNE STRATÉGIE DE GESTION FACE À L'ÉROSION CÔTIÈRE

Comté de Mayo (Irlande)

Le littoral est un milieu soumis à des aléas spécifiques (érosion côtière notamment) où la présence d'enjeux socio-économiques, humains, environnementaux génère une vulnérabilité.

Toute action présente un coût, c'est pour cette raison que dans un contexte de gestion intégrée de zones côtières, chaque démarche envisagée doit être réfléchie au préalable (ampleur du phénomène, enjeux des zones à préserver etc.). La démarche à suivre sera différente en fonction des différentes situations (espace rural inondable en cas de rupture de digue, zone urbaine exposée aux risques, plage à fort potentiel touristique etc.). Dans une situation donnée, l'option pour un type de structure, ou pour une combinaison de deux ou plus, est toujours un compromis entre la spécificité du problème à résoudre (l'érosion persistante du littoral, l'inondation de secteurs à basse altitude, etc), les conditions morphologiques (le type de littoral et le type de profil de plage) et l'utilisation des terres (à des fins résidentielle, de loisirs, agricole, etc), et l'impact prévu des structures sur les processus côtiers (Das Neves, 2011).

Gérer la protection des côtes

> Notions d'aléas, enjeux, vulnérabilité, risques et études préliminaires d'une zone d'étude

• Définitions préalables

Le choix des méthodes de protection des côtes dépend de l'évaluation des **risques**, ceux-ci s'exprimant par la combinaison **d'aléas** et **d'enjeux** (voir introduction). Plus un aléa est fort et les enjeux importants, plus le risque est important.
L'aléa « érosion » se détermine par une étude du bilan sédimentaire du littoral et des évolutions à long terme du trait de côte ou des zones submersibles.
L'aléa « submersion marine » repose d'une part sur une étude historique des inondations littorales, et d'autre part, sur une étude fréquentielle des paramètres océaniques (principalement le niveau de la mer).
Les aléas « mouvements de terrain » issus de l'érosion des falaises, repose sur une étude historique des mouvements de terrain enregistrés au droit des falaises. Aussi, une étude fréquentielle des paramètres mécaniques et physico-chimiques est établie en plus de l'étude des facteurs intrinsèques de la falaise (géologie, géomorphologie). Les mouvements de terrain concernent les glissements de terrain, les éboulements, les chutes de blocs etc. (MEEDDM, 2010).

Un évènement potentiellement dangereux, ou aléa, n'est un risque majeur que s'il s'applique à une zone où des enjeux humains, socio-économiques ou environnementaux sont présents.

La réflexion sur les enjeux doit porter sur la différenciation entre les enjeux actuels et futurs. Trois types d'enjeux majeurs existent : humains, socio-économiques et environnementaux. Ils concernent plus particulièrement l'urbanisation (population et infrastructures), le tourisme, les activités de pêche, l'élevage, la navigation, la culture, l'économie et l'environnement (patrimoine naturel). La zone littorale a toujours constitué une zone de forte activité humaine et montre en plus des spécificités environnementales.
Concernant les enjeux actuels, des mesures de gestion du risque sont envisagées (prévention, surveillance, signalisation du danger, interdiction d'accès etc.). Pour les enjeux futurs, ils doivent être réduits le plus possible. Pour ce faire, il est question d'étudier les zones (gestion préventive) prévues à la construction d'infrastructures (niveau des aléas, etc.).

L'évaluation de la vulnérabilité est une étape préalable au choix des solutions de gestion. Cette évaluation consiste à établir un bilan de vulnérabilité à partir d'indicateurs des composantes de cette dernière (aléas, enjeux, perception du risque, politiques et mesures de gestion). Elle mesure les dommages provoqués par l'aléa en cas de réalisation de celui-ci. Elle est fonction des enjeux.

