

Ouvrages de protection des côtes

par **Daniel CAMINADE**

Ingénieur civil des Ponts et Chaussées. Docteur en Génie civil

Maître de conférences et Responsable de la Maîtrise de Génie civil à l'Université du Havre

| | |
|---|--------------------|
| 1. Définitions et généralités | C 4 690 - 2 |
| 1.1 Notion d'entité sédimentologique | — 2 |
| 1.2 Stock de matériaux disponibles | — 3 |
| 1.3 Matériaux côtiers | — 3 |
| 1.3.1 Classification des matériaux | — 3 |
| 1.3.2 Origine des matériaux | — 3 |
| 1.3.3 Identification des matériaux | — 3 |
| 1.4 Morphologie côtière | — 4 |
| 2. Action des agents physiques | — 4 |
| 2.1 Action de la houle | — 4 |
| 2.1.1 Action des houles frontales | — 4 |
| 2.1.2 Action des houles obliques | — 5 |
| 2.2 Action des vents | — 5 |
| 2.3 Action des courants | — 6 |
| 2.4 Action des variations du niveau de la mer | — 6 |
| 3. Équilibres naturels | — 7 |
| 3.1 Profils d'équilibre d'une plage sableuse | — 7 |
| 3.1.1 Actions dans le profil | — 7 |
| 3.1.2 Profil d'hiver | — 7 |
| 3.1.3 Profil d'été | — 7 |
| 3.2 Profils d'équilibre d'une côte à falaise | — 7 |
| 3.2.1 Action des éléments naturels | — 7 |
| 3.2.2 Évolution dans le temps | — 7 |
| 3.3 Zones de sédimentation naturelle | — 8 |
| 3.3.1 Baies et estuaires | — 8 |
| 3.3.2 Baie du Mont-Saint-Michel | — 8 |
| 4. Principes d'aménagement | — 9 |
| 5. Effets des ouvrages. Actions dans le profil | — 9 |
| 5.1 Réduction de l'action érosive | — 9 |
| 5.2 Protection contre l'action érosive | — 9 |
| 5.3 Mesures de compensation | — 10 |
| 5.4 Ouvrages naturels | — 10 |
| 5.4.1 Barres | — 10 |
| 5.4.2 Massifs coralliens | — 11 |
| 5.4.3 Autres ouvrages naturels | — 11 |
| 6. Effet des ouvrages. Actions longitudinales | — 12 |
| 6.1 Actions sur le transit littoral | — 12 |
| 6.1.1 Mode de fonctionnement des épis | — 12 |
| 6.1.2 Dispositions constructives | — 12 |
| 6.2 Transit contrôlé des matériaux | — 14 |
| 6.3 Rétablissement du transit littoral | — 14 |
| 7. Aspects écologiques | — 14 |
| 8. Études d'aménagement | — 15 |
| 9. Exemples d'aménagement | — 15 |
| 9.1 Aménagement d'une falaise crayeuse : Bruneval | — 15 |
| 9.2 Aménagement d'une plage sableuse : Capbreton | — 16 |
| Références bibliographiques | — 16 |

Les zones littorales situées à la frontière de la mer et de la terre ont toujours présenté un grand intérêt et sont, encore aujourd'hui, le siège d'activités multiples liées à la mer (pêche, navigation, tourisme balnéaire...) mais aussi terrestres (villes, industries au bord de l'eau...).

Ces zones sont, à la fois, soumises à l'action des éléments naturels et à l'action de l'homme qui utilise et aménage ces zones et donc en modifie l'équilibre naturel.

Il apparaît de plus en plus nécessaire de protéger ces zones littorales pour qu'elles puissent continuer d'assurer dans l'avenir les fonctions qui leur ont été confiées.

La plupart des pays qui disposent d'un domaine maritime étendu ont édicté un certain nombre de textes réglementant l'usage que l'on peut faire de ces zones littorales. Pour ce qui concerne la France, le lecteur pourra se reporter à l'article **Défense du littoral** [C 4 695], où sont notamment exposées les principales mesures (réglementaires) de protection du littoral.

Les aspects techniques et pratiques relatifs à la protection du littoral exposés ci-après présentent de nombreuses facettes telles que :

- la lutte contre l'érosion ;
- la stabilisation des plages ;
- la restauration des plages ;
- la lutte contre la sédimentation ;
- la dépollution de certaines zones ;
- la restauration des zones humides ;
- etc.,

et font appel à des techniques très variées dont certaines ont été exposées dans les articles :

- **Principes d'implantation et d'aménagement des ports** [C 4 640] ;
- **Ouvrages de protection contre la houle** [C 4 631] ;
- **Ports de plaisance** [C 4 650] ;

auxquels le lecteur pourra se reporter.

L'étude et la réalisation d'un ouvrage de protection du littoral nécessitent :

- une bonne connaissance des phénomènes naturels ;
- une bonne appréciation des actions induites par les aménagements proposés ;
- la prise en compte de la totalité des aspects du projet : bien souvent, le littoral est une zone de conflits d'intérêts qu'il va falloir gérer au mieux.

Créés en 1972, les Schémas d'Aptitude à l'Utilisation de la Mer (SAUM) ont permis, en mettant autour d'une même table l'ensemble des acteurs :

- de recenser les problèmes posés, en particulier dans les zones sensibles ;
- de sélectionner les activités compatibles entre elles ;
- de proposer des mesures techniques adéquates.

Tout aménagement du littoral doit en effet aboutir à un consensus de l'ensemble des acteurs pour définir un programme d'actions concertées.

1. Définitions et généralités

1.1 Notion d'entité sédimentologique

L'implantation d'un aménagement ou d'un ouvrage littoral a une influence sur les parties situées de part et d'autre. De même, les portions de littoral adjacentes auront un impact sur le projet.

On est donc amené à définir une zone à l'intérieur de laquelle les ouvrages interagissent entre eux, mais dont l'action sur le littoral situé à l'extérieur de cette zone est nulle ou négligeable : on a alors déterminé une entité sédimentologique.

Les limites ou frontières de ces zones d'influence se traduisent, pour les études, par des conditions aux limites très simples telles que la nullité du transport littoral.

À titre d'exemple, la baie de Seine comprise entre le Cotentin (frontière naturelle entre la Manche occidentale et la Manche centrale) et le cap d'Antifer, près d'Étretat (zone de séparation des transports littoraux), constitue une entité sédimentologique.

Cette entité peut, du point de vue sédimentologique, et pour certaines études seulement, être séparée en deux sous-ensembles par la Seine et ses aménagements (endiguements et chenal de navigation...).

Suivant les études entreprises, il pourra être suffisant de s'intéresser aux sous-entités.

— L'étude des plages du Calvados peut être conduite en s'intéressant à la partie sud de la baie de Seine, car seuls les mouvements des matériaux locaux et des matériaux provenant du Cotentin sont importants. Les matériaux transitant au nord, au pied des falaises du pays de Caux, ou ceux amenés par la Seine, sont sans influence notable sur le comportement de ces plages.

— L'étude des plages du Havre et de Sainte-Adresse ne nécessite que la prise en compte des transports de galets en provenance de l'érosion des falaises du pays de Caux, depuis le cap d'Antifer.

À l'inverse, l'étude de l'estuaire de la Seine est plus complexe dans la mesure où il faut tenir compte de deux sous-entités nord et sud, mais aussi de la Seine qui apporte des matériaux fins ou très fins en quantité importante.

1.2 Stock de matériaux disponibles

L'étude des aménagements côtiers et notamment balnéaires s'appuie essentiellement sur la connaissance du transit des matériaux côtiers. Il est donc primordial de connaître, à un instant donné et pour une portion de littoral définie, le volume des matériaux susceptibles de participer activement au processus. La variation de ce stock permet en effet de caractériser le mode d'évolution de la côte : engraissement, érosion ou stabilité.

Pour être utile, il faut que ce stock de matériaux puisse être mobilisé par les éléments naturels (houles, vents, courants) sans intervention humaine : les matériaux emmenés au large par des fonds importants (20 m et plus) par les tempêtes ou déposés à la suite de dragages doivent, à cet égard, être considérés comme définitivement perdus, sauf importante intervention humaine.

1.3 Matériaux côtiers

1.3.1 Classification des matériaux

Les matériaux peuvent être classés en deux familles principales :

- les matériaux fins et très fins (argiles et vases) ;
- les matériaux plus grossiers (galets, graviers, sables).

Ces deux familles ont des comportements très différents vis-à-vis des agents naturels.

1.3.1.1 Matériaux fins

Ces matériaux, dont la dimension moyenne est inférieure à 80 μm , sont en général transportés en suspension dans l'eau de mer. Leur vitesse de sédimentation en eau douce est faible (de l'ordre de 0,3 mm/h), mais est considérablement augmentée (dans un rapport 1 000) par la présence de sel qui favorise la floculation. Les dépôts de vase vont évoluer dans le temps. Initialement constitués de crème de vase dont la concentration ne dépasse guère 100 à 150 g/L, ils vont se tasser en se solidifiant et acquérir une cohésion importante.

Ces dépôts seront stables sous l'action des éléments hydrodynamiques (courants, houle) tant que la contrainte critique de cisaillement en surface ne dépasse pas une valeur qui est fonction de la nature minéralogique du dépôt, de sa concentration et de son tassement.

