



Service contract B4-3301/2001/329175/MAR/B3
"Coastal erosion – Evaluation of the need for action"
Direction générale de l'Environnement
Commission Européenne

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

*Document d'information pour une évaluation rapide des aléas dus à
l'érosion côtière et aux submersions associées*

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 Recherche Géologiques et Minières (BRGM)
Institut français de l'environnement (IFEN)
EADS Systems & Defence Electronics

SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	3
1. INTRODUCTION.....	5
2. ÉVALUATION DES ALÉAS CÔTIERS.....	7
3. COLLECTE DES DONNÉES ET DES INFORMATIONS.....	8
4. DÉMAIGRISSEMENT DES DUNES ET REcul DU FRONT DUNAIRE.....	9
5. REcul DES DUNES ET DES FALAISES À LONG TERME	14
6. MONTÉE DU NIVEAU DE LA MER ET PERTES DE ZONES HUMIDES	24
7. RÉFÉRENCES.....	31

1. INTRODUCTION

Le but de ce document est de fournir un aperçu des méthodologies de base existantes en matière d'évaluation des aléas côtiers en Europe, tels que la submersion résultant d'une érosion côtière critique et la menace générale que constituent les pertes de terres induites par un recul à long terme du trait de côte associé à une montée du niveau de la mer.

La prévention de toutes les submersions est impossible mais on peut les gérer de façon à réduire les aléas encourus par les biens et les personnes au moyen de mesures les plus viables (Williams, 1994). Cette gestion doit porter sur le long terme et tenir compte de tous les facteurs qui ont une incidence sur les risques de submersion. Une utilisation optimale des données disponibles nécessite une approche intégrée à laquelle les systèmes d'information géographiques conviennent parfaitement.

Les cartes des aléas de submersion sont utilisées, entre autres, par les planificateurs et les compagnies d'assurance pour définir les zones terrestres exposées à un risque de submersion extrême (Association des compagnies d'assurance britanniques, 2000). La plupart des cartes d'aléas utilisées par ces compagnies d'assurance montrent des limites de submersion basées sur des rapports incomplets et anciens de phénomènes historiques. Elles n'incluent pas de données relatives à la hauteur, vitesse ou durée des submersions qui doivent pourtant être prises en compte lors de l'évaluation de la vulnérabilité d'une zone soumise à la submersion. La modélisation des submersions permet d'obtenir ces informations sur la base d'observations effectuées sur de longues séries temporelles.

Une grande variété de méthodologies et de modèles analytiques peuvent être utilisées pour établir la Hauteur de Submersion de Base (risque annuel de un pour cent) et les plaines de submersion dans les zones côtières du monde entier. Ces méthodologies sont trop nombreuses pour être incluses dans le présent document. Ce document fournit plutôt des informations d'ordre général pour une analyse simple des aléas de submersion côtiers pour les cordons dunaires avec ou sans ouvrages de protection. Il vise en outre à fournir des informations sur l'évaluation de la menace d'érosion côtière nette à long terme à laquelle sont soumises les dunes, les zones humides et les falaises, en se focalisant sur la cartographie des aléas.

L'évaluation des aléas est une partie essentielle de l'évaluation globale des risques qui inclut aussi une évaluation de la vulnérabilité. L'évaluation des risques est réalisée au sein d'une série d'activités connexes qui forment une image des aléas et des vulnérabilités qui expliquent les catastrophes naturelles :

Risque = [probabilité de l'aléa] x [estimation de la perte sociale/économique induite par l'aléa]

Des informations sont d'abord collectées sur la localisation, gravité, durée et fréquence particulière des menaces auxquelles est soumise une communauté. Une évaluation des impacts des aléas potentiels sur les ressources, l'économie, l'infrastructure et les équipements-clés, etc., de la communauté, est ensuite réalisée. Les processus qui augmentent ou diminuent la vulnérabilité, d'ordre économique, social, politique ou environnemental, détermineront toujours l'importance de ces impacts.

L'évaluation des risques est par conséquent composée de trois éléments principaux :

1. Collecte des données et informations appropriées.
2. Analyse des aléas, compréhension de l'ampleur, nature et caractéristiques d'un aléa.
3. Analyse de la vulnérabilité, dans quelle mesure les personnes ou les bâtiments sont-ils susceptibles d'être touchés par un aléa ?

La nature dynamique du trait de côte rend difficile une évaluation précise des risques et de la vulnérabilité d'une communauté. Des tempêtes extrêmes peuvent causer une érosion épisodique rapide qui peut déplacer le trait de côte de plusieurs dizaines de mètres vers l'intérieur des terres, et être suivies d'une période prolongée de sédimentation de la plage qui tend à reprendre, mais de façon incomplète, sa position antérieure. Ces phénomènes épisodiques peuvent augmenter fortement les risques de dommage encourus par une communauté. En outre, les prévisions à terme de la position du trait de côte reflètent les montées du niveau de la mer passées, mais elles ne reflètent pas les taux de montée du niveau de la mer à venir, susceptibles de s'accélérer à cause du réchauffement de la planète. Inversement, les communautés répondent aux aléas d'érosion en réalisant des projets de

protection du trait de côte (remblayage des plages, digues de mer, restauration des dunes), abaissant ainsi leur vulnérabilité.

Plusieurs aspects fonctionnels de besoins informationnels au niveau local ont été abordés au sein du projet EUROSION (voir la figure 1). Pour l'évaluation des risques dans la zone côtière, il est nécessaire de combiner les concepts de risques et d'analyses coût-bénéfices. Cette approche découle de l'enchevêtrement de la vulnérabilité (valeur sociale/économique comprise) et des risques (vulnérabilité x aléas).

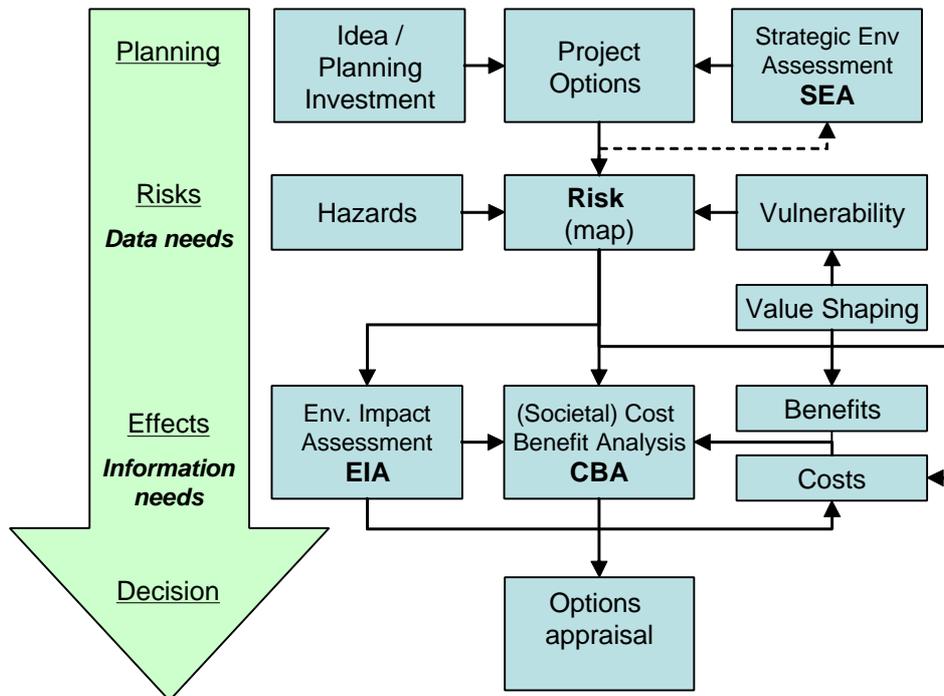


Figure 1 : L'approche d'EUROSION relative aux besoins informationnels fonctionnels sur la gestion de l'érosion côtière.

Ce document traite des deux premiers éléments se rapportant à l'évaluation des aléas côtiers. Pour des informations relatives à la vulnérabilité et (en relation avec l'évaluation des aléas) à l'évaluation des risques, voir le rapport de coût et bénéfices en matière de gestion de l'érosion côtière.

2. ÉVALUATION DES ALÉAS CÔTIERS

Les aléas côtiers en Europe sont à la fois épisodiques et structurels. Les plaines littorales situées au-dessous du niveau moyen de la mer sont soumises à une menace directe de submersion pendant les tempêtes. Ces zones sont le plus souvent associées à des défenses côtières naturelles, telles que des plages et des dunes, ou à des ouvrages artificiels de protection côtière. Un autre type d'aléa moins menaçant pour la vie des personnes est lié aux régimes côtiers à long terme et à la montée (accélérée) du niveau de la mer. Ici, des traits de côte (falaises ou dunes) subissent un recul dans le temps, entraînant des pertes de terres permanentes. Egalement associées à la montée du niveau de la mer, il faut noter les pertes croissantes de zones humides (intertidales) où la sédimentation naturelle ne compense pas la montée du niveau des eaux. La figure 2 donne un aperçu des processus, impacts et outils d'évaluation possibles traités succinctement par la suite. Dans le cas des aléas graves ou plus structurels liés aux zones de dunes, il existe une forte tendance à baser les modèles sur les caractéristiques de leurs profils transversaux. En ce qui concerne la cartographie des aléas côtiers, il est nécessaire de recommencer l'évaluation pour un plus grand nombre de profils transversaux. La modélisation des submersions nécessite cependant une combinaison avec un modèle d'élévation numérique (MEN) de la zone sujette aux submersions.

La conversion géographique est moins nécessaire pour l'évaluation traditionnelle des aléas liés au recul des falaises à long terme et à la perte des zones humides. Ici, l'approche est le plus souvent basée sur la collecte et le traitement des données géographiques.

Les cinq aléas côtiers mentionnés ci-dessus sont abordés dans les cinq chapitres qui suivent : de la collecte des données et des outils d'évaluation rapide à la cartographie des aléas côtiers (figure 2).

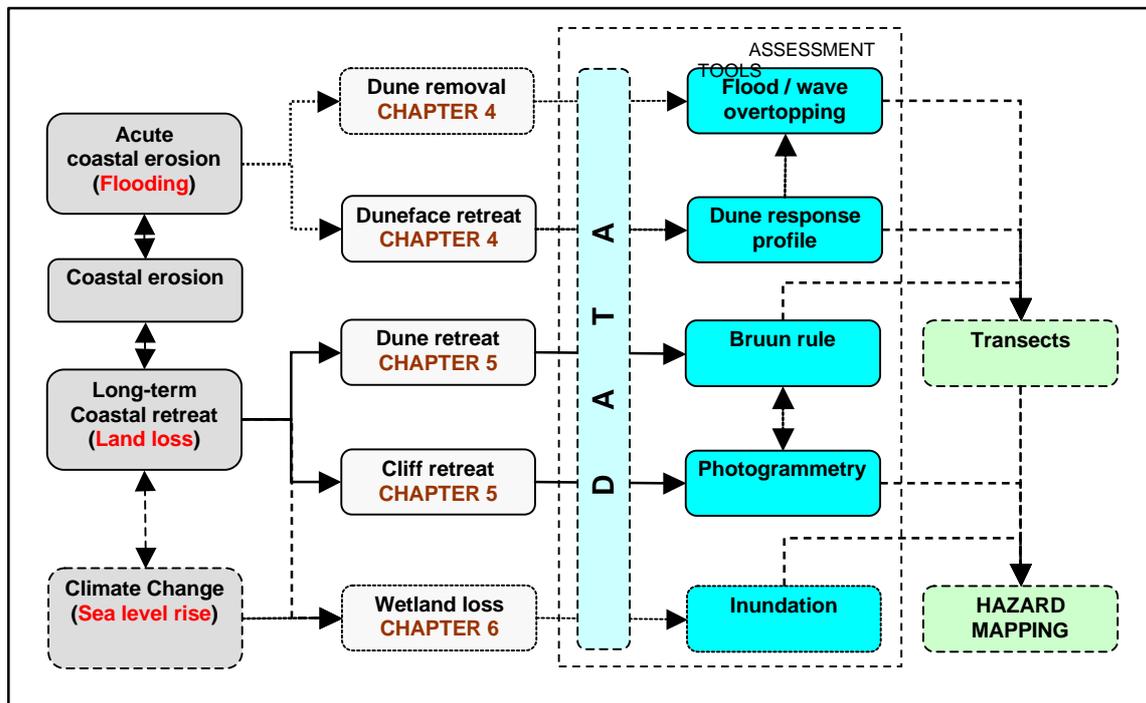


Figure 2 : Impacts de l'érosion côtière, de la montée du niveau de la mer et quelques approches d'évaluation des aléas pour aboutir à la cartographie des aléas côtiers.

