

Les Technologies pour l'Adaptation au Changement Climatique

– L'érosion et l'inondation des côtes –



Les Technologies pour l'Adaptation au Changement Climatique

– L'érosion et l'inondation des côtes –

Editeur

Xianli Zhu

Centre du PNUE à Risoe

Auteurs

Matthew M. Linham

Ecole d'ingénierie civile et de l'environnement, Université de Southampton

Robert J. Nicholls

Ecole d'ingénierie civile et de l'environnement et CentreTyndall pour la recherche sur le changement climatique, Université de Southampton

Novembre 2010



Le Centre du PNUE à Risoe pour l'Énergie, le Climat et le Développement Durable
Laboratoire National DTU à Risoe pour les Énergies Renouvelables
Boîte Postale 49
4000 Roskilde
Danemark
Téléphone +45 4677 5129
Fax +45 4632 1999
<http://www.uneprisoe.org/>
<http://tech-action.org/>

ISBN: 978-87-93130-43-2

Pré-production et impression:
Magnum Custom Publishing
New Delhi, Inde

Légende de la photo:

Photo de couverture — Vue sur l'extrémité sud de la piste cyclable de Bay Parkway s'effondrant dans Sheepshead Bay à Brooklyn, New-York. Photo: Jim Henderson. Wikimedia Commons

Photo de quatrième de couverture — Phénomène d'érosion côtière à Papaula Point, Maui County, Hawaii.
Photo: Forest et Kim Starr

Ce manuel peut être téléchargé sur <http://tech-action.org/>

Clause de non-responsabilité:

Ce guide vise à être un point de départ pour les gouvernements des pays en voie de développement, les responsables de plans de développement des zones côtières, ainsi que les parties prenantes impliquées dans l'évaluation des besoins en technologie et dans les plans d'action liés à l'adaptation à l'érosion et l'inondation côtières provoquées par le changement climatique. Les conclusions présentées dans cette publication appartiennent entièrement à leurs auteurs et ne sont aucunement attribuables au Fonds pour l'Environnement Mondial (FEM), au Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), ou au Centre du PNUE à Risoe.

Table des matières

Liste des figures et des tableaux	v
Abréviations	vii
Préface	ix
Résumé	xi
1. Introduction et Plan du livret	1
2. Le contexte	3
2.1 Le changement climatique dans les zones côtières	3
2.2 Les impacts physiques du changement climatique sur les zones côtières	4
2.3 Les effets socioéconomiques de la SLR	13
2.4 Résumé	13
3. Les stratégies, les options et pratiques de l'adaptation	14
3.1 Hiérarchiser les risques et les opportunités	17
3.2 Mettre en œuvre la réduction des risques	19
3.3 Evaluer l'efficacité des interventions	20
4. Les technologies d'adaptation et leurs applications	21
4.1 Les stratégies de protection	23
4.1.1 Le rechargement de plage	24
4.1.2 Les dunes de sable artificielles et la réhabilitation des dunes	35
4.1.3 Les brise-lames	41
4.1.4 Les digues	52
4.1.5 Les barrières anti-tempête et les barrages de retenue	60
4.1.6 La récupération territoriale	68
4.2 Les stratégies de compromis	76
4.2.1 La protection contre les crues	76
4.2.2 La restauration des zones humides	84

4.2.3	Les systèmes d'agriculture flottante	91
4.2.4	La cartographie des risques d'inondation	96
4.2.5	Les systèmes d'alerte aux inondations	102
4.3	Les stratégies de repli	113
4.3.1	Le recul stratégique	113
4.3.2	Les zones de retrait du littoral	122
4.4	Les exigences en matière de connaissances et de renforcement de capacités	129
4.4.1	Les connaissances requises pour les stratégies de protection	132
4.4.2	Les connaissances requises pour les stratégies de compromis	135
4.4.3	Les connaissances requises pour les stratégies de repli	137
4.4.4	Les sources d'informations	138
4.5	Les technologies de suivi	141
4.5.1	Les exigences en matière de suivi	141
4.5.2	Les technologies requises en matière de suivi	146
5.	Hiérarchisation des technologies et des pratiques	149
6.	Conclusion	152
7.	Références	154
	Annexe I: Glossaire	163
	Annexe II: Sources d'informations supplémentaires conseillées	166

Liste des figures et des tableaux

Liste des figures

Figure 2.1:	Modèle simplifié du recul du trait de côte vers l'intérieur des terres en cas de SLR (d'après la règle de Bruun)	5
Figure 2.2:	Le processus de compression côtière	6
Figure 2.3:	La SLR augmente les niveaux extrêmes de l'eau et la probabilité d'inondation si l'on n'applique pas de mesures d'adaptation	7
Figure 2.4 :	La récession du littoral causée par la SLR	10
Figure 3.1:	Illustration des interventions de protection, de compromis et de repli (planifié) face à la SLR	15
Figure 3.2:	Les liens entre les différentes typologies de stratégie d'adaptation et les technologies traitées dans ce guide	16
Figure 3.3:	Cadre conceptuel pour la mise en œuvre des mesures d'adaptation des côtes	17
Figure 4.1:	Données illustrant le volume de plage à Bournemouth Beach, Royaume Uni	26
Figure 4.2:	La méthode en « arc-en-ciel » de transfert des matériaux de reconstitution vers la plage	27
Figure 4.3:	Schéma illustrant la dérive littorale	28
Figure 4.4:	La plage de Bournemouth, Poole Bay, UK	32
Figure 4.5:	Dunes de sable sur la côte à Aberffraw, Anglesey, Royaume-Uni	35
Figure 4.6:	Illustration simplifiée de l'érosion causée par une tempête sur la dune	37
Figure 4.7:	Variation des formes de brise-lames	42
Figure 4.8:	Coupe transversale illustrant l'affouillement lié aux brise-lames	44
Figure 4.9:	Vue du dessus d'un brise-lames montrant les effets caractéristiques associés à la structure	45
Figure 4.10:	Le brise-lames de Bar Beach, Victoria Island, Lagos, Nigeria	51
Figure 4.11:	Coupe transversale d'une digue	52
Figure 4.12:	Processus d'affouillement au pied des structures inclinées	53
Figure 4.13:	Les besoins des digues en matière de surface	54
Figure 4.14:	Schéma du système de double digues utilisé dans la province de Nam Dinh, Vietnam	58
Figure 4.15:	Une coupe transversale des digues dans la province de Nam Dinh, Vietnam	59
Figure 4.16:	Barrage de retenue en construction sur la rivière de Jamuna, Bangladesh	61
Figure 4.17:	Schéma illustrant la manière dont les barrières anti-tempête et les barrages empêchent l'inondation côtière.	62
Figure 4.18:	Les principales méthodes de récupération territoriale	70
Figure 4.19:	Illustration du volume d'eau déplacé au niveau MHWS provoqué par la récupération	72
Figure 4.20:	Travaux passés et à venir de récupération territoriale à Singapour	75

Figure 4.21: Mesures de protection partielle contre les inondations pour une structure résidentielle	77
Figure 4.22: Mesures de protection totale contre l'inondation pour une structure résidentielle	78
Figure 4.23: Système d'agriculture flottante sur le lac Inle, Birmanie	91
Figure 4.24: Carte des risques d'inondation aux alentours de Cairns, Australie	97
Figure 4.25: Carte des risques d'inondations de Montego Bay, Jamaïque	101
Figure 4.26: Les composantes d'un système d'alerte aux inondations	103
Figure 4.27: Circuits d'informations du Programme de préparation aux cyclones (CPP) au Bangladesh	111
Figure 4.28: Le processus des plans de recul stratégique	114
Figure 4.29: Effet des marais salants sur les standards des digues et leurs coûts	115
Figure 4.30: Les différents types de zones de retrait	123
Figure 4.31: Les différents impacts à la suite d'une inondation trop forte pour les ouvrages de défense et les zones de recul	124
Figure 4.32: Les distances de sécurité mises en place à la Barbade	128
Figure 4.33: Les facteurs déterminant le niveau d'eau et la hauteur de crête des ouvrages de défense	133
Figure 4.34: Pentas des plages et différents types de déferlement des vagues	134

Liste des tableaux

Tableau 4.1: Les technologies d'adaptation complémentaires et concurrentes	21
Tableau 4.2: Degré actuel d'expérience dans la mise en application des technologies d'adaptation	22
Tableau 4.3: Les opérations de rechargement de Poole Bay entre 2005 et 2009	34
Tableau 4.4: Historique des mesures de contrôle de l'érosion, Bar Beach, Nigeria	50
Tableau 4.5: Aperçu des types de barrière anti-tempête et de leurs coûts	64
Tableau 4.6: Coûts de barrages réalisés au Bangladesh	65
Tableau 4.7: Coûts approximatifs des mesures de protection totale contre les inondations aux USA	80
Tableau 4.8: Les matériaux résistants à l'inondation recommandés par le NFIP	84
Tableau 4.9: Coûts de mise en œuvre d'un système d'agriculture flottante au Bangladesh	93
Tableau 4.10: Les composantes du système d'alerte aux inondations, de prévision et d'intervention d'urgence	104
Tableau 4.11: Dissémination du système de message d'alertes du centre d'alerte aux tempêtes du Bangladesh (SWC)	112
Tableau 4.12: Connaissances essentielles et secondaires pour la mise en œuvre des 13 technologies d'adaptation	130
Tableau 4.13: Sources d'informations possibles pour les connaissances requises exposées dans le tableau 4.12	138
Tableau 4.14: Les mesures de surveillance des 13 technologies d'adaptation	142
Tableau 4.15: Techniques et outils spécifiques utilisés pour le suivi des différents plans d'adaptation	146
Tableau 5.1: Critères potentiellement importants pour déterminer l'efficacité de l'adaptation aux inondations et à l'érosion des côtes	151

Abréviations

AR4	Quatrième Rapport d'Evaluation du GIEC (publié en 2007) IPCC 4th Assessment Report
BIS	Plan d'Amélioration des Plages Beach Improvement System
BMD	Service Météorologique du Bangladesh Bangladesh Meteorological Department
ACB	Analyse Coût-Bénéfices
CDMP	Projet d'Atténuation des Effets des Catastrophes dans les Caraïbes Caribbean Disaster Mitigation Project
CEA	Analyse de Rentabilité (Coût-Efficacité) Cost-Effectiveness Analysis
CIDA	Agence Canadienne pour le Développement International Canadian International Development Agency
CLIFFPLAN	Modèle de Simulation de l'Erosion des Falaises (Meadowcroft et al., 1999)
CPP	Programme de Préparation aux Cyclones (Programme national du Bangladesh) Cyclone Preparedness Program
DGPS	Système de Localisation Mondial Différentiel Differential Global Positioning System
FEMA	Agence Fédérale de Gestion des Situations d'Urgence US Federal Emergency Management Association
SIG	Système d'Information Géographique
GPS	Système de Localisation Mondial Differential Global Positioning System
HAT	Plus Haute Marée Astronomique Highest Astronomical Tide
GIZC	Gestion Intégrée des Zones Côtières
GIEC	Groupe d'Experts International sur l'Evolution du Climat
LiDAR	Détection et Télémétrie par Ondes Lumineuses (système de sondage) Light Detection and Ranging

AMC	Analyse Multicritère
MHW	Moyenne des Hautes Eaux Mean High Water
MHWM	Ligne Moyenne des Hautes Eaux Mean High Water Mark
MHWS	Pleine Mer Moyenne de Vive-eau Mean High Water Spring Tide
MLW	Ligne Moyenne des Basses Eaux Mean Low Water
MLWS	Basse Mer Moyenne de Vive-eau Mean Low Water Spring Tide
PANA	Programmes d'Action Nationaux d'Adaptation (une approche pour identifier les activités prioritaires pour l'adaptation au changement climatique dans les pays les moins développés, rapports émis pour le CCNUCC)
CNC	Comité National de Coordination (organisation du Bangladesh)
NFIP	Programme National d'Assurance contre les Inondations (de la FEMA) National Flood Insurance Programme
ONG	Organisation Non-Gouvernementale
OAS	Organisation des Etats Américains (une organisation internationale qui comprend les 35 Etats indépendants des Amériques) Organization of American States
RSLR	Elévation Relative du Niveau de la Mer Relative Sea Level Rise
SCAPE	Erosion des Falaises et des Plateformes (modèle de simulation numérique de l'érosion des falaises; Walkden & Hall, 2005) Soft Cliff and Platform Erosion
SLR	Elévation du Niveau de la Mer Sea Level Rise

Préface

Dans bien des endroits du monde, les zones côtières sont des centres économiques importants densément peuplés. L'élévation du niveau de la mer ainsi que la montée en puissance des tempêtes, des vagues et des ondes présentent une sérieuse menace pour toutes les personnes vivant dans ces régions. De nombreux pays en voie de développement ont, par conséquent, identifié les zones côtières comme un axe prioritaire de l'adaptation au changement climatique. Cependant, ces pays ont souvent besoin d'assistance pour identifier les différentes options d'adaptation, pour formuler les stratégies et les plans liés, et pour mettre en œuvre les mesures permettant de réduire le risque et les pertes réelles engendrés par les répercussions du changement climatique.

Cette publication vise à soutenir une planification efficace de l'adaptation. Treize technologies y sont traitées qui réduisent les impacts de l'érosion et de l'inondation des côtes causées par le changement climatique. En plus de proposer une description de chacune, ce guide évalue les avantages et les inconvénients, estime les coûts et les bénéfices, présente les capacités institutionnelles et organisationnelles nécessaires, et fournit enfin des exemples détaillés illustrant la manière dont la technologie peut être mise en application. Il est à espérer que cette approche exhaustive fera de ce livret une référence pour les décideurs politiques et les responsables de projets liés aux zones côtières. Aisé à lire et offrant un aperçu complet du sujet, il peut servir de source de référence à toute personne intéressée par cette problématique.

Ce livret, ou guide, a été conjointement rédigé par Matthew M. Linham et Robert J. Nicholls de l'Université de Southampton, au Royaume-Uni. Le Professeur Nicholls est l'un des plus grands experts internationaux sur les impacts du changement climatique sur les côtes et le principe d'adaptation, et tout particulièrement sur l'élévation du niveau de la mer. Il est également l'auteur principal de chapitres sur les zones côtières au sein de plusieurs rapports du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC). La réalisation de ce livret a été coordonnée par Dr. Xianli Zhu du Centre PNUE à Risoe sur l'énergie, le climat et le développement durable (URC). D'importantes observations et suggestions ont par ailleurs été faites par le Professeur John Hay de l'Université d'Ibaraki, Dr. Leonard Nurse de l'Université de West Indies, Marten Hillen de Royal Haskoning, Dr. Travis Mason du Channel Coastal Observatory, Sara Traerup de l'URC, et Pia Zevallos de Libelula. Leur contribution à cet ouvrage a été précieuse et est grandement appréciée. Nous les remercions vivement de l'aide précieuse qu'ils ont apportée.

Ce livret fait partie d'une série produite par le CPR dans le cadre du projet sur l'évaluation des besoins technologiques (EBT) (<http://tech-action.org/>). Le PNUE et le CPR mènent à bien le projet TNA dans 36 pays en voie de développement. Le financement de ce projet est assuré par le Fonds pour l'environnement mondial (FEM).

Jyoti Prasad Painuly
Chef de projet
Centre PNUE à Risoe

Mark Radka
Coordinateur de Programme sur l'Energie
PNUE DTIE

Novembre 2010

Résumé

Ce livret vise à être un outil pratique à disposition des gestionnaires des zones côtières dans les pays en développement. L'objectif est de fournir des orientations de bonnes pratiques et d'assister ces personnes dans l'évaluation de leurs nouveaux besoins d'adaptation, ainsi que de les aider à préparer des plans d'action pour faire face aux répercussions du changement climatique sur les zones côtières.

Ce livret présente d'abord les impacts physiques et sociétaux majeurs du changement climatique sur les littoraux. Il examine ensuite le processus d'adaptation à l'érosion et l'inondation des côtes là où les risques peuvent avoir des répercussions majeures. Cette étude se concentre sur les endroits où des technologies d'adaptation ont été mises en œuvre pour répondre à ces effets de manière efficace. Treize de ces technologies sont présentées dans ce guide, illustrant les trois axes stratégiques d'adaptation: protéger, faire des compromis ou se replier (de manière planifiée). Si cette liste n'est pas exhaustive, les technologies d'adaptation présentées ici restent parmi les plus utilisées/prises en considération aujourd'hui dans les zones côtières. Toutes permettent une adaptation efficace au changement climatique et leur mise en application devrait se généraliser dans le futur par le fait de l'aggravation de phénomènes tels que l'élévation du niveau de la mer.

Pour chaque technologie, les éléments suivants sont abordés: (1) une définition et une description de la technologie; (2) les avantages et les inconvénients techniques; (3) les capacités institutionnelles et organisationnelles nécessaires; (4) les coûts potentiels et les facteurs favorisant la mise en œuvre; (5) les facteurs entravant la mise en œuvre ; et une étude de cas pertinente. Les auteurs ont tenté d'utiliser autant que possible des exemples provenant de pays en voie de développement mais cela n'a pas toujours été possible, les projets y étant moins nombreux et moins bien documentés, et certaines technologies d'adaptation n'y étant quasiment pas mises en pratique. Les niveaux de connaissances et de capacités requis ainsi que les technologies de suivi sont ensuite décrits et comparés pour les treize technologies. Enfin, des sources plus détaillées sont proposées.

A chaque technologie sont associés des avantages et des inconvénients très divers. Il convient donc de sélectionner les mesures au cas par cas en prenant en compte des conditions locales. Il est largement admis que, d'une zone à l'autre, les options d'adaptation les plus efficaces varient. Dans certains cas, les technologies peuvent se compléter ; le cas échéant, il convient d'envisager l'élaboration d'une série de mesures adéquates.

Par ailleurs, trois cadres d'aide à la prise de décision sont brièvement présentés. Ces techniques aident les responsables de la gestion des côtes à comparer et sélectionner les options d'adaptation possibles.