• Etudes préliminaires à toute intervention

Etudes techniques

La mise en œuvre de toute solution de gestion du trait de côte doit être suivie par des études permettant d'évaluer la pertinence d'un aménagement et son impact sur l'environnement. Le recueil des données in situ est une phase importante afin de comprendre la dynamique d'un site. Les informations relevées, généralement insuffisantes, peuvent être complétées par un travail de modélisation physique ou numérique.
Les études préliminaires ont pour objectif de fournir une synthèse régionale sur la connaissance du secteur choisi et la détection des zones vulnérables, de proposer un diagnostic à une échelle locale et d'indiquer la faisabilité technique et économique des solutions envisagées. Une visite de terrain permet un examen du site et de mieux cerner les attentes vis-à-vis de l'étude et des solutions de protection. La collecte des données, menée dans un premier temps à l'échelle régionale, doit porter sur :

- l'hydrométéorologie ;
- les caractéristiques sédimentaires ;
- les aménagements influençant la dynamique sédimentaire ;
- la morphologie des fonds sous-marins ;
- inventaire des espèces rares et protégées (faune et flore).

Une étude technique obligatoire doit porter sur la description des phénomènes au niveau régional. Ensuite, l'analyse détaillée des mécanismes hydrosédimentaires conduira au diagnostic des dysfonctionnements et permettra l'ébauche de solutions. Si le sujet est complexe, elle permettra de localiser les secteurs critiques et d'identifier les manques en matière de connaissance (MEEDDM, 2010).

La mémoire du risque

L'analyse détaillée des évolutions passées du secteur choisi à partir de l'exploitation des données collectées permet une bonne valorisation du suivi (mémoire du risque local). Il est avantageux (d'un point de vue économique) de partager les différentes données avec d'autres acteurs réalisant le même type de suivi.
Inclure le public dans le processus de décision, par des programmes de communication (des sites Web, des conférences, etc.), est donc important. Ainsi « la mémoire collective de risque » ne doit pas être négligée pour améliorer la conscience publique et prévenir les risques.

Etudes économiques

Les évaluations économiques des projets d'aménagement sont indispensables. Cela consiste à identifier les fonctions et les services rendus par les écosystèmes littoraux et évaluer les effets liés à l'érosion, qu'elles soient positives ou négatives. Ces données doivent être intégrées aux dépenses liées à l'aménagement afin d'avoir une estimation du taux de rentabilité économique de l'aménagement.

Techniques souples ou dures

Le recours à des techniques « souples » réversibles (voir p. 21), au détriment d'ouvrages lourds, modifie le rôle du suivi (partie intégrante de la solution). La mise en place d'un suivi du littoral (prévu sur le long terme) consiste à évaluer les techniques et modes de gestion mis en œuvre, les modifier si besoin, estimer ou compenser les impacts et enrichir la connaissance indispensable à la planification des interventions futures.

> Les axes de gestion du trait de côte

Quatre axes de gestion du trait de côte sont envisageables :

Pas d'intervention :

Si les enjeux ne justifient pas une intervention ou s'il n'y a pas d'enjeux présents, il est convenu de suivre l'évolution naturelle tout en limitant les impacts anthropiques. Cela peut être la meilleure solution dans certains cas, étant donné que l'érosion côtière (au sens large) ne constitue pas toujours un risque. Aucune action n'est envisagée sur le littoral.
Afin de limiter les enjeux futurs (limiter les constructions à proximité des zones à risque) et laisser faire la nature, il faut maîtriser le foncier, par exemple : classement en zone « non constructible », ou en « espace vert à forte valeur touristique » (dans ce cas, des aménagements et des panneaux seront placés afin d'informer les usagers des risques probables et de limiter les accès). La maîtrise du foncier doit s'accompagner d'un suivi du recul de la falaise ou du trait de côte, ceci afin de surveiller l'évolution du phénomène d'érosion et d'adapter la stratégie de gestion.

Avantages:
aucune dépense, préservation des fonctionnalités naturelles si existantes.

Inconvénients :
risques sur les enjeux littoraux soumis à l'érosion, nécessite une communication importante auprès de la population et des usagers éventuellement concernés.