Dès que cette valeur est atteinte, la couche de vase va littéralement éclater et les particules vont se disperser au sein de la masse fluide et ne pourront à nouveau se déposer que dans une zone de calme.

1.3.1.2 Matériaux grossiers

Les matériaux les plus grossiers sont constitués de blocs provenant essentiellement de l'érosion terrestre : falaises, volcans, rochers. Ils peuvent atteindre plusieurs tonnes.

Les galets et les cailloux ont des dimensions supérieures à 25 mm et des formes généralement arrondies provenant de l'usure des matériaux entre eux et de l'usure par la houle et les courants.

Les graviers, dont les dimensions sont comprises entre 5 mm et 25 mm, ont en général des formes plus irrégulières que les galets.

Les sables, dont les dimensions sont comprises entre 80 μm et 5 mm, peuvent être répartis en 3 catégories :

- sables fins (inférieurs à 0,315 mm) ;
- sables moyens (compris entre 0,315 et 1,25 mm) ;
- sables gros (supérieurs à 1,25 mm).

Les sables ont des origines très variées puisqu'ils peuvent être issus de matériaux très divers tels que les calcaires, les silex, les granites, les schistes, etc.

Ils peuvent aussi être d'origine animale : calcaire coquillier et calcaire corallien.

Ces matériaux sont en général, compte tenu de leurs dimensions, transportés en charriage ou en saltation. Seuls les sables les plus fins (sables coralliens) sont susceptibles d'être transportés en suspension.

Leur mise en mouvement, contrairement aux matériaux fins, est très progressive et la proportion de matériaux repris par les éléments hydrodynamiques est une fonction croissante de la puissance des actions motrices.

Toutes choses égales par ailleurs, un matériau sera d'autant plus mobile que :

- son volume sera faible (jusqu'à une limite de l'ordre de 200 μm ; en deçà de laquelle apparaissent des forces de cohésion) ;
- sa masse volumique sera faible ;
- sa forme sera complexe.

Un sable coquillier « léger » et anguleux sera plus mobile qu'un sable siliceux « lourd » aux grains arrondis.

1.3.2 Origine des matériaux

Les matériaux fins et très fins résultent généralement de l'usure de matériaux plus gros : ils proviennent, la plupart du temps de l'érosion terrestre et ont été transportés par les fleuves.

Plus rarement, ces vases sont issues de l'érosion par la mer de matériaux plus grossiers (sables) ou proviennent de l'érosion côtière (argiles contenues dans les falaises crayeuses).

Enfin, il ne faut pas oublier les cendres d'origine volcanique.

Les matériaux plus grossiers sont, comme cela a été dit ci-avant, d'origine extrêmement variée ; ils peuvent provenir de l'érosion marine, mais peuvent aussi avoir été transportés par les fleuves ou même les glaciers.

1.3.3 Identification des matériaux

L'identification précise des matériaux constituant le stock disponible à un instant et à un endroit donné va permettre :

- de connaître l'origine de ces matériaux, y compris le mode de transport. On pourra aussi en déduire des indications précieuses sur le mode de fonctionnement de cette partie du littoral ;
- d'estimer et de prévoir le comportement de ces matériaux sous l'action des éléments naturels et des divers aménagements projetés.

Cette identification portera sur :

- la composition minéralogique ;
- la granulométrie ;
- la forme ;
- la masse volumique.

À titre d'exemple, le long d'un littoral, l'observation des variations de composition minéralogique et de granulométrie donne des indications sur le sens et les vitesses de transport.

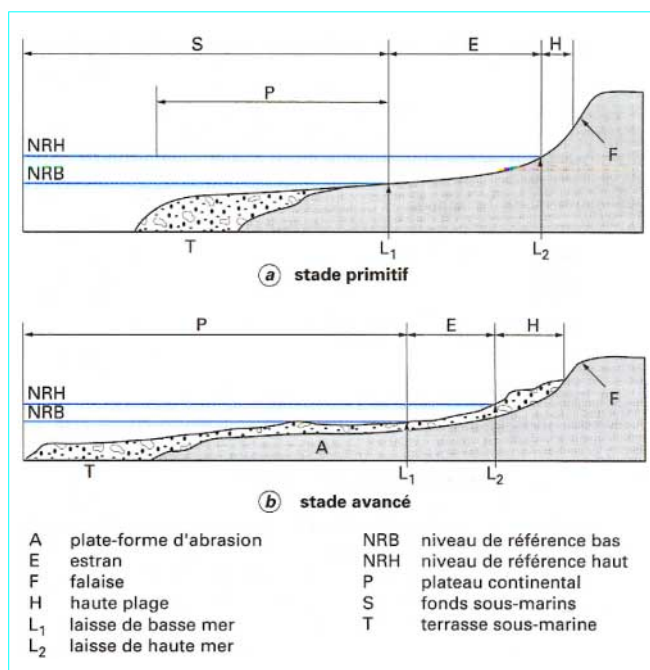


Figure 1 – Stades de développement d'une plage (d'après Johnson)

L'observation des grains peut indiquer s'ils ont été ou non martelés à sec, ce qui peut indiquer un mode de transport éolien.

La présence d'un bloc de granite bleu de plusieurs tonnes d'origine scandinave dans les zones de manœuvre du port du Havre-Antifer est la preuve d'un transport de type glaciaire (glacier et iceberg).

Si les matériaux sont, par eux-mêmes, d'excellents traceurs et portent sur eux la marque de leur histoire, l'analyse, même poussée, de ceux-ci n'est pas toujours suffisante pour connaître avec précision le sens et l'intensité des transports littoraux.

On pourra alors avoir recours à des traceurs artificiels : éléments colorés et éléments radioactifs (dont l'usage est particulièrement réglementé).

1.4 Morphologie côtière

La figure 1 donne la définition des différentes parties d'une côte en fonction du stade d'érosion, compte tenu du niveau de référence de la mer.

Le long de la plage, la répartition granulométrique des matériaux n'est pas uniforme et l'on constate que les matériaux sont en fait triés, les matériaux les plus fins étant situés le plus au large.

La pente générale de la plage, plus forte en haut de plage et plus faible en bas, et celle de ses différentes parties dépendent de l'exposition de la plage aux actions hydrodynamiques (houle principalement) et du matériau lui-même.

La pente des matériaux constatée en Manche, près du Havre, est de :

- 1/10 pour les galets (1/7 à 1/15) ;
- 1/20 à 1/50 pour les sables, pente pouvant aller jusqu'à 1/100 voire 1/150 pour des zones exposées constituées de sable fin.

La figure 2 permet d'estimer la pente d'une plage en fonction de la granulométrie du sable et de son exposition à la houle.

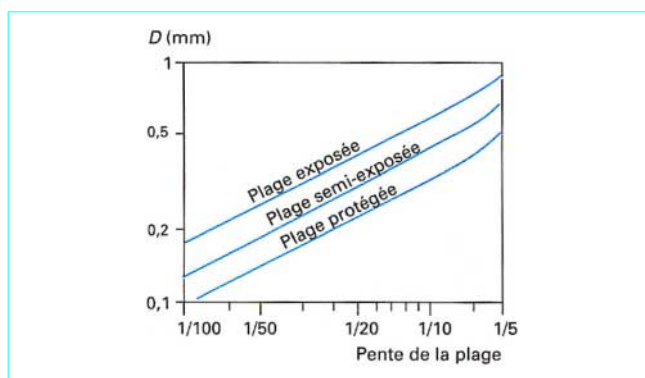


Figure 2 – Pente naturelle d'une plage en fonction de la granulométrie du sable (d'après Sylvester)

2. Action des agents physiques

Les différents agents physiques vont agir sur les diverses parties du littoral et les modeler, pour essayer de parvenir à un état d'équilibre qui pourrait s'établir si les actions étaient elles-mêmes stabilisées. Or l'action de la mer n'est jamais constante, ne serait-ce que par l'action de la marée. L'équilibre obtenu est donc un équilibre dynamique et temporaire qui va évoluer dans le temps au gré de la force des divers facteurs.

2.1 Action de la houle

La houle est le principal facteur susceptible de mettre les matériaux en mouvement.

2.1.1 Action des houles frontales

Au large, avant la zone de déferlement, les vitesses orbitales de la houle près du fond vont mettre les particules en mouvement et, compte tenu du fait que, dans la majeure partie des cas, les orbites ne sont pas fermées, ces particules vont être entraînées vers la côte (figure 3).

Par des profondeurs de 10 m, des houles de 5 m de creux entraînent des particules de 1 mm, les particules fines de 0,2 mm à 0,4 mm étant mises en mouvement dès que le creux dépasse 2 m.

Dans la zone de déferlement, les vitesses des particules d'eau proches du fond sont suffisamment importantes pour que les matériaux soient entraînés par charriage et par saltation. C'est ce que l'on observe le long des plages : à vague montante, le sable est entraîné avec la vague, puis se dépose en partie, tandis que le reste repart avec la lame descendante (figure 4).

L'action des houles frontales, qui est fonction de l'intensité des tempêtes, peut être représentée comme indiqué figure 5.

La zone de déferlement est le siège d'une intense activité sédimentologique. Dans certaines conditions de mer à faible marnage, où le déferlement se produit toujours dans la même zone, on constate une forte accumulation de matériaux sous forme de barre qui provoque et facilite le déferlement. Le phénomène s'autoentretient.