Un niveau de connaissances approprié est un prérequis indispensable pour une adaptation réussie. Plus on en sait sur le système côtier, plus les mesures employées peuvent être ciblées et efficaces. Il est important de souligner que les communautés manquent souvent d'informations pour déterminer si leur stratégie d'adaptation est adéquate et quels formats et normes choisir. L'accès à une assistance technique et à des conseils de la part d'organisations ayant une base scientifique et technologique solide permettrait

donc une meilleure adaptation au niveau des côtes en général, tout en encourageant un usage pertinent des technologies individuelles.

Enfin, ce livret rappelle aux utilisateurs que l'adaptation ne doit pas être perçue comme le simple fait d'appliquer la bonne technologie ou pratique, mais qu'elle devrait être comprise comme un processus de long terme dans lequel les risques et les opportunités sont priorisés, les mesures de réduction de risques mises en œuvre et les résultats évalués. Le rendement des technologies utilisées doit ainsi être suivi et évalué avec attention, et les enseignements tirés doivent être pris en compte dans le cycle du projet afin d'améliorer l'entretien des structures et les interventions futures.

1. Introduction et Plan du livret

Ce livret a pour but d'aider les pays en voie de développement à s'adapter au changement climatique dans les zones côtières en leur fournissant des modèles de bonne pratique. Cette publication a été réalisée pour soutenir ces pays dans l'identification des besoins en matériel, techniques, connaissances pratiques et compétences qui leur seront nécessaires pour être moins vulnérables aux répercussions négatives du changement climatique sur les littoraux.

L'utilisation de la stratégie d'adaptation gagne en importance, parallèlement à l'apparition de plus en plus importante d'impacts réels et potentiels du changement climatique tels qu'une érosion plus importante des côtes, ainsi que des inondations plus fréquentes, plus étendues et plus profondes. Malgré une atténuation significative de ces effets, l'inertie du processus du changement climatique implique qu'une stratégie d'adaptation reste essentielle sur le long terme dans les zones côtières, particulièrement en raison de l'élévation du niveau de la mer (SLR, acronyme anglais) (Nicholls et al., 2007a). De plus, l'accroissement de la population et le développement économique avancé de ces espaces en font une nécessité.

Ce guide fournit des informations sur 13 technologies d'adaptation parmi les plus largement utilisées et discutées aujourd'hui pour lutter contre l'érosion et l'inondation des côtes. Ces technologies dites « d'adaptation » désignent le vaste ensemble de processus englobant le savoir-faire, les données d'expérience et le matériel utilisés pour réduire les conséquences négatives des changements affectant les côtes et en exploiter les avantages. Il est à noter que les technologies présentées ici se concentrent sur le changement climatique comme moteur de ces transformations. Ces méthodes se divisent entre celles impliquant (1) des biens d'équipement comme les digues et les brise-lames ; et (2) celles axées sur des activités concernant l'information, le renforcement de capacités, les dispositifs institutionnels et le développement de politique et de stratégie¹.

Il est important de souligner que l'adaptation représente plus que la simple mise en œuvre d'une technologie spécifique. Par conséquent, ce livret s'attache à prendre en considération le processus plus large associé à l'application des technologies présentées, y compris la collecte d'informations et leur diffusion, les activités de sensibilisation, la conception, la mise en œuvre et le suivi. Avec cette approche, il est à espérer que les utilisateurs de ce livret auront une meilleure base d'informations pour sélectionner les mesures les plus appropriées à leur situation et pour les mettre ensuite en pratique dans le cadre de la stratégie de gestion intégrée des zones côtières (GIZC), augmentant ainsi la probabilité de succès et d'efficacité du projet.

L'une des raisons qui a mené à la rédaction de ce livret est l'expérience limitée des pays en voie de développement en matière d'adaptation au changement climatique. Si les exemples d'application présentés ici proviennent autant que possible de ces pays, la plupart des informations rassemblées pour cette publication proviennent de pays développés. C'est en effet là-bas que sont mis en œuvre la majorité

¹ Elles sont parfois désignées par les termes de technologies « dures » et « souples », mais cette utilisation est limitée dans ce livret afin d'éviter des confusions avec les termes similaires en anglais dans le domaine de l'ingénierie.

des projets d'adaptation. Toutefois, toutes les applications présentées dans ce livret ont été choisies pour être également pertinentes pour les pays en développement.

Ce guide est destiné à un public composé d'un large éventail de parties prenantes incluant les institutions gouvernementales, les organisations non-gouvernementales, le secteur privé et les communautés du littoral. Les auteurs entendent en faire une source d'informations essentielle et utile en matière d'adaptation au changement climatique dans les zones côtières pour cet ensemble varié d'acteurs.

Le plan du livret est organisé comme suit.

Le chapitre 2 s'attache à résumer les principaux impacts physiques et sociétaux du changement climatique sur les zones côtières tels que démontrés par de précédentes études, notamment le quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC). Il existe, en effet, toute une série de répercussions et d'effets associés liés au changement climatique dans les zones côtières.

Le chapitre 3 se concentre sur le processus d'adaptation et sur les typologies des différentes stratégies associées, et en particulier la distinction utilisée dans ce livret entre trois axes stratégiques : protéger, faire des compromis et se replier (de manière planifiée) (cf. IPCC CZMS, 1990). De nombreuses études ont souligné l'importance de considérer l'adaptation comme un processus en plusieurs étapes, la mise en application de la technologie n'étant que l'une d'entre elles; le succès ou l'échec de l'intervention sélectionnée dépend fortement du processus dans son ensemble.

Dans le chapitre 4, treize technologies d'adaptation aux risques d'érosion et d'inondation des côtes sont décrites. Elles sont regroupées selon trois stratégies : (1) protéger; (2) faire des compromis; (3) se replier. Pour chaque technologie, plusieurs aspects sont présentés tels que les détails spécifiques à chacune, les avantages et les inconvénients, les connaissances et les capacités requises, les coûts approximatifs ainsi que les facteurs favorisant et entravant la mise en œuvre. Des études de cas pertinentes dans les pays en développement sont également proposées, complétées si besoin par d'autres expériences provenant des pays développés. De plus, les connaissances et capacités nécessaires ainsi que les méthodes de suivi sont présentées et comparées entre les 13 technologies d'adaptation. Il convient de noter que les problématiques détaillées relatives à la conception des structures ne sont pas traitées dans ce guide.

Le chapitre 5 traite brièvement de la problématique relative à l'analyse décisionnelle, c'est-à-dire la manière dont on peut identifier la technologie la plus adéquate pour une situation spécifique. Cela comprend les discussions portant sur les cadres pertinents de prise de décision, notamment l'analyse coût-bénéfice, l'analyse de rentabilité et l'analyse multicritère.

Enfin, **le chapitre 6** offre une synthèse des conclusions et des recommandations principales concernant l'utilisation des technologies d'adaptation dans les zones côtières.

Un glossaire des termes techniques se trouve à la fin du document, accompagné de sources d'informations supplémentaires destinées aux lecteurs qui souhaiteraient explorer davantage les technologies d'adaptation individuelles ou étudier plus en détail les plus larges problématiques abordées dans ce livret. Les sources recommandées comprennent des textes généraux relatifs à l'adaptation et à l'ingénierie côtière, des conseils pertinents à destination des pays en développement ainsi que des textes spécifiques concernant les technologies présentées dans ce livret.

2. Le contexte

En 2007, le Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) a publié son quatrième rapport d'évaluation (AR4, acronyme anglais). Celui-ci fournit l'un des résumés les plus détaillés à ce jour sur les causes profondes et les effets du changement climatique. Le rapport évalue notamment les impacts sur plusieurs zones et régions spécifiques, y compris les littoraux.

Les principaux impacts physiques du changement climatique sur le système côtier sont présentés dans ce chapitre d'après Bindoff et al. (2007). Il convient de remarquer qu'en raison de la diversité et les variations que l'on trouve dans ces systèmes naturels, les effets décrits ici et les réponses qui y sont apportées ne seront pas uniformes partout dans le monde (Nicholls & Cazenave, 2010). Ceci est également dû aux différences locales et régionales de l'élévation relative du niveau de la mer (RSLR).

2.1 Le changement climatique dans les zones côtières

Les températures de surface de la mer (SST, acronyme anglais) sont en augmentation globale en raison de l'énergie thermique plus élevée absorbée par la surface de la Terre. Des observations au niveau mondial sur le contenu de la chaleur des océans montrent d'importantes variabilités annuelle et décennale qui provoquent en se superposant une augmentation sur le plus long terme.

Le niveau moyen de la mer (MSL, acronyme anglais) est également en hausse au niveau mondial. Ceci est dû à deux facteurs: (1) la dilatation thermique de l'eau de mer causée par les augmentations de SST; et (2) l'eau issue de la fonte des glaciers qui rejoint les océans. Cependant, la tendance spatiale est fortement irrégulière en raison des variations océaniques régionales comme le réchauffement. Dans certaines régions, il arrivera ainsi que l'élévation du niveau de la mer (SLR) dépasse la moyenne, et vice-versa.

Même si le MSL reste important, le niveau local ou relatif de la mer¹ est le facteur dominant lorsqu'il s'agit de déterminer les effets sur la côte. Contrairement à la SLR moyenne au niveau mondial, la RSLR explique les variations régionales du niveau marin et les mouvements verticaux localisés de la terre par rapport à la surface de l'océan, tel que l'affaissement des deltas (Syvitski et al., 2009). La RSLR influence à la fois le niveau moyen et extrême de la mer.

Le changement climatique pourrait aussi être à l'origine de vagues plus hautes et de tempêtes plus fortes, bien qu'il reste beaucoup d'incertitudes à ce sujet. En particulier, les tempêtes tropicales pourraient devenir plus intenses mais avoir lieu moins souvent.

Enfin, il a été constaté que le contenu en carbone des océans avait augmenté. Ceci s'explique par l'absorption du dioxyde de carbone relâché dans l'atmosphère lors de la combustion des carburants fossiles. Cela a pour conséquence une baisse du pH de la surface de l'océan qui est susceptible de se poursuivre dans le futur².

1 Niveau de la mer mesuré à l'aide d'un marégraphe par rapport au sol au-dessus duquel elle est située.

2 On appelle cela « l'acidification de l'océan » même si l'eau reste alcaline.

2.2 Les impacts physiques du changement climatique sur les zones côtières

Les répercussions probables de ces changements physiques sur les zones côtières sont décrites par Nicholls et al. (2007a). Un certain nombre d'entre elles sont apparentes et sont présentées ci-après.

Tandis que certaines concerneront tous les types de côtes, certains types spécifiques répondront de manière différente au changement climatique. Il convient donc d'analyser ces derniers séparément. Les effets s'appliquant en général seront présentés en premier, suivis de ceux concernant des types spécifiques de littoral.

Les impacts s'appliquant à tous types de côtes

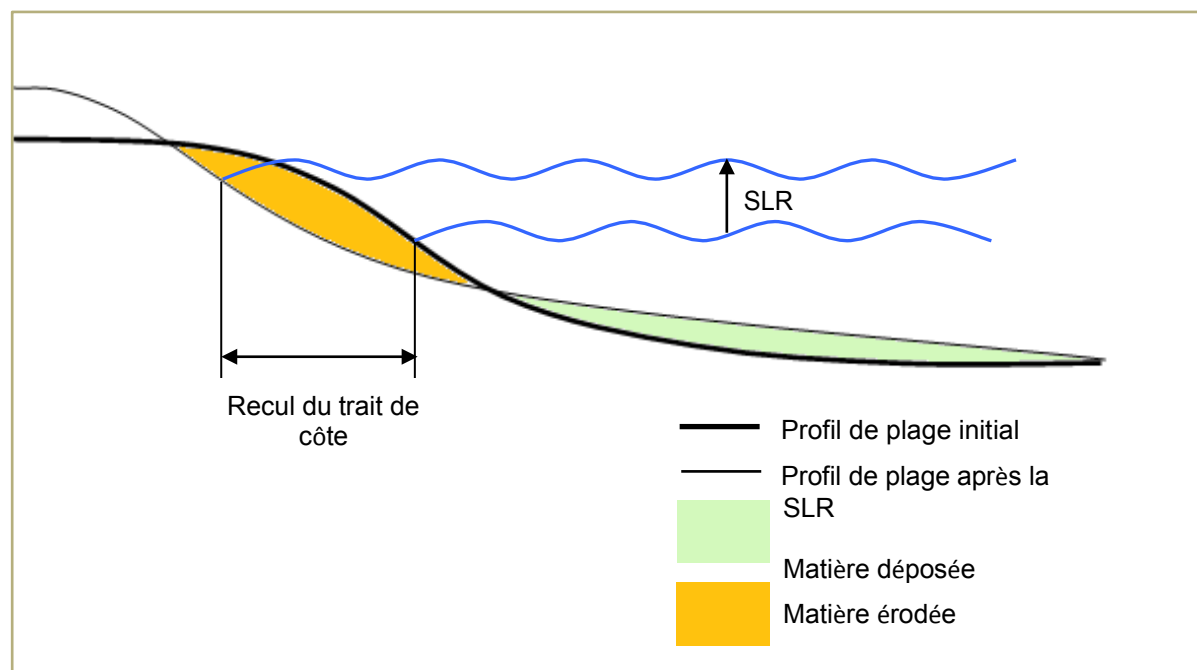
La SLR contribue à la hausse des taux d'érosion des côtes

L'érosion est le mouvement physique des sédiments qui se détachent du rivage sous l'effet des vagues et de l'action du courant. La SLR exacerbe l'érosion en facilitant le transport des sédiments vers le large.

Le modèle le plus connu de ce processus, et le plus largement appliqué, est proposé par Bruun (1962) et est illustré sur la figure 2.1. La « Règle de Bruun » suggère que le recul du trait de côte est de l'ordre de 50 à 200 fois aussi élevé que la hausse du niveau relatif de la mer et qu'il est causé par le besoin de la plage de maintenir un profil d'équilibre.³ Pour ce faire, en cas de SLR les sédiments sont retirés de la plage causant l'érosion, puis déposés par la suite sur l'avant-plage afin que le niveau gagne autant en hauteur que la SLR. Lorsque le niveau de l'eau augmente, le profil de la plage s'adapte donc en migrant vers la terre et en s'élevant, en prélevant les sédiments de la côte qui s'accumulent ensuite sur l'avant-plage. Ainsi, le volume de matière érodée et déposée reste équivalent.

3 Les profils de plage sont des lignes de section perpendiculaires au littoral (CIRIA, 1996). Ce terme désigne essentiellement la forme de la coupe transversale de la plage comprenant la zone située au-dessus de la ligne de flottaison et la partie sous-marine de la côte. Un profil d'équilibre est la forme idéale qu'une plage va prendre si les conditions, comme le régime des vagues par exemple, restent constantes sur un temps suffisamment long. En réalité, les vagues comme d'autres facteurs évoluent constamment, transformant également la forme d'équilibre. Le concept reste cependant pertinent lorsqu'il s'agit de s'intéresser aux modifications du profil, y compris pour l'évaluation des effets de SLR.

Figure 2.1: Modèle simplifié du recul du trait de côte vers l'intérieur des terres en cas de SLR (d'après la règle de Bruun)



Source: Adapté de French, 2001

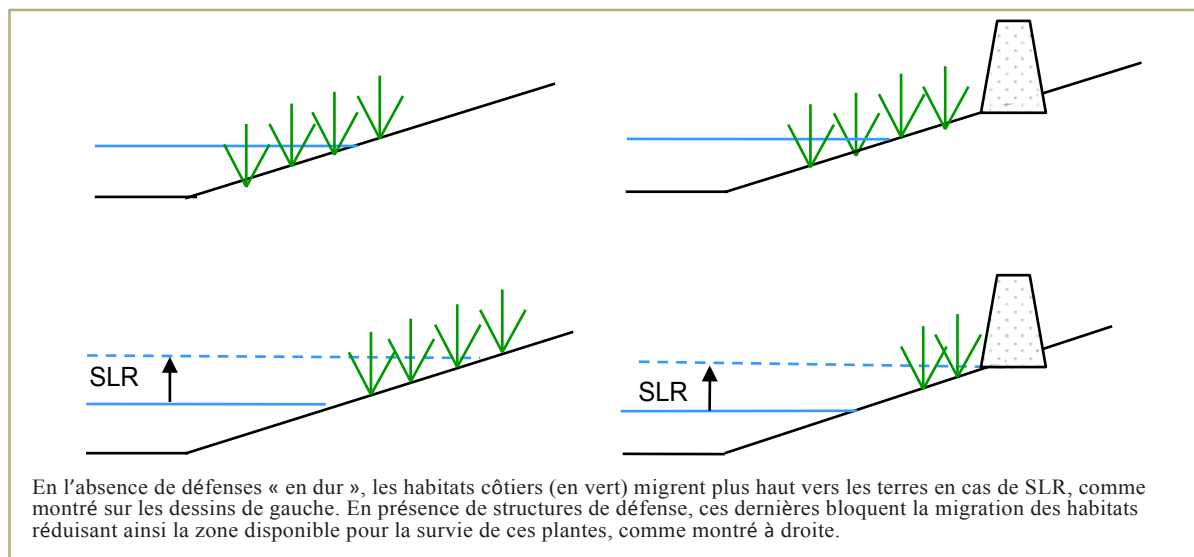
Cependant, il convient de noter que la règle de Bruun simplifie largement le comportement de la zone côtière. En réalité, il existe plusieurs processus en plus de l'ajustement du profil à la SLR qui auront une influence sur la forme et la position du profil de la plage. Idéalement, il est ainsi nécessaire d'obtenir un bilan sédimentaire⁴ complet pour prédire la réaction de la côte à la SLR de manière complète (voir par exemple: Stive et al. 2009).