3. COLLECTE DES DONNÉES ET DES INFORMATIONS

Les données les plus importantes nécessaires à l'évaluation de la probabilité de submersion et du degré des pertes de terres, ont été classées ci-dessous :

Groupe de thèmes de référence 1 – Limites administratives

- Thème de référence 1.1 – Limites terrestres
- Thème de référence 1.2 – Limites maritimes

Groupe de thèmes de référence 2 - Topographie

- Thème de référence 2.1 – Photographies aériennes / orthophotographies
- Thème de référence 2.2 – Images satellites
- Thème de référence 2.3 – Trait de côte actuel et historique
- Thème de référence 2.4 – Infrastructures
- Thème de référence 2.5 – Hydrographie
- Thème de référence 2.6 – Elévation terrestre
- Thème de référence 2.7 – Bathymétrie littorale
- Thème de référence 2.8 – Bathymétrie en mer
- Thème de référence 2.9 – Profils transversaux

Groupe de thèmes de référence 3 –Géomorphologie, géologie et sédimentologie

- Thème de référence 3.1 – Géomorphologie du trait de côte
- Thème de référence 3.2 – Géologie du trait de côte
- Thème de référence 3.3 – Sédimentologie du fond marin
- Thème de référence 3.4 – Transport sédimentaire
- Thème de référence 3.5 – Habitat sédimentaire (faune benthique)

Groupe de thèmes de référence 4 - Hydrodynamique

- Thème de référence 4.1 – Régime des vagues littorales
- Thème de référence 4.2 – Régimes des vagues et des vents en mer
- Thème de référence 4.3 – Courants littoraux
- Thème de référence 4.4 – Marées astronomiques
- Thème de référence 4.5 – Niveau marin en eaux calmes

Groupe de thèmes de référence 5 – Couverture des sols

- Thème de référence 5.1 – Couverture des sols
- Thème de référence 5.2 – Modification de la couverture des sols

Groupe de thèmes de référence 6 – Démographie

- Thème de référence 6.1 – Démographie

Groupe de thèmes de référence 7 - Patrimoine

- Thème de référence 7.1 – Zones à haute valeur écologique
- Thème de référence 7.2 – Patrimoine culturel

Groupe de thèmes de référence 8 – Biens économiques

- Thème de référence 8.1 – Marché foncier
- Thème de référence 8.2 – Activités économiques enregistrées
- Thème de référence 8.3 – Concessions de pêche et d'aquaculture
- Thème de référence 8.4 – Concessions d'extraction minière

Groupe de thèmes de référence 9 – Défenses côtières

- Thème de référence 9.1 – Ouvrages de défenses côtières

4 DÉMAIGRISSEMENT DES DUNES ET REcul DU FRONT DUNAIRE

4.1 Introduction

Le premier facteur de contrôle du type de base d'érosion dunaire est la section transversale d'avant tempête située au-dessus du risque annuel de un pour cent SWEL (réservoir dunaire frontal, SWEL correspond à la hauteur moyenne, i.e. corrigée des effets de la houle, de la mer durant la tempête). Si la zone de coupe transversale de la dune élevée est très importante, l'érosion se traduira par un recul du front dunaire orienté vers la mer, la dune rémanente restant comme une barrière contre les tempêtes et la houle. Par contre, si la zone de coupe transversale de la dune est relativement petite, l'érosion entraînera le démaigrissement de la dune d'avant tempête, laissant un profil à pente faible et douce. Ces deux situations distinctes requièrent des traitements différents de l'érosion étant donné qu'on ne dispose pas de modèle d'érosion dunaire adapté à l'ensemble des situations côtières.

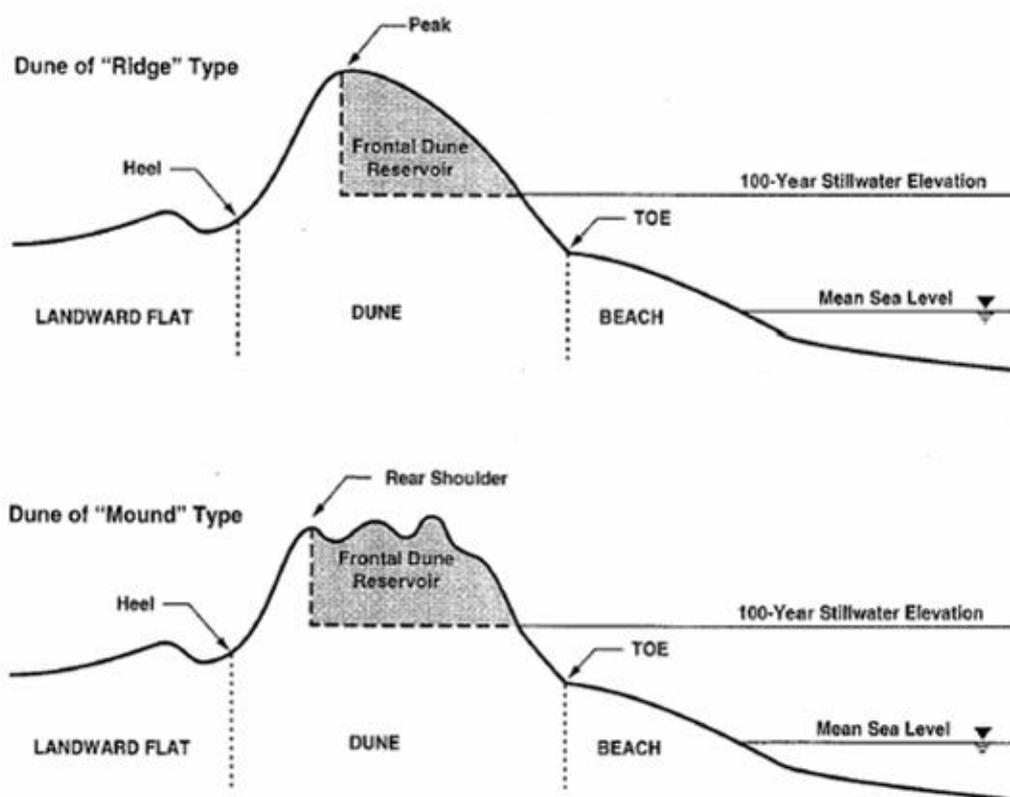


Figure 3 : Différents types de dunes : crête et butte, où la pointe et l'épaulement arrière sont importants pour l'évaluation des aléas.

La figure 3 présente la terminologie de deux types de dunes représentatifs. Une dune frontale est une crête ou une butte de sol sablonneux non consolidé, qui s'étend en continu le long du littoral vers l'intérieur d'une plage de sable. La dune se définit par des versants relativement pentus, adjacents à des zones nettement plus plates et basses de chaque côté. Par exemple, la dune d'une île barrière présente des replats vers l'intérieur du côté terre, et la plage ou plage arrière, une terrasse du côté de la mer. Le pied de la dune est un élément crucial, situé à la jonction de la pente douce du côté de la mer et d'une pente de 1:10 ou plus escarpée, marquant le front dunaire. L'épaulement arrière, qui est représenté sur la dune de type butte de la figure 4, est défini par la limite supérieure de la pente abrupte du côté de la dune situé vers l'intérieur des terres.

L'épaulement arrière des dunes de type butte correspond à la pointe des dunes de type crête. Lorsque l'érosion atteint ces points, le reste de la dune offre une résistance beaucoup plus réduite et est fortement susceptible de subir un démaigrissement rapide et complet lors d'une tempête. La figure 4 montre la localisation du "réservoir dunaire frontal," au-dessus du risque de submersion annuel de

un pour cent et du côté mer de la pointe ou de l'épaule arrière de la dune. L'importance du réservoir dunaire frontal détermine l'intégrité de la dune soumise à une érosion induite par les tempêtes.

4.2 Compilation des données importantes

Les données nécessaires à la délimitation des zones potentiellement touchées par des phénomènes liés à l'érosion sont :

- Profils transversaux / coupes transversales (voir *profils transversaux*)
- Bathymétrie littorale (voir *bathymétrie littorale*)
- Probabilité de dépassement des niveaux d'eau extrêmes (voir *probabilité de dépassement des niveaux d'eau extrêmes*)
- Niveau marin en eaux calmes de 100 ans
- Régime des vagues littorales (voir *régime des vagues littorales*)
- Jets de vagues et statistiques de déversement (voir *régime des vagues littorales*)
- Elévation terrestre (voir *élévation terrestre*)
- Sédimentologie des fonds marins (voir *sédimentologie des fonds marins*)
- Type de défenses côtières (voir *infrastructures*)

4.3 Démaigrissement des dunes et recul du front dunaire

Pour éviter le démaigrissement des dunes lors du risque de tempête annuel de un pour cent, le réservoir dunaire frontal (voir la figure 3) doit avoir normalement une zone transversale d'au moins 160 mètres carrés (FEMA, novembre 1988). Dans le cas des dunes plus massives, l'érosion se traduira par un recul du front dunaire, avec un escarpement qui apparaît du côté de la dune restante orienté vers la mer (voir la figure 4). Pour calculer le profil érodé dans des cas de ce genre, un traitement simplifié du recul du front dunaire est décrit ci-dessous.

Si la dune possède un réservoir dunaire frontal de moins de 160 mètres carrés, on peut s'attendre à ce que l'érosion induite par les tempêtes détruise la dune existante, du sable étant transporté vers la terre et vers la mer. Ces procédures fournissent un profil d'érosion réaliste de la dune d'origine, mais ne détaillent pas la redistribution du sable induite par l'érosion, le débordement et l'ouverture de brèches dans la dune.

Le traitement quantitatif des processus de débordement n'étant pas réalisable actuellement, la dune frontale a simplement été enlevée. La décision initiale de traiter l'érosion comme un phénomène de recul du front dunaire ou de démaigrissement de la dune est entièrement basée sur la taille du réservoir dunaire frontal. Pour les profils côtiers plus compliqués que ceux de la figure 3, on peut séparer le réservoir de sable supposé être efficace en résistant au démaigrissement de la dune de la partie de la dune d'avant tempête, située vers l'intérieur des terres.

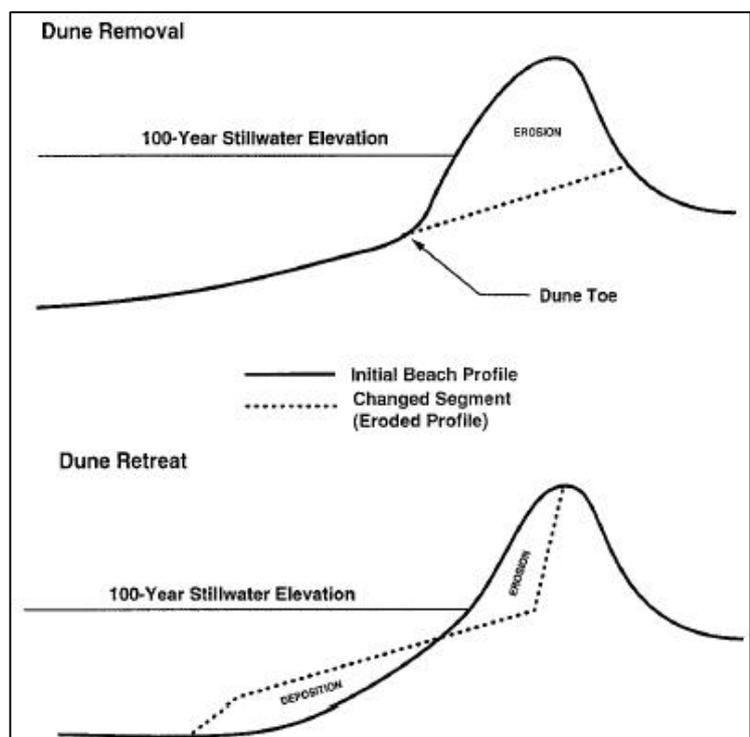


Figure 4 : Cas schématiques de géométries dunaires érodées

La figure 4 fournit une représentation schématique des différentes géométries d'érosion dunaire pour les évaluations des aléas de submersion côtiers et présente la différence entre le démaigrissement des dunes et le recul dunaire.

La figure 5 fournit un organigramme complet des points à considérer en matière d'érosion, en soulignant les deux grandes alternatives que sont le recul du front dunaire et le démaigrissement des dunes.

