



Contrat de service B4-3301/2001/329175/MAR/B3
"Erosion côtière – Evaluation des besoins d'action"
Direction générale de l'environnement
Commission européenne

Vivre avec l'érosion côtière en Europe: Espaces et sédiments pour un développement durable

***Lignes directrices pour la gestion de
l'érosion côtière en Europe :
Les enseignements***

Document traduit de l'anglais

22 mai 2004

Institut national des côtes et de la mer des Pays-Bas (RIKZ)
Union européenne pour la protection du littoral (EUCC)
IGN France International
Université autonome de Barcelone (UAB)
Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)
Institut français de l'environnement (IFEN)
EADS Systems & Defence Electronics

SOMMAIRE

Introduction	5
Enseignement 1 : Types d'érosion, occurrence et facteur humain	6
Enseignement 2 : Origines de l'érosion induite par la nature et par l'homme.....	8
Enseignement 3 : Évaluation de l'impact des activités humaines sur l'environnement et l'érosion côtière	15
Enseignement 4 : Connaissance des processus d'érosion	17
Enseignement 5: Actions de gestion locale dans une perspective plus vaste.....	18
Enseignement 6 : Cellule sédimentaire côtière.....	19
Enseignement 7 : Pas de solution miracle, mais des leçons tirées de l'expérience	21
Enseignement 8 : Définition d'objectifs clairs, du point de vue de la responsabilité	22
Enseignement 9 : Solutions multifonctionnelles et acceptabilité	23
Enseignement 10 : Analyses coûts-avantages	25
Annexe 1 – Vue d'ensemble des modèles de processus côtiers utilisés en Europe ...	27
Annexe 2 – Vue d'ensemble des techniques de gestion de l'érosion côtière utilisées en Europe	31
Annexe 3 – Vue d'ensemble des techniques de surveillance utilisées en Europe	33

Introduction

Ce rapport présente les principales leçons de gestion de l'érosion côtière, apprises dans la pratique. Il a pour but de fournir un état des lieux des solutions de gestion de l'érosion côtière en Europe aux responsables de la protection du littoral aux niveaux européen, national et, en premier lieu, régional et municipal, à partir de la revue de 60 études de cas. La sélection des études de cas était basée sur une variété de critères, visant à obtenir une image représentative de la diversité côtière de l'Europe.

La revue en tant que telle n'émet aucun avis sur le succès ou l'échec des solutions de gestion de l'érosion côtière appliquées. Toutefois, elle essaie de mettre en lumière quels objectifs avaient été assignés à ces solutions à l'origine et dans quelle mesure ces objectifs ont été atteints. Grâce à cette approche, nous supposons que le responsable du littoral, spécialiste ou non en ingénierie côtière, sera en mesure de comprendre, au vu de la série d'expériences européennes, les principaux obstacles qu'il ou elle pourra rencontrer en choisissant le concept de gestion d'érosion côtière le mieux adapté à son secteur.

Suivant la méthodologie -FPEIR (forces motrices, pressions, état, impact, réponses), la revue a abordé les questions suivantes : les causes connues de l'érosion côtière et leur impact actuel et prévu sur les valeurs sociales et économiques, les caractéristiques techniques des solutions proposées et leurs résultats positifs et négatifs du point de vue des habitants locaux. En outre, le rôle des mesures innovatrices (surveillance et modélisation avant la conception de mesures) a été étudié. Les **enseignements** qui sont présentés dans ce rapport reflètent ces questions.

Les principales conclusions tirées de ce rapport ont été incorporées dans le rapport de recommandation de politique d'EUROSION.

Ce rapport, ainsi que les études de cas individuelles, sont reproduits dans leur intégralité dans le guide de gestion du littoral, accessible sur Internet (<http://www.euroSION.org>).

LES ENSEIGNEMENTS DES ÉTUDES DE CAS

Enseignement 1 : Types d'érosion, occurrence et facteur humain

L'influence de l'homme, en particulier l'urbanisation et les activités économiques dans la zone côtière, a transformé l'érosion côtière, processus initialement naturel, en un problème d'intensité croissante. Les impacts défavorables de l'érosion côtière les plus fréquemment rencontrés en Europe peuvent être groupés en quatre catégories : (i) la submersion de la côte, résultat de l'érosion complète des dunes, (ii) la destruction des ouvrages de protection contre la mer, associée à l'érosion de l'avant-plage et au recul du trait de côte et (iii) le recul des falaises, plages et dunes causant la perte de terres à valeurs économique et écologique.

L'érosion côtière est un phénomène naturel qui a toujours existé et qui a contribué, à travers l'histoire, à la formation des paysages côtiers européens. L'érosion côtière, de même que l'érosion du sol dans les bassins-versants, sont les deux principaux fournisseurs de sédiment terrestre aux systèmes côtiers, qui comprennent les plages, les dunes, les récifs, les vasières et les marécages. De leur côté, les systèmes côtiers fournissent un éventail de fonctions comprenant l'absorption de l'énergie des vagues, la nidification et l'éclosion de la faune, la protection de l'eau douce ou le site d'activités récréatives. Cependant, la migration de la population humaine vers la côte et son interférence croissante dans la zone côtière ont également transformé l'érosion côtière en problème d'intensité croissante. Des problèmes que l'on rencontre communément en Europe sont présentés ci-dessous :

- arasement du système de dunes lors d'une seule tempête, ce qui peut avoir pour conséquence la submersion de l'arrière-pays. Ceci est bien illustré par les cas de la côte de la Hollande, de l'Escaut occidental, de la région des Wadden, de Rosslare, de la presqu'île de Hel, de Sylt, de la Camargue, de Vagueira et de Castellon.
- effondrement des propriétés situées en haut des falaises et des dunes, comme des documents le montrent dans les cas de South Down, de Luccombe, de la Normandie, de Hyllingebjerg – Liseleje, de Castellon, de Vale do Lobo et d'Estela.
- destruction d'ouvrages de défense contre la mer par suite de l'abaissement de l'estran, comme à Knokke-le-Zoute, dans l'estuaire Humber, à Ystad, à Chatellaillon, aux Sables d'Olonne, à Donegal, ou réduction des marécages côtiers comme à Elbe ou dans l'Essex.
- perte de terres à valeur économique, telles les plages de Haan, de Sylt, de Mamaia, de Vecchia Pineta, de Giardini Naxos, des Sables d'Olonne et de Ghajn Tuffieha et les terres agricoles de l'Essex ou perte de terres à valeur écologique comme l'île Scharhoern et le long de l'estuaire de l'Elbe.

Dans une moindre mesure, la régression de l'aquifère d'eau douce, associée à celles des massifs de dunes ayant pour conséquence l'intrusion d'eau salée, pourrait être mentionnée, mais ce phénomène a simplement été évoqué et non établi dans les cas examinés par le projet.

Enseignement 2 : Origines de l'érosion induite par la nature et par l'homme

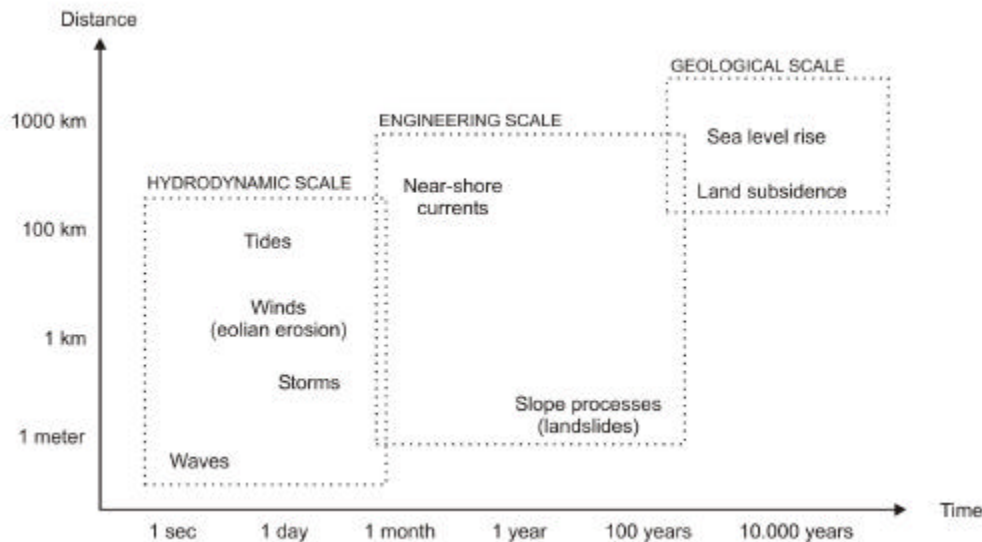
L'érosion côtière résulte de la combinaison de divers facteurs – induits à la fois par la nature et par l'homme – avec des modalités différentes dans l'espace et dans le temps – et qui sont de différente nature (continu ou occasionnel, réversible ou irréversible). Par ailleurs, il reste toujours des incertitudes concernant les interactions des agents de forçage et la signification des causes d'érosion non locales.

Ceci est confirmé par la totalité des cas examinés. Les divers types côtiers, comme nous l'avons montré dans l'introduction aux études de cas, déterminent la différence de résistance à l'érosion. Tandis que les côtes rocheuses dures s'érodent à peine, les falaises tendres et les côtes sédimentaires sont beaucoup moins résilientes. En conséquence, les différents facteurs naturels – agissant à des moments et à des échelles spatiales différentes – remodelent la morphologie côtière conditionnée par le facteur géologique. En outre, des facteurs anthropiques existent dans de nombreux cas et ils influencent aussi le développement morphologique de la zone côtière. Par ailleurs, la cause dominante de l'érosion côtière peut rester « cachée » pendant des décennies sinon des siècles, avant qu'un scientifique ne s'y intéresse et mesure son amplitude. Ceci correspond souvent à des effets qui sont à peine apparents sur le court terme mais seulement après des décennies, et non à des causes locales. Le barrage fluvial appartient à cette dernière catégorie et l'évidence de son impact, sur les processus d'érosion, a été récemment évoqué et, dans un petit nombre de cas, mesuré et démontré. Il est important de mentionner que cette question d'érosion induite par les barrages sur les fleuves fait toujours l'objet de polémiques ou d'expertises contradictoires, comme dans le cas du delta du Tage (Cova do Vapor), du Douro (Vagueira) (Portugal), du Rhône (France) ou du Messologi (Grèce). Dans certains autres cas, tel que celui de l'Ebre (Espagne), le déficit sédimentaire induit par le barrage a été bien établi.

Les figures 1-1 et 1-2 récapitulent respectivement les facteurs naturels et humains responsables de l'érosion côtière et mettent l'accent sur les modèles de temps et d'espace au sein desquels ces facteurs opèrent.

Figure 1-1. Modèles de temps et d'espace des facteurs naturels d'érosion côtière

Noter que la « Distance » et le « Temps » reflètent dans quelle mesure le facteur se produit et cause l'érosion.



Les facteurs naturels

Les vagues. Les vagues sont engendrées par les vents côtiers et les vents du large, qui soufflent au-dessus de la surface de la mer et transfèrent leur énergie à la surface de l'eau. En se déplaçant vers le rivage, les vagues se brisent et l'énergie turbulente libérée remue et déplace les sédiments déposés au fond de la mer. L'énergie des vagues est fonction de leur hauteur et de leur périodicité. En tant que tel, le déferlement de la vague est la cause mécanique de l'érosion côtière qui est constatée dans la plupart de cas et en particulier sur les côtes rectilignes ouvertes sur la mer comme celles du Sussex, de Ventnor, de l'Aquitaine, de Chatelaillon, de la Hollande, de Vagueira, Copa do Vapor, d'Estella, de Valle do Lobo, de la Petite Camargue, de Marina di Massa, de Giardini Naxos, d'Ystad ou de Rostock.