La migration naturelle de l'habitat côtier vers les terres en cas de SLR est empêchée par les ouvrages de défense « en dur »

Le phénomène de « compression côtière » est une conséquence courante du recul du trait de côtes qui affecte les zones situées entre la mer dont le niveau monte et les ouvrages de défense « en dur » ou défenses dures. Le niveau de la mer étant en hausse, il est attendu que les habitats du littoral migrent vers les terres afin de s'adapter aux évolutions de leur environnement. Cependant, en présence de structures de défense, ces habitats ne peuvent pas se déplacer et sont, de fait, coincés entre le niveau de la mer qui monte et ces barrières rigides. La zone située en face de la défense est, par conséquent, rendue significativement plus étroite, ce qui peut conduire à des réductions drastiques de la superficie des marais salants et autres habitats typiques de la zone intertidale. Ce phénomène est montré à la figure 2.2.

⁴ L'addition des gains et des pertes en sédiments dans un espace défini et sur une période déterminée (Kana, 1995).

Figure 2.2: Le processus de compression côtière



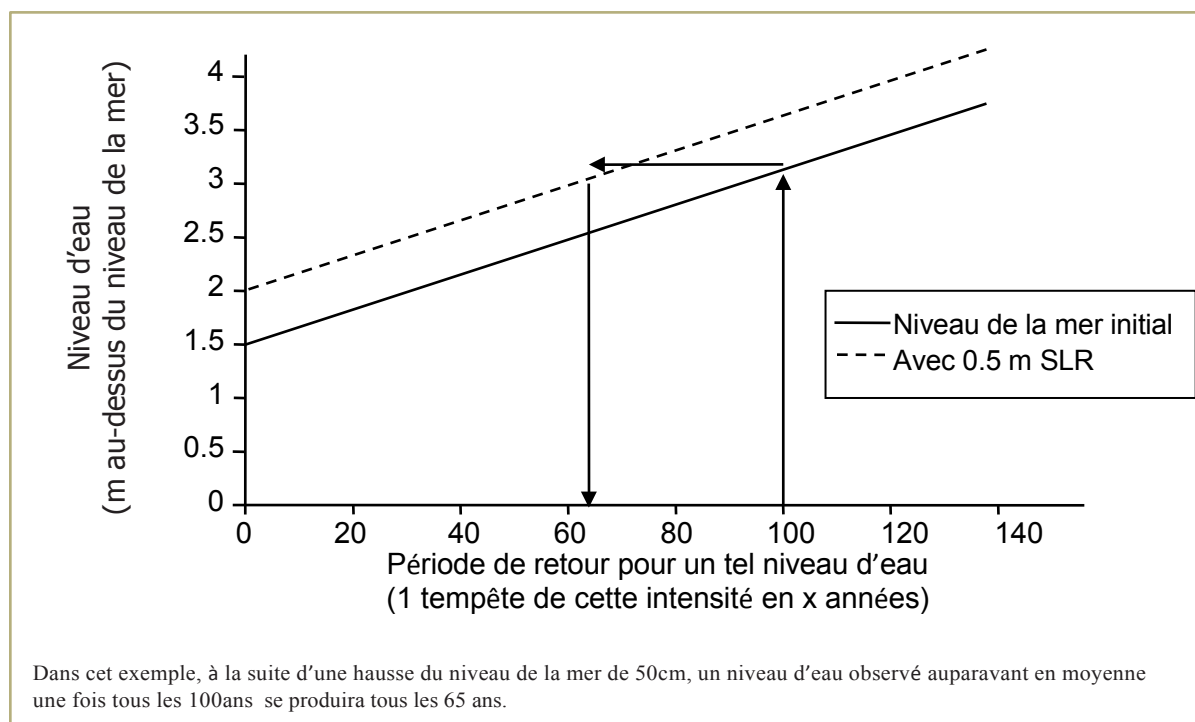
Les impacts sur une partie du système côtier peuvent provoquer des effets secondaires ailleurs

Les impacts négatifs du changement climatique sur une partie du système côtier sont susceptibles de conduire à des phénomènes d'érosion ou d'inondation sur d'autres parties de la côte. Par exemple, il arrive souvent que les îles barrière sableuses réduisent la hauteur des vagues dans les baies voisines. L'érosion, en entraînant notamment la disparition de ces îles, peut ainsi provoquer une augmentation de la taille des vagues alentours causant ensuite des taux d'érosion plus élevés sur le littoral de la baie concernée.

La SLR augmente la probabilité et l'importance des inondations

La SLR accentue la probabilité d'inondation dans les zones côtières, à moins que l'on soit en mesure d'améliorer les mesures de protection. Ceci peut être illustré à travers l'utilisation d'une « courbe de probabilité mesurant la fréquence des inondations » montrée à la figure 2.3. Le plus grand risque d'inondation est lié à des niveaux plus élevés d'eaux pluviales qui ont la capacité de provoquer de plus grands dégâts et d'être une menace pour les réserves en eau potable, et potentiellement pour les vies humaines.

Figure 2.3: La SLR augmente les niveaux extrêmes de l'eau et la probabilité d'inondation si l'on n'applique pas de mesures d'adaptation



L'apparition plus fréquente des niveaux d'eau extrêmes risque d'être accentuée par la dégradation des systèmes côtiers, tels que les marais et les dunes qui servent actuellement de défenses naturelles du littoral. De nombreuses communautés en dépendent lors de phénomènes climatiques extrêmes.

La SLR et le risque de tempêtes plus fréquentes augmentent le risque d'inondation malgré la présence de défenses.

Les endroits où des défenses côtières artificielles ont été construites restent exposés aux phénomènes climatiques extrêmes lorsque les niveaux d'eau dépassent la hauteur de ces structures ou qu'elles ne sont pas suffisamment efficaces ; on appelle cela le risque résiduel. Ce risque va devenir de plus en plus probable avec la montée du niveau de la mer. De plus, des tempêtes plus fortes peuvent aussi causer plus de dégâts aux ouvrages de protection et autres structures sur la côte (Nicholls et al. 2007a). Le problème d'inondation des côtes risque donc de s'aggraver avec la SLR, à moins qu'un processus d'adaptation soit mis en place pour répondre à ces changements.

Les plages, les côtes rocheuses et les falaises

Les plages sont des formations composées de matériau granulaire non cohésif et de résidus, tels que le sable, les graviers ou les galets. Elles se trouvent à l'interface entre la terre et la mer. Ces formations apparaissent le plus souvent dans des zones soumises à l'action des vagues. Les côtes rocheuses comprennent les littoraux composés de matériaux allant des roches dures, tels que le granite ou le basalte, à des matériaux relativement plus tendres et plus érodables (Finkl, 2004). Les falaises se forment

progressivement au cours d'une longue période à travers les processus d'érosion ou par un phénomène de soulèvement. Elles apparaissent sous des formes très variées et sont, par définition, érodables. Néanmoins, les taux de recul varient largement avec des retraits sur le long terme d'1 à 2 m par an pour les falaises à pierre tendre, si l'on ne tient pas compte des écroulements épisodiques.

Les impacts du changement climatique et de la SLR sur les plages, les côtes rocheuses et les falaises sont résumés ci-après. Ceux-ci s'ajoutent aux effets applicables à tous les types de côtes.

Le retrait des falaises à roche tendre est aggravé sous l'effet de la SLR et des facteurs climatiques.

Les falaises sont plus ou moins sujettes à l'érosion selon les éléments qui les composent. Les falaises à roche dure sont relativement résistantes à l'érosion tandis que celles à roche plus tendre sont susceptibles de reculer plus rapidement dans le futur, en raison de l'érosion de leurs bases causée par la SLR (Walkden & Dickson, 2008). L'éboulement des falaises peut aussi être amplifié par une augmentation des précipitations et les niveaux plus élevés des nappes souterraines. Le retrait des falaises à roche tendre est susceptible d'être épisodique et dépend de la SLR ainsi que des modifications des conditions de vagues et de l'approvisionnement en sédiment.

Les préférences touristiques peuvent évoluer du fait des effets directs et indirects du changement climatique.

Le changement climatique pourrait affecter de façon majeure le tourisme côtier qui dépend fortement « du soleil, de la mer et du sable ». La hausse des températures de l'air comme de la mer pourraient par exemple rendre plus attractives des destinations qui l'étaient moins auparavant, tandis que les stations touristiques actuelles deviendraient « trop chaudes » pour les touristes. De plus, les changements provoqués par la hausse du niveau de la mer et l'érosion qui en résulte pourraient faire baisser la valeur touristique d'une région.

Les deltas

On trouve les deltas là où les larges rivières charrient de grandes quantités de sédiments vers la mer. Un delta est formé par le dépôt continu de sédiments par la rivière et le remaniement qui s'ensuit sous l'action des processus côtiers tels que les vagues, les courants et les marées. La population vivant sur les deltas est estimée à 500 millions de personnes dans le monde, en raison de la présence d'importants services environnementaux (Syvitski et al., 2009).

L'affaissement des terres contribue à une SLR plus rapide dans les deltas

Le taux d'élévation du niveau de la mer peut largement dépasser la moyenne globale dans les zones très peuplées des deltas (Ericson et al., 2006 ; Syvitski et al., 2009). Ceci est dû à l'affaissement des terres causé par la compression sous leur propre poids des sédiments deltaïques relativement jeunes. Le prélèvement des nappes phréatiques, du gaz et du pétrole peut grandement exacerber ce tassement naturel. Certaines parties des villes situées sur les deltas se sont affaissées de plusieurs mètres au cours du 20ème siècle (Nicholls, 2010). Les deltas étant souvent associés à de larges zones urbaines et des populations en expansion, ceci pourrait devenir un problème significatif au cours du 21ème siècle. (Nicholls et al., 2008).

L'interaction entre l'élévation du niveau de la mer, le changement climatique et les pressions d'origine humaine est particulièrement menaçante

En plus du phénomène d'affaissement, les activités humaines affectent la capacité des deltas à s'adapter au changement climatique. Cela conduit notamment à la rétention de sédiments par des barrages, à des altérations dans les flux des marées ainsi que dans les ouvrages de navigation et de contrôle des inondations, et à des modifications dans le ruissellement des eaux de surface. L'amenuisement des réserves en sédiments fait risquer une plus forte érosion à ces régions, une submersion permanente ainsi que des inondations plus fréquentes.

Actuellement, la disparition des zones humides dans les deltas est largement causée par le développement d'origine humaine à travers, par exemple, la destruction directe et la modification rapide de l'environnement naturel. De telles transformations vont réduire la capacité des deltas à s'adapter en réponse à la hausse du niveau de la mer et aux autres effets du changement climatique.

Au-delà de la disparition des milieux humides directement causée par les activités humaines, la SLR et la plus grande intensité des tempêtes tropicales vont probablement exacerber les niveaux de pertes actuels. Compte tenu de son interaction néfaste avec les autres phénomènes climatiques et humains, l'élévation du niveau de la mer présente une menace particulièrement sérieuse pour les environnements des deltas.

Les estuaires et les lagons

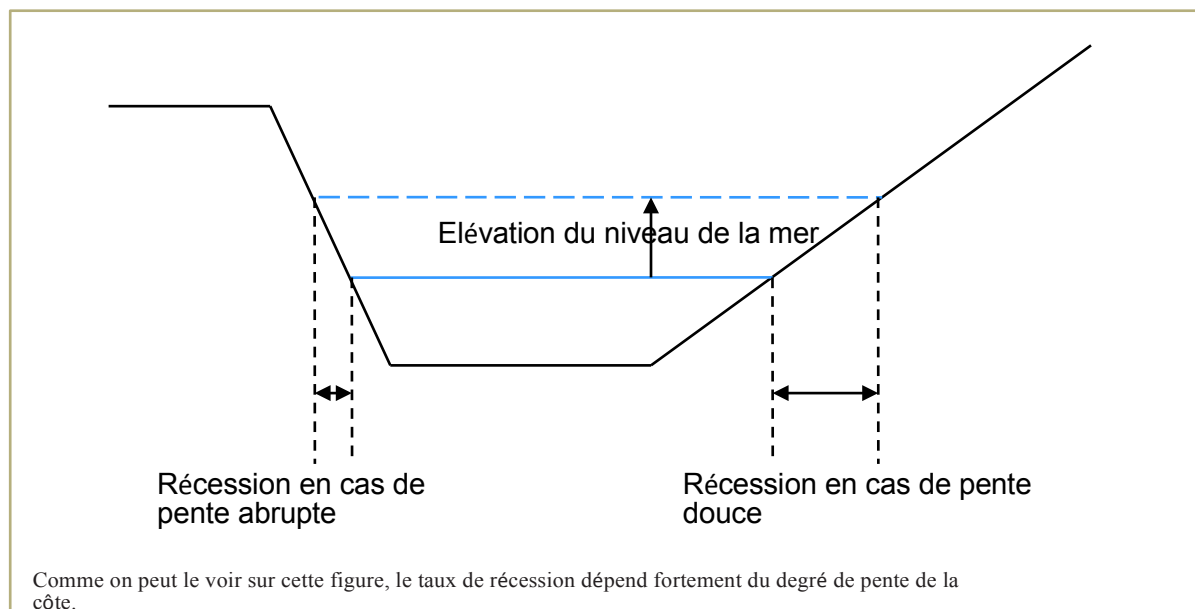
L'estuaire est la partie de l'embouchure des fleuves soumise à l'action des marées et s'ouvrant vers la mer. Les estuaires sont généralement soumis aux mouvements des marées et sont un mélange d'eau douce et d'eau salée (Bird, 2005). Ces environnements sont normalement protégés du vent et des vagues. Cependant, les lagons sont des zones d'eaux côtières peu profondes et salées, entièrement ou partiellement séparées de la mer par des bancs de sable, des galets ou, moins fréquemment, par des pierres (JNCC, 2010).

L'élévation du niveau de la mer provoque la migration des habitats côtiers vers les terres ainsi que la submersion des basses terres.

La SLR conduit généralement à des niveaux d'eau plus élevés et à l'intrusion d'eau salée dans les systèmes estuariens. Cela signifie que les communautés existantes de plantes et d'animaux seront amenées à se déplacer vers l'intérieur des terres. Si leur migration n'est pas entravée, et si le degré d'évolution de l'environnement n'est pas trop rapide pour que les systèmes naturels puissent s'adapter, ces communautés continueront d'exister malgré l'élévation du niveau de la mer.

En cas de SLR, l'amplitude du mouvement du littoral vers les terres et le degré de submersion permanente des terres côtières dépendent à la fois du taux de la SLR et du degré d'inclinaison des terres. Les côtes ayant une faible pente subiront une plus grande récession, comme le montre le schéma 2.4. Les estuaires et les lagons ayant typiquement des pentes peu inclinées, le mouvement du littoral peut y être significatif en cas d'une hausse même légère du niveau relatif de la mer.

Figure 2.4 : La récession du littoral causée par la SLR



Le changement climatique pourrait altérer la qualité des eaux côtières

La prolifération d'algues nuisibles pourrait être encouragée par une hausse des températures de l'eau et par les concentrations en dioxyde de carbone dissous également causées par le changement climatique. Des altérations dans les apports en eau douce pourraient nuire davantage à la qualité de l'eau: lorsque le niveau de l'eau augmente, cela encourage l'évacuation de l'eau de l'estuaire et vice-versa.

Il est attendu que les cyclones tropicaux et les tempêtes affectant les côtes augmentent en intensité, risquant d'altérer plusieurs autres processus propres aux systèmes estuariens, tels que le mouvement des sédiments dans le fond marin, l'apport de matière organique vitale pour la croissance des plantes et des animaux, la population de planctons et de poissons ainsi que les niveaux de salinité et d'oxygène.

Les récifs coralliens

Les côtes bordées de récifs coralliens sont presque toutes situées entre les Tropiques du Cancer et du Capricorne (Sheppard, 2005). Ces récifs constituent une collection d'organismes marins au squelette dur comme de la roche. La partie récif de l'ensemble est soumise aux conditions d'existence des coraux eux-mêmes. Pour vivre, ils requièrent des eaux chaudes et claires, ni trop fraîches ni trop salées, avec des températures entre 15 et 30°C et sans un taux trop élevé de sédiments (Sheppard, 2005). Les récifs jouent un rôle de défenses naturelles du littoral en permettant une dissipation efficace de l'énergie des vagues (French, 2001).

La hausse des températures de surface de la mer (STT) aggrave le blanchiment des coraux et élève leur taux de mortalité

Les coraux ont besoin d'une certaine plage de température pour vivre. Lorsque la température ambiante augmente, les coraux sont en situation de stress et subissent un phénomène de blanchiment. Le

« blanchiment » fait référence à la disparition des algues colorées qui vivent parmi les organismes coralliens. Ceci est problématique car les coraux dépendent de ces algues pour leur nutrition et leur énergie, et donc pour leur croissance et, in fine, leur survie. Ce phénomène intervient dans une certaine mesure naturellement, en raison des fluctuations saisonnières de la température de l'eau. Cependant, il y a de fortes chances pour que les hausses prolongées de température dues au réchauffement climatique menacent la survie à long terme des coraux.

Bien que certains organismes puissent être capables de s'adapter à des températures plus élevées, ceci n'a pas été établi dans le cas des coraux. Par conséquent, les hausses futures de SST entraîneront très probablement le blanchiment des coraux à un rythme plus fréquent et à une échelle plus large, et pour finir leur déclin.

L'acidification des océans affecte les taux de croissance des coraux.

La baisse du pH de l'eau de mer, due aux concentrations plus importantes de dioxyde de carbone, réduit le rythme avec lequel les organismes marins sont capables de construire les récifs en produisant leurs squelettes externes durs. Ajouté au phénomène plus fréquent de blanchiment, ceci peut causer la désintégration du récif. Ceci conduirait probablement à une augmentation de l'énergie des vagues, et par conséquent à un plus grand potentiel d'érosion du littoral.

L'intensification des tempêtes tropicales augmente les dégâts causés sur les récifs.

L'intensification des tempêtes tropicales due au changement climatique pourrait avoir des effets dévastateurs sur les récifs eux-mêmes, sur d'autres parties de l'écosystème marin ainsi que sur les habitants des îles basses. Les fragiles coraux peuvent se briser sous l'effet de tempêtes plus fréquentes et plus fortes, qui peuvent ainsi détruire la majorité des coraux d'un récif. Compte tenu de l'ensemble des effets mentionnés, les récifs coralliens apparaissent hautement menacés par le changement climatique et d'autres sources de tensions.