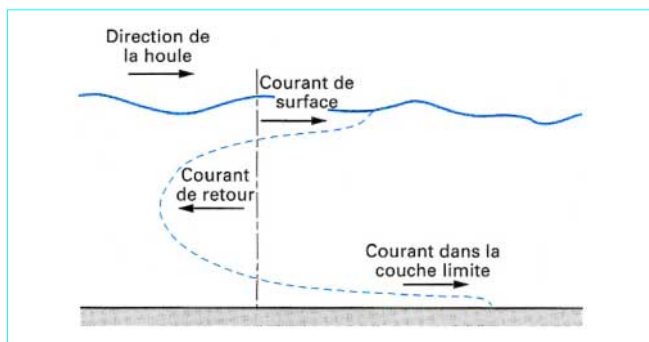


Figure 3 – Courants générés par une houle frontale

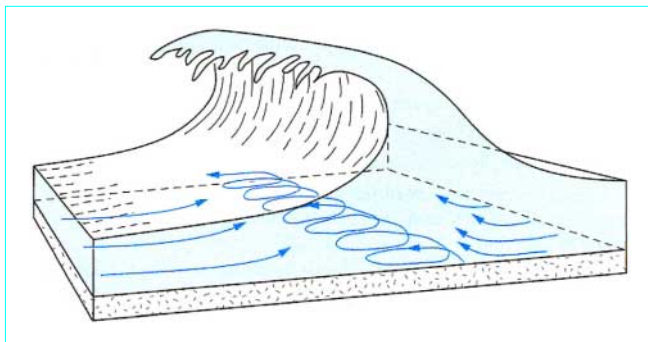


Figure 4 – Schéma du mouvement des grains dans les brisants (d'après Ingle)

2.1.2 Action des houles obliques

Lorsque la houle est inclinée par rapport au rivage, on constate l'apparition de courants de houle qui vont transporter les matériaux préalablement mis en mouvement. Sur le rivage, la descente de la lame ne se fait plus alors dans la même direction que la montée et les matériaux vont se déplacer en dents de scie : c'est le phénomène du jet de rive (figure 6).

Le transport des matériaux se fait de façon inégale suivant la nature de la côte, l'existence ou non d'une barre et les conditions de houle. Il n'est donc pas possible de donner de formule générale sur le transport solide.

Toutefois, la formule mise au point par le LCHF (Laboratoire Central d'Hydraulique de France) et la SOGREAH pour les sables permet d'estimer des ordres de grandeur du débit solide parallèlement à la côte :

$$Q = H^2 T \frac{Kg}{\gamma} f(\alpha)$$

avec Q débit solide (m^3/s),
 H creux significatif de la houle,
 T période moyenne de la houle,
 α angle d'incidence de la houle (ces trois dernières grandeurs sont mesurées par des profondeurs de l'ordre de 15 m),
 g accélération due à la pesanteur,
 γ cambrure de la houle au large,
 $f(\alpha) = \sin \frac{7\alpha}{4}$,

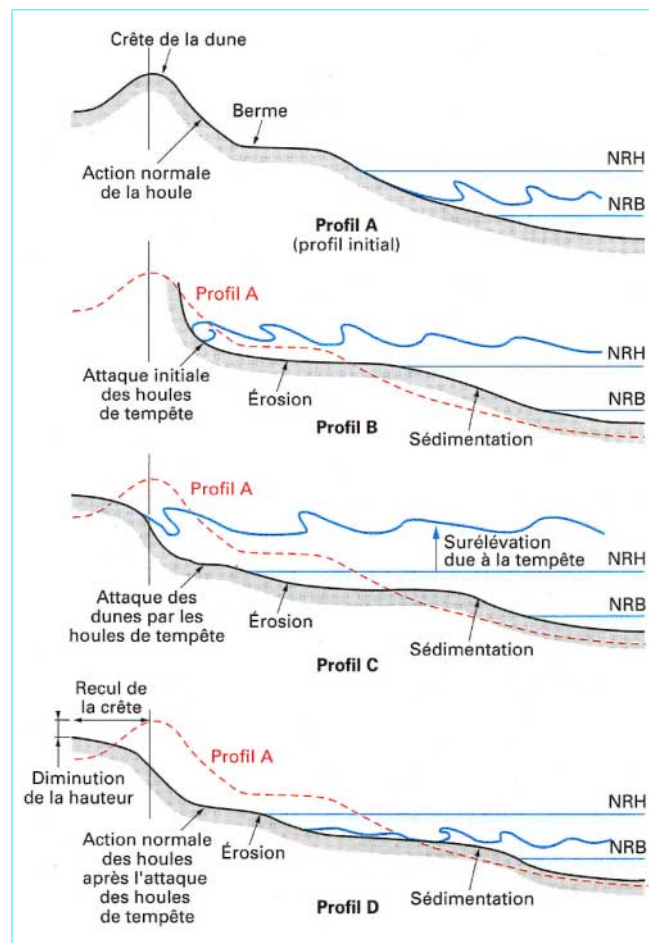


Figure 5 – Évolution des profils d'une plage soumise à des houles de tempête

K coefficient dépendant du matériau et fonction de la dimension moyenne, de la masse volumique et de la forme des grains :

— pour les sables siliceux compris entre 0,25 et 0,5 mm :

K est compris entre $3 \cdot 10^{-6}$ et $4,5 \cdot 10^{-6}$,

— pour les sables coquilliers plats de 0,5 mm ;

K est de l'ordre de $6 \cdot 10^{-6}$.

2.2 Action des vents

Les vents sont susceptibles de transporter à grande distance d'importantes quantités de sable.

Le dépôt, sur le sud de la France, de sable en provenance du Sahara est un phénomène bien connu, bien que relativement peu fréquent.

L'accumulation de sable dans les dunes landaises entre l'estuaire de la Gironde et l'Adour représente environ 20 milliards de m^3 déposés en un peu plus de 5 000 ans, soit en moyenne 3,5 millions de m^3 par an ou encore $15 m^3$ par mètre de littoral et par an.

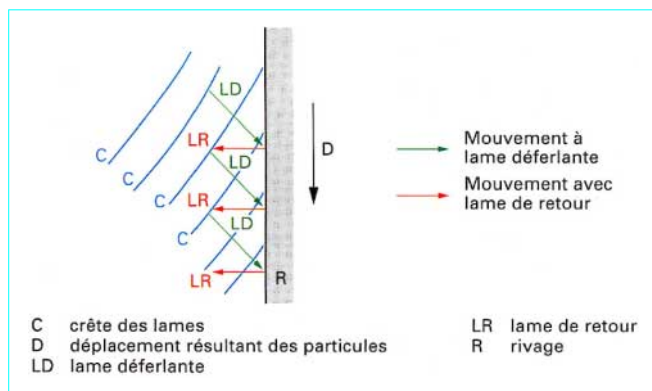


Figure 6 – Jet de rive

La mise en mouvement des particules sableuses se fait dès que la contrainte exercée par le vent sur les particules dépasse une valeur critique. Cette valeur dépend de la vitesse du vent, des caractéristiques du matériau (volume, forme, masse volumique, teneur en eau), du degré d'hygrométrie de l'air et de la nature de la végétation qui peut contrarier l'effet du vent.

La protection contre l'érosion éolienne s'exercera dans deux directions :

- empêcher le sable de partir en le stabilisant par des plantations telles que les oyats, les pins maritimes ou par des brise-vent ;
- favoriser son dépôt en augmentant la rugosité du sol par des brise-vent naturels ou artificiels.

Dans tous les cas, il est nécessaire d'avoir une action volontariste de conservation des dunes, ne serait-ce qu'en réduisant, autant que faire se peut, le piétinement humain qui provoque la destruction des plantes de petite taille.

2.3 Action des courants

Les courants marins ont deux actions principales sur les sédiments :

- ils peuvent transporter les matériaux préalablement mis en mouvement ou en suspension par d'autres actions hydrodynamiques telles que la houle ;
- s'ils dépassent une certaine vitesse, comme les courants de marée dans les estuaires, ils sont à même de mettre en mouvement les matériaux et de les transporter.

Dans la zone littorale, les courants généraux se superposent aux courants locaux généralement dus à la houle. Les différents courants (figure 7) :

- de retour (*undertow*) ;
- *rip-currents* (parfois appelés plaques de ressac ou lames de fond) ;
- d'expansion latérale de la houle ;

vont sculpter le littoral pour aboutir à un équilibre momentané (figure 8).

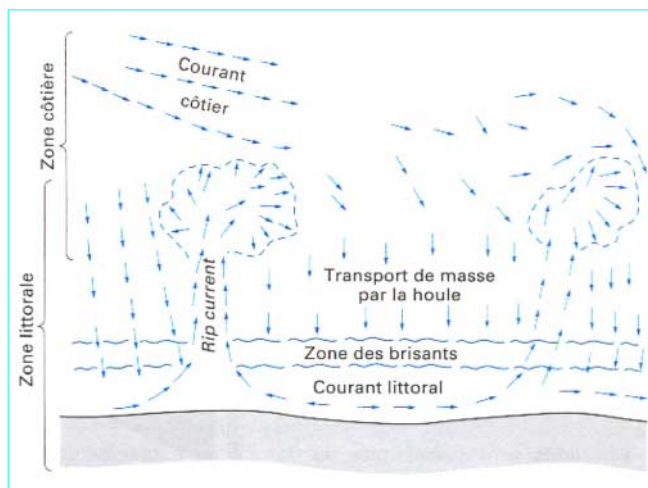


Figure 7 – Schéma général des courants près de la côte
(d'après Sheperd et Inman)



Figure 8 – Plage des Landes modelée par les courants de houle
(photo éditions Photoségor à Hossegor)

2.4 Action des variations du niveau de la mer

La variation lente du niveau des mers et des océans par rapport à la terre va remettre en cause les états d'équilibre précaires.