Les vents. Les vents agissent non seulement comme générateurs de vagues mais également comme un facteur du mouvement des dunes côté terre (érosion éolienne). Ceci est particulièrement visible le long des côtes sableuses telles que celles de l'Aquitaine, de Chatelaillon, de Rosslare et de la Hollande.

Les marées. Les marées ont pour résultat une montée du niveau de la mer due à l'attraction des masses d'eau par la lune et le soleil. Lors des grandes marées, l'énergie des vagues est libérée plus haut sur l'avant-plage ou le bas de la falaise (dégagement de falaise). Les côtes à forte marée (c'est-à-dire les côtes le long desquelles l'amplitude de la marée excède 4 mètres), le long de l'océan Atlantique (par exemple Vale do Lobo au Portugal), sont plus sensibles à la montée du niveau de la mer induite par la marée que les côtes à faible marée (avec une amplitude de marée inférieure à 1 mètre)

Courants littoraux. Les sédiments déplacés sur les fonds marins sont transportés par des courants loin de leur lieu d'origine. De son côté, le transport de sédiments grossiers

(sables, galets) définit la limite des cellules sédimentaires côtières, c'est-à-dire le système relativement autonome dans lequel s'accumulent les sédiments grossiers. Les courants sont générés par l'action des marées (courants de flux et de reflux), par les vagues arrivant obliquement sur le rivage (courant de dérive littorale) et par le retour des vagues sur l'avant-plage (courants d'arrachement). Tous ces courants contribuent aux processus d'érosion côtière en Europe. À titre d'illustration, la dérive littorale est responsable de l'enlèvement de volumes considérables de sable à Vale do lobo, sur les plages d'Estela, d'Aquitaine, à De Haan, Zeebrugge, Sylt ou au Jutland. L'érosion induite par le transport sédimentaire des courants transversaux est bien illustrée par les cas des Sables d'Olonne ou du Donegal. Quant aux courants de marée, leur impact sur le transport sédimentaire est maximal aux entrées des bassins de marée ou dans des estuaires comme dans la mer des Wadden, le bassin d'Arcachon, l'Escaut occidental et les estuaires de l'Essex. Dans quelques endroits, les courants littoraux et les cellules sédimentaires associées suivent des voies complexes, à en juger par les cas d'Estela, de Rosslare ou de Falsterbo

Tempêtes. Les tempêtes ont comme conséquence une élévation du niveau de la mer (connue sous le nom d'onde de tempête) et des vagues déferlantes induites par des vents violents. En combinaison avec des marées élevées, les tempêtes peuvent provoquer des dommages catastrophiques comme ce fut le cas le long de la Mer du Nord, en 1953. Outre des dommages à l'infrastructure côtière, les tempêtes font régresser les plages et les dunes de dizaines de mètres en quelques heures ou peuvent considérablement altérer la stabilité d'une falaise.

Au cours des 30 dernières années, un nombre significatif de tempêtes exceptionnelles ont sérieusement endommagé la côte. Exemples illustrant ce phénomène : De Haan et la Hollande (tempête de 1976), Chatellaillon (1962, 1972, 1999), Cova do Vapo et Estela (2000), Normandie (1978, 1984, 1988, 1990) et Donegal (1999).

Élévation du niveau de la mer. Le profil des côtes sédimentaires peut être modélisé comme une fonction parabolique de la taille des sédiments, du niveau de la mer, de la hauteur et de la périodicité des vagues, ainsi que de l'amplitude de la marée. Quand le niveau de la mer monte, la parabole entière doit monter avec elle, ce qui signifie qu'il faut une quantité supplémentaire de sédiments pour construire le profil. Ces sédiments proviennent de la côte (règle de Bruun). Quoique plus grave dans les secteurs vaseux abrités (par exemple les estuaires d'Essex), ce phénomène est reconnu comme un facteur significatif de l'érosion côtière dans toutes les mers régionales : océan Atlantique (Donegal, Rosslare), mer Méditerranée (Petite Camargue, Messolongi, Lakkopetra), mer du Nord (côte de la Hollande), mer Baltique (Golfe de Riga) et la mer Noire.

Mouvements de masse. L'expression « mouvements de masse » englobe une vaste gamme d'interactions terre-mer, qui peuvent avoir comme conséquence l'effondrement, le glissement ou le déplacement de pans entiers de falaises. Ces mouvements de masse impliquent, d'une part, des processus terrestres, comme les précipitations, l'infiltration de l'eau pluviale, le ruissellement, les alternances gel-dégel, et d'autre part, la sape de la base des falaises par les vagues. Les cas de Luccombe, de Birling Gap, de Criel-sur-Mer (Normandie), de Sylt, de Cova do Vapor et de Vale do Lobo illustrent parfaitement ce phénomène .

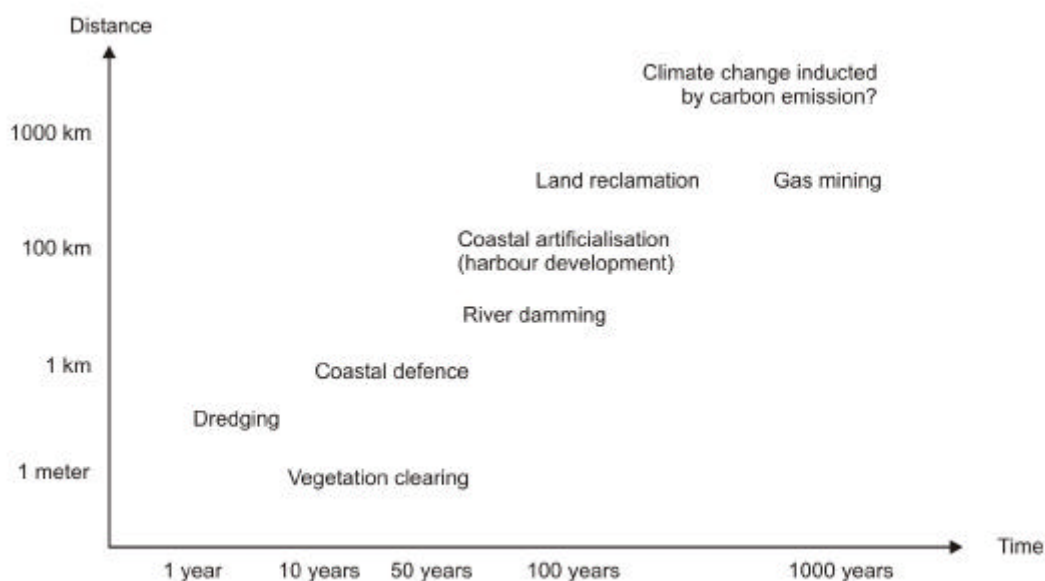
Mouvements verticaux des sols. Ces mouvements qui incluent le relèvement isostatique, les phénomènes tectoniques ou la compaction sédimentaire, peuvent exercer une influence positive ou négative sur l'évolution du trait de côte. Si la majeure partie de l'Europe nordique a bénéficié dans le passé d'un soulèvement continental (par exemple la mer Baltique, l'Irlande ou le Nord du Royaume-Uni), cette tendance s'est arrêtée (à l'exception de la côte finlandaise), comme à Donegal et Rosslare, et s'est même inversée (cas de l'estuaire de Humber). Le long de ces côtes, le niveau de la mer induit par le changement climatique monte plus rapidement que celui de la terre, ce qui a pour résultat une élévation relative du niveau de la mer.

Facteurs humains

Défenses dures. La protection dure du littoral peut être définie comme l'aménagement technologique du bord de mer à l'aide de digues, de brise-lames, de jetées ou de toute structure de roche dure visant à protéger les constructions ou autres biens situés sur la côte l'assaut de la mer. De telles structures modifient les modalités de transport des sédiments côtiers par 3 processus principaux :

- (i) le blocage des sédiments charriés le long du littoral et le déficit de sédiments de la dérive littorale dû au fait que, contrairement aux zones littorales « naturelles », les structures dures n'alimentent pas cette dérive en sédiments. Des exemples sont surtout fournis par les *structures de protection des ports et des marinas*, comme celles de Brighton - Sussex (Royaume-Uni), Aveiro – le cas de Vagueira et de Vilamora - Vale do Lobo (Portugal), Rosslare (Irlande), IJmuiden – le cas de la Hollande (Pays-Bas), Zeebrugge (Belgique), Skanor – Falsterbo (Suède), Messina (Italie) ou par des *épis transversaux* telles que ceux d'Ystad (Suède), du Jutland (Danemark), de Quarteira - Vale do Lobo, de Vagueira, d'Estela (Portugal), de Marina di Massa (Italie) et de la presqu'île de Hel (Pologne).
- (ii) les vagues incidentes réfléchies par les structures rigides entravent la dissipation de l'énergie et augmentent la turbulence, avec comme résultat une érosion transversale accrue du littoral. Ce phénomène s'est paradoxalement amplifié le long des côtes où des digues ont été construites précisément pour contrecarrer l'érosion côtière, ce qu'illustrent bien les cas de Chatellaillon et des Sables d'Olonne (France).
- (iii) la diffraction des vagues, qui est le changement de direction de la crête de la vague due à la proximité de structures de protection dures (jetées ou brise-lames). Ce changement entraîne une dilution de l'énergie de la vague à certains endroits (diminution de l'impact sur le trait de côte) et une concentration de cette énergie à d'autres endroits (augmentation de l'impact sur le trait de côte et de l'érosion consécutive). A noter que dans le cas de Playa Gross (Espagne), la diffraction des vagues induites par un brise-lames semi-circulaire est au contraire utilisée en tant qu'élément de solution à l'érosion côtière.

Figure 1-2. Modèles de temps et d'espace des facteurs humains de l'érosion côtière.



Conquêtes de terres sur la mer. L'impact sur l'érosion côtière des projets de conquête de terres sur la mer, entrepris au 19ème siècle et dans la première moitié du 20ème siècle, n'est devenu évident que depuis quelques décennies. Dans les bassins ou baies de marée (où les travaux de mise en valeur des terres sont le plus facilement entrepris), l'assèchement des terres entraîne une réduction du volume de marée et par conséquent un changement dans les courants de flux et de reflux qui charrient les sédiments. En conséquence, des rivages relativement stables commencent à s'éroder. Les projets de conquête de terres entrepris à Rosslare (Irlande) (en 1845 et 1855) ou dans l'Escaut occidental (Pays-Bas) fournissent un exemple tout à fait illustratif de ce phénomène. En ce qui concerne les projets d'assèchement de terres entrepris le long de côtes ouvertes, comme le projet de Maasvlakte le long de la côte hollandaise (Pays-Bas), les changements dans les processus côtiers ne résultent pas d'une réduction du volume de marée mais des modifications dans la géométrie du trait de côte et des angles de déferlement des vagues.

Ouvrages de régulation des bassins fluviaux. Comme pour la mise en valeur des terres, l'impact des ouvrages de régulation du flux de l'eau sur les processus côtiers n'a été pris en compte que récemment, probablement du fait que de tels impacts ne se voient qu'après plusieurs décennies. Les barrages ont fortement diminué les transports solides des cours d'eau, en piégeant des millions de mètres cubes de sédiments par an. Pour quelques fleuves européens méridionaux (l'Ebre, le Douro, l'Urumea, le Rhône), le volume annuel de décharge de sédiments à la mer représente moins de 10% de son niveau de 1950 (moins de 5% pour l'Ebre), ce qui a pour résultat un déficit considérable de sédiments à l'embouchure des fleuves et une érosion subséquente de la cellule sédimentaire, comme le montrent les cas des deltas de l'Ebre, de Playa Gross (Espagne), de la Petite Camargue -

delta du Rhône (France) et de Vagueira (Portugal). Outre les endiguements fluviaux, toute activité destinée à réduire l'écoulement de l'eau ou à prévenir la submersion fluviale (source importante de sédiments dans le système hydraulique) réduira le volume de sédiments arrivant sur la côte. Ceci est bien illustré par le cas de la régulation du Tage, dont l'impact se ressent encore à Cova do Vapor (Portugal).