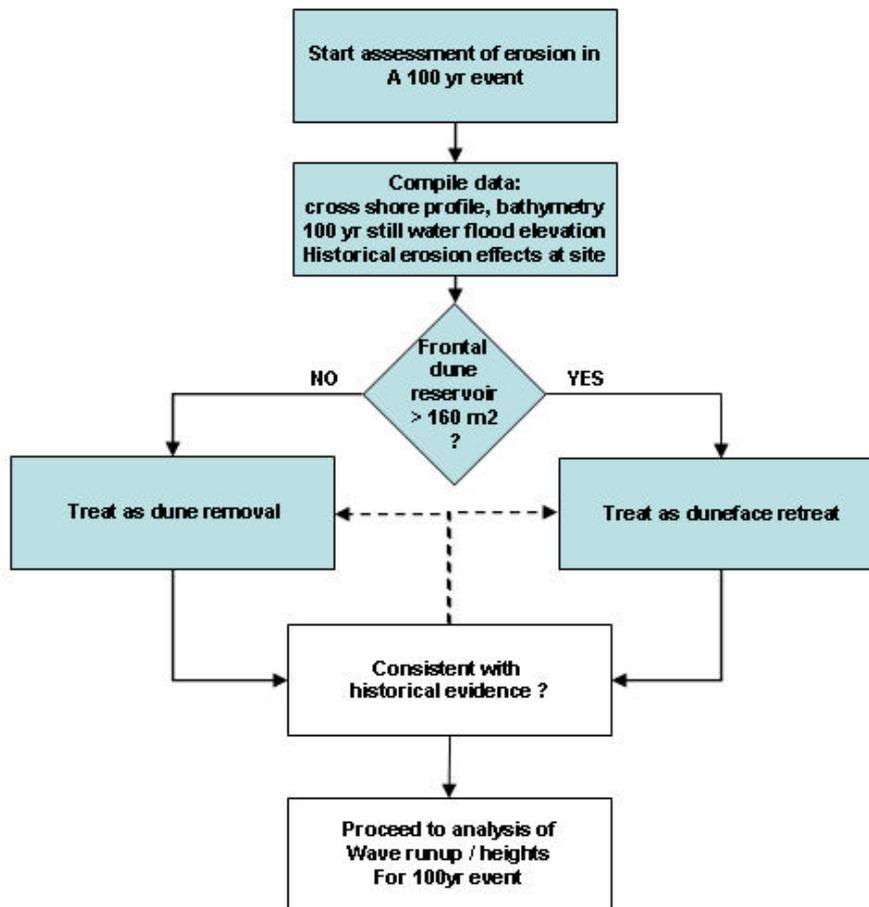


Figure 5 : Organigramme des points à considérer en matière d'érosion pour le recul du front dunaire et le démaigrissement des dunes.

Evaluation des structures côtières

Le but de l'évaluation est de déterminer si chaque structure côtière individuelle est conçue et entretenue pour pouvoir fournir une protection à partir d'un risque de submersion annuel de un pour cent. Pour qu'une structure particulière puisse être considérée comme stable pour un risque de submersion annuel de un pour cent, sa géométrie structurale doit inclure les analyses suivantes relatives aux effets de la houle qui accompagnent la submersion : érosion côtière, jet de vagues et déversement, et élévations de la tête des vagues. Autrement, on considère que la structure côtière est détruite pendant le risque de submersion annuel de un pour cent et enlevée de la représentation transversale avant de poursuivre les analyses des effets de la houle.

Les structures de protection contre les submersions peuvent avoir un effet important sur les informations qui figurent sur une carte des aléas de submersion, justifiant peut-être directement l'enlèvement de zones importantes de la zone côtière soumise à un aléa élevé. Par contraste avec la protection contre les submersions, un brise-lames peut agir à l'origine en limitant l'action de la houle et un revêtement, contrôler l'érosion du littoral, mais toute structure côtière stable peut influencer notablement sur les résultats de diverses analyses des aléas liés au risque de submersion annuel de un pour cent. Une évaluation est nécessaire pour une définition précise des aléas car une structure peut très bien diminuer les effets de submersion dans une zone donnée, tout en augmentant les aléas dus à l'érosion et à la houle dans des sites adjacents. Naturellement, plus les effets potentiels d'une structure côtière seront grands, et plus le processus d'évaluation devra être détaillé.

La documentation sur les structures côtières devrait au moins inclure les éléments suivants :

- Type et tracé de base de la structure ;
- Détails particuliers du site, (par exemple, tranche d'eau locale, élévation de la tête de la structure, climat de glace) ;
- Matériaux de construction et intégrité actuelle ;
- Données structurelles historiques, y compris la date de construction, plan d'entretien, parties responsables, réparations réalisées suite à des tempêtes ;
- Indications explicites de l'efficacité ou de l'inefficacité.

Traitement du démaigrissement des dunes

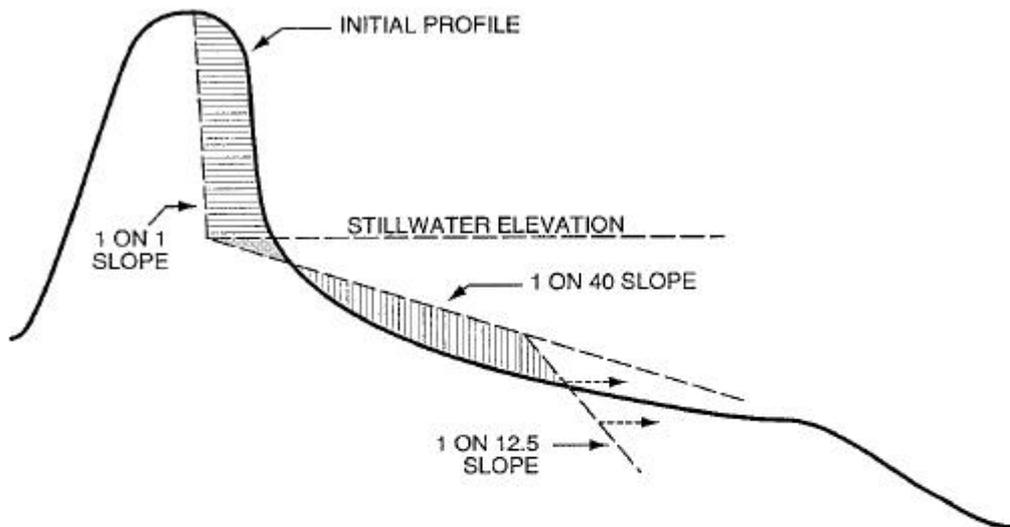
La détermination du réservoir dunaire nécessite l'évaluation de la zone de profil située au-dessus du niveau de risque de submersion annuel de un pour cent, du côté de la crête de la dune primaire orienté vers la mer (voir la figure 4). Lorsque le réservoir dunaire frontal est inférieur à 160 mètres carrés, l'élaboration du profil érodé est extrêmement simple : le démaigrissement de la dune se produit au moyen d'une pente inclinée vers la mer de 1:50 traversant le pied de dune. Le profil érodé est considéré comme étant la pente qui traverse la dune d'avant tempête, simplement plaquée sur les segments latéraux d'une coupe transversale donnée. Cela donne une rampe douce d'un côté à l'autre de la zone de brisants de tempête étendue qui convient comme première approximation du profil existant au maximum de la tempête. Ce traitement enlève simplement la projection verticale majeure de la dune frontale de la coupe transversale.

L'élaboration d'un profil érodé focalise sur les caractéristiques généralement distinctes qui définissent le pied de dune. Le pied de dune est supposé former la jonction entre la pente relativement escarpée du front dunaire et la zone notamment plus plate tournée vers la mer de la terrasse de la plage ou de la plage arrière (y compris toutes petites avant-dunes). Si une nette rupture de la pente n'apparaissait pas sur une section transversale donnée de la côte, sa localisation devrait être choisie au niveau de l'élévation caractéristique des pieds de dune définis sur des coupes transversales voisines au sein de la zone d'étude. L'autre solution consiste à placer le pied de dune au niveau du risque de submersion annuel de dix pour cent à proximité : il semble que cette approximation soit généralement appropriée aux côtes de l'Atlantique. Dans tous les cas, le pied de dune doit être pris à une élévation située au-dessus de celle de toutes terrasses de plage sur les côtes locales.

Traitement du recul du front dunaire

La procédure décrite ici produit un profil érodé pour le recul du front dunaire dans le risque de submersion annuel de un pour cent, pour des cas où le réservoir dunaire frontal est au moins égal à 160 mètres carrés. Lors d'un recul de ce genre, la barrière dunaire frontale demeure globalement intacte et le sable érodé est transporté en direction de la mer. Le profil d'après tempête offre un équilibre entre le sable soustrait par érosion au front dunaire et le sable déposé à des hauteurs plus basses du côté de la digue orienté vers la mer.

La procédure suivante pour l'élaboration du profil érodé représente une simplification du modèle de recul dunaire développé par Delft Hydraulics Laboratory (Delft Hydraulics, 1986).



PROCEDURE:

- 1 - CONSTRUCT RETREATED DUNEFACE WITH 540 FT² EROSION [] ABOVE 100-YEAR STILLWATER ELEVATION AND SEAWARD OF 1 ON 1 SLOPE.
- 2 - DETERMINE ADDITIONAL DUNE EROSION QUANTITY, SHOWN DOTTED, IN WEDGE BETWEEN STILLWATER ELEVATION, 1 ON 40 SLOPE, AND INITIAL PROFILE.
- 3 - BALANCE TOTAL DUNE EROSION WITH POSTULATED DEPOSITION [] BY APPROPRIATE PLACEMENT OF 1 ON 12.5 SLOPE AS LIMIT TO DEPOSITION.

Figure 6 : Le traitement procédural du recul du front dunaire

La figure 6 résume la procédure simple adoptée pour traiter les cas de recul du front dunaire. Le profil érodé est composé de trois pentes planes : une pente de 1:1 dans la partie la plus haute, puis une pente moyenne étendue de 1:40, qui se termine par un court segment de pente de 1:12.5 à la limite de la sédimentation de tempête. L'érosion de la partie supérieure de la dune spécifiée est 540 mètres carrés au-dessus du niveau du risque de submersion annuel de un pour cent et face à la pente de 1:1. La construction géométrique établit un équilibre entre la sédimentation littorale et l'érosion dunaire totale d'un peu plus de 160 mètres carrés pour un prolongement approprié vers la mer de la pente de 1:40. Le profil érodé résultant est plaqué sur les portions inchangées situées vers la terre et vers la mer du profil d'avant tempête. Cette procédure donne un profil complet qui peut être utilisé avec le Wave Runup Model pour évaluer la hauteur de submersion appropriée de la dune rémanente.

Configuration, jet et déversement de la houle dans les cas de recul du front dunaire

Le jet de houle correspond à la montée soudaine des eaux induite par l'action des vagues sur une barrière littorale à l'intersection du niveau d'eau de la période de retour de 100 ans. Le coin d'eau se réduit, ralentit et atteint une hauteur qui est supérieure au niveau d'eau de la période de retour de 100 ans. Des eaux de submersion en résultent qui s'écoulent ou forment des lacs dans la partie de la dune située vers l'intérieur des terres. Le débit de déversement moyen causé par la houle peut être calculé à l'aide de la formule :

$$Q = 0,489 \text{ EXP } (0,0771 * F)$$

Où :

F représente la hauteur maximale de la dune rémanente [m] au-dessus de la période de retour de 100 ans (appelée également le "freeboard") et Q est exprimé en mètres cubes d'eau par seconde et par mètre le long du littoral [m³/s.m].

Ce résultat a été mesuré lors de tests réalisés par Delft Hydraulics et pondérés pour reproduire une tempête spécifique sur les côtes néerlandaises, avec une hauteur de houle en eaux profondes significative de 7,5 mètres et une période de vague de pointe de 12 secondes. Des conditions de houle correspondant aux niveaux d'eau de la période de retour de 100 ans le long des côtes européennes peuvent différer de façon assez significative de ces conditions de houle. On suppose cependant que cette formule donne une estimation préliminaire du débit de déversement.

La quantité totale d'eau qui s'écoule sur les terres situées en retrait peut être évaluée en intégrant Q sur la durée de la tempête (considérée comme étant égale à 6 heures = 21600 secondes) et sur l'ensemble du littoral bordé par des dunes côtières. On suppose que les variations de Q le long de la côte peuvent être déterminées en interpolant la valeur de Q sur les sites de profil.

4.4 Zones sujettes aux submersions et cartographie des aléas

La quantité d'eau qui s'écoule dans l'arrière-pays suite au déversement induit par la houle peut être convertie en une zone sujette aux submersions ou un ensemble de zones sujettes aux submersions. Ceci s'effectue en identifiant d'abord les minima locaux successifs le long du profil transversal. Un minimum local est un point transversal dont l'élévation est inférieure à celle des points adjacents.

Dans le cas d'un démaigrissement complet de la dune (voir la figure 4), la zone sujette à submersion est déterminée approximativement au niveau de l'intersection du niveau d'eau de la période de 100 ans et de l'élévation terrestre.

Cependant, en pratique, l'eau ne s'écoule pas instantanément dans l'arrière-pays mais elle se répand sur la terre à une certaine vitesse et rencontre des obstacles qui lui résistent. Le niveau de l'eau de la période de retour de 100 ans n'est donc atteint que lorsqu'une tempête dure exceptionnellement longtemps. Quelques modèles existants permettent de simuler la complexité des submersions côtières induites par le déversement de la houle, l'ouverture structurale de brèches dans une dune ou une digue. Ces modèles fournissent des estimations beaucoup plus fiables des zones sujettes aux submersions. Ils nécessitent cependant un équipement et des moyens beaucoup plus importants (voir la figure 7).