La surélévation du niveau de l'eau va, par exemple, favoriser une nouvelle phase d'érosion jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre se fasse jour.

À l'inverse, l'abaissement du niveau de la mer peut aboutir à une phase d'engraissement par remontée des matériaux le long de la plage.

3. Équilibres naturels

3.1 Profils d'équilibre d'une plage sableuse

3.1.1 Actions dans le profil

Lorsque l'action de la houle est frontale, le mouvement des matériaux dépend de la violence de l'attaque des lames, tout en restant dans le même profil : il n'y a pas ou peu de mouvements transversaux.

Dans le cas où la houle est faible (période de beau temps), on constate que les matériaux ont tendance à remonter le long de la plage qui, alors, s'engraisse. Les pentes deviennent plus fortes.

À l'inverse, pendant les tempêtes, les matériaux vont être transportés vers le bas de la plage. En tête de plage, la houle va attaquer le cordon littoral en créant de véritables petites falaises de sable quasi verticales qui peuvent atteindre 3 m de haut (figure 9).

Si les matériaux sont entraînés trop loin et trop profondément, ils ne pourront plus être repris par les houles de beau temps dont l'action est plus faible que les houles de tempête. La disparition des matériaux entraîne alors l'appauvrissement du stock disponible.

À long terme, l'usure des matériaux, qui rend ceux-ci plus mobiles, entraîne aussi une diminution inéluctable du stock.

En l'absence d'apports, naturels ou artificiels, les plages sableuses ont une tendance naturelle à l'érosion.

3.1.2 Profil d'hiver

Dans nos régions, l'hiver est la période pendant laquelle on observe de nombreuses tempêtes. La houle, en dégraissant la plage, va provoquer un raiçissement du haut estran et un adoucissement de la partie basse.



Figure 9 – Mini-falaise de sable – Plage de Soustons

Ce phénomène est encore accentué si les houles ne sont pas frontales. On constate un basculement de la plage et un très fort dégarnissement de la partie la plus attaquée.

3.1.3 Profil d'été

À la fin de l'hiver, les houles de beau temps vont reprendre les matériaux et modeler la plage. Les directions de ces houles n'étant généralement pas les mêmes que celles d'hiver, le rivage n'aura pas forcément la même direction.

À la suite de mesures réalisées en nature, on estime que le remaniement des matériaux dans le profil atteint, dans certains cas, 500 000 m³ par km de plage et les différences de niveau été-hiver peuvent être de 2 voire 3 m.

La figure 10 montre les variations observées sur la plage de Capbreton. Le profil d'été s'établit un peu au-dessus du monticule de sable appuyé sur le perré de haut de plage (février 1995). Ce monticule aura disparu deux mois plus tard.

3.2 Profils d'équilibre d'une côte à falaise

3.2.1 Action des éléments naturels

Les falaises, notamment si elles sont constituées de matériaux relativement tendres comme la craie, sont soumises à des actions érosives d'origine terrestre : pluie, ruissellement, sources, gel et dégel... qui vont provoquer des éboulements.

Pendant ce temps, la houle qui frappe le pied de la falaise va le nettoyer en usant les matériaux et en les déplaçant longitudinalement.

Ensuite, elle va poursuivre son attaque par érosion du pied et provoquer de nouveaux éboulements qui vont provisoirement protéger le pied de falaise contre l'attaque de la houle.

L'attaque du pied de falaise est renforcée par le fait que les vagues entraînent avec elles des matériaux grossiers (galets) qui vont littéralement bombarder les matériaux en place.

3.2.2 Évolution dans le temps

Le profil d'une côte à falaise va évoluer par à-coups. Le recul de la falaise peut atteindre, en une seule fois, plusieurs mètres, voire quelques dizaines de mètres. Suivra alors une relative période de stabilité.



Figure 10 – Variation de niveau de la plage de Capbreton

Pour pouvoir se faire une idée précise du recul moyen de la falaise sur une période suffisamment longue, on peut recourir à des études d'archives : en France, le cadastre est bien tenu depuis plusieurs siècles et, par comparaison de divers relevés cadastraux éloignés, on peut alors calculer le recul moyen de la falaise et ainsi s'affranchir des phénomènes cycliques (figure 11).

3.3 Zones de sédimentation naturelle

3.3.1 Baies et estuaires

La plupart des côtes, notamment en France, sont à tendance érosive, sauf dans quelques endroits particuliers que sont les baies et les estuaires.

Les matériaux qui transitent le long des côtes vont avoir tendance à converger et à s'accumuler au fond des baies dans des zones relativement calmes qui sont propices au dépôt des matériaux.

Dans le cas des estuaires, le fleuve ou la rivière amène, en plus, des matériaux souvent fins, d'origine terrestre.

Ainsi pour l'estuaire de la Seine, on estime à 3 Mm³ par an le volume des matériaux de type sableux qui proviennent du Cotentin et des plages du Calvados et qui se déposent dans la zone estuarienne.

Le maintien d'activités portuaires dans ces zones demande des aménagements particuliers décrits dans l'article *Principes d'implantation et d'aménagement des ports* [C 4 640].

3.3.2 Baie du Mont-Saint-Michel

Autrefois, le Mont-Saint-Michel était entièrement entouré d'eau. Pendant de nombreuses années, les aménagements ont visé à accélérer l'ensablement : de 1850 à 1950, plus de 5 000 ha de surface agricole ont été gagnés sur la mer.

L'aménagement des rivières se déversant dans la baie a considérablement réduit le phénomène de chasse, permettant ainsi une sédimentation accrue.

Des études longues et coûteuses ont permis de sélectionner les mesures qui vont permettre de revenir à une situation plus conforme à l'image que l'on se fait du Mont-Saint-Michel.

Les menus envisagés (figure 12) portent sur :

- l'aménagement du Couesnon ;
- la construction de réservoirs de chasse (à marée) ;
- la suppression de la digue de la Roche Torin ;
- l'aménagement de la route d'accès au Mont.

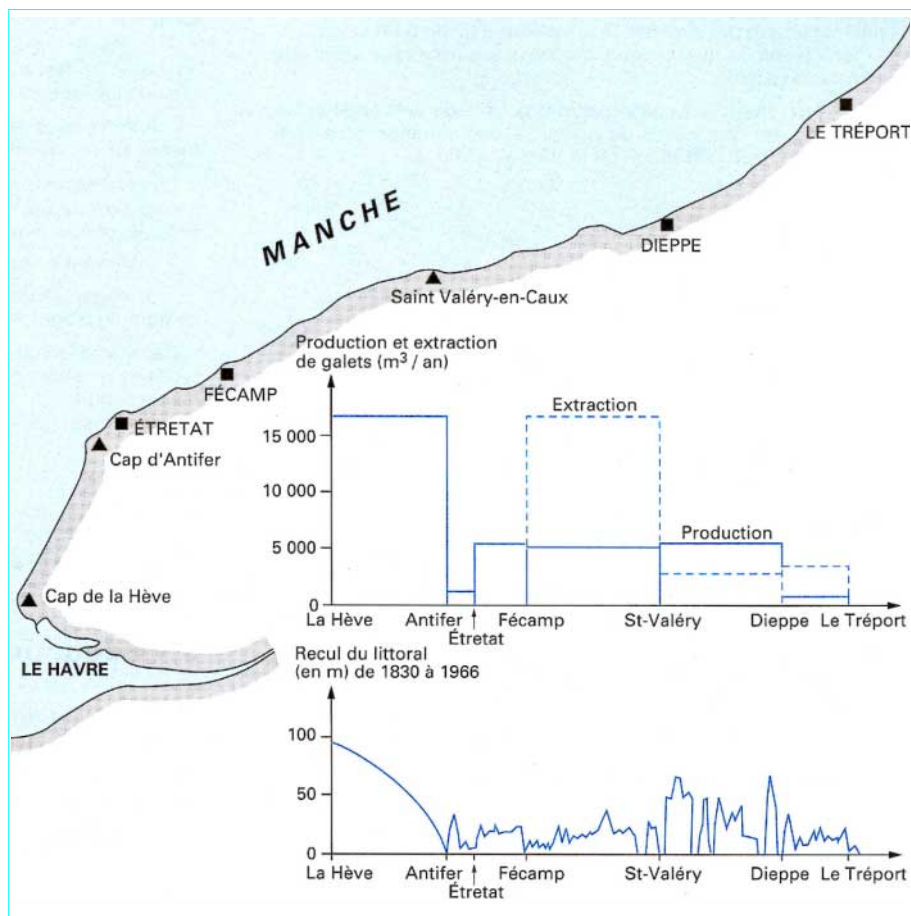


Figure 11 – Recul des falaises du Pays de Caux entre 1830 et 1966

5. Effets des ouvrages. Actions dans le profil

5.1 Réduction de l'action érosive

Les ouvrages de bas de plage vont permettre de réduire l'intensité de la houle qui attaque la côte.