Dragage. Les activités de dragage se sont intensifiées au cours des 20 dernières années pour les besoins de la navigation (nécessité de conserver une profondeur d'eau appropriée aux voies maritimes), de la construction (une quantité croissante d'agrégats de construction vient du fond de la mer) et depuis les années 90 pour le rechargement des plages et l'aménagement de zones sous-marines. Le dragage peut affecter les processus côtiers de plusieurs manières :

- (i) par l'enlèvement de matériaux sur les estrans (galets, cailloux), qui protègent la côte contre l'érosion. Par exemple, le ramassage des galets à Hyllingebjerg-Liseleje (Danemark) a déclenché une érosion. À titre d'illustration, on estime que 50 % de tout le volume des cailloux protecteurs (3 millions de mètres cubes) a été extrait au pied des falaises de craie de Normandie (France) depuis le début des années 1900.
- (ii) en contribuant au déficit sédimentaire de la cellule sédimentaire côtière, comme c'est le cas pour l'estuaire de Humber, la côte du Sussex (Royaume-Uni) pour les besoins de la construction (extraction de sable, de graviers et d'éboulis), pour l'Escaut occidental (Pays-Bas) dans des buts de navigation, pour Cova do Vapor (Portugal) où le sable a été dragué de la côte pour fournir des matériaux pour les plages de la Costa del Sol ou pour Marinella di Sarzana et Marina di Ravenna - Lido Adriano (Italie) où l'on a dragué le lit du fleuve.
- (iii) en augmentant la profondeur de l'eau, ce qui a pour résultat de modifier à la fois la réfraction des vagues et les caractéristiques de dérive littorale, comme l'illustre l'exemple de la mer des Wadden (Pays-Bas).

Défrichement. Un nombre significatif de cas a mis l'accent sur le rôle positif de la végétation pour augmenter la résistance à l'érosion des sols - par exemple, en Aquitaine (France) et dans les États baltes : Golfe de Riga (Lettonie), Klaipeda (Lithuanie), Tallinn (Estonie). Dans le même ordre d'idée, les changements de modalités de la mise en valeur des terres, qui tendent à réduire la couverture de végétation en haut des falaises, peuvent augmenter l'infiltration de l'eau et fragiliser la stabilité des falaises. Ceci est bien illustré par les exemples des terrains de golf d'Estela et de Vale do Lobo (Portugal).

Extraction de gaz ou d'eau. Quelques exemples illustrent l'effet de l'extraction du gaz ou de l'eau sur l'affaissement des terrains (mer des Wadden – Pays-Bas). Bien que ce phénomène semble avoir une portée géographique limitée en Europe, ses effets sont irréversibles et peuvent être tout à fait significatifs. A Marina di Ravenna - Lido Adriano (Italie), le terrain s'est affaissé de presque un mètre au cours de ces 50 dernières années, entraînant un déficit sédimentaire important et un fort recul du trait de côte.

Vagues produites par les bateaux. Ce cas est évoqué dans l'étude de cas liée au Golfe de Riga (Lettonie) et à la baie de Tallinn (Estonie). Sur ces deux sites, l'impact énergétique des bateaux et, en particulier, des grands navires rapides (ferries), a été une érosion côtière accrue.

Enseignement 3 : Évaluation de l'impact des activités humaines sur l'environnement et l'érosion côtière

En Europe, l'érosion côtière induite par les activités humaines est plus importante que l'érosion provoquée par les facteurs naturels. L'érosion côtière induite par l'homme provient principalement d'impacts cumulatifs et indirects de projets de petite et moyenne envergure, ainsi que des barrages fluviaux. Cependant, les constructeurs, les responsables chargés des études d'impact sur l'environnement (EIE) et les autorités compétentes n'accordent que peu d'intérêt à ces impacts.

A l'exception des autorités portuaires, les promoteurs de projets ayant un impact sur les processus côtiers n'accordent pas l'attention qu'il faudrait aux changements géomorphologiques le long de la côte. C'est bien ce qui ressort du faible nombre de rapports d'étude d'impact sur l'environnement (EIE) qui indiquent que les modifications des processus sédimentaires côtiers constituent un impact sérieux sur l'environnement. Cependant, il faut mentionner qu'il est toujours très difficile d'obtenir des rapports d'EIE, même lorsque les autorités administratives responsables ont approuvé un projet. L'opinion exprimée ici se base donc essentiellement sur les rapports d'EIE concernant certaines études de cas examinées par EUROSION, ainsi que sur des discussions avec des membres du Comité consultatif d'EUROSION. Les rapports d'EIE examinés concernent l'extension de la Maasvlakte (côte hollandaise – Pays-Bas), les programmes annuels de dragage de l'estuaire occidental de l'Escaut (Pays-Bas), l'extension du port d'Aveiro (Aveiro - Portugal), l'usine de production énergétique de Penly (Normandie - France), les fermes éoliennes offshore allemandes, à l'est de la mer de Wadden et la réhabilitation du bord de mer de Marina di Massa et de Marina di Pisa (Toscane - Italie).

L'intégration relativement faible dans les procédures d'EIE du transport sédimentaire côtier et des changements morphologiques induits peut s'expliquer par le fait que, à l'exception du cas des principaux projets tel celui de l'extension des grands ports, l'érosion côtière ne peut pas être directement attribuée à un seul projet de développement côtier (voir *enseignement 2*). Au contraire, l'impact des projets de petite et moyenne envergure est cumulé à l'impact d'autres aménagements, ce qui tend à diluer la responsabilité de chaque projet individuel dans l'érosion côtière. Ceci est confirmé par le petit nombre de projets de petite et moyenne envergure le long de la côte, pour lesquels l'élaboration d'une EIE est exigée par les autorités compétentes dans la phase de « criblage » (moins de 10 % du nombre total de projets le long de la côte de la Hollande). Même dans les cas où une EIE est exigée, l'impact sur les processus sédimentaires côtiers ne peut être retenu pendant la phase d'« étude sur le terrain » en tant que problème environnemental à prendre en compte par l'EIE. Le tableau 1 fournit une vue d'ensemble de la façon dont l'érosion côtière est actuellement prise en compte pour différents types d'aménagements.

Tableau 1-1. Érosion côtière dans les procédures d'EIE

<i>Type de projets</i>	<i>Impact sur l'érosion côtière</i>	<i>Couvert par une EIE?</i>
Infrastructure et activités portuaires (y compris dragage pour la navigation)	Elevé	Oui
Ouvrages de régulation de l'écoulement fluvial (essentiellement des barrages)	Elevé	Non
Construction en bord de mer	Modéré	Non
Conquête de terres (sur le littoral ou offshore) (exemple, fermes éoliennes)	Modéré	Partiel
Extraction d'agrégats (dragage) pour la construction et le rechargement de plages	Modéré	Oui
Extraction de gaz (élévation du niveau relatif de la mer)	Faible à modéré	Non
Navigaton maritime (vagues produites par les bateaux)	Faible	Non

Le manque de prise en compte des processus de transport sédimentaire côtier dans les procédures d'EIE est souligné indéniablement par le faible degré de sensibilisation des constructeurs et des chargés d'études d'impact sur l'environnement. La négation ou la sous-estimation des impacts des interventions humaines dans la zone côtière, qui intensifient probablement les problèmes d'érosion côtière, a comme conséquence une approche moins efficace de cet aspect de la question.

Certains membres du Comité consultatif d'EUROSION ont recommandé que les directives de la Commission européenne concernant les EIE - et plus spécifiquement celles traitant des évaluations indirectes et cumulatives d'impacts - conduisent à une meilleure visibilité et une compréhension pratique des processus de transport sédimentaire sur le littoral.

Enseignement 4 : Connaissance des processus d'érosion

La connaissance des agents de forçage provoquant l'érosion côtière et leur interaction complexe tend à s'améliorer avec le temps. Cependant, cette connaissance est fragmentée et empirique, comme le reflètent les différents types de modèles communément utilisés en Europe pour prévoir les changements morphologiques sur le littoral.

Depuis les années 50, des efforts majeurs ont été entrepris pour comprendre le comportement des systèmes côtiers et mieux comprendre les interactions entre les vagues, le vent, les marées, le profil des estrans, le transport sédimentaire et, finalement, l'évolution de littoral. Ces efforts ont conduit au développement de modèles, qui sont aujourd'hui généralement employés dans l'ingénierie côtière.

L'annexe 1 fournit une vue d'ensemble des modèles concernant les processus côtiers et utilisés dans le cadre des études de cas examinées par EUROSION ou mentionnées dans leur bibliographie. Cette vue d'ensemble prouve clairement que la compréhension des processus côtiers reste toujours largement fragmentaire et empirique. En raison de cette fragmentation, différentes théories bâties sur différents concepts, hypothèses et approches, ont été développées depuis les années 50 et ont produit différents modèles plus ou moins compatibles. Cette multiplicité de modèles peut se comprendre du fait de la complexité des phénomènes impliqués dans les changements morphologiques côtiers et de leurs interactions, qui demeurent en grande partie inexplicables. En raison de leur pertinence pour la gestion de l'érosion côtière, une attention particulière a été accordée, lors de la revue, aux modèles simulant :

- l'élévation du niveau de la mer induite par la force d'entraînement du vent
- la transformation des vagues à l'approche du littoral par réfraction, réflexion et diffraction
- l'effet des tempêtes sur le profil des dunes
- l'effet de l'élévation du niveau de la mer sur le profil des plages
- les interactions vagues-plage comprenant le déferlement, l'approche et l'étalement des vagues sur l'estran
- le transport sédimentaire, en particulier le transport de sable, vase et mélange sable/vase par la dérive littorale et les courants transversaux

Les agents forçant les phénomènes mentionnés ci-dessus - géométrie du trait de côte, amplitude et période des vagues, vitesse et direction de vent, marées astronomiques, vitesse des courants, profondeur de l'eau, rugosité du fond marin, bathymétrie, profil de l'estran et taille des sédiments - sont communs à une majorité de modèles, mais la manière dont ces agents sont combinés change d'un modèle à l'autre. Dans la pratique, un nombre significatif de modèles empiriques et semi-empiriques simples (par exemple la règle de Bruun ou l'équation du CERC) sont appliqués avec des résultats acceptables dans un petit nombre de situations (par exemple, pour les côtes rectilignes ouvertes, les littoraux en pente douce, les estuaires, le phénomène négligeable de la diffraction et de la réflexion,

etc.). Cependant, ces modèles sont fortement limités, ce qui empêche de les utiliser dans d'autres situations.

Par ailleurs, des théories bien établies, comme celle du transport de Bijker (1971) existent et couvrent un grand nombre de situations, mais elles requièrent des mesures sur le terrain et des possibilités considérables de calcul.

La conséquence opérationnelle de cette vaste gamme de modèles est que les ingénieurs côtiers ne savent jamais à l'avance quel modèle sera adapté à leur situation spécifique. En général, il faut apporter des améliorations aux modèles existants pour pouvoir vraiment répondre aux conditions particulières des études de cas, par exemple le modèle ESTMORF, spécifiquement développé pour simuler les changements morphologiques de l'estuaire occidental de l'Escaut (Pays-Bas). Les enseignements des études de cas examinés dans le cadre d'EUROSION montrent également que la reproduction de modèles existants peut être dangereuse puisque la réponse du littoral aux solutions envisagées peut ne pas être conforme aux prévisions des modèles. Ceci est illustré par le cas de Rosslare (Irlande) où le littoral a réagi, de manière imprévue, à un schéma massif de rechargement de la plage par la formation d'un banc de sable sur l'avant-côte ou encore le cas de Playa Gross (Espagne) où la réponse observée de la plage au régime des vagues et des marées dépasse certaines conditions météorologiques.