Recul stratégique :

si les enjeux ne justifient pas une intervention (zones où l'analyse coûts/avantages ne justifie pas une intervention technique de défense), si les enjeux sont faibles ou encore s'il s'agit de la seule option permettant d'assurer la protection de la population. Eventuellement, des ouvrages de défense naturels ou aménagés peuvent être envisagés.
Il existe trois types de recul : 1) déplacement des équipements de type plans plages (situés en première ligne, ils doivent être déplacés vers l'intérieur des terres en suivant l'évolution du trait de côte), 2) évacuation pour des équipements ponctuels de service public et 3) évacuation pour des biens privés (type campings et urbanisation commerces). L'évacuation peut être définitive ou elle peut se faire avec une relocalisation sur des territoires rétro-littoraux[36] ou encore, selon une réorganisation urbaine (très difficile à mettre en œuvre).

Avantages:
restauration des infrastructures naturelles et retour au fonctionnement naturel du littoral.

Inconvénients :
mise en œuvre complexe, coûteuse et longue, nécessite une communication importante auprès de la population et des usagers éventuellement concernés.

Intervention limitée :

si les enjeux nécessitent une intervention mais ne sont pas exposés à un risque fort alors, il faut intervenir par l'emploi de méthodes « douces » qui accompagnent les processus naturels de mobilité du trait de côte. Cette solution n'est pas toujours concevable et dépend fortement des conditions de milieu (il doit par exemple exister des phases de répit dans le recul du trait de côte).
Sur des sites naturels à vocation d'accueil du public, il est essentiel de prévoir un plan de gestion limitant l'impact du piétinement sur les secteurs fragilisés (cheminements en retrait des falaises, etc.), le nettoyage excessif des plages (absence d'ancrage pour les sédiments), etc. Des actions de communication et de formation pédagogique peuvent être mises en œuvre afin d'informer sur les phénomènes d'érosion, de limiter les impacts anthropiques, de prévenir les risques...

Avantages:
faibles interventions (réversibles), préservation des fonctionnalités naturelles si elles existent, anticipation grâce aux suivis, possibilité de gérer l'accueil du public, limitation et prévention des risques aux personnes et aux biens.

Inconvénients :
risques sur les enjeux littoraux soumis à l'érosion.

[36] Territoires rétro-littoraux : déplacement des biens sur des terrains situés au-delà de la zone d'aléa érosion marine.

Maintien du trait de côte :
si les enjeux sont importants, il faut envisager la protection de ces zones par l'intermédiaire de techniques « souples » et/ou « dures ».

Avantage:
maintien en place les enjeux socio-économiques importants.

Inconvénients :
maintien ou renforcement de l'artificialisation du littoral, érosion possible sur les zones à proximité, entretiens réguliers et perte de fonctionnalités naturelles. Ces inconvénients concernent très faiblement les rechargements.

Ces stratégies peuvent être combinées au niveau d'un plan d'action au cours des années ou décennies ; et aussi dans l'espace.

> Choisir un mode d'intervention

Les trois étapes suivantes sont classiquement réalisées afin de définir le mode d'intervention face à l'érosion côtière :

1/ Recensement des aléas et des enjeux caractérisant la côte.
Les différentes études à mener comprennent en effet la caractérisation des niveaux des aléas (nul, faible, moyen, fort) d'une zone donnée qui correspondent à la susceptibilité de la zone d'être affectée par les mouvements de terrain, les submersions ou l'érosion côtière (marine et éolienne). Il est également nécessaire d'évaluer les enjeux qui risquent d'être impactés et le degré de vulnérabilité de la zone concernée. La gestion du trait de côte nécessite par ailleurs de comprendre le fonctionnement morphodynamique d'une zone donnée (projet EUROSION).
Cela doit reposer sur :
- la réalisation des études sur des unités sédimentaires cohérentes : il s'agit de planifier à long terme les interventions globales en intégrant les interactions des processus côtiers à l'échelle adaptée des cellules sédimentaires ;
- l'intégration du concept de résilience côtière;
- l'identification des réserves stratégiques de sédiments (ces derniers peuvent y être prélevés sans compromettre l'équilibre naturel) et la gestion des stocks disponibles en sédiments