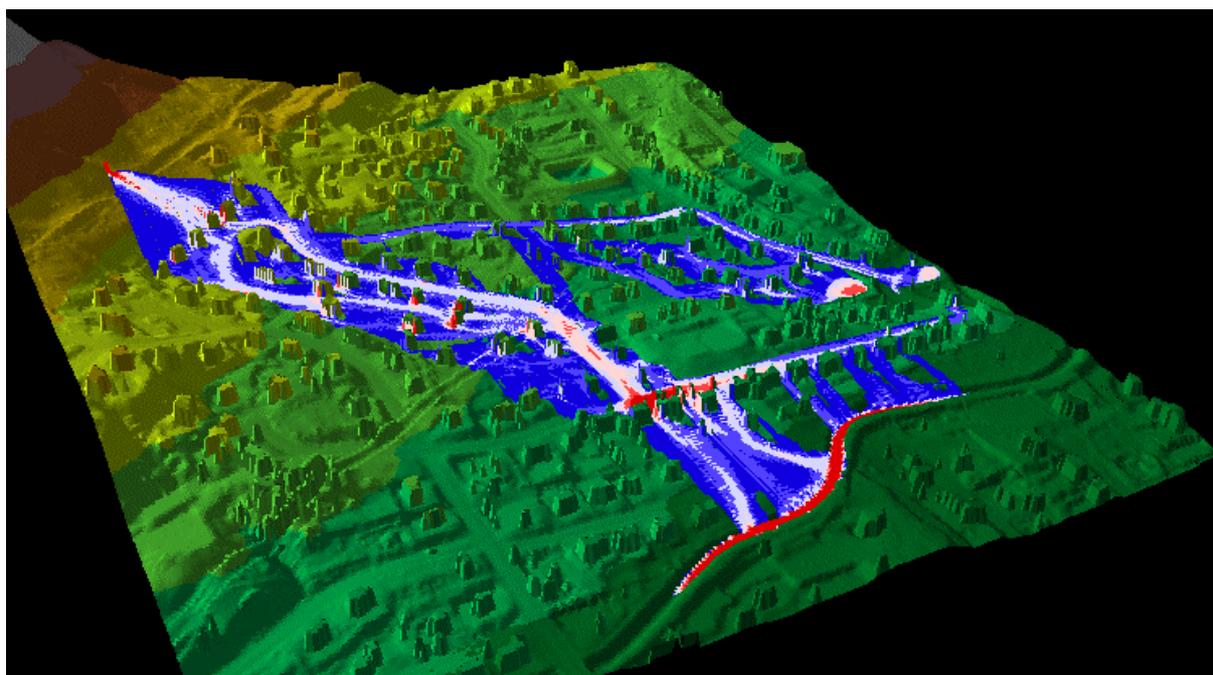


Figure 7 : Illustration d'un processus d'inondation à l'aide d'un modèle de simulation des submersions (MIKE Flood) intégré à un système d'information côtier. Source : Danish Hvdraulics Institute (DHI).

5 *RECU DES DUNES ET DES FALAISES À LONG TERME*

5.1 Introduction

Pour la gestion côtière et l'établissement de plans d'urbanisme, il est utile d'établir une distinction entre l'érosion côtière à court et à long terme. L'érosion côtière à court terme est associée à des modifications dynamiques du trait de côte qui se produisent sur toutes les plages (voir le chapitre 4). Les moyennes de ces fluctuations dans le temps n'aboutissent pas à un recul permanent du trait de côte. Dans ces cas-là, le trait de côte touché par de tels mouvements est entièrement considéré comme un élément constitutif de la plage active et est communément considéré comme formant "l'enveloppe dynamique".

Plusieurs méthodes d'évaluation existent pour traiter du recul du trait de côte à plus ou moins long terme.

5.2 Compilation des données importantes

Groupe de thèmes de référence 2 - Topographie

- Thème de référence 2.1 – Photographies aériennes / orthophotographies
- Thème de référence 2.2 – Images satellites
- Thème de référence 2.3 – Trait de côte actuel et historique
- Thème de référence 2.4 – Infrastructure
- Thème de référence 2.5 – Hydrographie

Groupe de thèmes de référence 3 – Géomorphologie, géologie et sédimentologie

- Thème de référence 3.1 – Géomorphologie
- Thème de référence 3.2 – Géologie du trait de côte
- Thème de référence 3.4 – Transport sédimentaire

Groupe de thèmes de référence 4 - Hydrodynamique

- Thème de référence 4.1 – Régime des vagues littorales
- Thème de référence 4.2 – Régimes des vagues et des vents en mer
- Thème de référence 4.4 – Marées astronomiques
- Thème de référence 4.5 – Niveau marin en eaux calmes

SUPPLÉMENT : SCÉNARIOS DE MONTÉE DU NIVEAU DE LA MER

Groupe de thèmes de référence 5 – Couverture des sols

- Thème de référence 5.1 – Couverture des sols
- Thème de référence 5.2 – Modification de la couverture des sols

Groupe de thèmes de référence 9 – Défenses côtières

- Thème de référence 9.1 – Ouvrages de défenses côtières

5.3 Le recul des dunes à long terme

Le principe de Bruun

Le premier et le meilleur modèle à lier le recul du trait de côte à une augmentation du niveau de la mer local a été proposé par Bruun [1962, voir la figure 8]. L'analyse réalisée par Bruun suppose que l'élévation du niveau de la mer provoque une migration du profil en équilibre de la plage et du fond marin vers le haut et vers la terre. À partir d'un certain nombre d'hypothèses, Bruun a défini la relation fondamentale existant entre le recul du trait de côte, R, et la montée du niveau de la mer, S :

$$R = \frac{L}{B + h} S$$

Où L est la distance transversale correspondant à la tranche d'eau h, considérée par Bruun comme la profondeur à laquelle se trouvent les sédiments littoraux (profondeur de fermeture), et B la hauteur de la dune. L'analyse est bidimensionnelle et suppose que :

1. La partie haute de la plage est érodée suite à la migration vers la terre du profil ;
2. Les matériaux enlevés de cette partie haute s'accumulent immédiatement sur l'avant-plage, de sorte que le volume enlevé est égal au volume déposé ;

3. L'élévation observée au niveau du fond marin suite à l'accumulation de matériaux est égale à la montée du niveau de la mer ; l'épaisseur de la tranche d'eau littorale reste donc constante [SCOR, 1991].

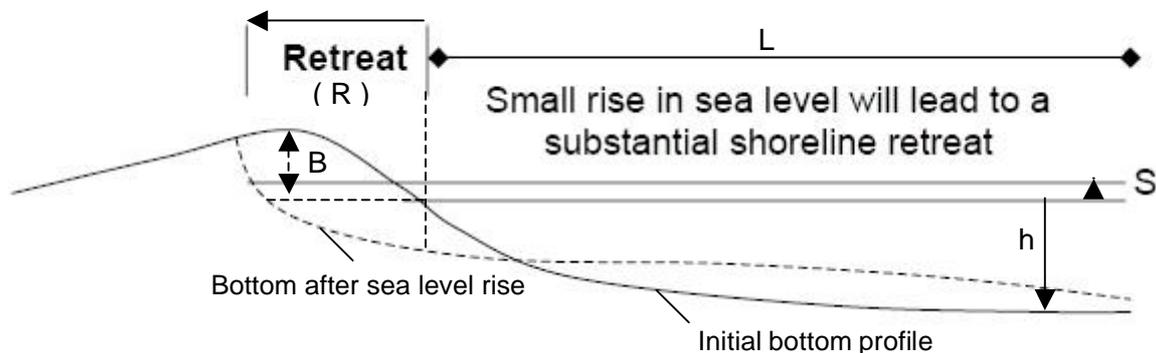


Figure 8 : Les principaux paramètres du principe de Bruun

Malgré sa simplicité et le nombre d'hypothèses admises qui ont été critiquées à plusieurs reprises, le principe de Bruun fonctionne remarquablement bien dans de nombreux cas.

Le panel intergouvernemental pour le changement climatique (UN-IPCC) rapporte qu'une montée du niveau de la mer de 1 cm provoque une érosion horizontale des plages d'environ 1 m. Ce phénomène représente désormais un problème important pour les plages aménagées qui se trouvent à moins de 5 mètres de l'océan [IPCC, 1998]. De plus, la montée du niveau de la mer serait à l'origine de tempêtes plus fortes qui augmenteraient la vitesse d'érosion des plages ; une tempête violente étant susceptible d'éroder suffisamment la côte pour changer l'ensemble de son profil en une année [Dubois, 1990]. Les recherches de Dubois ont montré que les valeurs d'érosion des plages observées étaient deux à trois fois plus importantes que l'érosion prévue pour la même année. Dubois suggère que la théorie de Bruun et la montée du niveau de la mer sont peut-être à l'origine des vitesses d'érosion constatées [Dubois, 1990]. Le principe de Bruun stipule en effet qu'un profil de plage caractéristique concave et ascendant enlève du sable de la face de la plage et le dépose sur l'avant-plage pour que la tranche d'eau reste constante. Le principe de Bruun peut être appliqué pour corréler la montée du niveau de la mer avec les plages qui subissent une érosion. Les vitesses actuelles de montée du niveau de la mer entraînent l'érosion et le recul de 70 % des plages de sable du monde entier. Si la vitesse de la montée du niveau de la mer continue à augmenter, les pertes de plages induites par l'érosion côtière augmenteront également.

5.4 Le recul des falaises

Le recul des falaises et les glissements de terres littorales représentent des menaces urbanistiques importantes, comme par exemple sur les côtes sud et est de l'Angleterre. Bien que les échecs individuels tendent le plus souvent à ne causer qu'un recul limité des falaises, des effets cumulatifs peuvent avoir des conséquences dramatiques. La côte de Holderness (UK) a subi par exemple un recul d'environ 2 km au cours des 1000 dernières années, au moins 26 villages figurant dans la Domesday Survey de 1086 ayant également disparu ; 75 Mm³ de terres ont été perdus en 100 ans (Valentin, 1954 ; Pethick 1996). Sur certaines parties de la côte du Norfolk, on a enregistré un recul de plus de 175 m depuis 1885 (Clayton et Coventry 1986).

Les falaises sont des systèmes de transport sédimentaire ouverts, caractérisés par des apports, débits et transits de matériaux : elles forment ce qu'on appelle des systèmes en cascades. Le concept d'"unité de comportement de falaise" (CBU) fournit un cadre important pour la gestion des falaises (Lee 1997 ; Moore et autres, 1998 ; Brunsden et Lee 2000). Ces unités (CBU) s'étendent du littoral aux sommets des falaises et sont associées aux CBU adjacentes dans le cadre fourni par les cellules littorales/cellules sédimentaires. On peut distinguer un ensemble de types de systèmes de falaises en fonction du débit et de l'accumulation de sédiments au sein des systèmes (voir figure 9).

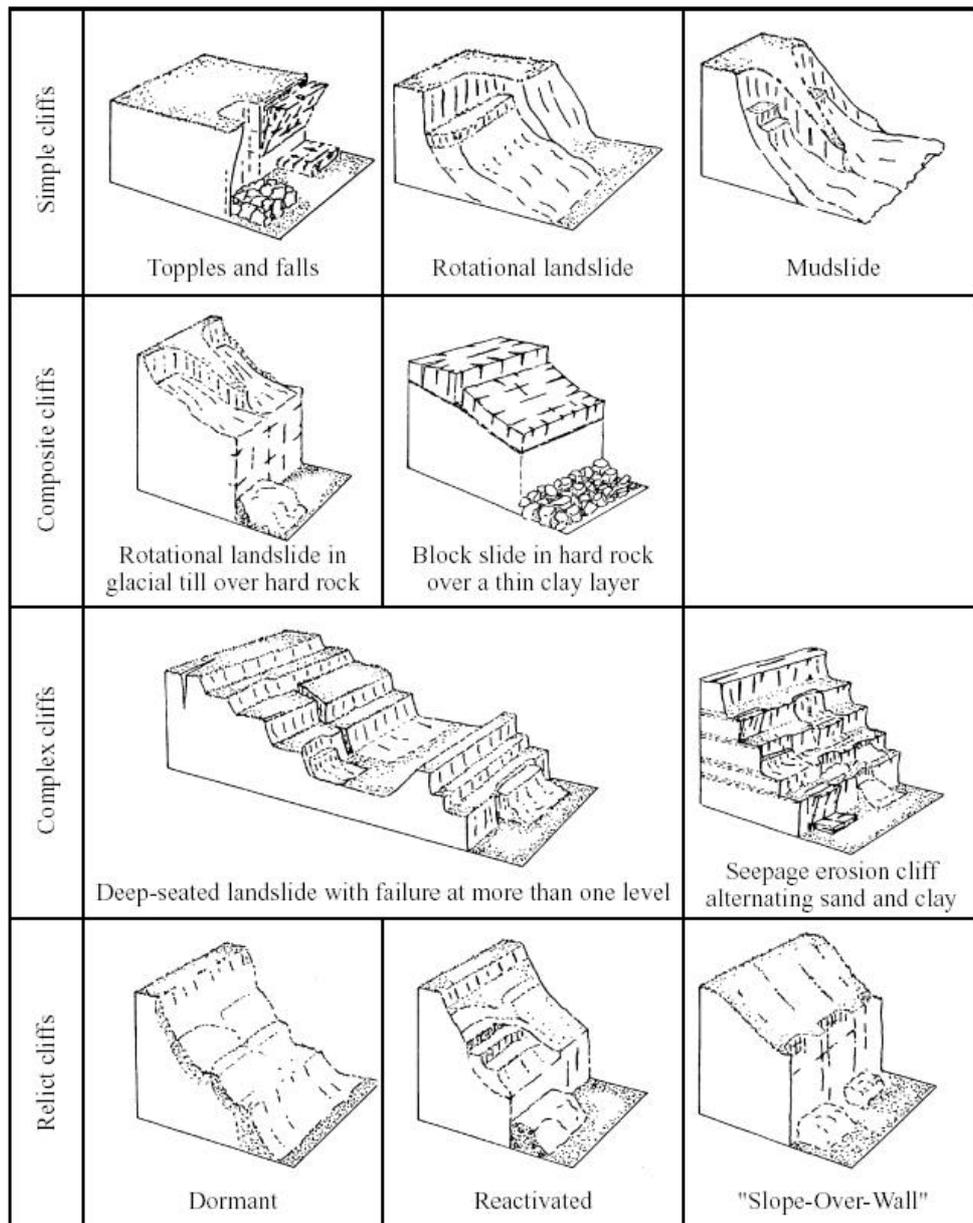


Figure 9 : Les principaux types de CBU

Dans le temps, les falaises présentent deux types de comportements opposés :