Enseignement 5: Actions de gestion locale dans une perspective plus vaste

Les mesures de gestion de l'érosion côtière prises dans le passé ont été généralement définies dans une perspective locale. Elles ont ignoré l'influence d'agents de forçage non locaux et ont négligé les processus de transport sédimentaire dans l'ensemble du système côtier. En conséquence, elles ont aggravé les problèmes d'érosion côtière au niveau local et ont provoqué de nouveaux problèmes d'érosion à d'autres endroits. Elles influencent toujours la conception des mesures actuelles.

Du point de vue historique, beaucoup d'ouvrages durs de protection ont été mis en place pour arrêter l'érosion localement et protéger les biens en danger. Bien que performants sur le court terme, leur efficacité s'est révélée la plupart du temps insuffisante à plus long terme. En avant des digues-promenades, des murs de type perré et des enrochements, la plage a continué à s'éroder en raison de la réflexion des vagues. Ceci a déstabilisé des constructions. L'entretien des ouvrages s'est avéré coûteux. Certains d'entre eux n'ont pas pu résister à l'attaque de la mer et se sont effondrés. Ceci a exigé des reconstructions coûteuses ou l'édification de nouveaux ouvrages. Dans d'autres cas, la construction d'épis et de brise-lames a eu pour conséquence un déplacement de l'érosion vers les secteurs avoisinants et demandé davantage de protection pour les biens en danger. Conséquence : un *effet domino* des ouvrages de défense, par exemple dans la presqu'île de Hel (Pologne) où une batterie complète d'épis avait été construite sur une distance de 12 km. Dans de nombreux cas, les épis n'ont pas pu empêcher l'érosion à long terme. De nos jours, quelques structures de défense côtière, héritées des stratégies d'aménagement passées, sont toujours en place comme les digues de Playa Gross (Espagne, construites en 1900),

de Chatellaillon (France, 1925), De Haan (Belgique, 1930) ou les dunes végétalisées du Jutland occidental (Danemark), stabilisées dans les années 1900. Elles continuent à interférer avec les processus sédimentaires – de manière positive ou négative. La perspective locale traditionnelle de gestion de l'érosion côtière est illustrée par le faible nombre de rapports d'impact environnemental (EIE) qui considèrent la perturbation des processus sédimentaires côtiers comme un impact environnemental sérieux (*Enseignement 3*).

Certains cas fournissent une exception à l'image décrite ci-dessus. Comme celui, intéressant, de Marinella di Sarzana (Italie), où des communautés voisines ont coopéré avec succès à un projet combiné de gestion de la zone côtière et d'un fleuve, ce qui a conduit à une proposition de projet intégré, qui est soumise à des procédures d'évaluation d'impact sur l'environnement.

Enseignement 6 : Cellule sédimentaire côtière

Pour tenter de mieux répondre localement aux causes non locales de l'érosion côtière et prévoir l'impact des mesures de gestion de l'érosion, dans un certain nombre de cas, principalement en Europe du Nord, les stratégies de gestion de l'érosion côtière sont bâties sur le concept de « cellule sédimentaire », ainsi que sur une meilleure compréhension des modalités du transport sédimentaire au sein de la cellule sédimentaire. Une telle approche exige une solide coopération entre les régions qui partagent une même cellule sédimentaire.

Au vu des causes et de l'ampleur de l'érosion marine, l'introduction du concept de "cellule sédimentaire côtière" constitue indéniablement une percée importante, car elle aide à fixer les limites géographiques des investigations sur les causes de l'érosion et à déterminer l'impact des mesures d'atténuation des effets de l'érosion (par exemple en Normandie, à Vagueira, en Essex, sur la côte de l'île de Wight, la côte de la Hollande et la mer des Wadden). Une cellule sédimentaire côtière peut être définie comme une portion de trait de côte et de zones côtières associées à l'intérieur de laquelle le mouvement des sédiments est en grande partie confinée. Dans la pratique, cela signifie que les mesures prises dans une cellule sédimentaire spécifique pourront avoir un impact sur d'autres secteurs de la même cellule sédimentaire, mais qu'elles n'affecteront pas les cellules adjacentes.

Vu sous l'angle de la cellule sédimentaire côtière un déficit sédimentaire limite la capacité du littoral à s'adapter à des circonstances changeantes. En outre, les ouvrages d'ingénierie, comme les digues portuaires ou les brise-lames, peuvent bloquer une partie du transport sédimentaire naturel. Une certaine quantité de sédiment est alors emprisonnée par ces ouvrages et elle n'est plus librement disponible dans la cellule. Des effets similaires se produisent, par exemple dans le Sussex, où la stabilisation des falaises empêche l'entrée naturelle dans la cellule des sédiments issus de l'érosion des falaises. Par conséquent, la rétention de sédiments par les ouvrages de défense est moins favorable que le recours à des mesures qui perturbent les processus naturels à un degré

moindre ou à de mesures qui renforcent même les processus naturels, par exemple le rechargement des plages et des avant-plages. Dans ce dernier cas, on peut même dire qu'on « travaille avec la nature ».

Le concept de la cellule sédimentaire côtière conduit à adopter les trois principes essentiels de gestion du littoral qui suivent et qui ont été expérimentés en Normandie, dans le Sussex, à l'île de Wight, dans l'Essex, sur la côte de la Hollande et sur celle de la mer des Wadden :

1. Conserver la quantité totale de sédiments (en mouvement ou dormant) dans le système côtier
2. Lorsque l'on prend des mesures, essayer de travailler avec les processus naturels ou les perturber le moins possible
3. S'il n'y a pas d'autre option possible, utiliser des ouvrages pour maintenir les sédiments en place

Le concept de cellule sédimentaire présente cependant des limites importantes compte tenu de l'évolution de ces cellules avec le temps. Les processus sédimentaires dans une cellule donnée ne sont pas totalement "autonomes" et des transferts de sédiments dans les cellules adjacentes peuvent finalement s'avérer non négligeables après une longue période. En outre, le concept de cellule sédimentaire est limité aux processus se produisant le long du trait de côte et n'inclut pas les causes d'érosion côtière se situant à l'intérieur des terres, comme la réduction de volume des sédiments fluviaux ou la modification des embouchures de fleuve et des niveaux d'eau dans un estuaire, comme dans le cas du Golfe de Riga. Ces limites ont finalement conduit, dans certains cas comme en Essex, à rechercher à déterminer la dimension géographique réelle d'une cellule sédimentaire.

Enseignement 7 : Pas de solution miracle, mais des leçons tirées de l'expérience

L'expérience a montré, qu'actuellement, il n'existe pas de solution miracle pour contrecarrer les effets néfastes de l'érosion côtière. De bons résultats ont été obtenus en combinant différents types de défense du littoral - ouvrages durs et interventions douces - en tirant profit de leurs avantages et en atténuant leurs inconvénients respectifs.

Partant de l'observation que l'érosion côtière résulte d'une combinaison de divers facteurs induits par la nature et par l'homme (*enseignement 2*), il n'est pas surprenant qu'il n'existe pas de solution miracle pour contrecarrer les effets néfastes de l'érosion côtière. Néanmoins, le principe général de « travailler avec la nature » a été proposé comme point de départ dans la recherche d'une solution satisfaisante (*enseignement 6*).

Cependant, cette observation s'appuie incontestablement sur l'idée que les solutions douces sont préférables aux solutions dures. Ceci est confirmé par un certain nombre de considérations tirées de l'expérience :

Même les solutions douces qui ont eu du succès - comme le rechargement des plages, qui a suscité un grand enthousiasme ces 10 dernières années - ont fait l'objet de réserves sérieuses. Ces réserves peuvent s'expliquer par un schéma de rechargement inadéquat induit par une compréhension insuffisante des processus sédimentaires (critique technique), par l'accès difficile aux réserves de sable, ce qui entraîne des coûts plus élevés (critique financière) ou des effets nuisibles inattendus sur l'environnement naturel, en particulier la faune benthonique (critique environnementale). Des exemples sont donnés par le cas de Vale do Lobo (Portugal) où 700 000 mètres cubes et 3,2 millions d'euros d'investissement ont été balayés par la dérive littorale en quelques semaines, le cas de l'Ebre où le volume de sédiments nécessaire pour recharger la plage a été importé d'une autre région et le cas de Sitges (Espagne) où le dragage du sable a causé des dommages irréversibles aux herbiers de posidonies (*Posidonia*).

Les solutions douces, du fait de leur manière particulière d'assister la nature, ne s'avèrent efficaces que dans une perspective de moyen à long terme, c'est-à-dire lorsque l'érosion côtière ne constitue pas un risque dans une perspective à court terme (5 à 10 ans). Leur impact ralentit en effet la régression du trait de côte mais ne l'arrête pas. L'effet positif des solutions douces, à long terme, peut être optimisé par des ouvrages en dur, qui permettent d'aborder efficacement un problème d'érosion, mais qui ont une durée de vie limitée (en général pas plus de 10 ans). Ceci a été particulièrement bien établi dans les cas de la Petite Camargue (France), où la présence de structures dures s'est avérée fournir une visibilité suffisante de défense tandis que des écrans brise-vent permettaient de reconstituer des dunes, De Haan (Belgique), où une digue procure la sécurité nécessaire aux biens socio-économiques cependant que le rechargement de la plage avec une berme subtidale donne une stabilité à long terme aux dunes environnantes, du Jutland occidental (Danemark), où l'utilisation de brise-lames isolés réduit les dépenses liées au rechargement de la plage. En outre, au Royaume-Uni, la plupart des cas étudiés qui bénéficient de plans de gestion du littoral (PGL), allient différents types de techniques.

L'annexe 2 résume les principaux avantages et inconvénients associés à chaque technique de gestion individuelle de l'érosion côtière.

Enseignement 8 : Définition d'objectifs clairs, du point de vue de la responsabilité

L'attribution d'objectifs clairs et mesurables aux solutions à apporter à l'érosion côtière - exprimées par exemple en termes de niveau raisonnable du risque, de perte tolérée de terres ou de capacité de charge de plage /dune - optimise leur rentabilité à long terme et leur acceptabilité sociale. Ceci a été facilité par la diminution des coûts liés aux outils de surveillance.

Dans la plupart des études de cas examinées, le recul du trait de côte est un phénomène que l'on observe depuis plus de cent ans. Dans quelques cas, comme à l'Île de Wight (Royaume-Uni), il est évident que les hommes luttent contre le recul du littoral depuis des milliers d'années. Par ailleurs, et bien qu'elles vieillissent, certaines structures de défense côtière, héritées des stratégies de gestion passées, sont toujours opérationnelles et continuent d'affecter les processus sédimentaires – de manière positive ou négative – comme le signale l'*enseignement 5*. Dans d'autres cas, les solutions dures et douces appliquées ont eu une durée de vie qui n'a pas excédé quelques mois, comme les épis en bois de Rosslare (Irlande) ou de Chatelaillon (France) - ou quelques semaines, comme le rechargement de Vale do lobo (Portugal). Ceci met l'accent sur la nécessité d'une surveillance adéquate et prolongée des solutions apportées à l'érosion côtière puisque ces solutions peuvent ne pas atteindre l'efficacité visée ou, au contraire, peuvent continuer à avoir des effets sur d'autres composantes du système côtier même au delà de leur durée de vie initialement prévue.

Les expériences tirées des études de cas ont également indiqué que les solutions apportées à l'érosion côtière, pour lesquelles des objectifs clairs ont été définis à l'avance et pour lesquelles des programmes de contrôle réguliers ont été appliqués, permettent de détecter plus vite tout décalage entre la réponse prévue du littoral et la réponse effective du littoral. Elles permettent également de décider d'actions correctives visant à économiser un montant significatif d'argent sur le long terme, comme l'illustrent les cas de la côte occidentale du Jutland (Danemark), celle des South Downs (Royaume-Uni) et celle de Playa Gross (Espagne).