2/ Le choix d'un mode d'intervention sur le littoral peut ensuite avoir recours à une **analyse coûts / avantages** (ACA). C'est la démarche de référence de l'évaluation économique. Cette analyse permet de rationaliser les interventions en confrontant les avantages attendus aux dépenses, aux coûts engendrés et aux utilisations alternatives qui pourraient être faites des budgets utilisés. L'ACA intervient notamment pour l'estimation des pertes ou la modulation des investissements et des budgets (préservation et restauration des écosystèmes). Cette analyse doit prendre en compte les aspects environnementaux, économiques et sociaux. Il s'agit aussi de rendre compte des externalités entre usages ou activités. Dans le cas présent, l'érosion affecte les biens naturels spécifiques des littoraux (plages, dunes, falaises ou marais) qui constituent des biens patrimoniaux pour les sociétés littorales. La mise en œuvre d'une ACA implique trois étapes :
- identification et caractérisation de l'ensemble des usages, fonctions et services rendus par les écosystèmes et leur contribution au patrimoine local ;
- évaluation des effets et des pertes (marchandes ou non, positives/avantages ou négatives/coûts) liés à l'érosion ;
- intégration des données en même temps que les informations sur les dépenses suivant le protocole de synthèse spécifié par l'analyse coûts/avantages. L'objectif étant d'avoir une estimation du taux de rentabilité économique de l'aménagement (MEEDDM, 2010).

3/ Une analyse multicritère peut également être menée après une analyse coût / avantages. Elle repose notamment sur la faisabilité du mode de gestion et l'acceptabilité du risque.
Le mode de gestion peut enfin être défini par les décideurs à partir des connaissances acquises lors des précédentes étapes.

Arbre de décision

De manière générale, il faut avoir recours à des entreprises spécialisées pour choisir la solution la mieux adaptée au problème d'érosion côtière, de submersion marine ou de mouvements de terrain.