- Une série complexe et aléatoire de phénomènes de recul, souvent avec des périodes de temps variables entre les phénomènes qui dépendent de l'enchaînement des tempêtes et de l'état de stabilité variable des falaises. Les tempêtes d'une ampleur particulière pouvant ainsi être redondantes (c'est-à-dire ne pas initier de recul de la falaise) jusqu'à ce que des facteurs préalables (altération climatique, baisse de la résistance à la déformation, etc.) n'abaissent la stabilité de glissement sous un niveau critique et que des tempêtes plus petites ne "provoquent" un recul ;
- La constitution et le maintien d'un ensemble caractéristique de modèles de terrain au sein d'une CBU qui persistent dans le temps, bien que des composants individuels évoluent et que les structures et les corrélations de ces caractéristiques changent continuellement.

Ces deux états font ressortir un problème fondamental pour la prévision et la mesure du recul des falaises – le besoin d'établir un lien entre des valeurs ou des observations extrêmement variables de phénomènes de recul et la tendance générale au sein d'une CBU. Il est ici commode d'examiner le recul des falaises en fonction d'une gamme d'échelles temporelles appropriées :

1. Comportement à court terme ; examiné sous cet angle, le recul apparaît comme un processus extrêmement variable, avec des variations marquées dans le taux de recul annuel autour d'une valeur

moyenne. Ce type de comportement est caractérisé par des périodes de non-activité entrecoupées de courtes phases de recul.

2. Comportement à moyen terme ; à cette échelle, les variations disparaissent d'elles-mêmes puisque les CBU ont tendance à maintenir un équilibre entre le processus et la forme via une réaction négative et des mécanismes autorégulateurs (par exemple accumulation de débris). Observée sous cette perspective, la vitesse de recul sera relativement constante. Cet état à moyen terme peut être considéré comme reflétant un comportement stationnaire caractérisé par le maintien de la forme de la CBU, le recul parallèle du profil de la falaise et un équilibre à terme du stock de sédiments, c'est-à-dire que la vitesse globale de détachement est égale à la vitesse globale d'enlèvement de l'avant-plage, avec des changements minimum dans le volume de matériaux stocké au sein du système de falaises.

3. Comportement à long terme ; à cette échelle, les caractéristiques de la CBU peuvent changer peu à peu, reflétant l'évolution progressive du trait de falaise en réponse à des changements environnementaux importants, comme par exemple le climat de l'Holocène et les variations du niveau de la mer.

L'évaluation des aléas liés au recul des falaises implique l'évaluation de la probabilité d'un phénomène de recul ou de glissement de terres littorales de dimension et de type particuliers sur une période de temps donnée. Un élément important de l'évaluation des aléas est constitué par la définition du potentiel de recul, en termes de nature et d'ampleur des phénomènes qui peuvent être attendus dans une CBU. Cela nécessite une évaluation :

- De la nature et de l'ampleur des phénomènes historiques ;
- Des facteurs d'influence de la configuration des phénomènes de recul ;
- Des causes et des mécanismes des phénomènes possibles ;
- De l'incidence théorique de phénomènes initiateurs.

Lorsqu'on évalue les probabilités, il est souvent plus fiable de prendre en considération la probabilité conditionnelle. Par exemple :

Probabilité annuelle de pertes = Probabilité d'un Phénomène de Tempête Initiateur x Probabilité de l'Absence de Plage (étant donné le phénomène de tempête) x Probabilité d'un glissement de terres (étant donné les conditions précédentes)

L'approche de recul linéaire la plus directe pour prévoir le recul des falaises en utilisant des données historiques est un modèle linéaire continu (Crowell et autres, 1997, Amin et Davidson-Arnott, 1997) :

$$X_t = \beta_0 + \beta_1 t + e$$

Où X_t représente la distance de recul au temps t et e une variable aléatoire qui subit une distribution gaussienne de moyenne nulle et de variance v . La distribution de X_t sera donc gaussienne de moyenne $\beta_0 + \beta_1 t$ et de variance v . S'il existe n observations historiques de la position de la falaise x_i au temps t_i , les estimateurs de vraisemblance maximum pour β_0 et β_1 peuvent être obtenus à partir d'une simple théorie de recul linéaire.

Bien qu'il existe une grande incertitude relativement à l'impact de la montée du niveau de la mer et du changement climatique, on s'attend à ce qu'il en résulte une augmentation des vitesses de recul. Un certain nombre de modèles empiriques simples sont disponibles pour obtenir une indication des changements possibles :

1. Projection historique ; où les vitesses de recul futures sont extrapolées de la façon suivante : (National Research Council 1987) :

$$\text{Vitesse de recul future} = \frac{\text{Vitesse de recul historique}}{\text{Montée du niveau de la mer historique}} \times \text{Montée du niveau de la mer future}$$

Ce modèle est très simple, mais il suppose que la montée du niveau de la mer exerce une influence prédominante sur le recul.

2. Modèles géométriques ; où la montée du niveau de la mer est supposée aboutir au recul parallèle du profil de la falaise (Bruun 1962), tout en s'accompagnant d'une élévation correspondante du pied de la falaise. Cette relation géométrique forme la base du principe de Bruun pour obtenir la réponse du trait de côte à la montée du niveau de la mer, c'est-à-dire le recul additionnel (R) au-dessus de la vitesse historique.

$$R = S \times \frac{L}{P(B+h)}$$

Où :

S = montée du niveau de la mer

h = profondeur de fermeture

P = Excédent de sédiments

L = Longueur du profil de la CBU

B = Hauteur de la falaise

L'excédent de sédiments correspondant à la proportion de sédiments érodés qui est suffisamment grossière pour rester dans le profil en équilibre.

3. Méthodes de stocks de sédiments ; le principe de Bruun est essentiellement bidimensionnel (côte - mer) et suppose que les apports et les transits sédimentaires longitudinaux sont égaux et équivalents, une condition qui se produit rarement dans la réalité. Pour modéliser de façon fiable la situation tridimensionnelle, un stock sédimentaire complet doit être calculé pour la cellule littorale considérée. Si l'on suppose cependant que la vitesse de recul historique représente la contribution nette au stock sédimentaire, le principe de Bruun (voir ci-dessus) peut être modifié pour prévoir l'augmentation du recul induite par la montée du niveau de la mer (R) de la façon suivante (Dean 1991) :

$$R = R_1 + S_c \times \frac{L}{P(B+h)}$$

Où :

R1 = vitesse de recul historique

S_c = modification de la vitesse de montée du niveau de la mer

La modification de la montée du niveau de la mer correspond à la différence entre la montée du niveau de la mer historique et future. Cela est tenu pour être l'adaptation la plus réaliste du principe de Bruun pour les falaises qui subissent une érosion (Bray et Hooke 1997).

4. Modèle géométrique de la plate-forme littorale ; où aucune plage n'est présente pour dissiper l'énergie dégagée par la houle. Des relations directes peuvent être formulées pour prévoir le recul en fonction de la résistance des matériaux et de la puissance de la houle (par exemple Sunamura 1992). L'érosion additionnelle (R) peut être évaluée à partir de la valeur de la montée du niveau de la mer et du gradient de la plate-forme littorale, de la façon suivante :

$$R = R_1 + \frac{S_c}{h(R_1+L)}$$

5.5 Cartographie des aléas liés au recul du trait de côte

Recul des falaises

Les résultats ont besoin d'être interprétés dans le contexte de comportements CBU contemporains et anticipés. Des prévisions à court terme du recul des zones situées au sommet des falaises peuvent induire en erreur quand la CBU évolue lors de phénomènes épisodiques, sur des moyennes de l'ordre de 100 ans. Pour bien faire, les prévisions devraient couvrir au moins un "cycle" de recul complet ; les informations pratiques fournies précédemment sur les échelles temporelles stationnaires à moyen terme sont aussi pertinentes ici, tout comme les autres méthodes pour exprimer les vitesses de recul prévues.

Les données et prévisions liées au recul des falaises peuvent être présentées de différentes façons, à savoir, entre autres :

1. Sous forme de tableau.
2. Sous forme de graphique, y compris :

- recul annuel et cumulatif mesuré;
- mesures du profil de falaise ;
- graphiques des simulations et prévisions de recul de la falaise ;
- fonctions de densité de probabilité de la position de la falaise à un moment donné ;
- fonctions de densité de probabilité à un moment donné pour que le recul de la falaise atteigne un point donné.

3. Sous forme de carte montrant à une échelle appropriée :

- la meilleure estimation de la position de la falaise au bout d'une période donnée comprenant les limites de confiance et les limites de prévision;
- un zonage basé sur la distribution de probabilité cumulative d'un recul de falaise sur une période donnée (figures 10 et 11). Par exemple :

Zone 1 ; Il est certain que les terres de cette zone seront touchées par un recul au cours d'une période donnée.

Zone 2 ; Il y a 50 % de chances que les terres de cette zone soient touchées par un recul au cours d'une période donnée.

Zone 3 ; Il y a 10 % de chances que les terres de cette zone soient touchées par un recul au cours d'une période donnée.

Zone 4 ; Il y a 1 % de chances que les terres de cette zone soient touchées par un recul au cours d'une période donnée.

Notez que les probabilités qui définissent les divisions des zones sont arbitraires et peuvent être adaptées pour convenir avec l'objectif. Plus de détails (c.-à-d. plus de zones) peuvent se justifier dans des zones avec plus de biens à risques. Cette forme de présentation n'établit pas de distinction entre des sites différents au sein de la même zone, bien que dans la réalité les biens d'une zone situés vers l'intérieur des terres ou vers la mer aient des probabilités différentes d'être touchés par un recul.

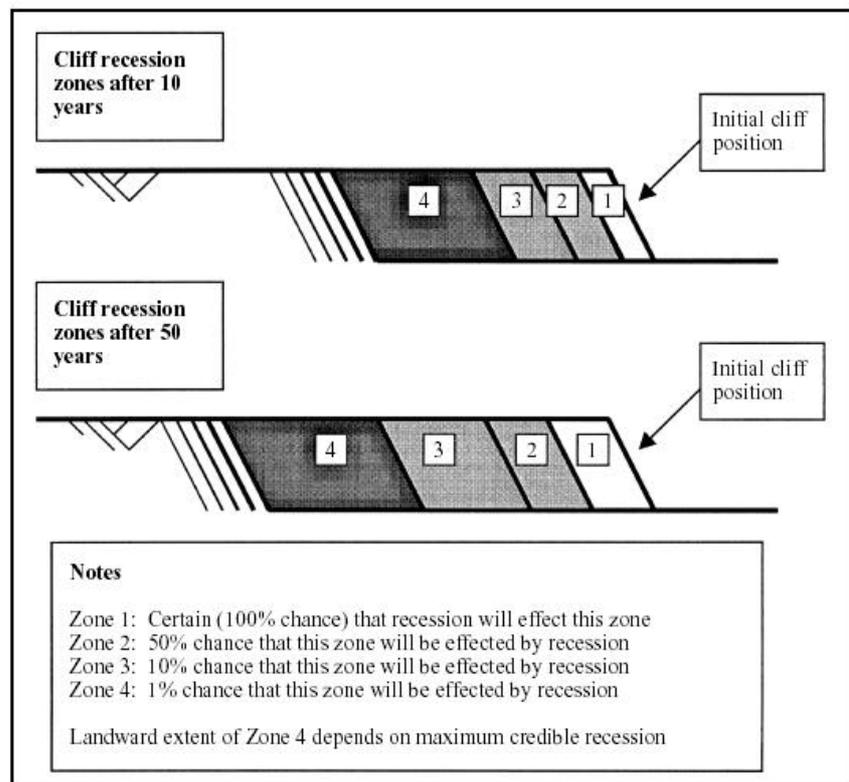


Figure 10 : Un zonage basé sur la distribution de probabilité cumulative du recul de falaise au cours d'une période donnée



Figure 11 : Exemple pratique d'un zonage basé sur la distribution de probabilité cumulative du recul de falaise au cours d'une période donnée.