Toutefois, il est important de noter que les programmes de contrôle réguliers sont toujours une exception en Europe et non une règle générale. Il existe, en particulier, un fossé significatif entre l'Europe du Nord et l'Europe du Sud au niveau de l'utilisation systématique des techniques de surveillance du trait de côte dans le cadre des politiques de gestion du littoral.

Des pays comme le Royaume-Uni, les Pays-Bas et les Länders allemands ont généralisé l'utilisation régulière du LIDAR, dispositif de surveillance installé à bord d'un avion, ou appliquent localement les systèmes vidéo ARGUS, cependant que d'autres pays comme le Portugal, la Grèce ou même la France utilisent des techniques de surveillance uniquement à certains endroits et généralement limitées à des projets expérimentaux de recherche. L'annexe 3 récapitule les différentes techniques de surveillance du littoral utilisées dans les études de cas examinés par EUROSION ou mentionnées dans leur bibliographie.

Ces différentes techniques de surveillance du trait de côte ont des résolutions et une précision différentes, et certaines ont plus de possibilités que d'autres. Ceci se voit concrètement dans le prix de revient unitaire moyen lié à chaque technique de surveillance. Le tableau 2 présente brièvement la gamme des coûts associés aux diverses techniques. Les informations fournies dans ce tableau supposent que le secteur à surveiller est supérieur à 100 km² pour permettre des économies d'échelle significatives. L'économie d'échelle est en effet un facteur important à prendre en compte car elle permet probablement de réduire le coût de plus de 50 % de la valeur initiale, comme l'illustre le cas de côte de la Hollande, où le LIDAR est utilisé comme technique de surveillance courante.

Tableau 1-2. Coûts unitaires de techniques de surveillance du littoral (secteurs supérieurs à 100 km²)

<i>Technique de surveillance</i>	<i>Résolution</i>	<i>Coût unitaire (Euros/ km²)</i>
Images Satellite - SPOT 5 - IKONOS	2,5– 5 mètres 1 mètre	5-8
Télé-détection fixe - système vidéo ARGUS	1 mètre	20-30
Levé sur le terrain - Profil de plage en utilisant stations totales ou GPS	0,1 mètre	100-200
Echosondage à bord d'un navire - Sonar multifaisceaux	0,1 mètre	150-250
Photogrammétrie aérienne	0,1 mètre	300-400
Altimétrie laser aérienne - LIDAR	0,1 mètre	500-700

Enseignement 9 : Solutions multifonctionnelles et acceptabilité

Les solutions techniques multifonctionnelles, qui remplissent des fonctions sociales et économiques en plus de protéger le littoral, sont plus facilement acceptées par la population locale et sont plus viables du point de vue économique.

La perception du risque par les populations locales influence considérablement la conception d'ouvrages de défense côtière. Une idée généralement reçue parmi les communautés résidant dans les secteurs en danger est que la technologie dure assure une meilleure protection contre l'érosion côtière et le risque associé de submersion du littoral.

Nous avons observé cette croyance, qui peut être fondée à court terme, mais pas nécessairement à long terme, dans un certain nombre de sites européens.

Pour des raisons similaires, ce n'est que récemment que le rechargement de plages, qui constitue depuis 1992 le fer de lance de la politique hollandaise de défense du littoral, a reçu un grand soutien de la population locale le long de la côte des Pays-Bas. Ce soutien est largement dû aux effets secondaires positifs du rechargement sur les activités récréatives, associées à l'extension de la plage, et sur la protection de la lentille d'eau douce induite par la consolidation des dunes. Ceci est aussi largement confirmé sur une majorité de sites à travers l'Europe, qui ont opté pour le rechargement des plages - comme Giardini Naxos, Marina di Massa, Pineta de Vecchia (Italie), Can Picafort, Mar Menor (Espagne), Mamaia (Roumanie), De Haan, Zeebrugge (Belgique), Sylt (Allemagne), Hyllingebjerg (Danemark), presqu'île de Hel (Pologne), Chatelaillon (France) ou Vale do lobo (Portugal). Dans quelques cas méditerranéens, les créneaux touristiques créés par le rechargement des plages sont même devenus un enjeu local, alors que les plages ne souffrent pas particulièrement de l'érosion ce qui, dans certains cas, a conduit à l'extraction illégale de sable, comme à Dolos Kiti (Grèce).

Au delà du rechargement des plages, dont la mise en œuvre s'est amplifiée au cours des 5 dernières années - sans succès dans certains cas (voir *enseignement 7*) - des solutions techniques différentes ont permis de combiner la défense côtière avec des visées sociales, économiques et écologiques. Ceci est bien illustré par les exemples de la Baie de Koge (Danemark), reprise sur la mer pour créer des espaces de nature à but récréatif et pour se protéger de la submersion marine, et de la Mer de Palling, où des récifs artificiels ont été expérimentés pour absorber l'énergie des vagues incidentes et régénérer la faune et la flore marines.

La recherche d'une solution multifonctionnelle s'appuie aussi sur des considérations financières. Un certain nombre d'exemples montrent que la défense côtière coûte cher. Les coûts vont de quelques milliers d'euros pour une protection locale à l'aide de brise-lames ou de géotextiles - comme sur la plage d'Estela (Portugal, 20 000 euros) - à plusieurs millions d'euros, pour un remodelage complet de la plage combinant le rechargement avec l'édification de digues d'enrochement, comme à Playa Gross en Espagne (11 millions d'euros). À ces coûts s'ajoutent ceux de l'entretien et de surveillance et, dans le cas du rechargement des plages, celui des rechargements périodiques. C'est pourquoi les solutions à l'érosion côtière qui remplissent simultanément plusieurs fonctions, augmentent les possibilités de trouver des cofinancements sur le long terme.

Enseignement 10 : Analyses coûts-avantages

Point critique pour la prise de décision, le bilan entre les coûts et avantages de la défense du littoral est, en général, peu discuté en Europe. D'où des dépenses qui peuvent être à long terme inacceptables pour la société si on les compare aux avantages obtenus.

Si les coûts de défense côtière et leur répartition sont en général disponibles dans la plupart des cas examinés, les avantages ne sont connus que dans quelques uns. Parmi ceux-ci, celui des South Downs (Royaume-Uni) où les 14 millions d'euros investis dans la défense côtière à Shoreham et Lancing assurent la protection de 135 millions de biens immobiliers -1 300 maisons et 90 locaux commerciaux- contre les risques d'érosion et de submersion, sur une période de 100 ans. Au contraire, sur la côte à falaises du Norfolk du nord (Royaume-Uni), l'exemple de Happisburgh démontre que le coût de stabilisation des falaises par des brise-lames, estimé à plusieurs millions d'euros, comme le proposent les autorités locales, dépasse largement la valeur des 18 maisons et de la route qui s'y trouvent, d'où les difficultés de financement de ce projet. De telles études de coûts-avantages tendent à être systématiquement faites au Royaume-Uni, pour autant que les plans de gestion du littoral recommandés par le DEFRA en donnent l'impulsion. Cependant, une telle démarche reste une exception dans les autres pays européens, malgré des dépenses considérables pour la défense côtière, ainsi qu'on peut le constater sur la côte hollandaise où une moyenne de 30 à 40 millions d'euros sont consacrées chaque année au rechargement des plages. Même chose aux Saintes-Marie de la Mer (Petite Camargue - France), où plus de 60 millions d'euros ont été dépensés au cours des 10 dernières années pour la défense lourde et la régénération des dunes, ou au Portugal, où 500 millions ont été investis dans la défense dure et la réhabilitation des dunes depuis 1995, le long de la côte qui va du port d'Aveiro au complexe de Vagueira.

On constate, cependant, que les décisions au niveau local sont prises au moins sur la base d'informations qualitatives concernant les avantages. Une évaluation qualitative des profits a été brièvement examinée dans un certain nombre de cas :

- sécurité des personnes et des biens, principalement des maisons, mentionnée dans tous les cas
- réduction des niveaux d'eau extrêmes, grâce à la sédimentation dans le lit des estuaires et des bassins de marée (Holderness, Humber, Essex, mer des Wadden)
- meilleur accès aux équipements portuaires par le dragage des chenaux de navigation (Escaut occidental)
- protection de l'aquifère d'eau douce contre l'intrusion saline dans les arrière-pays fertiles (Aveiro, Hollande)
- revalorisation de la valeur marchande de l'immobilier, induite par la réduction du risque (Playa Gross)
- augmentation de la fréquentation de la plage, induite par l'extension de l'avant-plage (Sitges, Marina di Massa, Giardini Naxos, Vecchia Pineta), de l'étendue de sable sec (Sables d'Olonne) ou par la modification des caractéristiques de déferlement des vagues (Playa Gross)

- réhabilitation des espaces naturelles et de la biodiversité qui y est associée (Aquitaine, Baie de Koge)
- fourniture d'abris pour les bateaux de pêcheurs (Vagueira, Dolos Kiti, Shabla Krapetz)
- absorption de l'azote par les marais côtiers, initialement prévus pour la défense du littoral.