Les marais salants, les mangroves et les herbiers marins

Les marais salants, les mangroves et les herbiers marins sont des habitats des zones intertidales et infralittorales peu profondes qui apparaissent dans les environnements protégés ou modérément affectés par l'énergie des vagues.

Les marais salants sont des milieux terrestres recouverts principalement de végétation herbacée résistant au sel qui se retrouvent inondés lors des marées. Ils apparaissent dans de nombreux estuaires tempérés et des hautes latitudes, ainsi que dans les sections découvertes de la côte qui sont protégées de l'action extrême des vagues par des plaines intertidales et des mécanismes de barrières (Allen & Pye, 1992).

Les mangroves sont des plantes ligneuses ou des arbustes qui se développent dans des eaux saumâtres ou dans les zones humides des estuaires, le long des côtes tropicales et subtropicales abritées.

Les herbiers marins sont des plantes à fleurs sous-marines que l'on trouve typiquement dans les eaux marines et dans les estuaires inondés en continu par la mer. La plupart du temps, ils s'enracinent dans les sédiments limoneux ou sableux en eaux peu profondes (Merlin, 2005).

Les marais, les mangroves et les herbiers remplissent d'importantes fonctions naturelles. Ils captent ainsi les sédiments, stabilisent le fond marin face à l'érosion, atténuent l'énergie des vagues, et fournissent des

habitats à de nombreux poissons, oiseaux et insectes. Ces zones humides côtières sont cependant très sensibles au changement climatique et à l'élévation du niveau de la mer, les espaces où ils sont situés étant très liés au niveau de l'eau (Nicholls et al. 2007a).

Les effets les plus prononcés risquent d'avoir lieu dans les marais d'eau douce ou en transition eau douce/eau salée.

L'élévation du niveau de la mer aura pour conséquence d'augmenter la durée pendant laquelle les marais salants sont submergés par la marée. Le changement climatique risque également de faire évoluer le nombre et l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes qui ont lieu sur les côtes. Ces effets se feront sentir plus sévèrement dans les marais situés en eau douce ou dans des zones de transition d'eau douce/eau salée.

Une élévation rapide du niveau de la mer pourrait submerger la partie des marais salants et des mangroves reliée à la mer.

Si l'apport en sédiments est suffisant, les marais comme les mangroves devraient être capables de suivre les évolutions de leur environnement touché par la SLR. Cependant, si la quantité de sédiments disponible n'est pas suffisante, la SLR va être plus rapide que le phénomène d'accumulation. La réponse dépend pour beaucoup du bilan sédimentaire. Le seuil à partir duquel cela arrive varie fortement et dépend en majeure partie des altérations causées par l'érosion et la sédimentation. Les habitats intertidaux situés dans les zones à hauts coefficients de marées et ayant un apport élevé en sédiments sont moins menacés par la SLR.

Le changement climatique aura des effets à la fois positifs et négatifs sur les mangroves.

Les impacts sur les mangroves vont être partagés. Ils peuvent inclure une croissance soutenue grâce aux niveaux plus élevés de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et la hausse des températures. Cependant, il peut également y avoir des effets négatifs, tels qu'une plus grande intrusion d'eau salée dans les zones où se trouvent les mangroves ainsi qu'une plus forte érosion des côtes. Ajouté à cela, on observe une large conversion dans l'usage des mangroves fait par les humains, qui en font par exemple des bassins à crevettes. En raison de ces facteurs, il est probable que les effets négatifs prévalent et que l'on assiste à un fort déclin des mangroves dans le futur.

Le déclin des herbiers marins va probablement être aggravé par le changement climatique.

Actuellement, les herbiers marins semblent être en déclin autour de nombreuses côtes en raison d'impacts d'origine humaine. On s'attend à voir ce phénomène s'accélérer si le changement climatique altère les conditions environnementales telles que la salinité, la température, le niveau de la mer, le dioxyde de carbone dans l'atmosphère, les tempêtes, et l'intensité de la lumière ultraviolette dans les eaux côtières.

Dans l'ensemble, les zones humides côtières vont subir un déclin dans le futur.

La survie des zones humides côtières dépend de la disponibilité des réserves en sédiments et de leur possibilité de migration vers les terres. Là où l'approvisionnement en sédiments est aisé et où la migration vers les terres n'est pas gênée, la plupart des milieux humides seront capables de s'adapter à la SLR. Mais dans l'ensemble, il semble que celles-ci doivent subir un déclin en raison des niveaux en hausse de

la mer et de la plus grande fréquence des tempêtes et autres phénomènes extrêmes. D'autres pressions climatiques ou humaines telles que le déficit en sédiments et la compression côtière vont aggraver ces déperditions.

2.3 Les effets socioéconomiques de la SLR

L'élévation du niveau de la mer (SLR) risque de provoquer une intrusion d'eau salée dans les eaux de surface et les aquifères côtiers et de faire progresser ce phénomène dans les estuaires et les systèmes fluviaux du littoral. De plus, elle risque de causer des inondations côtières plus importantes, des niveaux de submersion plus élevés ainsi que des vagues et des tempêtes qui toucheront plus profondément les terres du littoral. De nouveaux cas d'érosion sont également à craindre, accompagnés d'une accélération du phénomène (Nicholls et al., 2007a). Ces conséquences devraient se traduire de *façon extrêmement négative, et de manière particulièrement sévère dans les deltas et les petites îles*.

Les évolutions et la variabilité du climat devraient également avoir un impact sur l'agriculture en causant une baisse de la qualité des sols et de l'eau (Nicholls & Klein, 2005). Dans une moindre mesure, les activités de foresterie et de pêche dans les eaux côtières et dans les estuaires risquent aussi d'être affectées.

Les concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère sont susceptibles d'être bénéfiques à la croissance des plantes bien que les hausses de température risquent de raccourcir leurs cycles de vie. Si les phénomènes climatiques extrêmes deviennent plus fréquents, cela peut également nuire au rendement des cultures.

2.4 Résumé

Il convient de rappeler qu'en raison des différences locales et régionales de RSLR et de températures, les impacts et les interventions présentés dans ce livret ne seront pas uniformes partout dans le monde (Klein & Nicholls, 1998). Les répercussions du changement climatique sur les zones côtières devraient être très spécifiques à chaque site en raison du rôle des facteurs locaux.

Les effets du changement climatique dans les zones côtières sont nombreux et variés. Du point de vue de l'Homme, les cinq effets à retenir sont les probabilités accrues de : (1) crues et d'inondations des côtes; (2) érosion du littoral; (3) élévation des nappes phréatiques; (4) intrusion d'eau salée dans les eaux souterraines et de surface et (5) effets biologiques (Klein et al. 2006).

Ce guide ne prétend pas couvrir les technologies d'adaptation traitant tous les impacts du changement climatique sur les zones côtières. Il s'attache plutôt à se concentrer spécifiquement sur la protection du littoral contre les phénomènes accrus d'inondation et d'érosion, ces derniers étant des effets majeurs de la hausse du niveau de la mer et du changement climatique, et ayant des impacts socioéconomiques négatifs. De plus, les technologies d'adaptation associées à ces problématiques sont largement développées et les enseignements tirés de ces expériences peuvent être transmis au moyen de médias tels que ce guide. Les technologies traitant l'élévation du niveau des nappes phréatiques, l'intrusion d'eau salée et les effets biologiques sont cependant bien moins développées et ne seront pas discutées dans le présent guide. Il est nécessaire qu'un travail plus approfondi soit mené sur ce sujet.

3. Les stratégies, les options et pratiques de l'adaptation

Au sens large, les technologies d'adaptation peuvent être définies comme le matériel, les techniques, les connaissances pratiques, les compétences ou les instruments institutionnels nécessaires pour réduire les risques propres au littoral, notamment ceux liés au changement climatique. A ce jour, le principe d'adaptation a permis de fortement réduire la vulnérabilité de la société aux risques côtiers (Klein et al., 2000, 2001; Von Koningsveld et al., 2008). Concernant le changement climatique, l'adaptation a permis aux communautés vivant sur le littoral d'en atténuer les effets néfastes en prévenant ou réduisant les conséquences potentiellement négatives tout en profitant des aspects positifs (Tol et al., 2008; USAID, 2009).

Le présent guide utilise la typologie des stratégies d'adaptation avancées par le sous-groupe en charge de la gestion des zones côtières du GIEC (IPCC CZMS, acronyme anglais, 1990) et illustrées dans la figure 3.1. Il existe trois axes stratégiques d'adaptation ;

1. Protéger : défendre les zones vulnérables, notamment les agglomérations, les activités économiques et les ressources naturelles.
2. Faire des compromis: continuer d'occuper les zones vulnérables, mais à condition d'accepter le degré plus élevé d'inondation en changeant la façon d'utiliser la terre et les méthodes de construction et/ou en améliorant l'anticipation et la préparation.
3. Se replier (de manière planifiée): abandonner les structures dans les zones actuelles de développement, réinstaller les habitants et s'assurer que la nouvelle zone de développement soit aussi éloignée du littoral que nécessaire. Il n'est pas question ici de repli non planifié.

Bien que plusieurs autres typologies aient été proposées concernant l'adaptation au changement climatique (voir la figure 3.2), celle en trois volets avancée par le GIEC (1990) est la plus largement appliquée. Elle décrit efficacement les technologies développées pour lutter contre les risques accrus d'érosion et d'inondation décrits dans le présent guide comme le montrent les figures 1.1 et 3.2. Il est entendu qu'« améliorer la vigilance et la préparation » est une mesure transversale et est pertinente à des degrés divers pour toutes les technologies dont il est question ici.

Si le choix entre les stratégies de protection, d'adaptation ou de repli est important, il est essentiel de souligner que l'adaptation des côtes va au-delà de la simple mise en œuvre de l'une de ces trois interventions de base. Cela consiste plutôt en un processus politique et d'action impliquant une prise de décision globale et une mise en pratique des technologies.

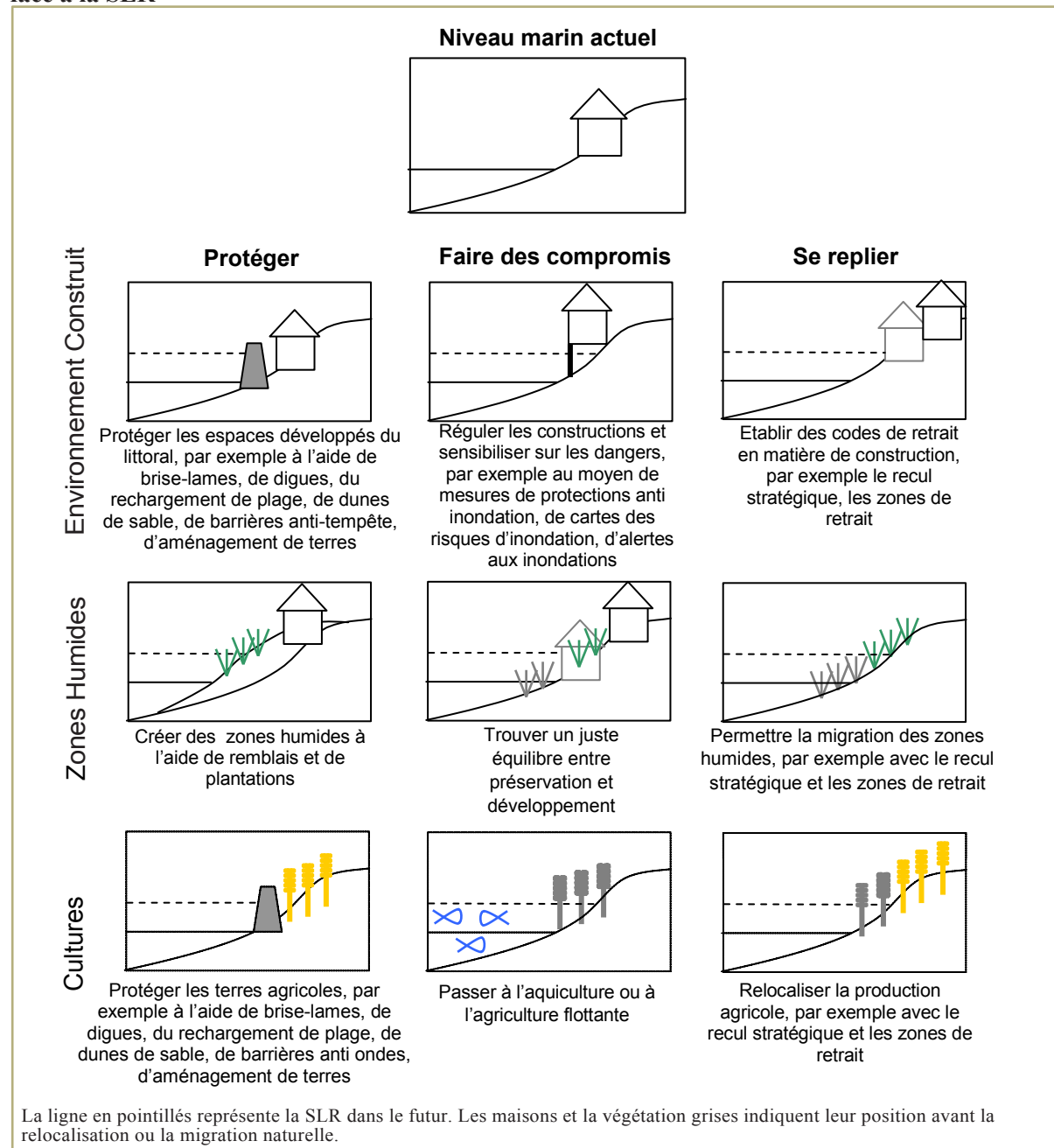
Encadré 3.1: Objectifs de la GIZC (French, 2005; USAID, 2009)

- Permettre la gestion des zones côtières de manière durable et bien renseignée ce qui est l'un des facteurs majeurs pris en compte dans les décisions concernant le littoral.
- Chercher à promouvoir la compatibilité et l'équilibre des usages qui sont faits des côtes.
- Promouvoir la coopération entre les différents départements, ministères ou agences ayant le contrôle sur divers aspects de la gestion des côtes. Promouvoir également la coopération avec d'autres institutions telles que les universités et les groupes d'utilisateurs.

Contd...

- Mettre en application des stratégies préventives et de précaution en matière de développement du littoral. Ex : Chercher à limiter le développement dans certaines zones à risque.
- Prendre en compte les coûts et les bénéfices tant économiques qu'environnementaux des stratégies d'aménagement des côtes afin d'en garantir la meilleure utilisation possible.
- Faciliter la communication entre toutes les parties intéressées dans la gestion des côtes et les processus décisionnels associés afin de s'assurer que tous les points de vue sont pris en compte.
- S'assurer que l'étendue et la complexité des problématiques définies comme priorités pour les mesures d'adaptation au changement climatique sont en adéquation avec la capacité des institutions impliquées.

Figure 3.1: Illustration des interventions de protection, de compromis et de repli (planifié) face à la SLR

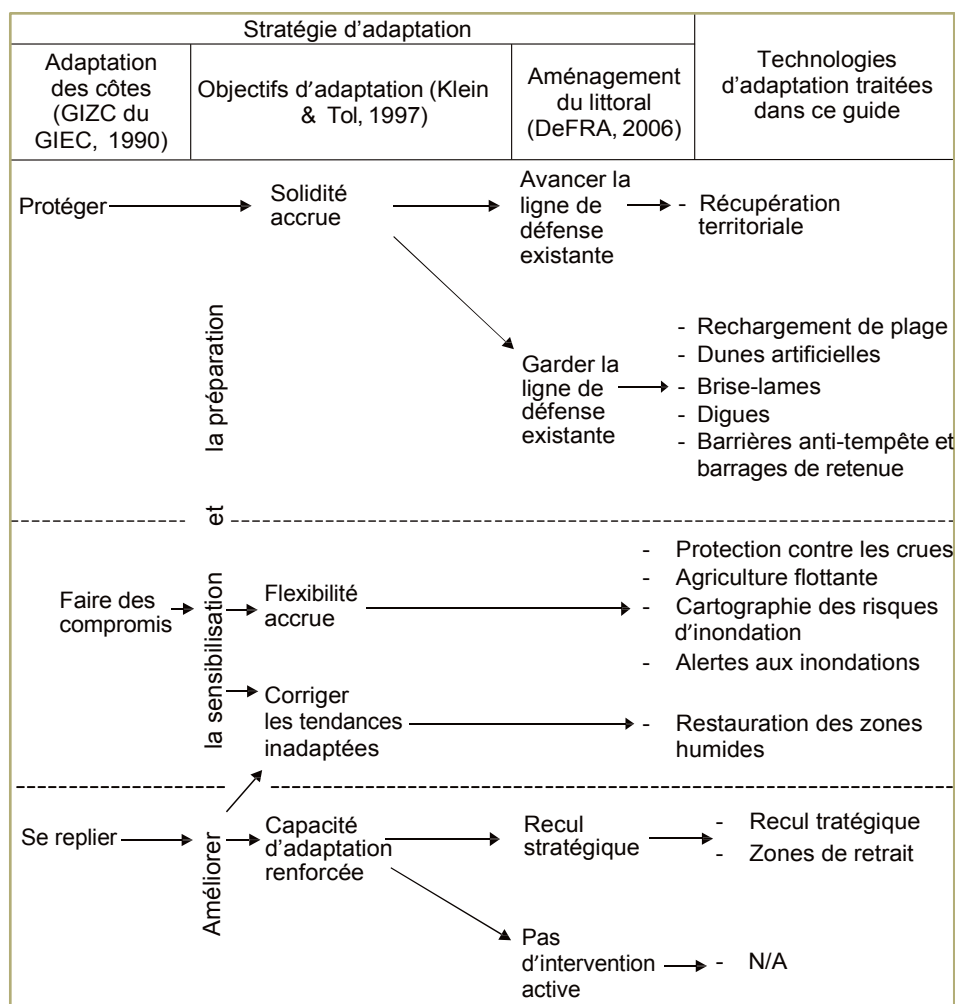


Source: Dessin des auteurs inspiré de IPCC CZMS (1990)

La manière la plus efficace de traiter l'adaptation est de l'intégrer aux activités de tous les services de planification plutôt que de la mettre en œuvre de manière isolée (Tompkins et al., 2005; USAID, 2009). Pour être réussi, il faut que le processus prenne en compte le contexte global dans lequel les répercussions du changement climatique sont à l'œuvre et qu'il considère les problématiques à la fois climatiques et non climatiques (Tol et al., 2008).