Pour cela, on peut agir directement sur la houle en la faisant déferler sur des digues submersibles. La houle abordant l'obstacle va se briser par manque de profondeur et une grande partie de son énergie va se dissiper dans le matelas d'eau compris entre la digue et la côte.

Pour être efficace, ce type d'ouvrage doit être relativement haut et implanté suffisamment au large, à une distance qui ne devrait pas être inférieure au quart de la longueur d'onde de la houle.

Ces ouvrages continus permettent en outre de s'opposer au départ des matériaux vers le large. Ils sont d'ailleurs utilisés pour la création de plages artificielles suspendues.

Dans ce dernier cas, on veillera à ce que les ouvrages ne soient pas trop hauts de façon à permettre le renouvellement de l'eau.

Une autre solution consiste à disposer au large des portions de digue espacées entre elles. La houle qui aborde ces ouvrages discontinus va être en partie réfléchi par l'ouvrage lui-même. L'autre partie de la houle va continuer son chemin en se diffractant autour des musoirs.

En moyenne, l'énergie qui va aborder la plage sera plus faible que celle contenue dans la houle d'origine, et la houle sera moins agressive.

Les dispositions relatives à ce type d'ouvrage :

- longueur et cote d'arase de chaque élément ;
- espacement des éléments ;
- position du dispositif par rapport à la côte ;

doivent être judicieusement choisies.

Il convient en effet d'éviter la superposition des houles diffractées qui pourraient provoquer des zones de forte érosion dans la mesure où la houle composée peut s'avérer plus agressive que la houle d'origine.

Bien entendu, on peut utiliser conjointement ces deux types d'ouvrage comme pour la réalisation de la plage artificielle du Larvotto (figure 13).

Ces ouvrages peuvent être construits en mettant en œuvre les techniques décrites à l'article spécialisé *Ouvrages de protection contre la houle* [C 4 631], telles que les ouvrages en enrochements ou les digues verticales en caissons.

5.2 Protection contre l'action érosive

La houle, notamment en période hivernale, attaque le haut de la plage. Il est possible de protéger cette zone qui comporte bien souvent d'autres aménagements tels que des routes, des commerces, des habitations, etc.

On dispose alors des ouvrages souvent massifs qui vont s'opposer à l'érosion due à la houle : il s'agit des ouvrages de haut de plage.

Autrefois, on construisait un perré incliné en maçonnerie surmonté d'un mur de garde (chasse-mer) qui renvoyait la houle vers le large. Cette houle réfléchi va heurter violemment la vague suivante et la faire déferler, provoquant une forte mise en vitesse et facilitant le franchissement du mur (figure 14).

On peut améliorer les choses en disposant, en avant du mur, des enrochements qui vont dissiper une partie de l'énergie de la houle (figure 15).

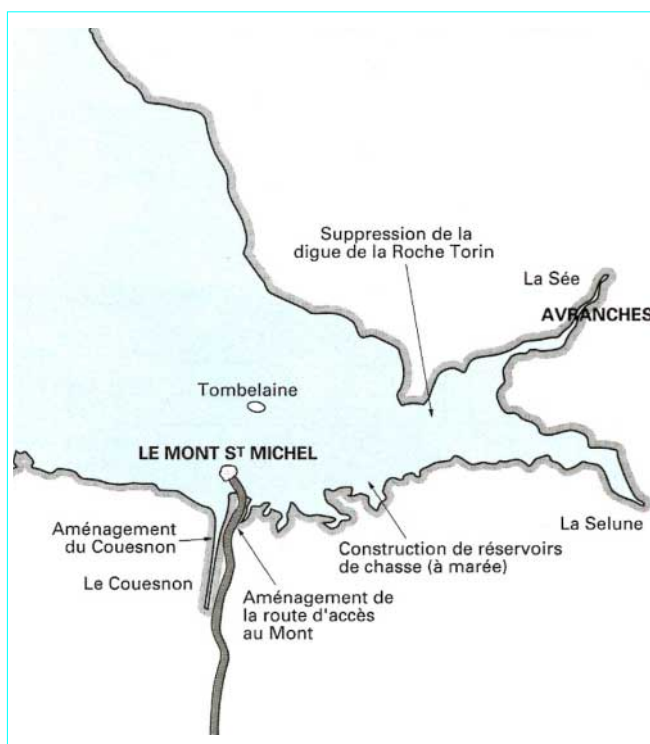


Figure 12 - Réaménagement de la baie du Mont-Saint-Michel

Toutes ces mesures tendent, en fait, à empêcher les dépôts de matériaux et à éroder certains endroits en rendant toute leur puissance hydraulique aux agents naturels : les rivières, mais aussi et surtout la marée.

4. Principes d'aménagement

Les principes d'aménagement du littoral peuvent être divisés en deux grandes familles :

- les actions qui visent à lutter contre les causes ;
- les actions réparatrices ou de compensation.

Dans le premier cas, on essaiera d'agir sur les phénomènes naturels pour aller dans le sens souhaité :

- diminuer l'érosion des falaises en aménageant la partie terrestre (drains, végétation...), mais aussi en bloquant les éboulis en pied de falaise pour obtenir une autoprotection ;
- diminuer l'action des houles de tempête en les faisant déferler au large et les transformer ainsi en houles de « beau temps » lorsqu'elles abordent les plages ;
- lutter contre la sédimentation en renforçant les courants de marée au lieu de les atténuer.

Dans le second cas, on se contentera de réaliser des aménagements ou des ouvrages pour compenser l'effet des phénomènes naturels ou carrément pour s'y opposer :

- recharger en sable une plage trop érodée ;
- protéger une route de bord de mer en construisant une digue de haut de plage, etc.

Dans la plupart des cas, il faudra recourir simultanément aux deux types de mesures qui permettront d'avoir un effet immédiat (mesures de compensation) tout en favorisant les évolutions à long terme par des aménagements adéquats.

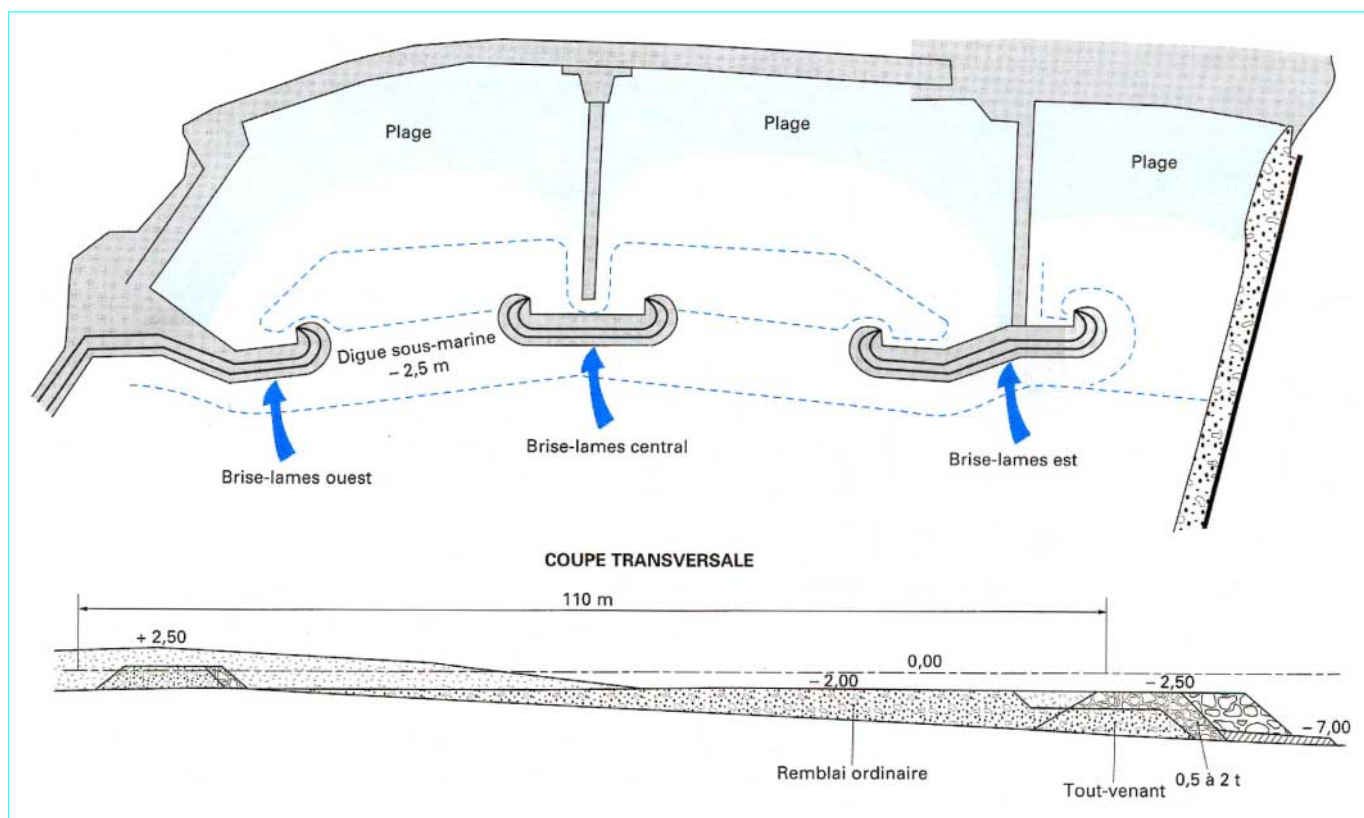


Figure 13 – Plage artificielle du Larvotto

Il faut prendre garde à disposer des ouvrages aussi peu réfléchissants que possible, faute de quoi, les vitesses horizontales augmentant, les matériaux seront plus facilement mis en mouvement et l'érosion accrue. Cette érosion peut dans certains cas mettre en péril l'ouvrage lui-même, par affouillement du pied.