Annexe 1 – Vue d'ensemble des modèles de processus côtiers utilisés en Europe

TITRE	DESCRIPTION	LIMITES D'APPLICATION
MODELES MATHÉMATIQUES		
Equation du CERC (1950)	L'équation du CERC aide à prévoir le volume de sédiments transporté le long du littoral, en tant que fonction de l'amplitude des vagues (dans la zone de déferlement), de leur période et de leur obliquité. Les versions améliorées de l'équation du CERC - Davies et Kamphuis (1985), Sayao, Nairn et Kamphuis (1985) - incluent la taille des sédiments et la pente de plage dans le modèle.	Applicable seulement dans les cas où le transport de sédiments est principalement induit par des vagues s'approchant à angle oblique et qui ont les mêmes propriétés en tous points le long de la côte. Non applicable lorsque d'autres forces d'entraînement (par exemple, les courants de marée) deviennent significatives. Non applicable non plus aux bancs, zones d'immersion ou canaux dragués.
Formule de transport de Bijker (Bijker, 1971)	La formule de Bijker évalue le transport de sédiments en modélisant « un transport des sédiments sur le fond » (Sb) et des « matériaux transportés en suspension » (Ss). Ce transport est une fonction de la hauteur des vagues au large, la période et l'angle d'approche, la vitesse du courant, la taille et la densité des sédiments, la vitesse de chute des particules et la rugosité du fond.	La formule de Bijker a une plus vaste gamme d'applications que la formule du CERC, en particulier dans les estuaires où les courants tidaux et fluviaux deviennent dominants. Cependant, elle nécessite davantage de mesures sur le terrain.
DUROS (Veilinga, 1986)	Le modèle DUROS (abréviation de 'Dune eROsion' =érosion de dune) aide à prévoir la réponse d'un profil de dune à une onde de tempête forte. Le "profil de tempête" est une fonction de l'amplitude de la vague significative (eau profonde), de la hauteur maximale des vagues, de la taille des sédiments et du profil initial.	Le modèle DUROS convient pour évaluer rapidement si les dunes existantes sont résistantes ou pas. Pour les secteurs côtiers complexes comprenant des baies partiellement fermées ou une géométrie de littoral complexe, le modèle présente des limites.
Règle de Bruun (1962)	La règle de Bruun évalue la réponse du profil du littoral à l'élévation de niveau de la mer. Ce modèle simple affirme que le profil de plage est une fonction parabolique dont les paramètres sont entièrement déterminés par le niveau d'eau moyen et la taille des sables. Bakker (1968) et Swart (1976) ont adapté la règle de Bruun pour prévoir le transport de sédiments par les courants de retour.	Uniquement applicable sur des sites locaux à échelle réduite. Sur de longues étendues côtières, la règle de Bruun et les modèles associant le transport par les courants transversaux deviennent complexes.
Formule de la force d'entraînement du vent (Wu, 1980)	Développé par Wu (1980), le modèle mesure le transfert d'énergie du vent soufflant au-dessus de l'océan à la surface de l'eau (force d'entraînement du vent ou cisaillement du vent), qui a comme conséquence une élévation du niveau de la mer (élévation due au vent). La formule peut être adaptée pour estimer le niveau de la houle.	Cette interaction entre le vent et la surface de mer n'est pas bien comprise et la formule représente indéniablement la meilleure approximation connue. La formule dépend cependant de coefficients empiriques (tel le « coefficient de traînée ») qui peuvent être inadaptés pour des situations spécifiques.
Modèle du déversement en crête (Owen, 1980)	Le déversement en crête est défini comme la quantité de l'eau passant au-dessus de la crête d'un ouvrage incliné, par unité de temps. Le modèle semi-empirique d'Owen suppose que le déversement en crête est une fonction de la période d'amplitude significative de la vague et de la période moyenne, la hauteur de la crête au-dessus du niveau d'eau calme, la structure inclinée du littoral et la profondeur de l'eau dans les grands fonds. Le modèle a été développé à l'origine pour des ouvrages imperméables, avec un gradient de 1:1 à 1:5. Cependant, le modèle incorpore un coefficient de rugosité, qui est basé sur l'existence de matériaux de construction alternatifs. Ce coefficient de rugosité permet à la méthode d'être utilisée dans le cas des plages de galets, des profils dunaires induits par des tempêtes et des structures d'enrochement inclinées.	Le modèle nécessite la détermination empirique du coefficient liée à la pente. La formule ne fonctionne pas dans le cas de digues verticales, pour lesquelles d'autres formules développées par Goda (1980) peuvent être employées.
MODELES INFORMATIQUES		
MIKE 21 NSW	MIKE 21 NSW est un modèle vent-vague spectral, qui décrit la propagation, la croissance et l'affaiblissement des vagues en courte période (entre 0,21s et 21s) dans des secteurs côtiers. Le modèle inclut les effets de la réfraction et du rapprochement des vagues (shoaling), dus à la variation de profondeurs, la génération des vagues, due au vent, et la dissipation d'énergie, due au frottement au fond et au déferlement des vagues. Les effets du courant sur ces phénomènes sont inclus. Le modèle est dérivé de l'approche proposée par Holthuijsen et autres (1989).	Est adapté pour des secteurs côtiers où la diffraction et la réflexion sont négligeables, et pour la simulation des vagues de période courte.

TITRE	DESCRIPTION	LIMITES D'APPLICATION
	<p>Les données de base suivantes sont nécessaires dans MIKE 21 NSW :</p> <ul style="list-style-type: none"> . données bathymétriques . champ de vent stationnaire (option) . champ de courant stationnaire (option) . carte de coefficient de frottement sur le fond (option) . paramètres de rupture des vagues (option) . limites des vagues en mer 	
MIKE 21 BW	<p>Le modèle de vagues MIKE 21 Boussinesq (BW) est principalement utilisé pour étudier la dynamique des vagues (amplitude d'onde significative, coefficient de perturbation de la vague, élévation de la surface de l'eau et vitesse moyenne en profondeur des particules) dans les ports et les petits secteurs côtiers. Le modèle est capable de reproduire les effets combinés de la plupart des phénomènes de vague intéressants pour l'ingénierie côtière et portuaire, y compris le rapprochement des vagues, la réfraction, la diffraction et la réflexion partielle de l'amplitude finie irrégulière des vagues à crête longue ou à crête courte se propageant sur des bathymétries complexes, ainsi que des phénomènes tels que le groupement de vagues, la génération de bornes subharmoniques et superharmoniques et les interactions quasi-résonnantes de triade.</p>	<p>Le modèle a été principalement conçu pour les ports côtiers, mais il peut aussi être utilisé pour des petites baies côtières complexes. Ne fonctionne pas sur les côtes ouvertes.</p>
MIKE 21 EMS	<p>Le module de vague elliptique en pente douce (SME), MIKE 21 SME, simule la propagation des vagues harmoniques en temps linéaire sur une inclinaison bathymétrique avec une profondeur arbitraire de l'eau. MIKE 21 SME est basé sur la solution numérique de l'équation elliptique en pente douce formulée par Berkhoff en 1972 et il est capable de reproduire les effets combinés de la dispersion, du rapprochement des vagues, de la réfraction, de la diffraction et de la rétrodiffusion. La dissipation d'énergie, due au déferlement de la vague et au frottement sur le fond, est incluse de même que la réflexion et la transmission partielles au travers, par exemple, de quais et de brise-lames. Des couches d'éponge sont appliquées aux endroits où la pleine absorption de l'énergie de la vague est nécessaire. En outre, le modèle inclut une formulation générale des contraintes de radiation, basée sur Copeland (1985) qui sont valables dans le croisement de trains de vagues et dans les secteurs à forte diffraction.</p>	<p>Limité aux secteurs côtiers à bathymétrie en pente douce. Ne convient pas pour d'autres cas.</p>
MIKE 21 PMS	<p>MIKE 21 PMS est basé sur une approximation parabolique à l'équation elliptique de pente douce régissant la réfraction, le rapprochement des vagues), la diffraction et la réflexion des vagues linéaires de l'eau se propageant sur une bathymétrie en pente douce. L'approximation parabolique est obtenue en assumant une direction principale de vague (direction x), en négligeant la diffraction le long de cette direction et en négligeant la rétrodiffusion. En outre, les améliorations à apportées à l'équation résultante, voir Kirby (1986), permettent d'utiliser l'approximation parabolique pour les vagues se propageant à angles larges vers la direction principale assumée. Par ailleurs, MIKE 21 PMS peut reproduire les contraintes de radiation de vague nécessaires pour la simulation des courants induits par les vagues, qui est très importante pour le calcul du transport de sédiments sur le littoral.</p>	<p>Adapté pour couvrir les secteurs côtiers avec bathymétrie en pente douce, où la réflexion et la diffraction sont négligeables le long du principe de direction des vagues (direction x), c'est-à-dire lorsqu'il s'agit de petits brise-lames et de champs d'épis et d'un canal de navigation.</p>
MIKE 21 ST	<p>Le modèle de transport de sédiments MIKE 21 (ST) est conçu pour l'évaluation des taux de transport de sédiments et des taux initiaux liés aux changements de niveau de lit des sédiments meubles (sable) dus aux courants ou au flux combiné vague-courant. Le modèle fournit et compare des résultats venant de différentes théories de transport comprenant Engelund-Hansen, Engelund-Hansen, Zyserman-Fredsøe, Meyer-Peter et Müller, Ackers-Blanc, et Bijker :</p>	<p>Convient seulement pour les sédiments meubles (par exemple le sable) pour lesquels il fournit de bons résultats.</p>
MIKE 21 MT	<p>Le modèle de transport de particules fines MIKE 21 décrit l'érosion, le transport et le dépôt de particules fines et de mélanges de sable/vase sous l'action des courants et des vagues. Le modèle se base essentiellement sur les principes de Mehta et autres (1989), avec l'introduction des contraintes de transformation du lit due aux vagues, un modèle stochastique pour le flux et l'interaction des sédiments développé en premier lieu par Krone (1962), et un transport de sédiments meubles basé sur Van Rijn (1984).</p>	<p>MIKE 21 MT peut être appliqué à des études d'ingénierie, par exemple :</p> <ul style="list-style-type: none"> * les études de transport de sédiments composés de matériaux fins et cohérents ou de mélanges de sable/vase dans les estuaires et les secteurs côtiers dans lesquels des aspects environnementaux sont en jeu et où il peut y avoir des problèmes de dégradation de la qualité de l'eau * l'envasement des ports, chenaux de navigation, canaux, fleuves et réservoirs * les études de dragage
MIKE 21 HD	<p>Le modèle hydrodynamique MIKE 21 (HD) simule les variations et les flux de niveau d'eau en réponse à une variété de fonctions de forçage dans les lacs, les estuaires, les baies et les secteurs côtiers. Les niveaux et les flux d'eau sont résolus sur une grille rectangulaire couvrant la zone d'intérêt. MIKE 21 HD</p>	<p>Le modèle MIKE 21 HD est applicable à un éventail de phénomènes hydrauliques et apparentés. Ceci inclut la modélisation de l'hydraulique de marée, des courants générés par les vents et les vagues, des ondes</p>

TITRE	DESCRIPTION	LIMITES D'APPLICATION
	<p>inclut des formulations pour les effets sur :</p> <ul style="list-style-type: none"> * la force d'inertie de convection et croisée * la contrainte de transformation au fond * la contrainte de transformation du vent à la surface * les gradients de pression barométrique * la force de Coriolis * la dispersion d'inertie (par exemple à travers la formulation de Smagorinsky) * les courants induits par les vagues * les sources et les puits (masse et inertie) * l'évaporation * la submersion et le séchage 	<p>de tempête et des inondations. Il nécessite cependant une grande quantité de données d'entrée et des ressources importantes.</p>
Simulating WAVE Nearshore (SWAN)	<p>Le modèle SWAN (Simulating Waves Nearshore) est un modèle spectral de vague, développé à l'université de technologie de Delft, Pays-Bas. SWAN modèle l'énergie contenue dans les vagues lorsqu'elles circulent au-dessus de la surface de l'océan en direction du rivage. Dans ce modèle, les vagues changent de hauteur, de forme et de direction en raison du vent, de la dissipation par frottement (white capping), du déferlement de la vague, du transfert d'énergie entre les vagues et des variations du fond océanique et des courants. Les états initiaux de la vague, y compris son amplitude, sa direction et sa périodicité sont entrées dans le modèle et le modèle introduit les changements dans les paramètres d'entrée lorsque les vagues atteignent le rivage. Des résultats sont introduits dans une grille de 500 m par 500 m pour le domaine de recherche. Des informations sont produites pour chaque cellule (amplitude de la vague, direction de la vague et célérité de la vague) dans la grille modèle, et peuvent être représentées sur une carte pour simplifier la visualisation des changements de vagues dans le secteur à l'étude.</p>	<p>SWAN est l'un des meilleurs modèles de transformation des vagues sur le littoral. Mais il doit être combiné avec d'autres modèles pour déduire le transport de sédiments ou pour prévoir des changements morphologiques.</p>
STWAVE	<p>STWAVE (STeady State spectral WAVE) est un modèle développé par les ingénieurs de l'armée américaine pour mesurer la croissance vent-vague et sa propagation. STWAVE simule la réfraction et le rapprochement vagues induites par la profondeur, la réfraction et le rapprochement vagues induites par le courant, le déferlement des vagues induit par la profondeur et la cambrure de la vague, la diffraction, la croissance paramétrique de vague due au vent et l'interaction vague-vague et la dissipation par frottement (white capping), qui redistribue et dissipe l'énergie dans un champ de vague croissant.</p>	<p>Les hypothèses de modèle pour STWAVE sont : (i) une pente inférieure douce et une réflexion négligeable des vagues, (ii) des états de vague spatialement homogènes en mer, (iii) un régime permanent de vagues, de courants et de vents, (iv) une réfraction et un rapprochement vagues linéaires, (v) un courant de profondeur uniforme, (vi) le frottement du fond est négligé.</p>
SBEACH	<p>SBEACH (Storm-induced BEACH CHange Model) est un modèle développé par les ingénieurs de l'armée américaine pour simuler l'érosion d'une plage par un courant de retour, de la berme et des dunes produite par des ondes de tempête et des surcotes. La dernière version permet la simulation de l'érosion de dunes en présence d'un fond dur.</p>	
UNIBEST-DE	<p>UNIBEST-DE est le module du progiciel côtier d'UNIBEST pour calculer les développements du profil transversal (cross-shore) pendant les tempêtes d'une côte composée de matériaux meubles. En plus d'une forte attaque des vagues, ces conditions sont caractérisées par une élévation considérable du niveau moyen de la mer (onde de tempête). Le déferlement intense des vagues produit des niveaux élevés de turbulence, mettant ainsi en suspension de grandes quantités de sédiments. En conséquence, le transport de ces sédiments en suspension est le mécanisme prédominant de transport dans de telles conditions. Le modèle se vérifie avec des données à grande échelle de modèles physiques et des données de terrain. Le modèle représente les transports par les courants de retour (cross-shore) dans une grille unidimensionnelle à maille variable. Le modèle nécessite une série de périodes prédéfinie de vagues et de niveaux d'eau et propose des options pour automatiser un grand nombre de simulations. Les résultats sont présentés sous la forme de fichiers sortie ASCII, qui peuvent être inspectés graphiquement en tant qu'historiques ou distributions de temps le long du profil du fond.</p>	<p>Les possibilités des modèles sont pertinentes pour des applications telles que :</p> <ul style="list-style-type: none"> * L'érosion de dunes et le changement de profil des plages dans des conditions extrêmes. * Les opérations de rechargement de plage * Les travaux de protection de dunes
UNIBEST TC	<p>UNIBEST-TC est le module de transport de sédiments (cross-shore) du progiciel côtier d'UNIBEST. Il est conçu pour calculer les transports de sédiments par les courants de retour et le profil résultant sous l'action combinée des vagues, des courants de marée (longshore) et du vent. Le modèle tient compte des séries constantes, périodiques et chronologiques et des limites hydrodynamiques à prescrire. UNIBEST-TC tient compte des processus transversaux (cross-shore) principaux tels que l'asymétrie, le courant de retour, la pesanteur et la masse-flux de vagues au-dessous des cuvettes de vague. Le modèle tient compte des processus suivants :</p>	<p>Ce modèle requiert un grand nombre de données d'entrée et de ressources informatiques.</p>