La gestion intégrée des zones côtières (GIZC) est un cadre utile pour la réalisation de ces objectifs. Certains des objectifs principaux sont présentés dans l'encadré 3.1.

Figure 3.2: Les liens entre les différentes typologies de stratégie d'adaptation et les technologies traitées dans ce guide



Source: Adapté de Nicholls et al., 2007a

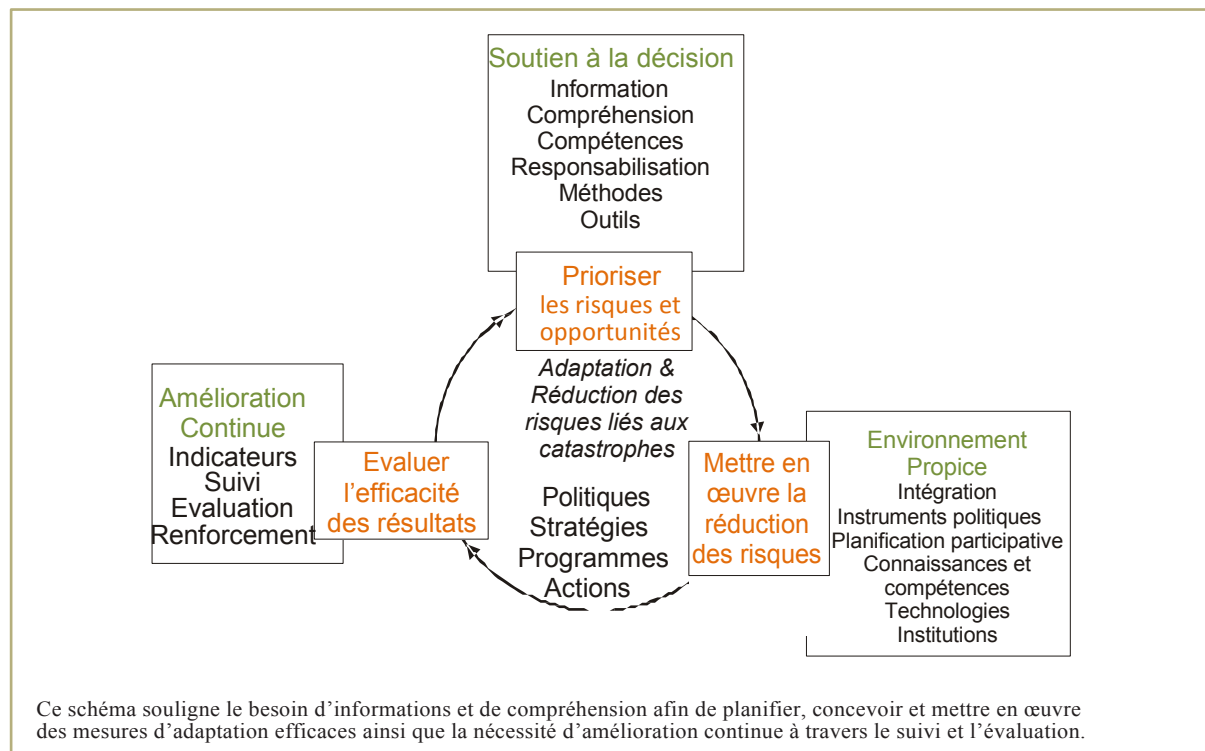
La simple mise en œuvre d'une technologie d'adaptation n'est pas une finalité; l'adaptation consiste plutôt à une démarche nourrie, exigeant une priorisation des risques et des opportunités, la mise en œuvre de mesures de réduction des risques et un contrôle continu de leur efficacité. Il convient donc de faire un suivi et une évaluation rigoureux de toute technologie et de mettre à profit les **enseignements** tirés dans le

cycle du projet afin d'améliorer la maintenance et les futures interventions, comme montré dans la figure 3.3. Ce cycle se compose de trois étapes élémentaires :

1. La priorisation des risques et des opportunités
2. La mise en œuvre de la réduction des risques
3. L'évaluation de l'efficacité des résultats produits

Il devrait être possible grâce à ce cadre de fournir une adaptation efficace et planifiée, qui à son tour sera le soutien d'un développement durable dans les espaces côtiers. Il convient de noter cependant que, bien que les mesures d'adaptation dans ces zones permettent d'atténuer leur vulnérabilité aux impacts du changement climatique, une protection totale contre l'inondation et l'érosion des côtes est impossible. Afin de réaliser chacune de ces trois étapes, une série de technologies et de stratégies pourra être employée. Dans les pays en développement, cette démarche peut s'avérer plus difficile à mettre en œuvre en raison d'un manque de capacité d'adaptation. Les trois étapes demeurent cependant nécessaires et sont à traiter de manière adéquate. Elles sont discutées aux sections 3.1 et 3.3.

Figure 3.3: Cadre conceptuel pour la mise en œuvre des mesures d'adaptation des côtes



Source: Hay 2009

3.1 Hiérarchiser les risques et les opportunités

Un des éléments clés lorsque l'on développe une stratégie d'adaptation est de comprendre les faits élémentaires qui constituent le changement climatique et de déterminer quelles en seront les répercussions dans une région (Tompkins et al., 2005). Être bien informé sur les risques est crucial pour une prise de

décision éclairée (Hay, 2009). Des informations pertinentes, précises et mises à jour permettront la mise en œuvre d'interventions mieux ciblées et plus efficaces (Klein et al., 2001).

Développer les solutions les plus efficaces est toujours une priorité, mais cela l'est d'autant plus lorsque cela concerne les pays en développement, ceux-ci ayant probablement des ressources limitées (Tompkins et al., 2005). Les pratiques à l'œuvre actuellement dans certains de ces pays, où sont appliqués des modèles mal compris ou aveuglement copiés, vont à l'encontre de ces recommandations et entraînent souvent des coûts socioéconomiques et environnementaux exorbitants.

En général, l'approche multidisciplinaire a été reconnue comme fournissant les modèles d'adaptation les plus efficaces. Ceci a été observé dans des pays ayant un long historique d'ingénierie côtière, comme les Pays-Bas (Van Koningsveld et al., 2008), et il est à espérer que cette vaste expérience puisse profiter aux pays en développement.

Compiler des informations claires et concises sur les répercussions potentielles du changement climatique sur une région peut s'avérer difficile en l'absence d'informations spécifiques (Tompkins et al., 2005). Il est possible d'obtenir des données pertinentes sur les zones côtières provenant de plusieurs grandes bases de données au niveau mondial et régional (voir Klein et al., 2001). Cependant, l'adaptation requiert souvent des informations plus détaillées que celles que ces grands organismes peuvent fournir (Klein et al., 2006). L'existence de programmes locaux dédiés à la collecte de données serait ainsi très bénéfique. Les technologies qui pourraient être utilisées pour la collecte d'informations sur le système côtier sont abordées à la section 4.4 et sont également évoquées dans Klein et al. (2001).

Lorsqu'un besoin d'adaptation est identifié, les décideurs doivent ensuite déterminer quelles actions pourraient être entreprises. Celles-ci peuvent comprendre des technologies axées sur l'utilisation de biens d'équipement, tels que les digues et les brise-lames, ou d'autres axées sur l'information, les arrangements institutionnels et le renforcement de la capacité d'adaptation. Selon les pays, les différents contextes conduiront à la mise en place d'interventions sur mesure en les adaptant aux conditions locales. La sélection des technologies doit tenir compte des réalités de temps, de financement, de personnel et de capacité institutionnelle (USAID, 2009).

Déterminer le bon moment pour lancer les mesures est également un aspect important de l'adaptation. La mise en œuvre peut-être soit réactive soit anticipée. On met en place un processus d'adaptation dite réactive après que les premiers effets du changement climatique deviennent manifestes, tandis qu'un processus anticipé se produit avant que ces effets ne soient apparents. Si toutes les technologies peuvent être mises en pratique de manière anticipée, elles ne peuvent pas toutes être utilisées de manière réactive. Les bénéfices tirés des stratégies axées sur le compromis ou le repli sont bien plus importants lorsque celles-ci sont mises en œuvre de manière proactive. Il est en général conseillé d'inclure une indemnité allouée au changement climatique lors de la planification et la conception des infrastructures côtières.

Il existe plusieurs outils de décision visant à faciliter le choix des technologies à employer, ainsi que le moment et l'endroit où les mettre en application. Parmi eux, l'on trouve l'analyse coût-bénéfice, l'analyse coût-efficacité et l'analyse multicritère. Ces méthodes sont abordées plus en détail au Chapitre 5.

La planification spatiale est un élément du processus d'adaptation des côtes qui peut être grandement soutenu par l'application des systèmes d'information géographique (SIG). Ceux-ci se sont révélés être des outils très utiles dans l'analyse des problèmes et dans l'identification des technologies et des lieux

appropriés pour les options d'adaptation (Klein et al., 2006). Ils fournissent ainsi un excellent soutien aux gestionnaires du littoral dans leurs prises de décision. Le principe du SIG est de combiner d'une part de la cartographie informatique et des techniques de visualisation avec d'autre part des bases de données spatiales et des outils statistiques, analytiques et de modélisation (Klein et al., 2001). Des modèles numériques peuvent également être inclus et les résultats conservés (Dawson et al. 2009; Mokrech et al., 2009). De plus, le SIG est un outil précieux pour les autres étapes de l'adaptation et peut être utilisé pendant tout le processus.

Tout au long de la stratégie d'adaptation, l'engagement des parties prenantes ainsi que les volets de communication et de sensibilisation sont essentiels. Les responsables doivent chercher à faciliter la communication entre toutes les parties concernées, conformément aux recommandations formulées dans la GIZC (Encadré 3.1). Ces activités aideront à justifier les mesures d'adaptations auprès du public et à communiquer sur les incertitudes associées au projet. Cela permettra également d'améliorer l'efficacité du processus de planification et de conception.

3.2 Mettre en œuvre la réduction des risques

Une fois qu'il a été décidé de mener une stratégie d'adaptation, la ou les technologies sélectionnées doivent être mises en application. Il est probable que la sélection d'un axe entre protection, adaptation et repli implique la mise en œuvre d'une ou plusieurs technologies supplémentaires ; ainsi, une région devrait être capable de répondre plus efficacement à un large panel d'effets du changement climatique (USAID, 2009).

Un autre intérêt lié à l'application simultanée de plusieurs technologies complémentaires est le risque réduit d'assister à une grave défaillance. Cela fait également office de mesure de sécurité supplémentaire (IOC, 2009). Par exemple, les systèmes d'alertes aux inondations (section 4.2.5), qui sont considérés comme une mesure d'adaptation à l'environnement, sont souvent mis en œuvre en complément de mesures de protection telles que les systèmes de digues et les barrières anti ondes de tempête (traités à la section 4.1.4 et 4.1.5). Cela répond en partie au problème du risque résiduel soit ce qui pourrait arriver si un événement exceptionnel dépassait la capacité de défense.

Malheureusement, il n'existe pas de solution idéale unique ou générique concernant l'adaptation des côtes. Chaque situation doit plutôt être évaluée et traitée par rapport à ses particularités propres (IPCC CZMS, 1990). Ceci conduit à la mise en œuvre de mesures d'adaptation diverses sur différents sites afin de prendre davantage en compte les conditions locales (Evans et al., 2004). Etablir un portefeuille d'interventions s'est révélé être à la fois plus efficace et moins coûteux, cette méthode permettant une adaptation aux différences locales et des synergies entre les technologies. Il est donc fortement recommandé de la mettre en pratique. Le tableau 4.1 devrait aider les gestionnaires de littoral à identifier les portefeuilles possibles de technologies complémentaires, et non en concurrence.

L'utilisation d'approches « flexibles » pour la gestion des côtes devrait également faire l'objet d'une attention particulière (Thorne et al., 2007). Celles-ci garantissent à la génération suivante l'accès à la même gamme d'options qu'aujourd'hui. Pour ce faire, les stratégies de gestion des côtes devraient être réversibles. De même, il convient que les mesures « sans regrets » soient une priorité ; celles-ci étant bénéfiques indépendamment du changement climatique. Par exemple, la restauration des zones humides (section 4.2) améliore l'état de ces écosystèmes côtiers rendus vulnérables par différents facteurs (USAID, 2009).

3.3 Evaluer l'efficacité des interventions

Une fois la stratégie d'adaptation mise en œuvre, il convient d'établir un processus continu et adéquat de suivi et d'évaluation. Ceci permet aux gestionnaires des côtes de déterminer si les mesures d'adaptation ont atteint leurs buts spécifiques. Les informations ainsi obtenues devraient permettre de savoir dans quelle mesure la stratégie est performante. Cela peut ensuite donner lieu à des ajustements d'interventions, si nécessaire (Klein et al., 2001). Cette démarche d'apprentissage et d'amélioration continue est essentielle, car vouloir à tous prix « réussir du premier coup » ne permet pas la mise en place de réels changements bénéfiques, et n'encourage pas les personnes à admettre leurs erreurs (Tompkins et al., 2005). Lors de l'étude du processus d'adaptation (Figure 3.3), on considère un état idéal du système où les étapes précédentes ont été correctement menées. Dans le cas où le suivi expose des problèmes, cela donne lieu à un rapport qui permet un nouveau départ du processus (Figure 3.3).

Afin d'établir un suivi et une évaluation efficaces, il est nécessaire de collecter régulièrement un ensemble de données pertinentes et fiables liées aux objectifs initiaux du projet. Les options d'adaptation devraient être revues par rapport à ces buts explicites afin de pouvoir évaluer leurs succès et leurs faiblesses (Nicholls & Klein, 2005). Cependant, lorsque l'objectif en question est la protection contre les phénomènes météorologiques extrêmes, il peut s'avérer difficile d'évaluer dans quelle mesure les technologies ont été efficaces, les conditions d'utilisation étant, par définition, des événements rares. Dans ces cas précis, tant les modèles que les expériences dans le monde impliquant des infrastructures similaires peuvent fournir des informations. Il est ainsi nécessaire d'avoir une démarche de gestion des côtes ouverte vers l'extérieur.

Les effets du changement climatique sur une région étant également incertains, les impacts doivent périodiquement être analysés et revus localement. Cela servira ensuite à prioriser les risques et les opportunités comme cela est expliqué à la section 3.1. Une bonne connaissance des impacts peut aider les gestionnaires à mettre en œuvre les adaptations les plus performantes. Cette meilleure connaissance des conditions locales va permettre d'ajuster la stratégie lorsque nécessaire, à l'aide des informations concernant les répercussions du changement climatique spécifiques à la région.

Il est important de maintenir les activités de suivi sur de nombreuses années. Il convient donc de prévoir l'établissement d'un système adéquat (Klein et al., 2006). Cependant, il peut s'avérer difficile de maintenir ce processus dans les pays en développement, notamment en raison des coûts associés (Tompkins et al., 2005). Si la nécessité du suivi n'est pas reconnue, il y a un risque que cet aspect important se retrouve menacé par une logique d'économie. Ainsi, mettre en œuvre jusqu'au bout le processus d'adaptation en trois étapes représente un défi.

La collecte de données pour les besoins du suivi se fait à travers les mêmes technologies que pour la description initiale du système côtier (cf. 3.1). Les conditions concernant ce processus sont discutées en détail à la section 4.5.

4. Les technologies d'adaptation et leurs applications

Ce chapitre traite des treize technologies d'adaptation mises en œuvre en réponse à l'érosion et l'inondation des côtes et groupées par axe stratégique: protéger, faire des compromis, se replier. Pour chaque technologie sont décrits : (1) les avantages et les inconvénients techniques; (2) les capacités institutionnelles et organisationnelles requises; (3) les coûts et besoins financiers; (4) les facteurs favorisant et entravant la mise en œuvre; et (5) l'étude d'un cas pertinent. Dans la partie 4.4, on s'intéressera aux exigences en termes de connaissances et de renforcement de capacité, et dans la partie 4.5, aux technologies relatives au processus de suivi. Des sources supplémentaires sont proposées en annexe II.

Il est important de souligner qu'une stratégie d'adaptation efficace comprendra probablement une série variée de technologies. Le tableau 4.1 montre celles qui sont complémentaires et celles en concurrence pour des séries potentielles identifiées. Il apparaît qu'un grand nombre de combinaisons est possible.

Tableau 4.1: Les technologies d'adaptation complémentaires et concurrentes

	Zones de retrait	Recul stratégique	Agriculture flottante	Alertes inondations	Cartographie des risques d'inondation	Restauration des zones humides	Protection anti-inondations	Récupération territoriale	Barrières anti-tempête	Digues	Brise-lames	Dunes artificielles et Réhabilitation de dunes
Rechargement de plage		a				b						
Dunes artificielles et Réhabilitation de dunes		a				b						
Brise-lames/murs de protection		a						c				
Digues		a						c				
Barrières anti-tempête												
Récupération territoriale												
Protection anti-inondations												
Restauration des zones humides												
Cartographie des risques d'inondation												
Alertes aux inondations												
Systèmes d'agriculture flottante												
Recul stratégique												

	Complémentaires
	Concurrentes

a. Complémentaires lorsque ces éléments sont relocalisés plus haut vers les terres.

b. Les zones humides et les plages sableuses coïncident rarement

c. Lorsqu'utilisé pour protéger les nouvelles terres aménagées

Le niveau d'expérience et de connaissances dans la mise en pratique de ces 13 technologies varie dans le monde. Dans le domaine de l'adaptation des côtes, celui-ci est dans l'ensemble plus avancé dans les pays développés. Le niveau d'expérience actuel des pays est présenté de manière synthétique dans le tableau 4.2, selon une distinction entre pays développés et pays en développement.