Une bonne solution consiste à mettre en œuvre des enrochements naturels ou des blocs artificiels comme pour la protection de la route littorale à la Réunion (figure 16).

Cette solution présente toutefois quelques inconvénients pour les plages à vocation touristique : les enrochements se couvrent d'algues glissantes et peuvent s'avérer dangereux pour les estivants qui s'aventurent dessus.

Dans un certain nombre de cas, ils peuvent être masqués l'été par le sable ou les galets, notamment lorsqu'ils sont englobés dans le profil d'été (comme à Capbreton dans les Landes).

5.3 Mesures de compensation

La première mesure à envisager est bien entendu l'entretien des ouvrages existants de façon à ce qu'ils puissent continuer à assurer correctement leur rôle.

Une autre mesure, qui a un effet immédiat, est de procéder au rechargement de la plage trop amaigrir.

Il faudra alors choisir le matériau adéquat, notamment sa forme, sa taille et sa densité.

Un matériau concassé permet, pour un temps, d'obtenir des pentes plus raides qu'un matériau roulé.

On peut utiliser des matériaux plus gros que celui d'origine, en particulier pour les plages de sable, la limite, pour les zones balnéaires, étant le confort pour les estivants.

Si l'on utilise cette technique, il faudra veiller à ce que le volume mis en œuvre permette de reconstituer le stock nécessaire pour obtenir une protection souple et déformable du littoral.

Il faudra prévoir un entretien important par des rechargements périodiques.

5.4 Ouvrages naturels

5.4.1 Barres

Dans les mers sans marée ou à faible marnage, on constate que le déferlement se produit toujours dans la même zone, là où se sont accumulés des matériaux.

Ces barres fonctionnent comme des ouvrages submersibles de bas de plage et s'autoentretiennent.

Il faut veiller à ce qu'elles ne disparaissent pas, faute de quoi le littoral, naguère protégé, se trouverait exposé à la houle du large.

5.4.2 Massifs coralliens

Dans les mers chaudes, on peut observer la présence de massifs coralliens. Ceux-ci sont constitués d'animaux vivants, les madrépores, qui produisent un calcaire d'excellente qualité.

La mer vient se briser sur ces massifs qui agissent comme de véritables disques submersibles.

À l'intérieur de cette barrière corallienne, on trouve une zone calme (lagon), propice aux diverses activités (pêche, tourisme...).

Il s'agit là d'un équilibre précaire : le massif pousse et se développe sans cesse sous l'action des madrépores mais est écrêté par les lames venant du large.

Si les madrépores viennent à mourir, pour cause de pollution par exemple, ou si l'on exploite les bancs de corail pour fabriquer de la chaux ou du ciment, la protection naturelle est complètement détruite et la côte livrée à l'attaque directe de la houle du large.



Figure 14 - Digue de Socoa - Saint-Jean-de-Luz.
Mise en vitesse des lames sur un parement arrondi

5.4.3 Autres ouvrages naturels

Des bancs de sable, de galets, des barres de rochers peuvent constituer d'excellentes protections naturelles contre l'attaque de la houle.

Il faudra alors veiller à ce que leur existence ne soit pas menacée.

La baie de Saint-Jean-de-Luz est naturellement protégée au sud-ouest par la pointe de Socoa et au nord-est par la pointe de Sainte-Barbe (figure 17). Entre les deux se situe un petit îlot rocheux.

Ces protections naturelles ont fait l'objet de confortement dès le règne de Louis XIII puis grâce à Vauban, et continuent de nos jours à être entretenues (figure 18).

De ce fait, la baie intérieure de Saint-Jean-de-Luz est relativement calme. Toutefois, ne bénéficiant d'aucun apport naturel, les plages ont tendance à se dégarnir et il faut alors procéder à quelques rechargements périodiques.



Figure 15 - Plage de Capbreton. Perré avec protection de pied en enrochements (profil d'hiver)

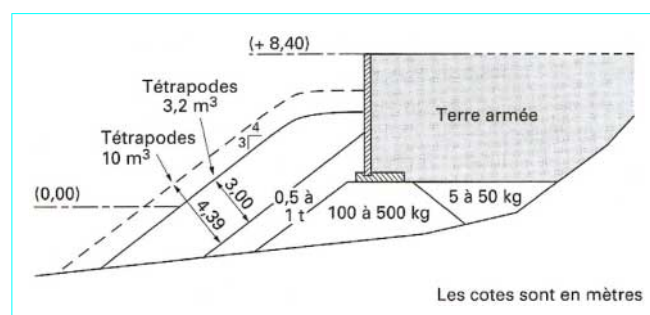


Figure 16 - Protection de la route du littoral à la Réunion



Figure 17 – Baie de Saint-Jean-de-Luz
(photo éditions Lavielle à Anglet)



Figure 18 – Confortement des ouvrages de protection de Saint-Jean-de-Luz

6. Effet des ouvrages. Actions longitudinales

6.1 Actions sur le transit littoral

Une des manières les plus classiques de réduire de façon notable le transit littoral est de lui opposer des obstacles.

Ces obstacles peuvent être très importants comme les jetées d'un port ou être plus petits comme les épis.

Les matériaux tels que le sable, les graviers ou les galets vont se déposer à l'amont de l'épi. À l'aval de l'épi, la portion de littoral n'étant plus alimentée va s'éroder.

6.1.1 Mode de fonctionnement des épis

Pour réaliser une protection constituée d'épis, on procédera par étapes en remontant vers la zone d'où proviennent les matériaux : les épis se rempliront alors naturellement (figure 19).

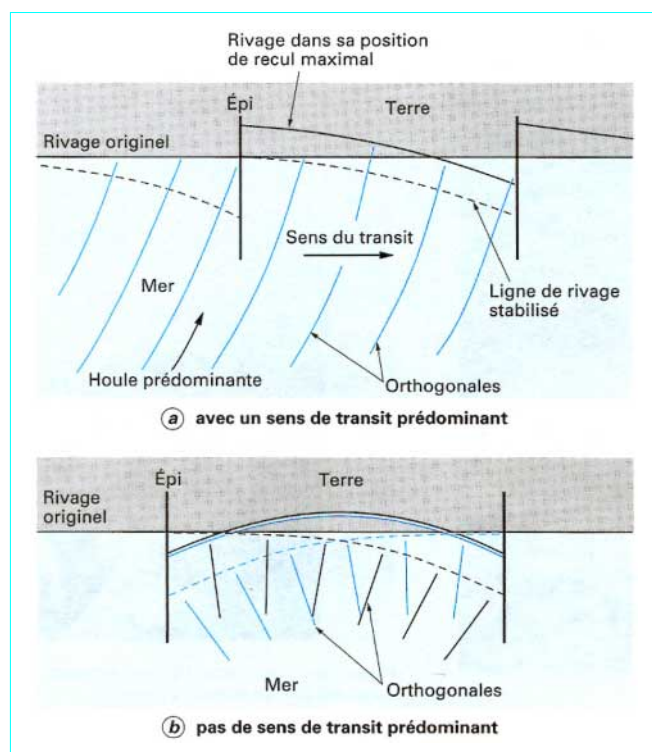
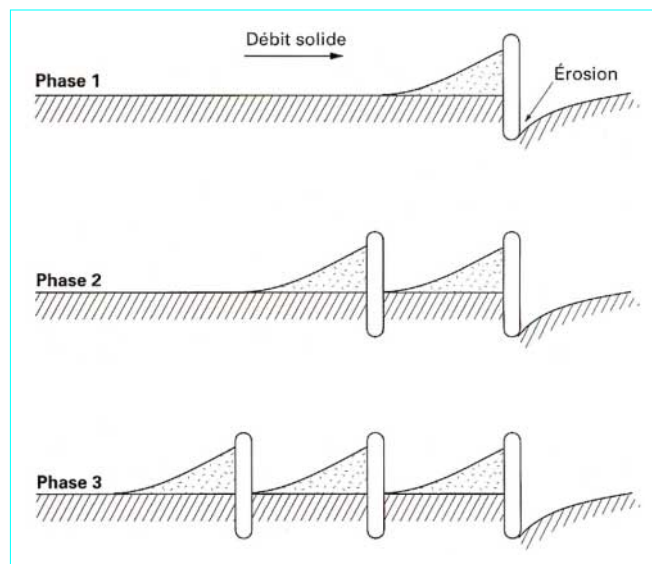
L'action des épis est bien entendu de freiner considérablement le transit littoral, mais aussi de réduire le basculement de la plage. De ce fait, la variation des profils entre deux épis peut être limitée, et cela peut être mis à profit si l'on veut protéger le haut de plage (figure 20).