Recul du trait de côte

Les photographies aériennes ortho-rectifiées numériquement sont devenues un outil important en matière de cartographie du trait de côte historique. Elles se sont substituées aux besoins de méthodes traditionnelles telles que l'utilisation d'un télescope de transfert équipé d'un zoom pour projeter des traits de côte sur une carte de base. Les photographies aériennes rectifiées numériquement possèdent tous les éléments d'une photographie, mais les déformations de l'image provenant de l'inclinaison de l'avion, de l'objectif de l'appareil photo, et du déplacement du relief ont été corrigées. L'image est aussi géoréférencée et peut donc être combinée avec d'autres formes de données géographiques dans un système d'information géographique (GIS).

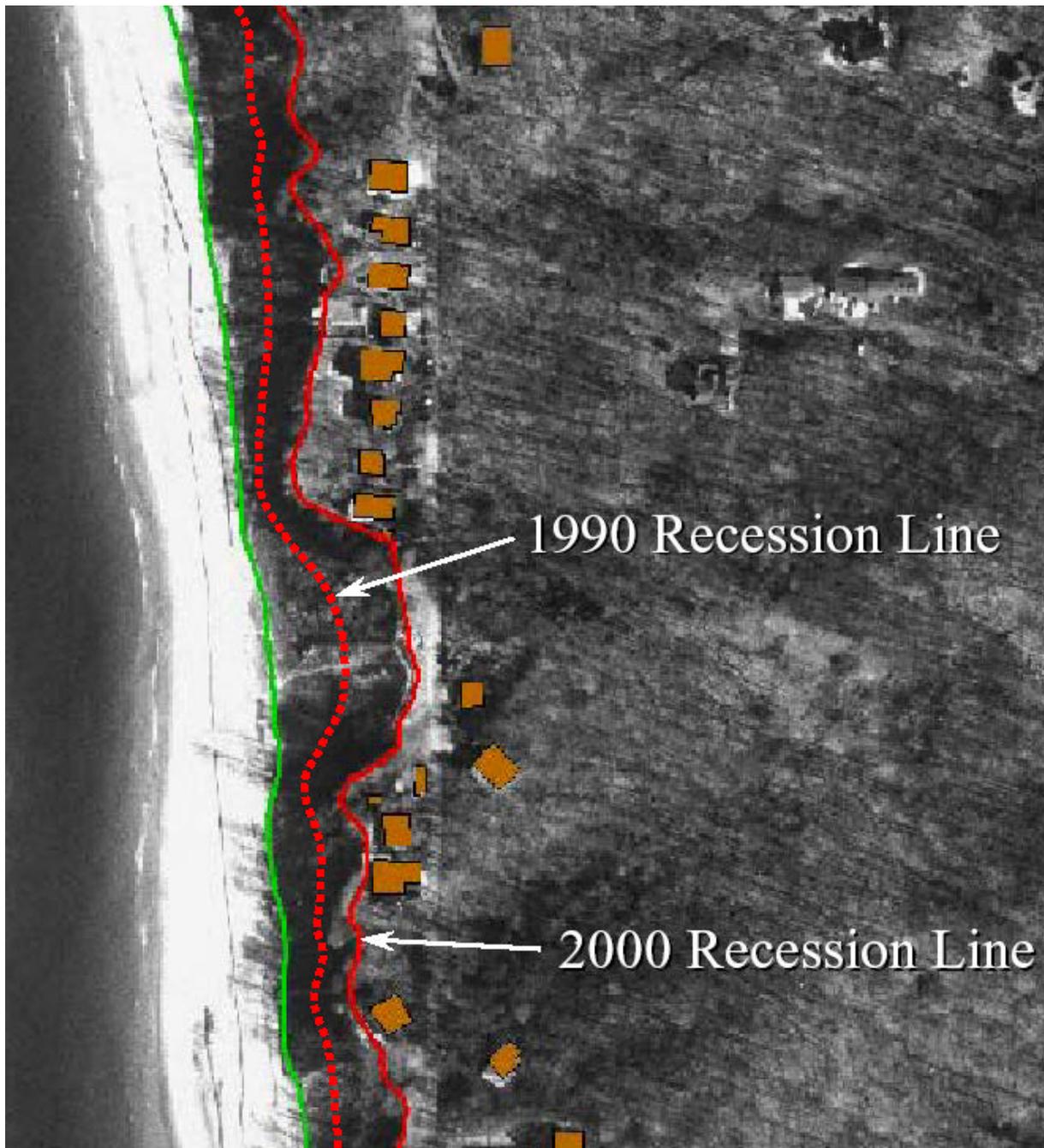


Figure 12 : Exemple pratique de lignes de recul pour le recul du trait de côte.

Analyse vectorielle des variations du trait de côte et application GIS

Les analyses vectorielles des variations du trait de côte fournissent un modèle d'érosion et de sédimentation temporaire pour tout ensemble de données linéaires historiques du trait de côte. L'approche vectorielle pour analyser les données historiques des variations du trait de côte contraste avec une approche à grille au niveau de sa flexibilité d'échantillonnage et ses échelles temporelles. L'approche vectorielle représentée sur la figure ci-dessous peut accepter tout un nombre de représentations linéaires temporelles du trait de côte et échantillonner ces traits de côte de façon flexible pour calculer la variabilité passée et les variations futures projetées (Van Dusen, 1997). La figure ci-dessous représente une section limitée des données et de l'approche analytique des variations du trait de côte. Notez le passage des pertes globales nettes (érosion) au gain global net (sédimentation) lorsque l'analyse évolue de la gauche vers la droite. Les zones en hauteur sont représentées en haut de l'image, les zones en mer en bas de l'image. Les sections transversales sont séparées par des intervalles de 50 mètres. L'échelle est de 1:4500.

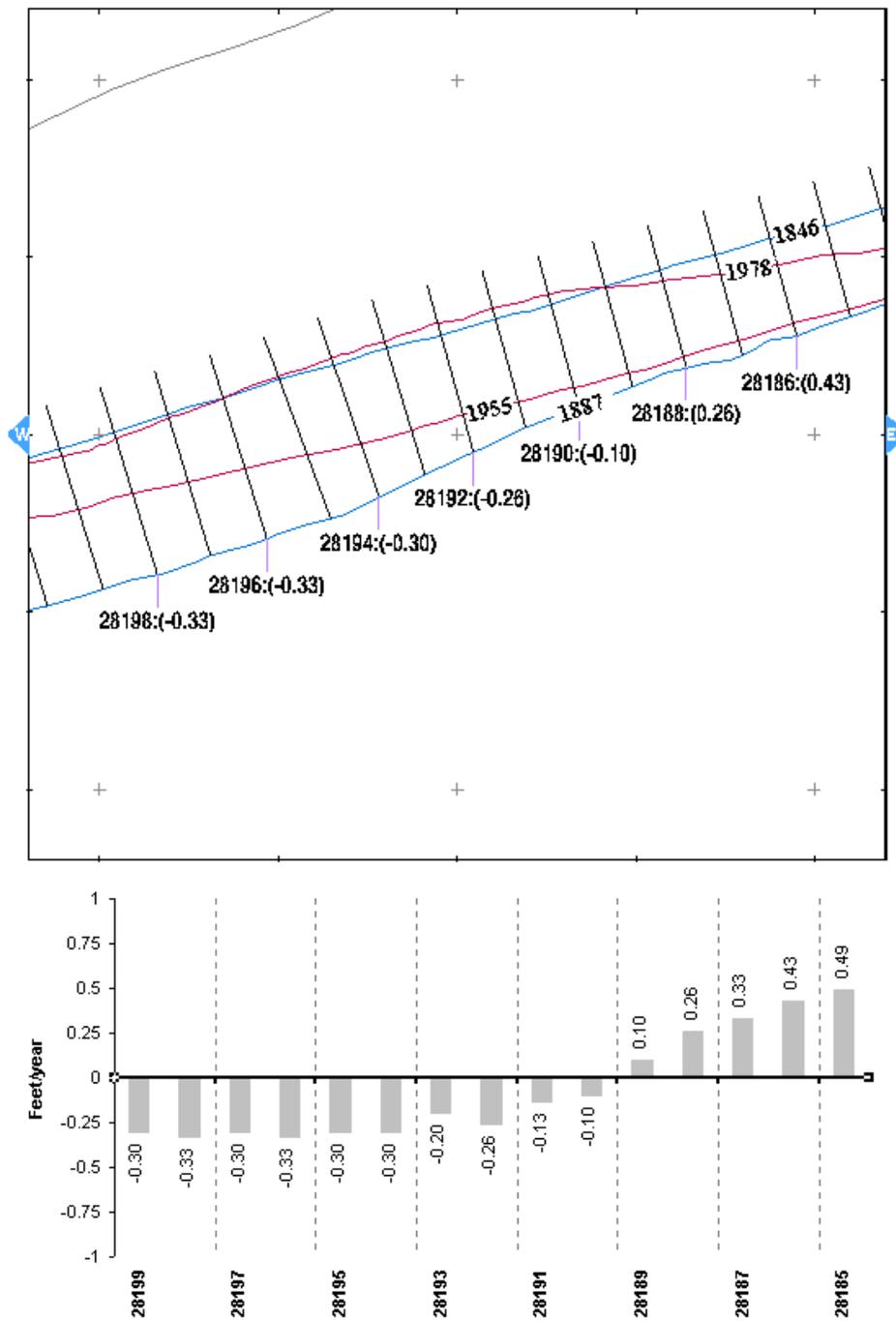


Figure 13 : Exemple GIS pratique de lignes de recul pour le recul du trait de côte.

Dans l'exemple ci-dessus (figure 13), des données historiques linéaires du trait de côte aussi anciennes que 1844 et aussi récentes que 1982 ont été utilisées et une analyse a été réalisée pour définir et exécuter une procédure afin d'obtenir la vitesse historique des variations du trait de côte en utilisant une méthodologie vectorielle.

6. MONTÉE DU NIVEAU DE LA MER ET PERTES DE ZONES HUMIDES

6.1 Introduction

Les zones humides sont des zones situées entre la terre et la mer. Elles sont régulièrement inondées, non pas à cause de situations extrêmes, mais simplement à cause des marées. Le tableau 1 présente quelques zones humides du littoral européen en km², le pourcentage que ces zones représentent dans la région correspondante (Gilbert et autres, 1990) et quelques autres régions à titre de comparaison.

Tableau 1 : Zones humides (Gilbert et autres, 1990)

Région	Zones humides [km ²]	% de la région
Europe du Nord et de l'Ouest	31515	0,713
Côte de la mer Baltique	2123	0,176
Nord de la Méditerranée	6497	0,609
Amérique du Nord	32330	1,639
Extrême-Orient	102074	0,999
Asie du Sud-Est	122595	3,424
Grandes îles de l'océan Pacifique	89500	19,385

Les zones humides sont importantes d'un point de vue écologique : elles servent de viviers pour les poissons, fournissent de la nourriture aux oiseaux et sont des habitats pour beaucoup d'autres animaux. En outre, elles offrent une protection contre les tempêtes et les submersions. Les zones humides peuvent être divisées grossièrement en trois catégories, selon leur niveau de salinité.

1. Marais salés

Les marais salés se rencontrent à des latitudes plus élevées (par rapport aux mangroves) et dans un environnement salin. Les marais salés se trouvent sur la partie des barrières tournée vers la terre. Dans cette situation, ils sont surtout menacés de façon indirecte par la montée du niveau de la mer, au sens où ils peuvent être ensevelis sous une barrière qui migre vers l'intérieur des terres (voir aussi la figure 15).

2. Marais saumâtres

Dans les marais saumâtres, les taux de salinité sont inférieurs à 30 ppt (environ 17000 mg CL/l). On peut les trouver dans les estuaires, dans les endroits où les eaux sont calmes et les apports sédimentaires abondants. Grâce à cet apport en sédiments et à leur propre production organique, ils sont normalement capables de faire face à une montée du niveau de la mer.