Tableau 4.2: Degré actuel d'expérience dans la mise en application des technologies d'adaptation

Technologie	Pays développés			Pays en développement			Remarques
	Bas	Moy	Elevé	Bas	Moy	Elevé	
Rechargement des plages			✓		✓		Augmentation rapide des applications
Dunes artificielles et Réhabilitation de dunes			✓	✓			
Brise-lames/murs de protection			✓			✓	Les pays en développement ont souvent une approche ad-hoc
Digues			✓			✓	Les pays d'Asie orientale ont un long historique dans la construction de digues
Barrières anti-tempête		✓		✓			Une technologie plus spécialisée qui promet de voir son application s'étendre.
Barrages de clôture			✓			✓	
Récupération territoriale			✓			✓	Plus utilisée dans les zones densément peuplées
Protection anti-inondations		✓			✓		Mise en pratique croissante dans le monde
Restauration de zones humides			✓	✓			
Systèmes d'agriculture flottante	✓					✓	Applications uniquement dans quelques environnements estuariens (ex : Bangladesh)
Cartographie des risques d'inondation			✓			✓	Augmentation rapide des applications
Alertes aux inondations			✓			✓	Augmentation rapide des applications

Contd...

Recul stratégique			✓	✓			Appliquée dans les zones historiques de récupération territoriale – à ce jour principalement en Europe du N-O et aux USA
Zones de retrait			✓			✓	Augmentation rapide des applications

4.1 Les stratégies de protection

Dans son usage courant, la protection du littoral désigne la réduction ou la suppression des dommages affectant les côtes et les terres alentours, causés par l'inondation, l'action des vagues et l'érosion, à l'aide de barrières visant à supprimer les influences hydrauliques (Kraus, 2005). La tendance de la société à vouloir construire des infrastructures proches du littoral et à faire usage des côtes et de leurs ressources a conduit à une plus large mise en œuvre des stratégies de protection pour l'adaptation de ces régions (Cooper & Harlow, 1998).

Cette stratégie implique la conduite de mesures défensives et d'autres types d'activités pour protéger les zones des inondations, des crues des marées, des effets des vagues sur les infrastructures, de l'érosion, de l'intrusion d'eau salée et des pertes en ressources naturelles. Ces mesures peuvent être conçues à partir d'un ensemble de solutions structurelles dites « dures » ou « douces ». Elles peuvent être mises en pratique de manière autonome ou être combinées avec d'autres selon les conditions spécifiques du site (IPCC CZMS, 1990). Les mesures protectives, dures et douces, sont présentées ci-après.

Les défenses dures

Les défenses dures sont l'approche traditionnelle utilisée en matière de défense des côtes. On utilise des structures qui fournissent une barrière rigide entre la terre et la mer et qui résistent à l'énergie des marées comme des vagues, empêchant ainsi toute interaction entre les deux (French, 2001). Ce sont par exemple des brise-lames, des digues, des revêtements, des blocs de béton et des cloisons. Par le passé, les défenses dures ont été employées parce qu'elles fournissent une protection tangible et sont donc appréciées par les populations concernées qui leur font confiance. Actuellement, il est cependant devenu clair que si ces structures sont bénéfiques pour l'arrière-pays qu'elles tendent à protéger, elles sont peu utiles pour empêcher le processus physique de l'érosion. Le problème est en fait transféré du littoral au fond marin situé immédiatement en face de la structure (Pilarczyk, 1990b) ou à la côte adjacente (Nicholls et al., 2007b). Lorsque l'on utilise ce type de défenses, il convient donc d'anticiper ces problèmes et d'être prêt à faire face aux conséquences (par ex. Leafe et al., 1998; DEFRA, 2006).

Le problème majeur lié aux ouvrages de défenses dures est le fait qu'une fois en place, ils fixent le trait de côtes à l'endroit où il se trouve au moment de la construction. Bien que cela présente l'avantage de freiner l'érosion, du moins au début, fixer la position d'un littoral est problématique car ces derniers sont par nature des reliefs dynamiques qui réagissent à certains facteurs comme l'élévation du niveau de la mer et le régime des vagues. De plus, les structures rigides peuvent gêner l'usage récréatif des plages et peuvent être coûteuses à construire et à entretenir (USACE, 2002). Il est nécessaire de bien prendre en compte ces coûts et ces avantages lorsque la mise en pratique de ces technologies d'adaptation est envisagée.

On assiste actuellement à une prise de conscience grandissante des effets secondaires négatifs associés à ces structures sur les schémas d'érosion et de sédimentation. Cela a conduit à une valorisation croissante de la protection dite « souple » ou « douce » et des autres axes stratégiques de repli et de compromis (Klein et al., 2006). Une solution alternative peut également être une combinaison de défenses dures (sections 4.1.3 à 4.1.6) avec des défenses douces, telles que le rechargement des plages en sédiments. Avec cette méthode, le maintien du niveau des plages est assuré par le réapprovisionnement tandis que la défense dure continue de protéger le littoral contre les événements climatiques plus extrêmes.

Les défenses douces

Si les défenses dures luttent contre les forces naturelles telles que l'énergie des vagues, les technologies douces s'adaptent aux processus naturels et les complètent (Bermingham et al., 2000). Les mesures de défense douce ont largement été développées en réponse aux effets négatifs des méthodes dures. Elles représentent également un tournant stratégique majeur, passant d'une réaction ponctuelle aux risques côtiers à l'adoption d'une approche plus globale et proactive (Dean, 2002; Hanson et al., 2002; Williams & Micallef, 2009). Les défenses douces sont par exemple le rechargement des plages en sédiments (Section 4.1.1) et la reconstitution de dunes (section 4.1.2).

En adoptant ces mesures, il est possible d'éviter nombre des conséquences négatives liées aux méthodes dures. Cette approche est particulièrement intéressante pour les côtes exposées aux vagues et où sont situées des plages. De plus, l'utilisation des défenses douces aide à entretenir le paysage naturel et à maintenir la fonction d'habitat du littoral. Le fait de tenir compte des processus naturels permet d'optimiser au mieux la situation, tout en minimisant l'impact environnemental et en créant des opportunités (Chadwick et al., 2004).

Lorsque l'on met en pratique des mesures douces, il est cependant important de souligner que ces solutions requièrent un processus continu et régulier de contrôle, d'entretien et de suivi technique; cela exige une plus grande participation d'ingénieurs, de concepteurs, de designers etc... que pour les défenses dures (Edge et al., 2003). Il convient donc de prendre en compte ces coûts et besoins financiers supplémentaires lors de la sélection de l'une ou l'autre option.

Résumé

Tandis que l'on assiste à une large tendance à l'utilisation de mesures de défenses douces, les deux types de technologies continueront à être mis en pratique dans le futur. Les ouvrages de défense dure devraient notamment avoir un rôle important dans la protection des régions urbaines du littoral contre les inondations. Quant aux mesures douces, elles seraient plus appropriées sur les côtes qui ont un taux sédimentaire élevé et qui sont composées de plages. Par ailleurs, des combinaisons des deux types de technologies sont susceptibles d'être mises en pratique dans de nombreux cas, de tels scénarios étant souvent plus économiques.

4.1.1 Le rechargement de plage

Définition

Le rechargement des plages en sédiments est une technologie d'adaptation utilisée à l'origine pour répondre à l'érosion, mais qui peut également avoir un effet bénéfique sur la réduction des inondations. C'est une approche de protection du littoral dite de technique douce, qui désigne l'introduction artificielle

de sédiments en quantité suffisante sur une zone de plage qui connaît un déficit. Ce processus peut être également désigné par les termes de recharge de plages, réapprovisionnement, reconstitution ou encore alimentation artificielle des plages.

Description

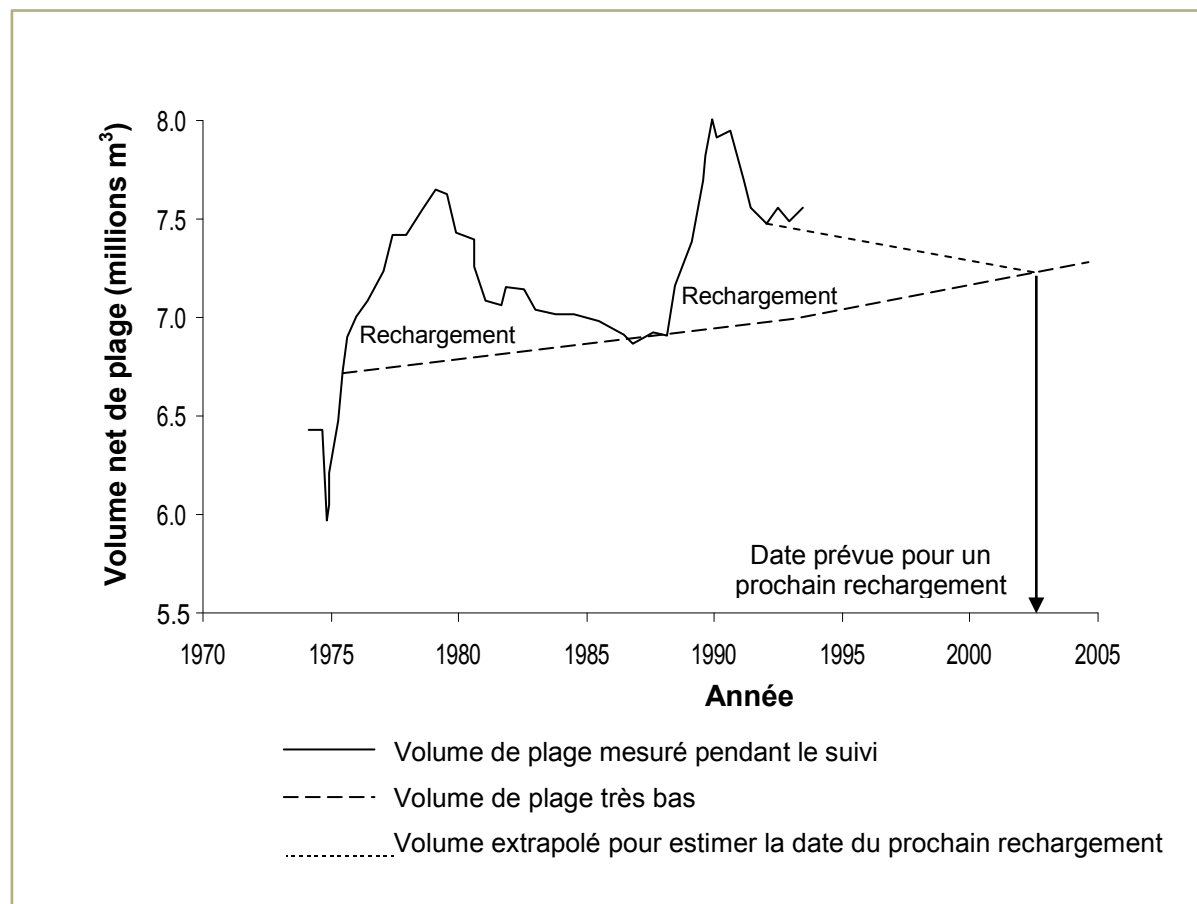
L'introduction de matériaux permet de reformer la plage et de maintenir une certaine largeur suffisante pour offrir une protection contre les tempêtes. Cette méthode est majoritairement utilisée pour les plages de sable mais le terme peut aussi désigner un approvisionnement en galets ou même en pavés. Cependant, le but est de s'assurer que le matériau utilisé pour la reconstitution de la plage est bien compatible avec la partie existante naturelle (ou d'origine) (Reeve et al., 2004). La technologie de rechargement est souvent mise en œuvre conjointement avec la création artificielle de dunes (cf. section 4.1.2).

Cette technique est bénéfique car elle permet la dissipation de l'énergie des vagues ; lorsque ces dernières remontent sur la plage puis se brisent, elles perdent en force. Les différentes formes et pentes des profils de plage n'ont pas la même interaction avec les vagues. La forme en coupe transversale de la plage influence ainsi sa capacité à atténuer l'énergie des vagues. Une plage est dite « dissipative » – c'est-à-dire ayant une forte capacité de dissipation – lorsqu'elle est large et peu inclinée, tandis qu'une plage dite « réflexive » – c'est-à-dire qui réfléchit l'énergie – est étroite et pentue, et ne réussit qu'à atténuer faiblement l'énergie des vagues. La logique du rechargement de plage consiste donc à transformer une plage réflexive fortement soumise à l'érosion en une plage dissipative plus large permettant une meilleure protection contre ce phénomène (French, 2001).

En plus de participer à la dissipation de l'énergie des vagues, cette méthode répond au problème de déficit sédimentaire qui est la cause profonde de l'érosion. Dans ce but, de larges quantités de matériaux composant la plage sont introduites au stock sédimentaire de la côte. Elles proviennent d'une source externe de sédiments, que l'on appelle aussi le site d'emprunt. Le terme de « bilan sédimentaire » désigne l'équilibre délicat qui existe entre les sédiments entrants et sortants. De même que pour un compte en banque, lorsque le volume ajouté est plus élevé que le volume retiré, l'on assiste à une accumulation et la côte avance vers la mer ; à l'inverse, si l'on retire plus que ce que l'on ne dépose, c'est une érosion qui se produit (Morton, 2004). Le rechargement de plage répond au déficit en sédiments – la cause de l'érosion – en introduisant de larges quantités de matériaux le long du littoral. Cela peut avoir comme effet de faire avancer la côte vers la mer.

Il convient de noter que cette technique ne ralentit pas l'érosion, mais fournit simplement des sédiments provenant d'une source externe sur lesquels la force d'érosion va continuer d'agir. En ce sens, le rechargement de plage offre davantage une barrière vouée à canaliser les attaques plutôt qu'une réelle protection fixe contre l'érosion côtière.

La force d'érosion agissant en continu, il est probable que l'état de la plage se dégrade à nouveau et nécessite un réapprovisionnement. Le schéma 4.1 montre l'évolution du volume d'une plage au Royaume-Uni alimentée en sédiments. On peut observer que le volume de celle-ci diminue avec le temps en raison de l'érosion naturelle. Lorsque le déclin atteint un niveau critique, il convient de conduire à nouveau un rechargement afin d'éviter que les infrastructures côtières ne subissent des dégâts.

Figure 4.1: Données illustrant le volume de plage à Bournemouth Beach, Royaume Uni

Source: Adapté de Harlow and Cooper (1996)

Il existe plusieurs méthodes de rechargement, comme le positionnement au moyen de drague, camion ou convoyeur à bande. Le sable peut être placé de manière à étendre la largeur de la plage ou encore en tant que dépôt sous-marin qui sera ensuite progressivement déplacé vers la terre par l'action naturelle des vagues – cette pratique est actuellement utilisée aux Pays-Bas (VanKoningsveld et al., 2008). Le dépôt sous-marin participe également à la dissipation de l'énergie des vagues, réduisant ainsi son impact sur la côte (Dean, 2002).

Le dragage de matériaux au large est souvent favorisé car cela permet d'en obtenir de grandes quantités en provenance d'une zone où le prélèvement et le transport vers la terre ne perturbent pas outre mesure les communautés du littoral (Dean, 2002). Lors du dragage, les sédiments sont extraits du fonds marin accompagnés de grandes quantités d'eau. L'état liquide du mélange permet de le transporter vers la côte par des tuyaux flottants ou sous-marins, ou par la méthode en « arc-en-ciel » (« rainbow », terme anglais) (voir illustration de la figure 4.2).

Figure 4.2: La méthode en « arc-en-ciel » de transfert des matériaux de reconstitution vers la plage



Le remblai est déchargé au moyen d'un jet partant de la proue d'un navire placé le plus près possible de la côte.

Source: Photo: Dredging International

Une alternative au dragage offshore est le prélèvement de sédiments provenant de sources terrestres et compatibles avec la plage. Ceux-ci sont ensuite transportés sur le site de réception par camions. Cependant, seul un faible pourcentage du rechargement s'effectue de cette manière et cette approche convient davantage à des opérations de petite échelle, ce mode de transport exigeant davantage de main d'œuvre (Dean, 2002).

Une fois les sédiments transportés à l'endroit de la plage concernée, ils doivent ensuite être déposés de manière appropriée. Dans le cas de sites de dragage offshore, ils peuvent être déversés sous forme de dépôt sous-marin. Cependant, le rechargement se fait plus généralement en acheminant les sédiments jusqu'à la côte. Ensuite, il est possible de retravailler les matériaux pour en faire une plage plane. Il est également possible de créer des dunes artificielles sur la portion terrestre de la plage (cf. section 4.1.2) à l'aide de bulldozers ou autres machines.