6.1.2 Dispositions constructives

Les dispositions constructives des épis sont fonction du type de transport littoral et de la proportion de matériaux que l'on veut stopper.

Sur une plage de galets dont la pente est importante et où le transport s'effectue essentiellement par jet de rive, on pourra recourir à des épis courts dépassant largement au-dessus du terrain initial.

Pour une plage de sable fin, où le transport se fait tout au long de l'estran, on aura recours à des épis plus longs dont la saillie ne doit guère dépasser le mètre. La longueur des épis est fonction du transit du bas de plage que l'on veut intercepter.



Les épis peuvent être construits de manière extrêmement diverse en utilisant les matériaux disponibles sur le site, y compris l'acier qui, s'il est utilisé en forte épaisseur, résiste bien à la corrosion et à l'abrasion des matériaux mis en mouvement par la houle (sables et galets) :

- rideau plan en maçonnerie, en béton, en bois, en palplanches ;
- rideau en zigzag permettant un raidissement en tête de l'épi ;
- mur massif en maçonnerie, en gabions remplis de béton ou d'enrochements ;
- épi en enrochements naturels ou artificiels (figure 21) ;
- épi maçonné (dans ce cas, on prendra soin d'éviter les renards en disposant un écran dans le sol) (figure 22) ;
- rangées de pieux en bois, en métal.

On peut aussi utiliser des épis en forme de T qui favorisent la sédimentation en bas de plage (figure 23).

Bien entendu, il faudra veiller au bon état de ces ouvrages qu'il faut entretenir.



6.2 Transit contrôlé des matériaux

L'utilisation des épis peut permettre de stopper le transit littoral. L'adaptation d'épis courts permet de laisser une part non négligeable et relativement contrôlée de matériaux transiter le long du littoral et ainsi permettre de lutter contre l'érosion en aval de la zone aménagée.

De même, on peut agir sur la saillie des épis par rapport au sol naturel. On peut même envisager des épis à panneaux mobiles (figure 24).

Tous ces paramètres doivent être pris en compte au moment de l'établissement du projet : la rectification d'un épi ou d'un système d'épis est souvent possible, mais aussi coûteuse.

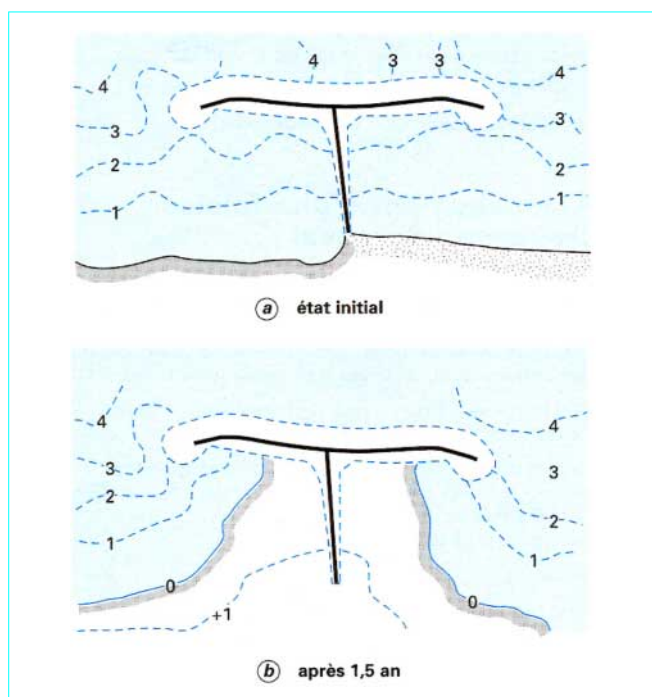


Figure 23 – Épi en T

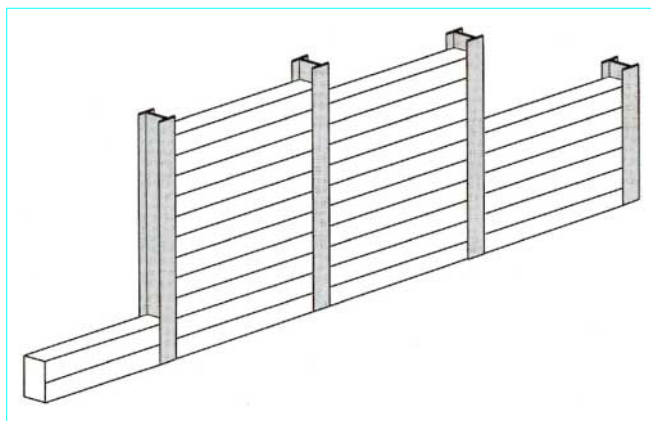


Figure 24 – Épi à panneaux mobiles

6.3 Rétablissement du transit littoral

Dans un système d'épis, le remplissage se fait progressivement à partir de la zone de provenance des matériaux. Une fois le casier plein, l'épi est contourné par les matériaux : au bout d'un certain temps, le transit littoral reprend naturellement.

Dans certains cas, où l'on a interrompu volontairement ou non le transit, on peut être amené à vouloir le rétablir, par exemple, pour lutter contre l'érosion des zones situées en aval.

On peut alors démanteler partiellement ou totalement les aménagements préalablement mis en place.

On peut aussi rétablir artificiellement le transit en prélevant les matériaux en amont et en les transportant en aval.

Cela peut se faire, par exemple, par des moyens de terrassement classiques, par des engins de dragage ou même des pompes et des canalisations à demeure.

Il n'en reste pas moins vrai que ces moyens artificiels sont d'un coût élevé.

7. Aspects écologiques

La réalisation d'un aménagement littoral, quel qu'il soit, va modifier l'équilibre qui s'était instauré au préalable.

Il y a donc lieu d'étudier quelles sont les conséquences à court, moyen et long termes de chaque aménagement projeté. La réponse de l'écosystème va permettre dans un certain nombre de cas de choisir la solution qui permettra de réaliser un consensus.

Bétonner un haut de plage est certainement une solution efficace pour protéger une route littorale, mais cela se fera au détriment de l'esthétique et peut-être de la plage elle-même.

La constitution de plages artificielles sous forme d'alvéoles devra prendre en compte le renouvellement de l'eau, surtout dans les mers sans marée, faute de quoi la plage deviendrait insalubre et certaines algues se mettraient à proliférer.

La protection des zones humides revêt une importance particulière, dans la mesure où elles servent d'abri et de zones de production à de nombreuses espèces sédentaires ou migrantes. À titre d'exemple, citons la baie de Somme, la baie de Seine, la Camargue...

Dans ces zones naturellement soumises à sédimentation, grâce aux apports fluviaux en particulier, on constate une tendance à la prolifération des roseaux qui accélère la sédimentation. On a étudié ce phénomène en baie de Seine lors de la construction des extensions du port du Havre et plus récemment celle du pont de Normandie. Il est apparu que l'on pouvait espérer conserver ces zones dans leur état naturel, tout simplement en y introduisant une quinzaine de chevaux de Camargue : résistants au froid et à l'humidité, ces chevaux piétinent les roseaux dans les zones où ils sont parqués, ils empêchent une sédimentation trop rapide. Leur efficacité serait plus grande que tous les systèmes imaginés. Reste à mesurer cette efficacité à long terme.

Dans ce domaine d'aménagement très sensible à la moindre perturbation, toute solution non traumatisante pour le milieu doit être étudiée avec soin : le succès du maintien du littoral grâce à l'emploi de végétaux et de brise-vent en est une illustration.

8. Études d'aménagement

Compte tenu de tout ce qui vient d'être dit, une étude d'aménagement devra être conduite avec rigueur en y associant à chaque stade tous les partenaires, intervenants ou parties prenantes, de façon à choisir la solution qui réalise la meilleure synthèse.

■ Comprendre les phénomènes

La première phase d'une étude consiste tout d'abord à observer ce qui se passe en nature. Cette phase d'observation peut durer plusieurs années et pourra être raccourcie si l'on dispose d'observations, de mesures et de relevés pour les périodes passées.

On s'attachera à quantifier chacun des aspects :

- actions hydrodynamiques (marées, courants, houles, vents...) ;
- nature et provenance des matériaux ;
- analyse du transport des matériaux dans chaque sens et, surtout, ne pas se contenter d'une estimation du transport résultant (qui peut être beaucoup plus faible) ;
- détection d'éventuels cycles pluriannuels qui peuvent masquer certains aspects.

■ Modéliser les phénomènes

Les phénomènes d'évolution des côtes sont, dans la plupart des cas, très complexes. Dans ces conditions, mener une étude en intégrant tous les paramètres peut s'avérer une tâche impossible dans des délais toujours trop restreints.

La bonne connaissance des phénomènes, tirée de la phase d'observation, va permettre de ne retenir que les paramètres fondamentaux pour la suite de l'étude : si l'on s'intéresse à la migration de galets le long d'une côte, on pourra, sans grand risque d'erreur, négliger les transports en suspension.

Le but de cette phase est de schématiser les phénomènes pour pouvoir les étudier de façon synthétique.

■ Imaginer les scénarios

La suite de l'étude consiste alors à proposer divers scénarios s'appuyant sur des solutions techniques à réaliser par phases.