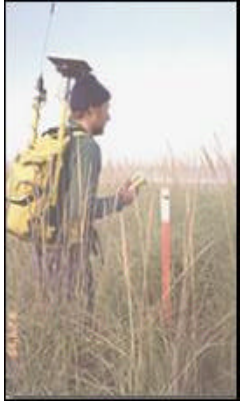
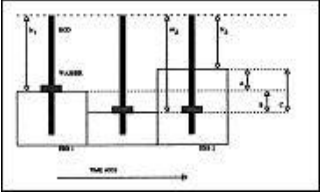
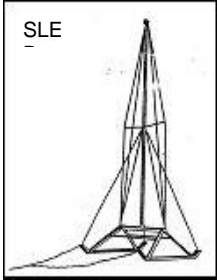

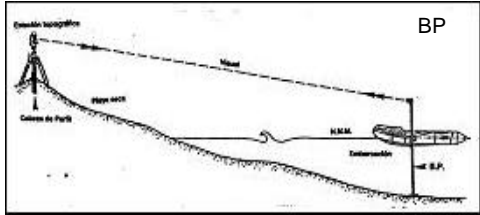
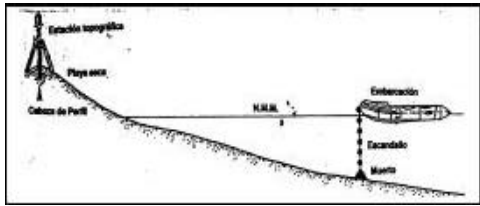
TITRE	DESCRIPTION	LIMITES D'APPLICATION
	<ul style="list-style-type: none"> * Un flux oscillant asymétrique * Des effets de longues vagues et de groupement de vagues * Un courant de retour induit par les vagues * Le transport de sédiments selon Van Rijn et autres (1995) * Les flux éoliens * L'inclusion de la contribution extérieure de rouleau dans l'équilibre d'inertie * L'inclusion du retard de briseur dans le modèle d'affaiblissement d'énergie des vagues 	
UNIBEST CL+	<p>UNIBEST-CL+ est un modèle d'équilibre de sédiments (une partie de l'ensemble des modèles d'UNIBEST) avec lequel les transports par la dérive littorale (longshore) calculés sur des points spécifiques le long de la côte peuvent être traduits en migration du trait de côte. L'application typique est l'analyse de la morphologie à grande échelle des systèmes côtiers pour évaluer les causes de l'érosion ou pour prévoir l'impact d'une infrastructure côtière envisagée (par exemple un port) sur la côte. Mais le modèle peut également être employé pour des considérations sur une plus petite échelle, comme la prévision de l'évolution du trait de côte autour d'ouvrages de protection (épis, revêtements, digues d'embouchure et, dans une certaine mesure, brise-lames).</p> <p>Sources et puits de sédiments peuvent être définis en tout point pour simuler les apports en sédiments fluviaux, l'effet de l'affaissement des terrains ou de l'élévation de niveau de la mer, la perte de sédiments vers le large, la dérivation artificielle de sédiments et l'exploitation des sables de plage. Ces dispositifs en font un outil approprié pour la conception des opérations de défense contre la mer et la prévision de leur impact sur la côte après leur mise en oeuvre. Les dispositifs techniques du modèle incluent :</p> <ul style="list-style-type: none"> * Grille curviligne (qui peut être adaptée à différents types de côte : les côtes rectilignes, les deltas et les baies. * Calcul de la propagation des vagues et de la dérive littorale par les vagues. * Le transport solide de la dérive littorale et sa répartition le long de la côte peuvent être évalués à l'aide de plusieurs formules de charge sédimentaire totale pour le transport du sable (Bijker et van Rijn) ou des galets (Van der Meer et Pilarczyk). * Effets du transport sédimentaire par la dérive littorale sur les changements d'orientation de la côte. * Entrée possible de centaines de combinaisons d'états de vague et de marée. * Différentes formes de profils côtiers peuvent être prises en compte le long de la côte et des variations saisonnières du régime des vagues peuvent être simulées. 	
GENESIS	<p>GENESIS (GENERALized Model for Simulating Littoral Change) est un modèle développé par les ingénieurs de l'armée américaine pour calculer la modification du trait de côte due essentiellement par l'action des vagues. Le système est basé sur la théorie d'une seule ligne dans laquelle il est supposé que le profil de la plage reste inchangé, ce qui permet de décrire la modification de la plage uniquement en termes de position du littoral. Le modèle peut être appliqué à une grande variété de situations comportant arbitrairement des nombres, des lieux et des combinaisons d'épis, jetées, brise-lames, digues et rechargements de plage. Dans le système sont également incluses d'autres caractéristiques telles que le rapprochement des vagues, la réfraction et la diffraction ; le sable passant à travers et autour des épis, ainsi que les sources et les puits de sable.</p>	
ESTMORF	<p>ESTMORF est un modèle unidimensionnel de la morphologie d'estuaire, qui inclut des effets tridimensionnels, développé par RIKZ. Dans la nature, le chenal principal transporte le flux de l'eau et les berges servent de zones de stockage. La schématisation d'ESTMORF distingue trois parties dans une section transversale : le chenal principal, la berge haute et la berge basse. Dans ESTMOR, les sédiments sont transportés dans l'estuaire par l'intermédiaire des principaux chenaux, tandis que l'échange de sédiments se produit sur les berges. Les berges stockent les sédiments ou fournissent des sédiments au chenal. Les calculs d'ESTMORF sont basés sur une combinaison de lois empiriques et physiques. L'équilibre morphologique est déterminé à partir de lois empiriques. Sur la base d'observations effectuées dans de nombreux estuaires à travers le monde, on sait qu'il existe un rapport entre la taille d'un chenal et le volume d'eau qu'il transporte. De même, il y a un rapport entre la dimension des berges et les flux de marée. Ainsi, la géométrie d'équilibre des chenaux et des berges peut être liée au flux de marée.</p> <p>La concentration d'équilibre et le champ réel de concentration (dus au développement normal et/ou à l'interférence humaine) sont basés sur des lois physiques. Le champ de concentration en sédiments est déterminé à partir d'une équation de transport, qui inclut les propriétés physiques du sédiment et le champ résiduel de flux dans l'estuaire. La sédimentation et l'érosion sont déterminées à partir de la déviation de la concentration réelle et de la concentration d'équilibre.</p>	<p>Développé à l'origine pour l'estuaire de l'Escaut occidental, ce modèle peut être appliqué à d'autres bassins de marée. Il ne convient pas à d'autres types de côtes.</p>

Annexe 2 – Vue d’ensemble des techniques de gestion de l’érosion côtière utilisées en Europe