3. Marais d'eau douce de marée

Ces marais se rencontrent dans les parties les plus élevées des estuaires. Ils sont donc moins souvent inondés et ont des taux de salinité plus bas (environ 2750 mg CL/l). Lorsque le niveau de la mer monte, le principal aléa pour les marais d'eau douce est l'intrusion d'eau salée ; les marais deviennent alors saumâtres ou salins, ce qui entraîne le remplacement des espèces végétales d'origine par des espèces plus résistantes au sel. Le creusement de chenaux pour la navigation peut aussi provoquer la salinisation.

La montée du niveau de la mer peut donc perturber les zones humides de trois façons principales : par inondation, érosion, et intrusion d'eau salée. Dans certains cas, les zones humides se transforment en nappes d'eau ouvertes ; dans d'autres cas, le type de végétation change mais une zone particulière demeure une zone humide. Cependant, si la montée du niveau de la mer a lieu suffisamment lentement, la capacité des zones humides à se développer vers le haut – par blocage de sédiments ou par accumulation de la tourbe créée par les sédiments – peut empêcher que cette montée du niveau de la mer ne détruise les zones humides.

En expliquant les impacts potentiels de la montée du niveau de la mer, nous nous focalisons sur ce que serait l'impact si les zones humides ne se développaient pas vers le haut, le lecteur ne devant pas oublier que cette "sédimentation verticale" potentielle est susceptible de contrebalancer ces impacts. L'impact réel dépendra du "changement net du substrat," c'est-à-dire de la différence entre la montée du niveau de la mer et la sédimentation de la zone humide. Ici, toutes les estimations de pertes futures de zones humides sont basées sur l'hypothèse de la poursuite des vitesses actuelles de sédimentation verticale.

Les marais côtiers ont résisté à la faible vitesse de montée du niveau de la mer qui a caractérisé les derniers millénaires (voir la figure 14). Les zones de marais se sont donc développées dans le temps suite à l'inondation des terres, et les terres situées juste au-dessus des zones humides sont beaucoup plus humides que sèches (A et B). Si, dans le futur, la montée du niveau de la mer est plus rapide que la capacité des marais à réagir, les zones de marais subiront une contraction (C). La construction de cordons d'enrochement pour protéger le développement économique peut empêcher aussi aujourd'hui les marais de se former et entraîner leur disparition totale dans certaines zones (D).

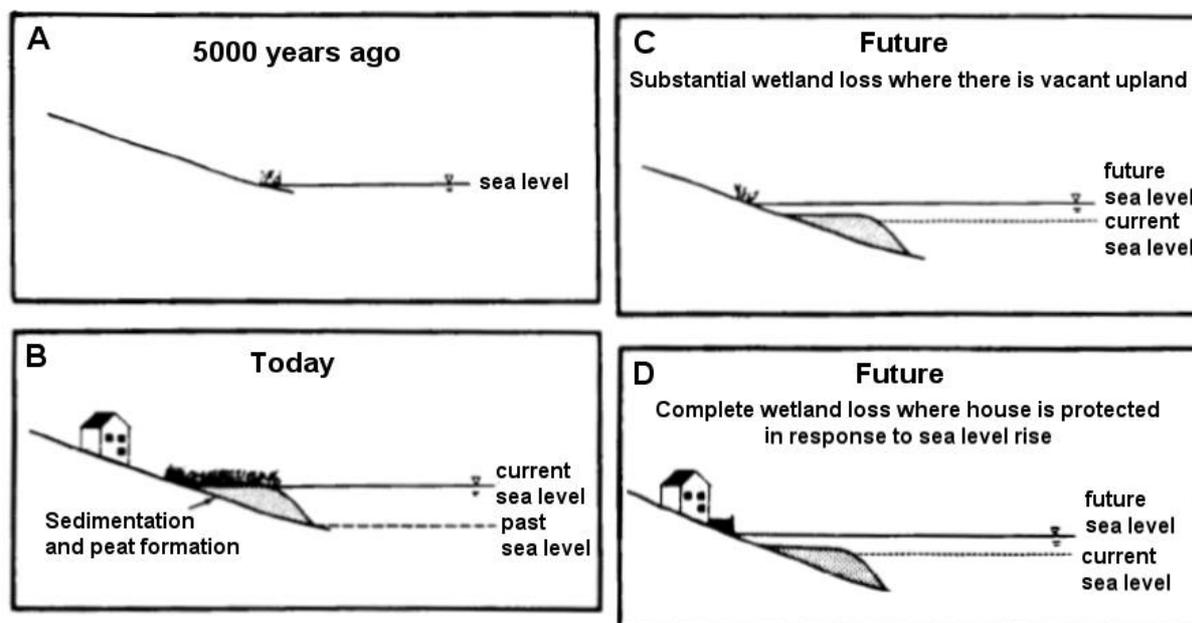


Figure 14 : Pertes partielles et totales de zones humides dans le futur induites par la montée du niveau de la mer et un facteur anthropique.

La réponse directe des zones humides à la montée du niveau de la mer a été modélisée en sélectionnant deux valeurs critiques de la montée du niveau de la mer, pondérées en fonction de la hauteur des marées : la valeur inférieure distinguant l'absence de perte de zones humides de la perte de zones humides ; la valeur supérieure distinguant la perte partielle de la perte quasi-totale. Les pertes sont modélisées linéairement entre les deux valeurs seuils. Le potentiel de migration des zones humides vers les plaines littorales adjacentes situées en amont est évalué sur la base de la morphologie côtière et de la densité de la population côtière. En plus des effets de la montée du niveau de la mer, les aménagements directs réalisés par l'homme sont susceptibles de provoquer des réductions globales importantes dans les zones humides côtières. Sur la base des tendances actuelles, 60 % du stock actuel de zones humides risque d'avoir disparu d'ici les années 2080, sans tenir compte de la montée du niveau de la mer. Il est probable que la vitesse de disparition des zones humides diminuera avec le temps suite à une rareté croissante et à une augmentation des niveaux de vie qui donneront une valeur plus élevée à l'environnement. Par conséquent, un scénario de référence de pertes de 1 % par an dans les années 1990, déclinant de façon uniforme jusqu'à une valeur constante de 0,4 % par an dans les années 2020, a été adopté. Cela aboutit à une perte de 37 % du stock total de zones humides d'ici 2080 sans montée du niveau de la mer (IPCC, 1995).

6.2 Compilation des données importantes

Groupe de thèmes de référence 2 - Topographie

- Thème de référence 2.1 – Photographies aériennes / orthophotographies
- Thème de référence 2.2 – Images satellites
- Thème de référence 2.3 – Trait de côte actuel et historique
- Thème de référence 2.4 – Infrastructures
- Thème de référence 2.5 – Hydrographie
- Thème de référence 2.6 – Élévation terrestre
- Thème de référence 2.7 – Bathymétrie littorale
- Thème de référence 2.8 – Bathymétrie en mer

Groupe de thèmes de référence 3 – Géomorphologie, géologie et sédimentologie

- Thème de référence 3.1 – Géomorphologie du trait de côte
- Thème de référence 3.2 – Géologie du trait de côte
- Thème de référence 3.3 – Sédimentologie du fond marin
- Thème de référence 3.4 – Transport sédimentaire
- Thème de référence 3.5 – Habitat sédimentaire (benthique) faune

Groupe de thèmes de référence 4 - Hydrodynamique

- Thème de référence 4.3 – Courants littoraux
- Thème de référence 4.4 – Marées astronomiques

Groupe de thèmes de référence 5 – Couverture des sols

- Thème de référence 5.1 – Couverture des sols
- Thème de référence 5.2 – Modification de la couverture des sols

Groupe de thèmes de référence 6 – Démographie

- Thème de référence 6.1 - Démographie

Groupe de thèmes de référence 7 - Patrimoine

- Thème de référence 7.1 – Zones à haute valeur écologique
- Thème de référence 7.2 – Patrimoine culturel

Groupe de thèmes de référence 8 – Biens économiques

- Thème de référence 8.2 – Activités économiques enregistrées
- Thème de référence 8.3 – Concessions de pêche et d'aquaculture
- Thème de référence 8.4 – Concessions d'extraction minière

Groupe de thèmes de référence 9 – Défenses côtières

- Thème de référence 9.1 – Ouvrages de défenses côtières

6.3 Pertes de zones humides

Les modifications potentielles au sein des stocks de marais salés peuvent être évaluées en utilisant une méthode décrite par Nicholls et autres (1999). Cette méthode établit une comparaison entre le potentiel de sédimentation verticale et la montée du niveau de la mer, et tient compte de la possibilité de migration des marais salés induite par un recul planifié ou non planifié des défenses côtières naturelles. Pour la sédimentation verticale, la vitesse de la montée du niveau de la mer est normalisée par la hauteur des marées. Ceci est utilisé conjointement avec une valeur critique de montée du niveau de la mer pour déterminer la réponse des marais salés aux montées du niveau de la mer. Au-dessus de la vitesse critique, des pertes croissantes de marais salés sont supposées se produire. Cette valeur critique risque de baisser puisque l'accroissement du développement côtier aboutit à des mesures qui réduisent l'apport sédimentaire disponible pour la sédimentation verticale. Ces méthodes connaissent cependant des restrictions importantes. La méthode utilisée pour les pertes est notamment difficile à valider et à vérifier, et il existe une très grande incertitude concernant les valeurs critiques utilisées. En outre, la méthode ne spécifie pas les parties de marais salés perdues, et seule une perte proportionnelle est établie. Par conséquent, les pertes de marais salés s'interprètent le mieux comme des résultats indicatifs.

Scénarios de changement climatique

Pour réduire le nombre important de combinaisons de scénarios, les scénarios de changement climatique et les scénarios socioéconomiques peuvent être associés comme sur le tableau 2. Le "Scénario de changement climatique élevé" et le "Scénario socioéconomique d'entreprise régional" associent la pression climatique et socioéconomique la plus élevée et fournissent le cas extrême d'une société qui ne répond pas à la menace d'un changement climatique dans les 50 prochaines années. Le "Scénario de changement climatique bas" associé au "Scénario socioéconomique de durabilité global" présente la pression climatique et socioéconomique la plus basse, représentant une 'situation meilleure' (Nicholls et autres, 1999).

Tableau 2. Scénarios de changement climatique (1990 à 2050)

Scénario UKCIP98	Montée du niveau relatif de la mer (m)	Débits fluviaux de pointe
BAS	0,16	5 %
ÉLEVÉ	0,71	20 %

Ou en se basant sur les hypothèses de l'IPCC (www.ipcc.ch) :

- Montée du niveau moyen de la mer : + 55 cm (15 cm eustatique ; 40 cm anthropique)
- Augmentation de la hauteur des marées : + 30 cm (mthw + 15 cm ; mtlw -15 cm)
- Augmentation de la température de l'air : + 2,7 °C
- Précipitations : + 9,8 % (mars - mai + 22,1 % ; juin - août - 6,0 %)
- Vitesse du vent : + 3,8 % (septembre - novembre + 6,8 % ; juin - août - 4,3 %)
- CO₂ : +100 %

Processus de sédimentation

L'autre grande ligne de cette étude traite des relations entre les variations du niveau de la mer et les processus de sédimentation dans les marais salés. Ceci parce que l'évolution des marais salés dépend de l'équilibre variable qui existe entre les variations du niveau de la mer, le régime des marées, le régime des vents et des vagues, l'apport sédimentaire et la végétation de la zone humide (Reed, 1990 ; Allen et Pye, 1992). Cela suppose par conséquent que l'accélération de la montée actuelle du niveau de la mer induite par le réchauffement de la planète pourrait provoquer des pertes importantes des marais salés côtiers (Orson et autres, 1985 ; Stevenson et autres, 1986 ; Viles et Spencer, 1995). Les modèles d'équilibre sédimentaire présentés par Allen (1990) et French (1991, 1993, 1994) démontrent cependant qu'il n'existe pas de relation simple entre un ou plusieurs des paramètres mentionnés ci-dessus et le développement ou la disparition des marais salés. Ceci pourrait expliquer pourquoi des vitesses de sédimentation différentes ont été enregistrées dans des marais salés dans des conditions apparemment similaires. Une autre raison de ce manque apparent de relation est que l'accumulation nette de sédiments peut varier fortement au sein d'un seul marais par suite de la morphologie.

Un certain nombre de méthodes ont été utilisées pour évaluer les vitesses de sédimentation des marais salés. Beaucoup d'études sur les stocks de sédiments ont été basées sur l'utilisation d'horizons repères (par exemple Nielsen, 1935 ; Letzsch, 1983), ou de pieux repères (Harrison et Bloom, 1977). Des techniques de datage aux radio-isotopes ont été utilisées par exemple par Bartholdy et Madsen (1985). Ces dernières années, un certain nombre d'auteurs ont fait appel à un nombre varié de séparateurs pour développer une relation directe entre la dynamique et la sédimentation sur des échelles temporelles courtes. Le défaut de toutes ces méthodes est qu'elles fournissent peu d'informations spatiales. Un nivellement répété peut être utilisé pour obtenir des informations sur une échelle plus large.