Ces études vont permettre de préciser le coût des aménagements et d'évaluer leur efficacité. Bien entendu, on pourra à ce stade de l'étude définir plusieurs variantes.

■ Tester les solutions envisagées

On s'attachera alors à tester chacun des scénarios, pour chacune des étapes, de façon à vérifier et à comparer l'efficacité des diverses solutions proposées.

Pour cela, on pourra s'aider de modèles mathématiques, numériques, physiques (cf. rubrique *Modélisation* dans ce traité). Il faut noter que les modèles sédimentologiques physiques sont des outils très lourds, donc coûteux, qui ne fournissent de résultats valables et fiables que si les données de base (observations sur site) sont bien représentatives de la réalité et qu'elles ont été convenablement introduites dans le modèle.

Pour vérifier cela, on essaye de reproduire les évolutions passées sur une période suffisante (calage du modèle).

Il n'est pas rare de constater que le modèle diverge notablement de ce que l'on observe en nature. Il faut alors vérifier que les hypothèses retenues lors de la phase de modélisation sont correctes. Très souvent, cela conduit à réaliser une nouvelle campagne de mesures sur le site.

■ Choisir une solution

Au terme des études techniques, il va falloir retenir un parti d'aménagement et le réaliser. Cela peut se faire à l'aide d'une analyse multicritère.

On accordera une préférence aux solutions qui ont pour objet d'agir sur les causes des phénomènes plutôt que sur les effets : même si elles sont parfois plus coûteuses en première phase, elles sont en général plus efficaces à long terme et leur impact sur l'écosystème est plus facilement accepté.

9. Exemples d'aménagement

Les très nombreuses réalisations, tant en France que dans le monde, permettront au lecteur de se faire une idée des difficultés qu'il y a à mener à bien de tels ouvrages. À côté de cas très complexes comme :

- l'aménagement de la baie du Mont-Saint-Michel ;
- la restauration de la plage de Saint-Aygulf [\[3\]](#) ;
- la construction de la plage artificielle du Larvotto ;

quelques exemples simples d'aménagement méritent d'être cités.

9.1 Aménagement d'une falaise crayeuse : Bruneval

Au nord du port du Havre-Antifer se situe une vailleuse qui débouche directement sur la mer, juste au Nord de la pointe du Groin. Initialement, cette petite plage était constituée de galets provenant de la falaise. Le transit littoral faible était dirigé vers le sud.

Pendant la construction du port du Havre-Antifer, cette plage a vu son équilibre précaire largement modifié.

Au cours d'une tempête nocturne de nord-ouest, la quasi-totalité des galets constituant la plage a disparu sous l'action de la houle pour aller vers des fonds d'une profondeur supérieure à 10 m, près de l'enracinement de la digue principale.

On estime à 20 000 m³ le volume ainsi transporté en une nuit.

L'estran, réduit à un platier quasi horizontal de bancs de craie, aboutissait directement au pied de la falaise où une habitation subsistait. Il n'était plus alimenté par le sud du fait de la présence de la digue. Sous l'action des houles et des quelques galets restants qui bombardaient le pied de la falaise, celui-ci reculait rapidement.

Il fut alors décidé de le protéger par un perré en béton avec un mur chasse-mer. On a ainsi bloqué le recul du pied de falaise. Par contre, la partie basse continuait à s'éroder sous l'action conjuguée de la mer et des galets, action renforcée par la réflexion de la houle sur l'ouvrage.

Les bancs de craie qui constituaient la fondation de l'ouvrage se sont à leur tour érodés, mettant en péril l'ouvrage.

Diverses solutions ont alors été étudiées, dont la réalisation d'un parafoiille en palplanches qu'il aurait fallu battre à travers la craie.

La solution retenue a consisté à revêtir le platier à l'aide d'enrochements naturels de 0,5 à 2 t en partie courante et de 1 à 3 t en tête et en pied (figure [25](#)).

La stabilité de cet ouvrage a été vérifiée sur modèle réduit, car aucune formule de prédimensionnement ne pouvait être appliquée (pente faible, lisse et imperméable).

Depuis, l'ouvrage donne satisfaction. La protection, autrefois apportée par un stock important de galets peu réfléchissants, a été remplacée par celle d'un massif d'enrochements assurant la même fonction.

Beaucoup plus au sud, du côté d'Octeville et de Sainte-Adresse, la protection du pied de falaise est assurée par un stock de galets dont on ralentit le transit grâce à des épis.

9.2 Aménagement d'une plage sableuse : Capbreton

L'ensemble des plages de Capbreton se situe un peu au sud d'Hossegor dont il est séparé par le Gouf de Capbreton (figure 26).

Cette rivière profonde (50 m à l'embouchure, 600 m à quelque distance de la plage) est en fait une véritable barrière sédimentologique.

En effet, le fort transit littoral dirigé du nord au sud transporte de grandes quantités de sable qui devraient se déposer naturellement dans ces grands fonds.

La rivière qui sert d'accès au lac d'Hossegor et au port de Capbreton a son embouchure protégée par deux jetées parallèles décalées, la plus longue étant située au nord.

Les plages situées au sud sont donc privées de tout apport naturel en provenance du nord.

Pour les stabiliser, on a procédé à divers aménagements.

■ En haut de plage, pour éviter le recul qui aurait mis en péril la route et les bâtiments avoisinants, a été réalisé un perré imperméable incliné en béton dont le pied est protégé par des enrochements qui sont noyés dans le sable fin en été et sont dégarnis par la houle en hiver.

■ Pour diminuer le basculement des plages, deux épis en enrochements ont été construits.

■ Enfin, pour compenser les érosions d'hiver, les plages sont rechargées périodiquement avec des matériaux prélevés au nord contre la digue côté Hossegor.

Ces prélèvements inférieurs aux atterrissements ne mettent pas en cause l'équilibre dynamique des plages situées au nord (Hossegor, Seignosse, Soustons).

Grâce à l'utilisation de ces diverses techniques : ouvrages de haut de plage à coefficient de réflexion amélioré, cloisonnement de la plage au moyen d'épis et enfin rechargement, les touristes peuvent utiliser ces plages durant l'été.

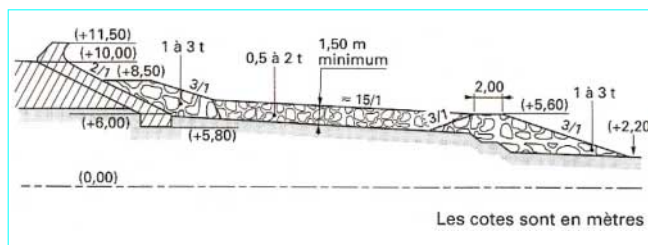


Figure 25 – Aménagement de la plage de Bruneval



Figure 26 – Aménagement de la plage de Capbreton marée haute (photo éditions Photoségor à Hossegor)

Références bibliographiques

- [1] BONNEFILLE (R.). – *Cours d'hydraulique maritime*. École Nationale Supérieure des Techniques Avancées. Masson (1990).
- [2] CHAPON (J.). – *Travaux maritimes*. Eyrolles (1972).
- [3] CHAVAND (M.) et MIGNIOT (C.). – *Exemple de protection du littoral : Reconquête de la plage de Saint-Aygulf (département du Var)*. La Houille Blanche n° 4 (1992).
- [4] CIRIA (Construction Industry Research and Information Association). – *Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering*. Special Publication 83/CUR, Report 154.
- [5] CERC (Coastal Engineering Research Center). – *Shore Protection Manual* (1984).
- [6] GRAILLOT (A.) assisté de : MM. CAMINADE, FOURGEAUD, JANOUËIX, JOLIVET, LEVEN, TUAL et HAUVILLE. – *Cours de travaux maritimes*. École Nationale des Travaux Publics de l'État (1982). Institut Portuaire d'Enseignement et de Recherche (1987).
- [7] GRAILLOT (A.) et ROSSE (B.). – *Défense des côtes*. CIPF Arras (1976).
- [8] LAVAL (D.). – *Cours de travaux maritimes*. École Nationale des Ponts et Chaussées (1963-1964).
- [9] LCHF (Laboratoire Central d'Hydraulique de France). – *Plages et littoraux artificiels* (1972).
- [10] LEPETIT (J.P.). – *Protection du littoral. Problèmes posés, moyens d'étude et ouvrages de défense*. Rapport HC042/72222. LNH (1972).
- [11] MIGNIOT (C.). – *La défense des côtes. L'action des courants et de la houle sur les fonds de vase*. LCHF (1977).
- [12] MIGNIOT (C.). – *Action des courants, de la houle et du vent sur les sédiments*. La Houille Blanche n° 1 (1977).
- [13] MIGNIOT (C.) et MANOUJIAN (S.). – *Un exemple des difficultés de la protection du littoral contre l'érosion marine : le cas de la côte d'Anglet (Pyrénées-Atlantiques)*. La Houille Blanche n° 4/5 (1979).
- [14] MIGNIOT (C.). – *Érosion et sédimentation en mer. Les causes et les moyens d'action*. Extrait de : *La pratique des sols et fondations*. Le Moniteur (1981).
- [15] MIGNIOT (C.). – *Manuel sur l'hydrodynamique sédimentaire et l'érosion et la sédimentation du littoral*. Cours enseigné à l'ENTPE et à la faculté des Sciences d'Orsay – Paris-Sud (2 tomes) (1987).