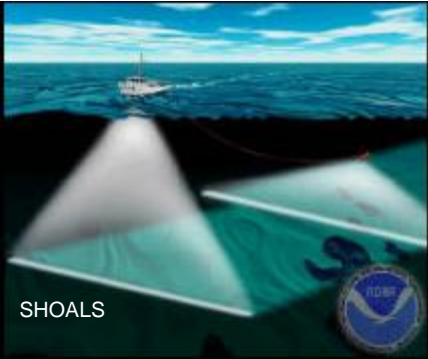
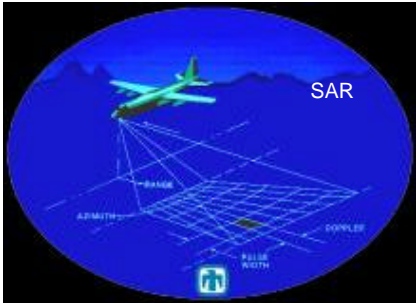
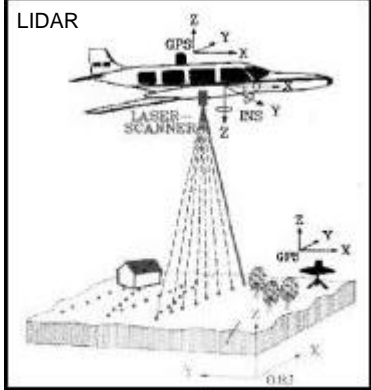
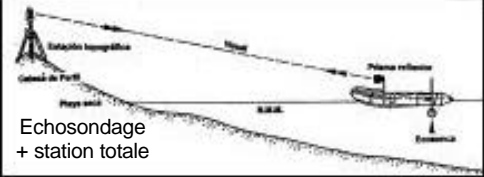
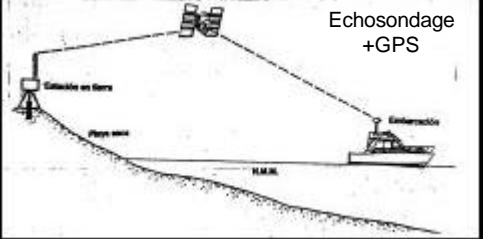
TECHNIQUES	PRINCIPES	LIMITES D'APPLICATION
TECHNIQUES DURES		
Brise-lames	Les brise-lames sont des structures protectrices placées au large, généralement en matériaux durs tels que béton ou roches, qui visent à absorber l'énergie des vagues avant qu'elles n'atteignent le rivage.	Les brise-lames réfléchissent ou diffractent l'énergie des vagues, mais ils peuvent aussi la concentrer sur des points sensibles. Dans ce cas, l'érosion qui affecte la côte peut aboutir à la destruction des constructions que les brise-lames avaient pour but de protéger.
Gabions	Le gabion est un filet métallique rempli de roches, qui forme un volume d'environ 1 mètre de côté. Les gabions sont empilés les uns sur les autres pour former un mur.	Ils sont utilisés pour protéger une falaise ou un secteur à court terme seulement, car ils sont facilement endommagés par les ondes de tempête et parce que les filets tendent à rouiller assez rapidement. Les gabions ont l'avantage d'être faciles à utiliser et ils sont relativement bon marché, mais leur durée de vie est courte.
Géotextiles	Les géotextiles sont des tissus perméables, qui peuvent retenir les matériaux pendant que l'eau les traverse. Les tubes géosynthétiques sont de grands tubes se composant d'un matériau tissé géotextile, rempli d'un mélange sableux. Le mélange se compose en général de matériaux dragués (par exemple du sable) dans les environs, mais ce peut être aussi du mortier ou un mélange de béton.	Les géotextiles sont d'usage relativement récent, mais ils ont donné de bons résultats pour empêcher l'érosion des plages. Ils sont aussi très flexibles et peuvent être réarrangés si leur configuration ne fournit pas de bons résultats.
Batterie d'épis	Les épis sont des structures allongées perpendiculairement au rivage. Habituellement construits en groupes que l'on appelle des batteries d'épis, leur but est de piéger et de maintenir entre eux les sédiments apportés par la dérive littorale. Les épis peuvent être construits en bois ou en roche. Ils interrompent le transport de la dérive littorale. Lorsqu'une batterie d'épis bien conçue remplit son rôle, le transport solide de la dérive littorale n'est pas modifié et une plage stable se maintient	Le sable accumulé entre les épis contribue à un déficit de sédiment vers l'aval dans le sens de la dérive littorale. Le problème de l'érosion est alors seulement déplacé. Ainsi, pour être efficace, le recours aux épis devrait être limité aux cas où le transport par la dérive littorale se fait principalement dans une direction et où l'action des épis ne causera pas une érosion inacceptable en aval.
Revêtements	Le revêtement est un dispositif incliné qui casse ou absorbe l'énergie des vagues mais qui peut laisser l'eau et des sédiments passer au travers. Les anciens revêtements en bois se composent de poteaux fixés sur la plage avec des lattes en bois. Les revêtements modernes sont faits de blocs en béton ou en pierre, posés sur une couche de matériau plus fin. L'enrochement (riprap) consiste en un empilement de roches, pesant souvent plusieurs tonnes. L'enrochement présente l'avantage d'avoir une bonne perméabilité et d'avoir un aspect plus naturel.	Les revêtements sont adaptés aux estrans en pente douce. Ils présentent les mêmes effets négatifs que les murs et les digues, mais dans une moindre mesure. Ils dénaturent le front de mer, ce qui peut induire des changements dans l'écosystème de l'estran.
Digues	Les digues séparent la mer et la terre et elles peuvent aussi servir d'ouvrage de soutènement. Les digues sont principalement utilisées pour s'opposer à l'érosion des vagues. Mais elles ne protègent pas les plages situées en avant d'elles.	Lorsque les digues sont utilisées dans les secteurs où il y a une action significative des vagues, elles peuvent accélérer l'érosion des plages car une grande partie de l'énergie des vagues déferlant sur la structure est réorientée vers leur pied. Les digues sont particulièrement appropriées là où la pêche et le canotage sont très pratiqués sur le rivage et où les plages en pente douce pour les bains de soleil ou la natation ne sont pas étendues. Leur utilisation peut se justifier lorsque les risques associés à l'érosion côtière sont sérieux.
TECHNIQUES DOUCES		
Création de récifs artificiels	Construction d'un récif artificiel qui absorbe l'énergie des vagues (procurant ainsi une protection côtière), tout en fournissant un habitat favorable à la biodiversité marine et des possibilités d'activités récréatives.	Il n'existe que quelques exemples de récifs artificiels en Europe (mer de Palling et Royaume-Uni surtout), mais ils semblent donner de bons résultats.
Drainage de la plage	Le drainage de plage diminue le volume d'eau de la nappe de retrait des vagues par infiltration dans l'estran et réduit donc l'enlèvement de sédiments. Le drainage de la plage donne également un sable plus sec, de couleur « or », apprécié pour les activités récréatives.	Cette technique est assez nouvelle et ses résultats doivent encore être confirmés. Il faut noter que le drainage de plage est adapté lorsque l'érosion résulte de mouvements transversaux et que la dérive littorale est peu importante.
Rechargement de plage	C'est l'augmentation du volume de sédiments sur une plage par des apports artificiels. Le rechargement de sable peut être réalisé par placement direct des sédiments sur la plage, généralement par pompage. Il peut être également se faire sur l'avant-plage, ce qui est plus économique.	Le rechargement des plages et des avant-plages a connu beaucoup de succès dans l'Europe du Nord du fait de la disponibilité en sédiments présentant des propriétés similaires à ceux des plages. Lorsque des sédiments ne sont pas disponibles à proximité et qu'il faut les importer d'une autre région, le rechargement de plage peut ne pas être la meilleure solution. Les opérations de rechargement doivent aussi être conçues avec précaution car elles risquent d'altérer la flore et la faune à la fois sur la plage et dans les lieux d'emprunt des sédiments.

TECHNIQUES	PRINCIPES	LIMITES D'APPLICATION
Reprofilage de la plage	Le reprofilage artificiel de la plage peut être recommandé lorsque les pertes de sédiment ne sont pas assez graves pour justifier l'importation de grands volumes de sédiments. Le reprofilage est réalisé en utilisant les sédiments existant sur la plage.	Le reprofilage de la plage est une technique économique car elle ne nécessite pas l'importation de sable. Cependant, l'opération doit parfois être répétée plusieurs fois pour retrouver un profil approprié. Le reprofilage est limité aux plages sur lesquelles l'érosion par les courants de retour est dominante et où les tempêtes ne sont pas trop fortes.
Drainage de falaise	Réduction de la pression interstitielle par pompage de l'eau dans la falaise, ce qui empêche l'accumulation d'eau dans les roches qui la constituent.	Peut ne pas être applicable à tous les types de falaises.
Reprofilage de falaise	Modification de la pente du versant de la falaise pour augmenter sa stabilité. La pente qui permet à la falaise de devenir stable dépend du type de roche, de la structure géologique et de la teneur en eau.	Peut ne pas être applicable à tous les types de falaises. Par ailleurs, cette technique suppose une très bonne connaissance de la structure géologique de la falaise et des conditions de l'infiltration de l'eau.
Protection du pied de falaise	Protection de la falaise par la mise en place d'un enrochement à son pied.	Cette technique est facile à mettre en oeuvre, mais elle peut ne pas arrêter complètement l'érosion. Elle doit donc être utilisée dans les cas où un certain recul de la falaise est acceptable.
Création d'anses stables	Augmentation de la longueur de la ligne de rivage pour diluer l'énergie des vagues par unité de longueur de côte. Tandis que quelques segments de littoral sont protégés, l'érosion continue entre ces points forts, ce qui induit la formation d'anses.	Cette technique n'est pratiquement pas utilisée en Europe. Elle est encore à l'état expérimental. Toutefois, elle a été envisagée pour un certain nombre de sites, en particulier sur la côte de Hollande.
Régénération des dunes	Accumulation de sable transporté par le vent, dans la zone supra-littorale. La vitesse du vent est réduite par des barrières perméables faites de bois, de géotextiles et de plantes, ce qui stimule l'accumulation de sable.	Convient dans les cas où le vent joue un rôle important.
Création de marais	Plantation des vasières avec des espèces pionnières telles que <i>Spartina</i> . La végétation des marais améliore la stabilité des sédiments grâce à ses racines, ce qui augmente la cohésion de la vase et diminue l'érosion. Les marais procurent aussi une protection contre la submersion en absorbant l'énergie des vagues.	La création de marais connaît un vif succès au Royaume-Uni. Cependant, cette technique rencontre des difficultés dans une conjoncture d'élévation accélérée du niveau de la mer. Dans ce cas, l'accumulation de sédiments fins, nécessaires à la création d'un marais peut être insuffisante et ne pas empêcher la submersion du marais.
Rechargement des vasières	Rechargement des vasières existantes en (voir rechargement des plages).	Comme pour la création de marais, le rechargement des vasières peut être compromis par une élévation accélérée du niveau de la mer.
Boulonnage de falaises	Boulonnage des roches d'une falaise pour augmenter sa stabilité. Cela n'empêche pas l'attaque des vagues au pied de falaise, mais l'occurrence de mouvements de masse sur son versant est diminuée.	Peut ne pas être applicable à tous les types de falaises.
By-pass	Rétablissement du transport des sédiments retenus en amont d'un ouvrage, par pompage et refoulement en aval. Une variante consiste à utiliser les matériaux de dragage d'un port pour les remettre à la disposition de la dérive littorale.	Cette technique a été appliquée par un certain nombre d'autorités portuaires en Europe car les volumes de sable retenus par les ouvrages portuaires sont généralement considérables. Quand des sédiments sont piégés par une série d'épis, la technique peut ne plus être rentable. Dans le cas des ports, les sédiments accumulés sont susceptibles d'être pollués et ils ne doivent donc pas être réinjectés dans le circuit sédimentaire.
Plantation de végétation et stabilisation	Colonisation des sols côtiers par la végétation qui freine leur érosion, en particulier par le vent. La végétation, en diminuant aussi la vitesse du vent, favorise le développement des dunes. Elle accroît également la stabilité des falaises et réduit l'occurrence des mouvements de masse qui les affectent.	La végétation adaptée aux dunes, comme l'oyat, est généralement très fragile et exige qu'on la protège avec vigilance.

Annexe 3 – Vue d'ensemble des techniques de surveillance utilisées en Europe

	TYPE DE TECHNIQUE	NOM DE LA TECHNIQUE		
OBSERVATIONS DIRECTES		PLAGE ÉMERGÉE	<ul style="list-style-type: none"> • RTK-dGPS (in-car, bag carried) http://www.ecy.wa.gov/programs/sea/swces/research/change/monitoring.htm • Station totale + mire • Télémètre + mire 	 <p>Station totale / télémètre + mire</p>  <p>RTK-dGPS</p>
	TECHNIQUES TOPO-BATHYMÉTRIQUES (pour créer des profils de plage)	PLAGE SUBMERGÉE	<ul style="list-style-type: none"> • Station totale + mire • Mires de profondeur • CRAB (=WESP) • SLED • Barre de profilage (BP) • Plomb de sonde • Profileur hydrostatique 	 <p>Mires de profondeur</p>  <p>SLE</p>  <p>CRAB</p>
	TRACEURS (pour mesurer le transport de sédiments)		<ul style="list-style-type: none"> • Peinture de couleur • Peinture fluorescente • Traceur radioactif • Traceurs naturels • Dunes de sable magnétique 	 <p>BP</p> 

Plomb de sonde

OBSERVATIONS À DISTANCE	FIXES	<ul style="list-style-type: none"> • ARGUS http://www.wldelft.nl/cons/work/argus/index.html • Photographie horizontale • Cartes et diagrammes de navigation historiques 	 <p>Photo aérienne</p>	 <p>ARGUS</p>	
	MOBILES	AÉRIENNES	<ul style="list-style-type: none"> • Photographies aériennes (Photogrammétrie digitale, Orthophotographies) http://dcn.waterland.net/neonet/ • Images satellite (LANDSAT, SPOT, Ikonos...) • LIDAR (=altimètre laser; SHOALS...) http://duff.geology.washington.edu/data/raster/lidar/laser altimetry in brief.pdf • WRELADS • SAR http://dcn.waterland.net/neonet/indexeng.html http://www.sandia.gov/radar/whatis.html 	 <p>SHOALS</p>	 <p>SAR</p>
	SUR MER	<ul style="list-style-type: none"> • Echosondage +GPS (hydroglisseur, bateau...) http://www.eurosense.com • Echosondage + mire + station totale (zodiac) • SIDE SCAN SONAR http://www.kleinsonar.com/discript/ssonar.html • SBP (pour les anciennes données sismologiques du littoral) 	 <p>LIDAR</p>	 <p>Echosondage + station totale</p>	 <p>Echosondage +GPS</p>