Exemple : Etude de la Zone de Skallingen (DK)

Le marais de Skallingen (Danemark) est l'une des plus grandes zones de marais salés non protégés par une digue en Europe. Il couvre une surface de 31 km² et est situé dans la zone de marée de Grådyb, du côté (lagunaire) est de la péninsule de Skallingen (figure 15). Le marais salé de Skallingen est récent. Il a commencé à se développer au début du siècle dernier après la construction de digues entre les dunes, le long du littoral vers l'ouest, dans le but de prévenir les activités de débordement. La surface des marais est située à une hauteur d'environ 1 m au-dessus de DNN (Danish Ordnance Datum). Cela veut dire que le marais est submergé pendant 9 % de l'année. Des mesures systématiques des vitesses de sédimentation ont commencé en 1931 quand 5 relevés furent recouverts par une couche de 2 cm de sable.

Sédimentation/érosion à long terme issue du nivellement

Le développement du marais de 1931 à 1973 est représenté sur la figure 16a. La figure 16b montre le développement jusqu'en 1998 de façon plus détaillée. Le plus souvent, l'accumulation a eu lieu au sein de trois unités morphologiques : 1) dans les zones où le marais s'est développé vers l'est, 2) sur le marais, le plus souvent dans le marais intérieur et extérieur et de façon moins prononcée au niveau de l'estran intérieur et 3) sous la forme de levées le long des criques. Manifestement, aucune érosion nette ne se produit sur les surfaces continues des marais. Les valeurs négatives (érosion)

n'apparaissent que sous forme de pointes sur le profil. Elles sont associées à de nouvelles formations de criques, à des approfondissements ou à des mouvements latéraux de criques anciennes.

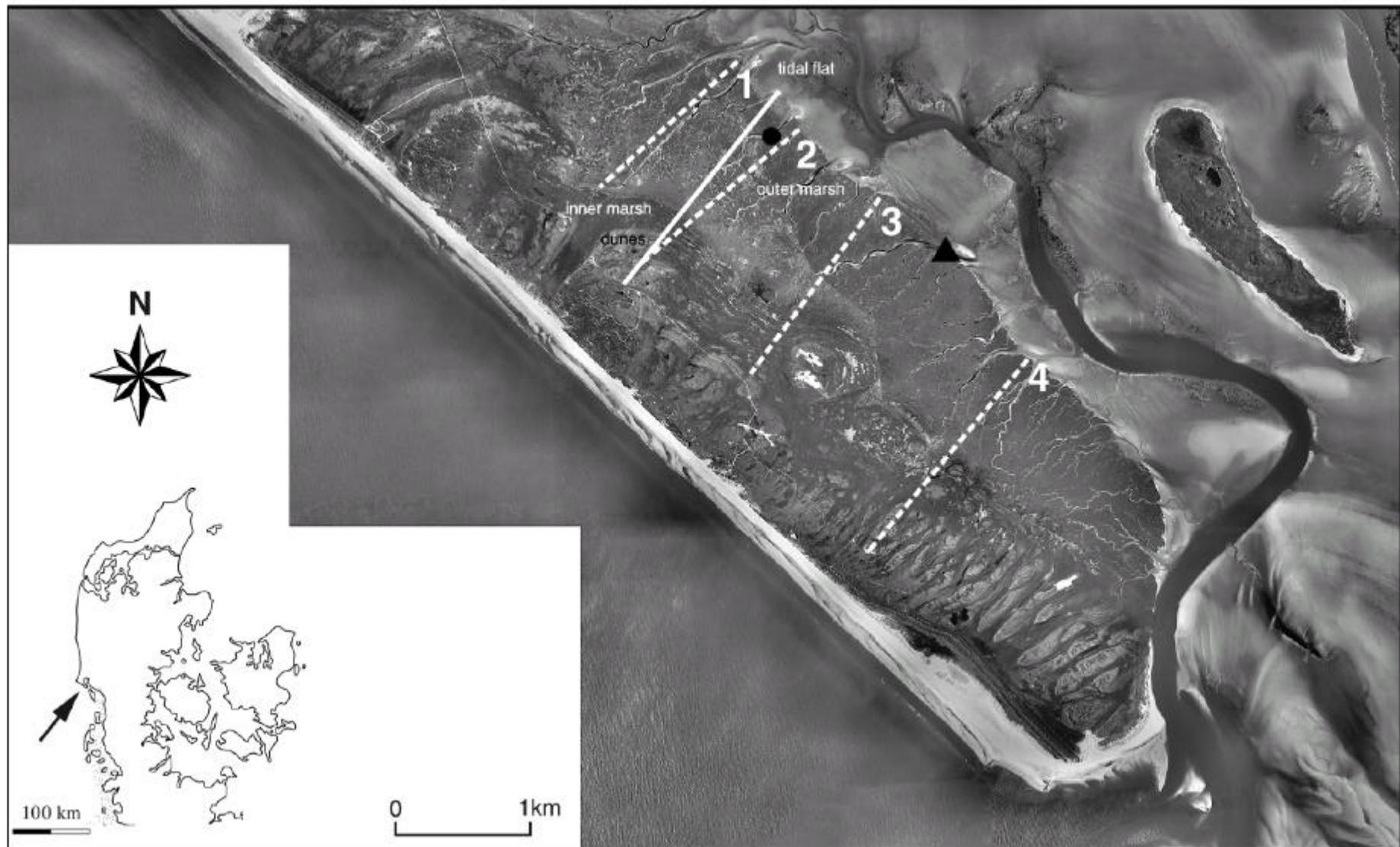


Figure 15 : Exemple de zone d'étude à Skallingen (DK) qui est l'un des plus grands marais non protégés par une digue en Europe. Notez les coupes transversales de nivellement et la localisation des instruments de mesure.

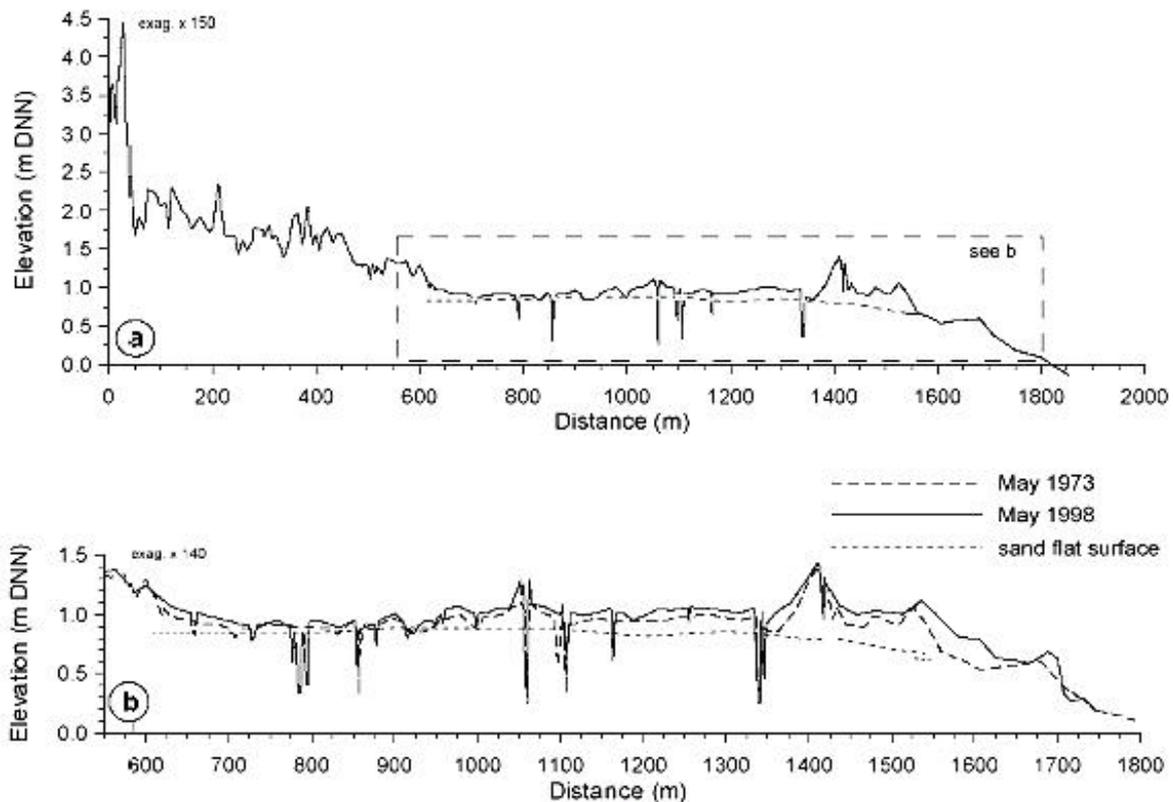


Figure 16 : a) Topographie du profil de 1973 et de la surface sablonneuse des marais prés-salés. b) Profil de la partie extérieure de la surface de 1998 comparé à des surfaces plus anciennes (pour la localisation voir la figure 16a).

6.4 Cartographie des pertes de zones humides

Pour la cartographie de la dynamique des zones humides, on peut utiliser une grille courante de 5 km x 5 km basée sur une base de données référencée géographiquement ordinaire dans un système d'information géographique ArcView (GIS). Ceci peut faciliter l'intégration d'analyses sectorielles, et la combinaison de sorties de modèles au sein d'un même système est essentielle pour l'échange, la visualisation et la présentation des résultats de recherche. (Figure 17).

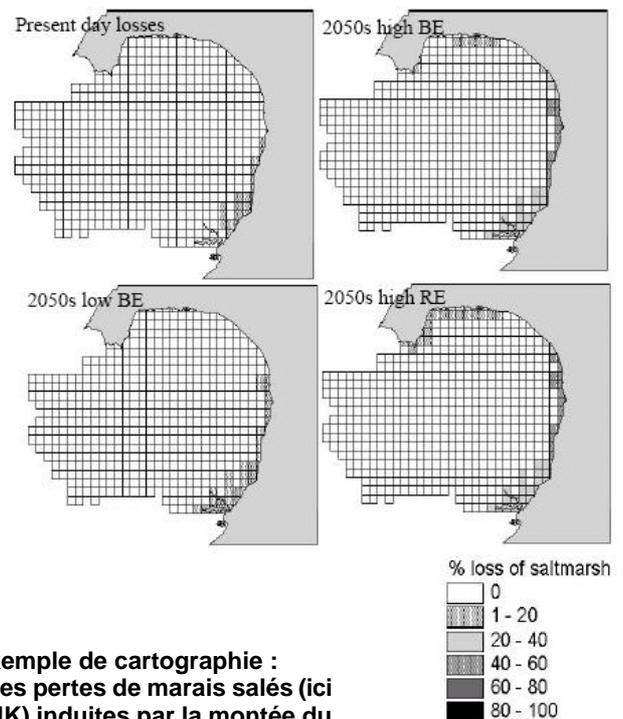


Figure 17 : Exemple de cartographie : Estimations des pertes de marais salés (ici East Anglia, UK) induites par la montée du niveau de la mer jusque dans les années 2050 en tant que pourcentage du stock de 1990.

7. RÉFÉRENCES

P. B. Williams, "Flood-Control vs Flood Management ," Civil Engineering , vol. 64, pp. 51-54, 1994.

Association of British Insurers "Inland Flooding Risk" (Sept 2000) – ABI
<http://www.insurance.org.uk>

Federal Emergency Management Agency (FEMA). (Novembre 1988). Basis of Erosion Assessment Procedures for Coastal Flood Insurance Studies. Washington, D.C, Etats-Unis.

Federal Emergency Management Agency (FEMA), Avril 2003. Guidelines and Specifications for Flood Hazard Mapping Partners. Annexe D : Guidance for coastal flooding analyses and mapping

Delft Hydraulics Laboratory. (1986). Wave Runup and Overtopping at Dunes During Extreme Storm Surge Report M1819, Part II (en néerlandais). Delft, Pays-Bas.

Bruun, P. 1962, 'Sea-level rise as a cause of shore erosion', Journal Waterways and Harbours Division, vol. 88(1-3), pp. 117-130.

SCOR Working Group 89, 1991. The response of beaches to sea-level changes: A review of predictive models. Journal of Coastal Research, 7, 895-921.

Dubois, R. N., Barrier beach erosion and rising sea level, Geology, 18, 1150-1152, 1990.

Regional Impacts of Climate Change (IPCC) mdash;North America, 1998, Disponible : [En ligne][1999, Janvier 27]

James G. Titus, ed., 1988. Sea level rise and wetland loss: an overview. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency. 186 pp. EPA 230-05-86-013.

Gilbert, J.T.E., Vellinga, P. et autres. 1990. Strategies for adaptation to Sea Level Rise. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Response Strategies Working Group (III).

Nicholls, R.J., Hoozemans, M.J., & Marchand, M. (1999) Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise: regional and global analyses. Global Environmental Change, 9, 69-87.