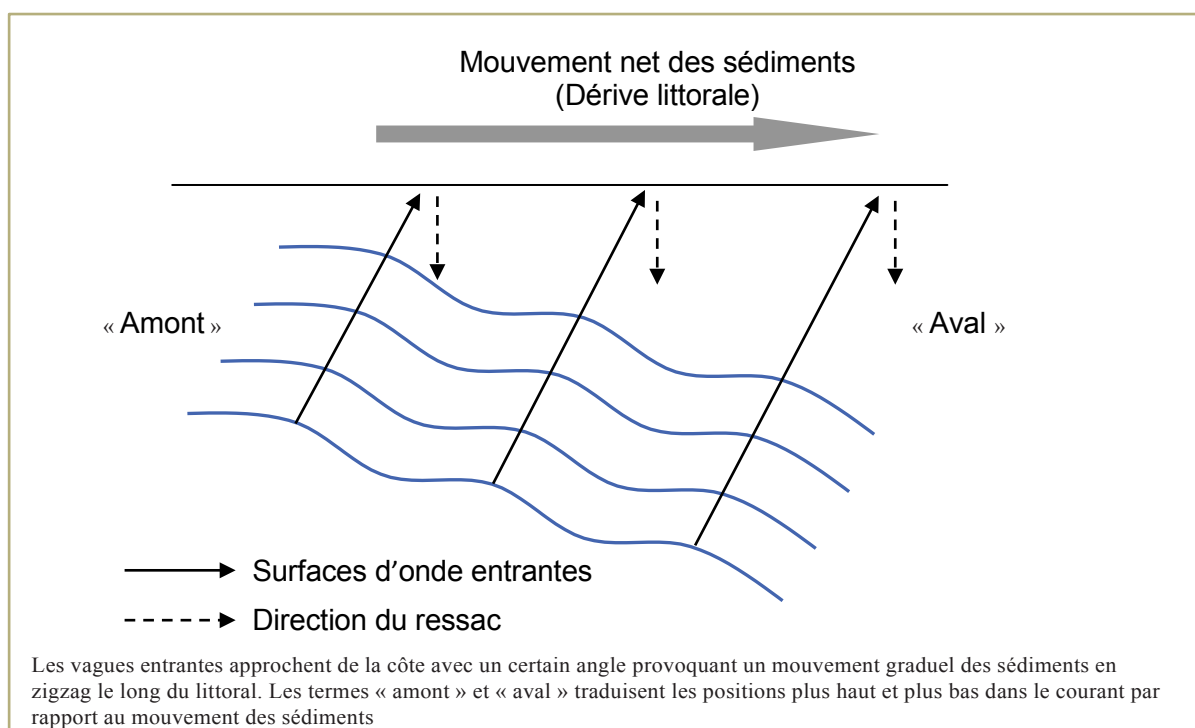
Les avantages liés au rechargement de plage

Lorsqu'elle est bien menée, la méthode du rechargement présente des avantages nombreux et variés. Tout d'abord, cela permet de réduire les effets négatifs de l'érosion côtière en fournissant des sédiments supplémentaires pour pallier celle-ci. L'érosion continuera d'agir sur le littoral, mais la plage plus large et plus profonde offrira un tampon de protection aux infrastructures côtières et autres actifs contre celle-ci

et contre les dégâts provoqués par les tempêtes. Le rechargement de plage est une solution de gestion flexible des côtes en ce sens qu'elle est réversible. Ceci présente le grand avantage de permettre autant que possible la transmission des solutions à la génération suivante.

La redistribution le long de la côte des sédiments déposés aura lieu à travers un processus appelé la dérive littorale, sous l'action des vagues, des marées et du vent. La dérive est causée par les vagues qui approchent de la côte de façon oblique, apportant avec elles le sédiment. Cependant, lorsque les vagues se retirent vers la mer, le mouvement est toujours perpendiculaire à la côte. Ceci initie un mouvement graduel des sédiments le long de la côte, comme le montre la figure 4.3. Grâce à cette redistribution naturelle, le rechargement de plage est susceptible d'avoir des répercussions positives sur les zones adjacentes qui n'ont pourtant pas été alimentées. Ceci présente de grands avantages comme de réduire l'érosion de la plage et des falaises de la cellule côtière dans son ensemble¹.

Figure 4.3: Schéma illustrant la dérive littorale



Source: Adapté de French, 2001

Le rechargement sédimentaire peut compléter des mesures de protection dures telles que les brise-lames (cf. section 4.1.3), en faisant office de dernière ligne de défense. L'existence d'une large plage de sable en face de telles structures réduit fortement l'énergie des vagues qui les atteint, offrant ainsi une protection supplémentaire.

L'introduction de sédiments proches des composants initiaux la plage aidera à conserver son paysage naturel tout en offrant une meilleure protection contre l'érosion et l'inondation des côtes. L'apparence naturelle des projets de rechargement en fait également une solution esthétique.

¹ Une cellule sédimentaire côtière est une portion de côte dans laquelle le mouvement de sédiments est contenu. Les sédiments d'une cellule ne sont ni transportés ni partagés avec les cellules adjacentes.

Comme mentionné au chapitre 2, le tourisme côtier dépend largement du « soleil, de la mer et de la plage de sable ». Par conséquent, le rechargement des plages permet de promouvoir les loisirs et le tourisme dans ces régions (Nicholls et al., 2007b). Cela peut servir à encourager le secteur du tourisme dans les endroits où il existe déjà ou à attirer des touristes dans de nouveaux lieux soutenant ainsi le développement de ces zones.

Il est aussi possible d'en obtenir des avantages écologiques. Des dispositifs de rechargement ont été mis en place en tenant compte des conditions de vie des tortues de mer, offrant ainsi à ces créatures de nouvelles aires de nidification. Ceci est un bon exemple de mesure qui pourrait, à son tour, servir à promouvoir « l'écotourisme » entraînant ainsi des bénéfices supplémentaires en termes de développement.

Aujourd'hui, le rechargement est très populaire dans les pays développés, mais a également été mis en pratique dans les nations en développement, telles que le Brésil (Veracruz, 1972; Elfrink et al., 2008), le Nigéria (Sunday & John, 2006; voir aussi le tableau 4.4), la Corée (Kim et al., 2008), le Ghana (Nairn et al., 1998) et la Malaisie (Brøgger & Jakobsen, 2008). La technologie et les méthodes impliquées sont bien établies et il est possible de trouver de nombreux fournisseurs expérimentés dans ce domaine capables de mettre en œuvre de tels projets dans le monde entier.

Les inconvénients liés au rechargement de plage

Comme rappelé au début de ce chapitre, le réapprovisionnement sédimentaire des plages n'est pas une solution permanente contre l'érosion du littoral. Des rechargements périodiques, ou « top-ups », seront nécessaires pour maintenir l'efficacité du dispositif. Cela exige des réinvestissements réguliers, qui peuvent être considérés comme des frais d'entretien tels que ceux qui sont associés aux structures de technologie dure. De même que pour tout type d'ouvrages de protection de la côte, réduire le risque d'inondation et d'érosion donnera une impression accrue de sécurité. Dans une certaine mesure, cela est une bonne chose. Cependant, même en présence de mesures protectrices, les zones côtières restent sensibles aux phénomènes extrêmes d'inondation et d'érosion, et resteront exposées aux catastrophes naturelles ayant de longues périodes de retour. Si elles ne sont pas régulées attentivement, les mesures de protection pourraient encourager le développement imprudent de ces zones à risques à cause de ce sentiment accru de sécurité.

Le dépôt de sédiments sur les plages peut générer un certain nombre d'effets négatifs sur l'environnement, tels que l'enfouissement direct d'animaux et d'organismes résidant sur la plage, des doses létales ou nuisibles de turbidité de l'eau – causée par l'agitation des sédiments – et des compositions altérées de sédiments qui pourraient affecter les types d'animaux vivant dans cette zones (Dean, 2002). Par conséquent, les projets doivent être conçus en accordant de l'importance aux conséquences négatives potentielles pour l'environnement. Il convient de porter une attention particulière aux répercussions sur les espèces rares ou importantes résidant dans la zone côtière.

Par ailleurs, le placement de matériaux de reconstitution peut perturber les habitats sur la plage et dans l'océan, comme la nidification des oiseaux et des tortues de mer, si les dispositifs ne sont pas conçus de manière appropriée. Cela est particulièrement le cas si la taille des grains de sable ou la composition ne correspond pas aux composantes d'origine de la plage (IOC, 2009).

La mise en pratique du rechargement de plage devrait augmenter dans le futur, et par conséquent la demande en sédiments de qualité. La disponibilité limitée de grands fournisseurs ajoutée à la hausse de la demande en projets de rechargement ont déjà causé une augmentation des prix des sédiments aux Pays-Bas, où ils sont largement utilisés (Hillen et al., 2010). Cette tendance à la hausse devrait être observée ailleurs dans le futur.

Les coûts et besoins financiers

Linhام et al. (2010) ont fait d'importants travaux de recherche sur le coût unitaire du rechargement de plage. Ils ont montré que les coûts variaient typiquement entre 3-15 US\$/m³ (aux niveaux de prix de 2009) là où des sites de dragage étaient disponibles localement. Le facteur le plus important pour déterminer les coûts du rechargement se trouve être la distance de transport des matériaux prélevés.

La plupart de ces données ont été collectées dans des pays développés, car c'est là que la majeure partie des projets de rechargement a lieu actuellement. Dans les pays en développement, les coûts devraient en général être similaires voire plus élevés en raison de leur industrie moins développée en matière de technologie côtière.

Les coûts varient largement d'un pays à l'autre. Cela est dû à plusieurs facteurs détaillés dans l'encadré 4.1.

Encadré 4.1: Facteurs influençant les coûts à l'unité du rechargement de plage

- Taille du projet et économies d'échelle associées
- Distance entre le site de dragage et le site de dépôt
- Nombre de voyages nécessaires entre le site de dragage et la zone de rechargement
- Forme du fond marin sur le site d'emprunt – cela détermine la taille de drague qui peut être utilisée et influence donc le nombre de voyages nécessaires
- Matériaux de reconstitution – les matériaux plus grossiers causent une usure plus grande du matériel, un coût susceptible d'être transféré sur les clients par les prestataires
- Pertes estimées en matériaux
- Disponibilité (et taille) des dragues
- Degré d'exposition du site – cela détermine le type de drague à utiliser et peut aussi raccourcir les heures de travail si le site est soumis à des vagues et des vents forts
- Coefficient des marées – Des coefficients élevés limitent la durée pendant laquelle les dragues peuvent s'approcher suffisamment de la côte pour déposer les matériaux. Cela peut aussi affecter la durée du projet.
- Exigences des tiers

Source: CIRIA, 1996; Linham et al., 2010

Le paiement des fournisseurs est normalement calculé par rapport au volume de sédiments livré. Cela exige d'établir des rapports sur les parties visibles et sous-marines de la plage avant et après le rechargement.

Le coût du processus de suivi doit être pris en compte dans le coût total du projet. Celui-ci peut varier selon les coûts de la main d'œuvre locale et pourrait ainsi mener à de larges différences selon les pays (Mason, communication perso.).

Les capacités institutionnelles et organisationnelles requises

Les opérations de rechargement de grande échelle exigent des études techniques approfondies et des connaissances et du matériel spécialisés. Cela peut par exemple inclure des dragues et des tuyaux à

louer auprès d'un fournisseur spécialisé. Cependant, il est également possible d'effectuer le rechargement à une plus petite échelle. Le matériau constituant la plage peut être transféré de sources terrestres ou encore du lieu de dépôt vers la zone d'érosion par camions. Compte tenu de l'échelle réduite de cette approche et du fait que l'équipement utilisé soit déjà disponible, le transport par camions peut être plus pratique au niveau local.

Une fois l'opération menée, un processus continu de suivi des plages est nécessaire afin d'évaluer le succès du rechargement sédimentaire et de déterminer le moment où une nouvelle intervention sera nécessaire. Avec la formation et les technologies appropriées à disposition, le suivi devrait pouvoir être effectué au niveau local. Cependant, il convient d'évaluer les dispositifs de rechargement dans leur ensemble, ce qui peut nécessiter la participation de plusieurs communautés si l'opération est menée à grande échelle.

Les facteurs entravant la mise en œuvre

Le rechargement de plage exige l'identification d'une source appropriée de sédiments à une distance relativement proche du lieu de dépôt. Cela garantit un niveau de coûts raisonnable. La disponibilité de sédiments varie largement et les sources compatibles peuvent ne pas être aisées à trouver. C'est pourquoi la popularité croissante de cette méthode dans le monde peut être à l'origine de problèmes, la demande en sédiments étant en hausse. Ceci est déjà le cas pour des petites îles où le sable est souvent transporté sur de longues distances pour ce type de projets.

Le rechargement nécessite du matériel et des connaissances très spécialisés, y compris des dragues et des tuyaux qui doivent être loués auprès de fournisseurs spécialisés. Hillen et al. (2010) notent le nombre limité de grands fournisseurs et soulignent également la hausse des coûts associés en raison de la demande élevée. Les caractéristiques du site d'opérations influenceront aussi le type et la taille de dragues qui peuvent être utilisées – ceci peut limiter encore davantage les fournisseurs disponibles.

Le degré de connaissance de l'opinion publique sur la manière dont fonctionnent les dispositifs de rechargement de plage peut également présenter un obstacle. Cela est notamment vrai lorsque l'intervention consiste à intervenir sur l'avant-plage ou à décharger des dépôts sous-marins. En utilisant ces techniques, les avantages de la méthode peuvent ne pas être visibles immédiatement, et à moins que le public soit informé sur le fonctionnement du dispositif, il est possible qu'il doute des bénéfices liés au rechargement et s'oppose à de tels projets. Il convient, par ailleurs, de faire prendre conscience aux personnes que le rechargement n'est pas une solution permanente et que des réapprovisionnements vont avoir lieu dans le futur. Si cet aspect n'a pas été clairement communiqué, le public pourrait croire que le dispositif a échoué et ne pas voir d'un bon œil les dépenses concernant ces projets. Ceci sera d'autant plus vrai dans le cas où le financement public est utilisé pour couvrir les coûts du rechargement.

Les facteurs favorisant la mise en œuvre

Cette méthode peut également servir d'option rentable pour le dragage d'entretien des ports et des canaux. L'utilisation de déblais de dragage peut également aider à lutter contre le potentiel manque de sédiments adéquats au large. Cependant, il est nécessaire de faire attention lors de l'utilisation de ces matériaux, les dragages dans les ports pouvant révéler des taux de pollution élevés qui doivent être strictement contrôlés.

Le rechargement de plage peut également être combiné avec d'autres technologies d'adaptation et peut aider à pallier les inconvénients des méthodes dures, comme l'affaissement de la plage et un déficit en sédiments en aval des structures

Si le rechargement offre des avantages écologiques, cela peut également servir à encourager l'écotourisme et pourra fournir une source de revenus à l'économie locale.

Etude de cas : La plage de Bournemouth, Poole Bay, Royaume-Uni

N'ayant pu trouver des études de cas bien documentées sur le système de rechargement de plage dans les pays en développement, celui de Poole Bay est utilisé ici. Les principes employés sont applicables dans le monde entier.

Poole Bay, située sur la côte sud de l'Angleterre, a subi des rechargements périodiques depuis les années 1970 à aujourd'hui. A ce jour, l'on compte trois projets à grande échelle mis en œuvre en 1974-1975, 1988-1990 et 2005-2006. Comme le montre la figure 4.4, les rechargements ont aidé à entretenir une large plage de sable, élément important pour l'économie touristique de la région. Ces activités, associées à un processus de contrôle régulier et systématique, fournissent une étude de cas sur les bonnes pratiques du rechargement de plage.

Figure 4.4: La plage de Bournemouth, Poole Bay, UK



Source: Photo: Robert Courtman, Wikimedia Commons

La décision d'employer la méthode du rechargement sur ce site a été prise à la suite d'une période qui a vu les défenses dures, telles que les brise-lames et les épis, subir des dégâts importants. Ces mesures de protection n'étaient pas assez efficace pour retenir les sédiments de la plage (Harlow &

Cooper, 1996). La méthode de rechargement été sélectionnée pour répondre à ces problèmes. En effet, elle a été considérée comme étant bénéfique pour le secteur touristique de la zone, largement alimenté par la présence de plages de sable (Cooper & Harlow, 1998).

Un projet pilote, connu sous le nom de Projet d'amélioration de la plage 1 (BIS1) a été lancé en 1970. Il consistait au dépôt de 84,500 m³ de sable dragué au niveau moyen des basses eaux sur 1.8 km de front de mer (Lelliott, 1989). Les résultats et l'expérience acquise par ce projet ont convaincu les autorités de mettre en œuvre un réapprovisionnement à grande échelle en 1974-1975 (BIS2). Cette étape a consisté au pompage de 654,020 m³ de sable marin dragué directement sur 8,5 km de front de mer (Cooper & Harlow, 1998).

Lors du projet de 1974-1975, ce sont 749,300 m³ de matériau supplémentaire qui ont rejoint l'avant-plage. Le suivi a révélé qu'une grande partie s'était pour finir déplacée sur la côte pendant les mois suivants, participant ainsi à alimenter la plage (Hodder, 1986).

Le rechargement du projet BIS2 a rempli sa fonction durant treize ans, mais en 1987, le suivi révéla des volumes de plage significativement bas et le besoin d'une nouvelle intervention. Cette situation avait en effet entraîné l'endommagement du mur de soutien de la plage et une migration du niveau moyen des hautes eaux (MHW, acronyme anglais) jusqu'au pied du mur lui-même (Harlow et Cooper, 1996). Le BIS3 a donc été initié en réponse au problème et a été conduit en trois phases entre 1988 et 1990.

Ce projet a consisté au dépôt de 998,730 m³ de sédiments directement sur la plage. Les matériaux de remblai ont été pompés dans les terres situées au-dessus du MHW. Le sable a ensuite été redistribué à travers les processus naturels tels que l'action des vagues afin que la plage reforme ensuite son profil spécifique (Harlow et Cooper, 1996). Par un heureux hasard, un dragage avait lieu au même moment au port de Poole Harbour. La disponibilité des matériaux provenant de cette source a permis de réduire considérablement les coûts de l'intervention (Turner, 1994).

Utiliser le sable dragué dans les ports et les canaux permet de réduire les coûts du rechargement. Si cela pouvait être fait dans les pays en développement, cette méthode devrait devenir plus économique. En Inde par exemple, le rechargement est souvent trop coûteux pour être utilisé comme moyen de défense contre l'érosion côtière. Il a cependant été démontré que dans certaines zones où les sédiments sont issus du dragage de canaux de navigation et de ports, le coût est suffisamment réduit pour permettre sa mise en pratique (Rao et al., 2009).

Pour éviter des dégâts coûteux infligés aux infrastructures côtières comme cela a été le cas en 1987, la stratégie de rechargement a évolué à la suite du BIS3. Les futures interventions de réapprovisionnement sont planifiées de manière à être non seulement plus fréquentes, mais également plus localisées, utilisant ainsi de plus petits volumes de sédiments (Linham, 2008). Ceci diffère des pratiques passées consistant à ne pas effectuer de rechargement jusqu'à ce que la plupart des matériaux de la plage aient disparu. L'objectif est de maintenir le volume à un niveau où les dégâts peuvent être évités ou conduire à des pertes initiales moins importantes en sédiments à la suite du réapprovisionnement (Cooper & Harlow, 1998). Conformément à ces orientations, BIS4 a été divisé en plusieurs petits projets, espacés entre 2005 et aujourd'hui (voir le tableau 4.3). Chaque projet était chargé d'une partie spécifique de la plage, au lieu de recharger en une seule fois le système dans son ensemble.