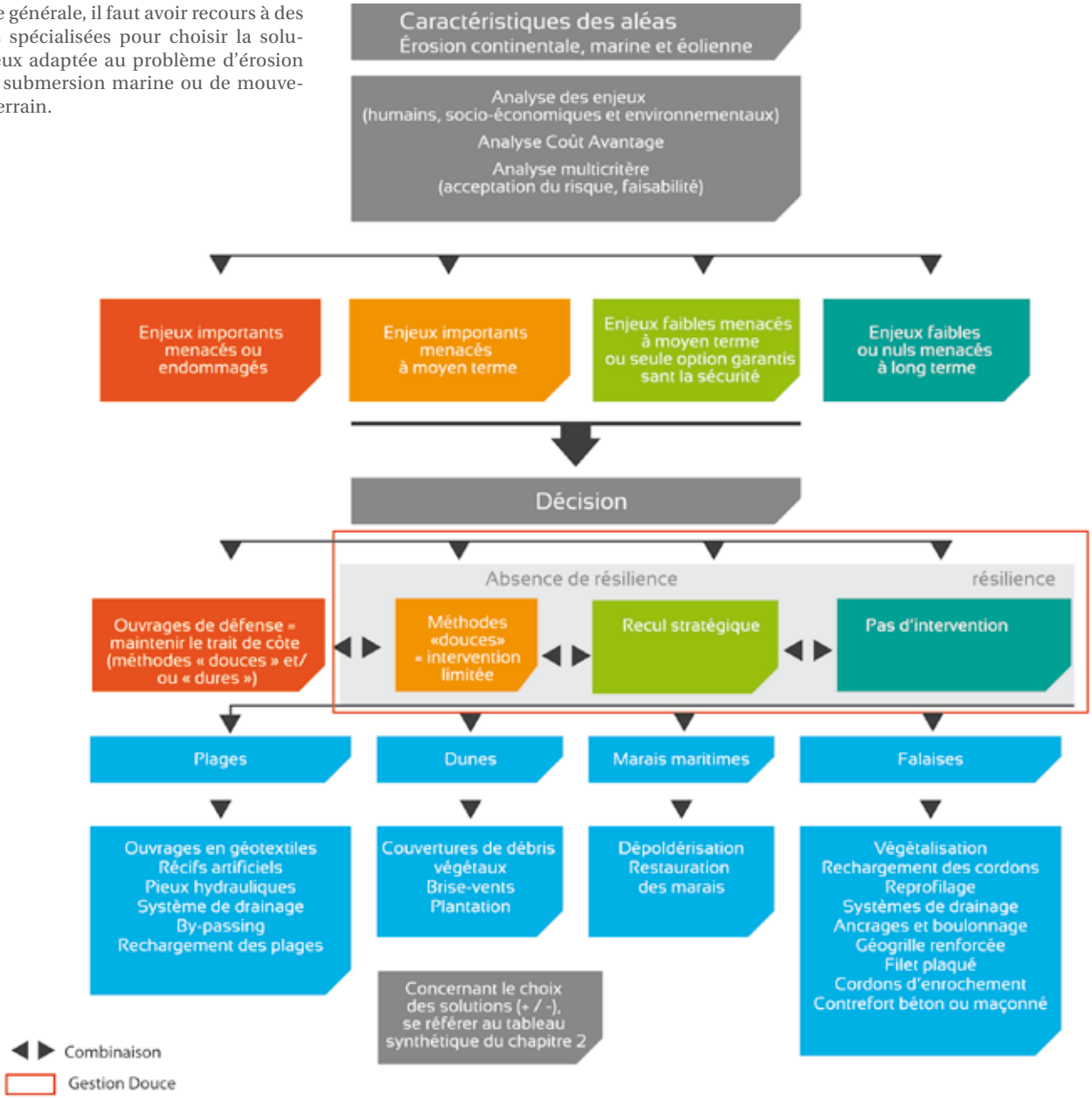


Figure 19 : Arbre de décision

Conclusion

Les littoraux offrent de nombreux services. Leur rôle dans la protection des côtes (de par leur forme) et leur diversité biologique permet d'en faire des infrastructures naturelles littorales variées. Cependant, des efforts doivent être faits afin d'améliorer la résilience des espaces littoraux par une meilleure gestion des sédiments et par la préservation d'un espace suffisant pour les processus côtiers. Il faudrait renoncer à l'idée de réaliser un aménagement définitif mais au contraire il est conseillé d'intégrer un cycle d'actions alternant entre phases d'observation et d'intervention. La seule action définitive envisageable sur le moyen et le long terme reste le recul stratégique hors de la zone menacée par les risques d'érosion. S'il n'y a pas d'enjeux importants, il est inutile de lutter contre les phénomènes d'érosion. Dans certains cas, ces phénomènes peuvent être bénéfiques pour les écosystèmes (fonctions écologiques des zones humides telles que les marais, maintien des paysages identitaires).

Le présent document, destiné aux gestionnaires du littoral, présente un panel de solutions afin de limiter l'érosion côtière et met en avant l'importance des solutions dites « douces » dans la mesure du possible, avec leurs avantages et inconvénients. Bien souvent, ces solutions douces ne sont pas définitives et peuvent parfois être combinées avec des solutions « dures » pour protéger des enjeux menacés à court terme. Mais il est rappelé que sur le long terme il est illusoire de vouloir fixer définitivement le trait de côte sans impact environnemental fort et de lourds investissements économiques.

Références

Albinet V., Bayer P., Barbel P., Barrere P., Becet J-M., Chauvin A., Favennec J., Fransaer D., Gérard B., Guibert P., Howa H., Legrain D., Le Nindre Y.M., Leroi E., Miossec A., Monbet Y., Moulis D., Oliveros C., Piraud J., Sornin J-M., Van Heuvel T. and Verger F. (1999) - Le littoral. Manuels et méthodes. BRGM. 351 p.

Battiau Queney Y. and Clus-Auby C. (2010) - Les ateliers de l'EUCC-France. De la connaissance des systèmes littoraux à la gestion intégrée des zones côtières. Union des océanographes de France. 186 p.

Communications écrite et orale (documents Power Point) du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM).

Communication écrite (document Word) de das Neves, 2011.

Communication écrite (document Word) de l'Office National des Forêts (ONF).

Communication écrite (document Word) de L'Université Nationale d'Irlande à Galway (NUIG).

Consulmar, Hidroprojecto and Risco, (1989) - Study of the littoral between the Vilamoura harbour and the western jetty of Rio Guadiana. Lisboa. 109 p (in Portuguese).

Eurosion (2004) - Vivre avec l'érosion côtière en Europe – Espaces et sédiments pour un développement durable. Conclusions de l'étude Eurosion,format PDF, 21p.

Favennec J. (2002) - Connaissance et gestion durable des dunes de la côte atlantique. Manuel récapitulant les enseignements du projet européen Life-Environnement de "Réhabilitation et gestion durable de quatre dunes françaises". 394 p., 4 ann.

French P.W. (2001) - Coastal defences. Processes, Problems and Solutions. 366 p.

Genna A., Capdeville J.P., Mallet C., Deshayes L. (2004) - Observatoire de la Côte Aquitaine - Etude géologique simplifiée de la Côte Basque. Rapport final BRGM n°RP-53258-FR, 42 p., 25 ill.

Goeldner-Gianella L. (2008) «Dépoldériser en Europe occidentale. Les apports d'une géographie sociale de l'environnement à l'étude du milieu littoral», Université de Nantes, 6 décembre 2008

Gouguet L. (2010) - Gestion de l'érosion côtière. 60-66.

MEEDDM (2010) Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer (2010) - La gestion du trait de côte. Quae. 978-2-7592-0360-4, 290 p.

Nédellec JL., Zornette N., Mathon C., Aubié S., Imbault M.H. (2005) - Observatoire de la Côte Aquitaine – Evolution et cartographie de l'aléa mouvements de terrain sur la Côte Basque. Rapport final BRGM n°RP-52783-FR, 41 p., 9 ill., 2 ann.

Pacheco, A., Ferreira, Ó., Williams, J.J., Garel, E. Vila-Concejo, A., Dias, J.A., (2010) - Hydrodynamics and equilibrium of a multiple inlet system. Marine Geology, 274 (1-4), pp. 32-42.

Paskoff R. (2006) - Les littoraux - Impact des aménagements sur leur évolution. Armand Colin. 260 p.

Paskoff R. and Clus-Auby C. (2007) - L'érosion des plages - Les causes, les remèdes. Institut océanographique. 978-2-903581-47-3, 184 p.

SOGREAH (2003) - : Etude de l'évolution du trait de côte du littoral de Capbreton.

Phase 1: diagnostic de l'état actuel, 30 p. + annexes.

Phase 2 : modélisation mathématique de l'évolution du trait de côte et incidence sur le risque littoral, 29 p + annexes.

Phase 3 : recherche de solutions d'aménagement du littoral, 56 p. + annexes.

Veloso Gomes, F.; Taveira Pinto, F.; das Neves, L. & Pais Barbosa, J. (2006). EUrosion - A European Initiative for Sustainable Coastal Erosion. Pilot Site of River Douro - Cape Mondego and Case Studies of Estela, Aveiro, Caparica, Vale do Lobo and Azores, 317 p, ISBN 972-752-074-x.

Galice (Espagne)

Le projet ANCORIM est cofinancé par l'Union européenne dans le cadre du programme INTERREG IVB - Espace Atlantique, "Investir dans notre avenir commun"

Pointe de Gâvres, Bretagne (France)

Coordination pour le projet éditorial
BRGM (France)
Région Aquitaine (France)

Edition
BRGM et ONF (France)
Avec la contribution du partenariat Ancorim

Direction de publication
Directeurde la publication: Alain Rousset
Co-directeur de la publication : Philippe Buisson
Directrice de la communication : Corinne Descours

Création, mise en page et impression : Akson, Bordeaux (France)

Crédits photos: Akson, Olivier Aumage, Gonzalo Borrá, BBC, BRGM - M. Le Collen, Cap l'Orient, CETMAR, CETMEF, CREAA, ECOPLAGE, EUROSION, Colin Faulkingham, Fotolia, France 24, Gold Coast City Council, IHRH, Le Cornec/GéosAEL, NOAA, NUIG, Observatoire de la Côte Aquitaine, ONF, OSPAR, Paskoff, RPS Group Galway, SOGREAH, Abdreas Trepte, University of Coimbra, University of Vigo, Wikipedia, Xunta de Galicia