Tableau 4.3: Les opérations de rechargement de Poole Bay entre 2005 et 2009

Dispositif d'amélioration	Année	Volume de remblais déposé (m ³)	Source des matériaux
BIS4.1	2005/06	600,000	Dragage du port
BIS4.2	2006/07	898,000	Site de dragage au large
BIS4.3	2008	70,000	Site de dragage au large
BIS4.4	2009	70,000	Site de dragage au large
BIS4.5	2010	TBC	TBC

Les volumes de remblais déposés sur les différentes parties de la plage de Poole Bay entre 2005 et 2009

Le suivi de l'état des plages est un aspect important du processus de rechargement à Bournemouth depuis le début des activités sur le site². La nouvelle approche qui consiste au rechargement en petites quantités et de manière régulière attribue un rôle plus important que jamais au suivi du projet.

Des enquêtes biannuelles relatives au profilage de plage furent lancées en 1974 et ont été maintenues depuis lors (Harlow & Cooper, 1996). L'origine des lignes de profil a été marquée sur la digue et l'orientation des profils également enregistrée afin de permettre des études répétées (Cooper & Harlow, 1998). Les profils sont mesurés en deux phases; une série de relevés topographiques a lieu au-delà du MLW, tandis que d'autres bathymétriques sont effectués à partir de la MLW et jusqu'à environ 450 m au large. Ce repère est calculé approximativement pour représenter la profondeur de fermeture³ (Harlow & Cooper, 1996). Des enquêtes détaillées à partir de point coté sont également menées annuellement et sont utilisées comme base pour modéliser les fluctuations des niveaux de plage. Des relevés aériens et des LIDAR⁴ sont par ailleurs entrepris environ tous les cinq ans afin d'obtenir une image détaillée de la topographie locale (Mason, comm. pers.).

La collecte d'informations concernant le profil de plage a plusieurs avantages. Cela permet tout d'abord de calculer le volume net de la plage et l'actuel taux d'érosion afin de pouvoir estimer des dates probables pour un futur réapprovisionnement. Cela permet donc de planifier le financement de ces activités. Le processus de suivi indique également le moment où le rechargement devient nécessaire, et ce avant que des dégâts irréparables ne soient infligés aux défenses et infrastructures côtières. Cela garantit de plus le maintien de volumes de plage constants pour les zones de loisirs. Enfin, l'analyse des taux d'érosion dans la période suivant le rechargement peut permettre d'améliorer les futurs projets. Par exemple, cela peut permettre d'ajuster le volume déposé afin de réduire le phénomène d'érosion accélérée qui suit l'approvisionnement.

Les avantages liés au processus de suivi sont devenus importants en raison du tournant opéré dans la stratégie de gestion qui de réactive est devenu proactive. Sur le long terme, cela aura des avantages économiques comme une réduction des coûts engendrés par les dégâts sur les digues, et permettra également d'avoir un financement disponible en amont pour les futures interventions (Cooper & Harlow, 1998). En exposant la nécessité d'un nouveau rechargement, le suivi garantit de plus que le standard de protection contre l'inondation et l'érosion des côtes ne tombe pas en deçà d'un niveau tolérable.

2 Consulter le site www.channelcoast.org pour plus d'informations sur le suivi de l'état des plages à Bournemouth.

3 Un point situé au large à partir duquel le mouvement de sédiments est considéré comme négligeable (Hallermeier, 1981).

4 Une méthode aérienne de relevé topographique qui utilise des lasers pour mesurer les distances

Ce passage à une stratégie proactive est important. Si cet exemple pouvait être suivi ailleurs, des économies significatives pourraient être réalisées et l'efficacité de la gestion côtière à long terme s'en trouverait améliorée.

4.1.2 Les dunes de sable artificielles et la réhabilitation des dunes

Définition

Les dunes naturelles sont des dépôts de sable formés par le vent, représentant une réserve en sédiments située dans la zone juste au-dessus du niveau normal des marées hautes (French, 2001). Les dunes artificielles sont des ouvrages techniques créés de façon à imiter le fonctionnement des dunes naturelles.

La réhabilitation de dunes désigne la restauration de dunes naturelles ou artificielles endommagées pour qu'elles retrouvent un état satisfaisant voire leur niveau initial de fonctionnement afin qu'elles offrent une protection optimale des côtes. La création et la réhabilitation artificielles de dunes sont des technologies visant à réduire l'érosion et l'inondation des terres basses adjacentes.

Description

Les dunes apparaissent naturellement le long des littoraux sableux les moins développés. La figure 4.5 en montre un exemple. Là où elles sont présentes, elles jouent un rôle de défense à deux niveaux:

1. Elles représentent une barrière entre la terre et la mer, tout comme les digues.
2. Les dunes sont « dynamiques », en ce sens qu'elles interagissent fortement avec la plage, formant un système sans cesse en transformation en réaction aux évolutions du vent, du régime des vagues ou du niveau de la mer. Les dunes sont ainsi capables de fournir des sédiments à la plage lorsque cela est nécessaire à cause de l'érosion, et d'en garder en réserve si ce n'est pas le cas (French, 2001).

Figure 4.5: Dunes de sable sur la côte à Aberffraw, Anglesey, Royaume-Uni



Source: Crédit photo David Rayner, Wikimedia Commons

Il est clair que les dunes de sable naturelles sont un moyen de défense efficace contre l'érosion et les inondations des côtes. Cependant, un problème se pose car les larges plages de sable, l'environnement le plus propice à l'existence de dunes, attirent un fort développement. C'est pourquoi les dunes naturelles sont en déclin. Ajouté au risque plus élevé d'érosion provoqué par l'élévation du niveau de la mer (SLR) et par des vagues plus fortes, les dunes de sable sont menacées.

L'importance du rôle des dunes dans la protection des côtes a cependant été reconnue, et la construction de dunes artificielles ainsi que la réhabilitation de celles existantes sont des technologies d'adaptation au changement climatique qui sont envisagées dans les zones côtières.

Dans sa version la plus simple, la construction des dunes artificielles implique le positionnement sur la plage de sédiments issus du dragage de sources externes. Ces dépôts sont ensuite retravaillés pour former des dunes à l'aide de bulldozers ou d'autres moyens. Par conséquent, la construction de dunes est souvent entreprise en même temps que le rechargement de plage (cf. section 4.1.1), le sable étant déjà disponible.

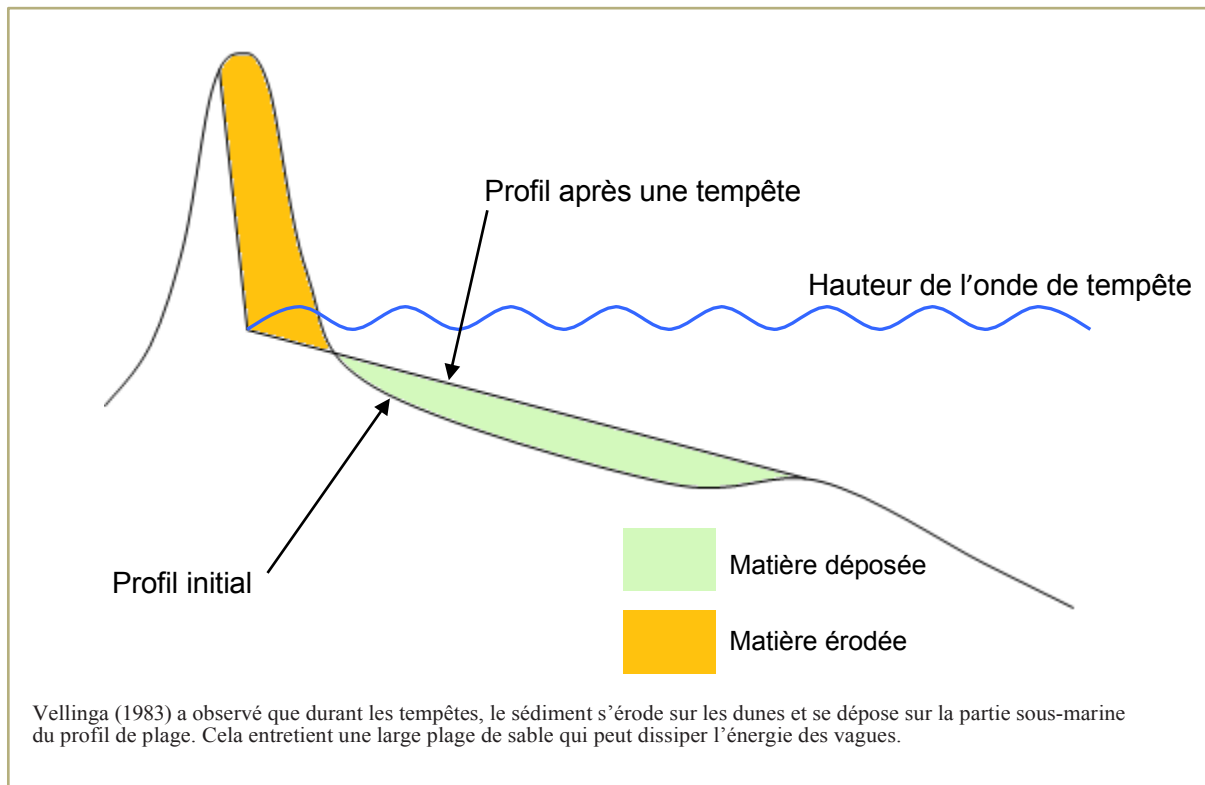
Il existe un certain nombre de méthodes pour réaliser la réhabilitation des dunes. L'une d'entre elles est la construction de palissades sur le côté maritime de la dune, afin de retenir le sable et d'aider à stabiliser les surfaces de sable nu. Cette méthode peut également être utilisée pour soutenir la croissance de la dune après que les bulldozers l'ont construite (Nordstrom & Arens, 1998). Des matériaux naturels tels que des branches ou des tiges de roseaux sont généralement utilisés pour la construction de ces palissades, car une fois le sable retenu, ils se désagrègent (Nordstrom & Arens, 1998).

Il est également possible de planter de la végétation dans le but de stabiliser des dunes artificielles ou naturelles. Cela permet l'accumulation du sable transporté par le vent autour de leurs racines – au bout d'un certain temps, cela provoque une croissance de la dune. Cela peut être réalisé en transplantant des unités végétales de pépinières ou de dunes en bon état à proximité (USACE, 2003). Le processus de plantation faisant usage d'outils très faciles d'accès, il peut être mené au niveau communautaire. Après un temps, les réseaux de racines présents dans les dunes aident également à leur stabilisation.

La création de dunes artificielles et la restauration peuvent être menées sur des plages existantes, des plages construites à travers la technique de rechargement, d'autres dunes, des territoires inexploités, des parties inexploitées de zones développées et des espaces actuellement entièrement développés mais qui peuvent être achetés afin de pouvoir restaurer les dunes (Nordstrom et al., 2000).

Les avantages liés aux dunes de sable artificielles et à la méthode de réhabilitation

Le rôle important joué par les plages de sable dans le processus de dissipation de l'énergie des vagues a déjà été évoqué à la section 4.1.1. Cependant, les plages de sable sont soumises à une transformation perpétuelle car elles réagissent continuellement aux éléments fluctuants comme le régime des vagues et le niveau de la mer. Le volume de sable contenu sur une plage varie ainsi constamment. Pendant les périodes où le volume de la plage est réduit, la côte est soumise à l'érosion. C'est dans cette situation que les dunes de sable peuvent être particulièrement utiles en offrant une réserve en sédiments disponible pour satisfaire aux forces d'érosion. Cela compense le sable dispersé et aide à maintenir de larges plages sableuses capables de dissiper l'énergie des vagues. Ce processus est illustré à la figure 4.6. Le volume de l'érosion peut être calculé à l'aide de l'équation de Vellinga (1983) qui nécessite de savoir la hauteur des vagues, le niveau extrême de la mer et la vitesse de chute des sédiments.

Figure 4.6: Illustration simplifiée de l'érosion causée par une tempête sur la dune

Source: Adapté de Charlier & De Meyer (1998) Réf: Charlier, R.H. et De Meyer, C.P. (1998) *Coastal Erosion: Response and Management*, Volume 70. Berlin: Springer Verlag

Si elles sont bien gérées, les dunes sont capables de fournir un niveau élevé de protection contre l'érosion et l'inondation côtières. Offrant une défense à la fois physique et tangible, elles peuvent même servir à encourager le développement durable dans la zone côtière.

Les dunes sont des éléments naturels et, à condition que la construction/l'initiation de dunes artificielles soit réalisée de manière bienveillante pour l'environnement, elles ne dénaturent pas nécessairement le paysage. De nombreuses plages de sable possédaient des dunes naturelles avant l'exploitation du littoral; en ce sens, le recours aux dunes artificielles pourrait même restaurer en partie le caractère naturel du site.

Les dunes fournissent également un habitat côtier précieux à de nombreuses espèces de plantes et d'animaux spécifiques. Elles peuvent ainsi être considérées comme un atout important à des fins tant écologiques que récréatives.

Les inconvénients liés aux dunes de sable artificielles et à la méthode de réhabilitation

Malgré le fait qu'elles soient un élément naturel présent sur de nombreuses côtes sableuses, les dunes gênent l'accès à la plage. Dans de nombreux cas, elles ont été retirées dans le processus de développement et les communautés se sont élargies en ayant un accès direct aux plages et une vue directe sur la mer. La reconstitution de dunes peut donc rencontrer l'opposition de la population locale si cela remet en cause ces facteurs.

La perte de surface est une autre problématique. Les dunes ont un volume d'occupation du sol raisonnable. Ce besoin d'espace augmente en conséquence si les dunes doivent avoir suffisamment de place pour s'adapter à la SLR et éviter ainsi la compression côtière. Le fait d'utiliser un terrain potentiellement exploitable pour la création ou la réhabilitation de dunes risquerait d'être mal perçu si tous les avantages ne sont pas présentés clairement. Par ailleurs, la construction de dunes pourrait avoir lieu sur une zone de plage dédiée à des fins touristiques et récréatives, ce qui limiterait son usage possible par le public.

Les coûts et besoins financiers

Les coûts des projets les plus basiques de construction de dunes consistant au simple dépôt de matériau dragué au large puis d'un travail de modelage par les bulldozers ne devraient pas être très différents de ceux du rechargement de plage en termes de prix au mètre cube de sédiments utilisé (cf. section 4.1.1). Des coûts supplémentaires pourraient cependant s'ajouter avec la plantation de gazon et la pose de palissades.

Les facteurs susceptibles d'influencer le coût à l'unité pour la construction de dunes sont détaillés dans l'encadré 4.2.

Encadré 4.2: Facteurs influençant le coût à l'unité de la construction de dunes

- Apport nécessaire de matériau dragué pour la construction/restauration des dunes ou si les palissades ou la végétation peuvent être employées pour aider à l'accumulation de sable.
- Disponibilité et proximité du matériau de construction compatible issu de sites terrestres ou du large
- Type de drague utilisé, taille et disponibilité
- Besoin ou non de palissades pour les nouvelles dunes afin d'empêcher l'érosion
- Besoin ou non de planter de la végétation sur les nouvelles dunes
- Fréquence nécessaire de réapprovisionnement artificiel de la dune ou la structure accumule-t-elle naturellement assez de sable.
- Taille du projet et économies d'échelle réalisées

Les capacités institutionnelles et organisationnelles requises

Si la construction de dune au moyen de sable dragué exige des connaissances et du matériel spécifiques tels que décrits à la section 4.1.1, la réhabilitation et la maintenance de dunes naturelles ou artificielles sont réalisables au niveau de la communauté.

La pose de palissades pour stabiliser le sable et soutenir la croissance de la dune est possible en employant des matériaux locaux et naturels comme des branches et des tiges végétales (Nordstrom & Arens, 1998). Cette mesure nécessite donc très peu de matériau ou assistance externes. Elle permet par ailleurs d'empêcher l'érosion causée par les activités humaines.

Comme cela a déjà été mentionné, planter la végétation se fait souvent au niveau local, y compris le travail d'entretien qui s'ensuit (Nordstrom & Arens, 1998). Il a été observé que le succès de cette approche

variait considérablement selon le degré d'implication des communautés (Nordstrom & Arens, 1998). Des campagnes de sensibilisation pourraient aider les personnes à mieux comprendre le rôle des dunes dans la protection des côtes, ce qui permettrait d'encourager les efforts locaux pour continuer à les préserver.

Qu'il s'agisse d'une création de dunes au moyen de processus naturels ou par positionnement artificiel de sable, le déplacement et la mise en forme des matériaux est une tâche réalisable avec des moyens techniques limités à condition que les matériaux nécessaires soient disponibles. L'emploi de bulldozers ou autre équipement de déplacement de terre est suffisant pour entreprendre des opérations ponctuelles de remise en forme des dunes. Les sédiments peuvent même être déplacés par bulldozers de la crête des dunes vers les zones plus basses, si la hauteur de crête dépasse les conditions prévues à la conception (Nordstrom & Arens, 1998).

Les facteurs entravant la mise en œuvre

Les expériences passées de projets de création ou de réhabilitation de dunes ont montré que l'un des obstacles majeurs est la difficulté de convaincre l'opinion publique et les élus municipaux du besoin d'entreprendre la construction ou le rehaussement des dunes (Nordstrom et al., 2000).

Des conflits d'intérêts pourraient également apparaître, notamment si le projet a lieu dans une zone principalement utilisée à des fins résidentielles ou touristiques. En effet, les propriétaires locaux pourraient se montrer soucieux de conserver une vue directe sur la mer. Dans ce cas, il est possible de maintenir les nouvelles dunes relativement basses et linéaires, bien que ceci puisse affecter le niveau de protection offert. Néanmoins, si tous les avantages que présentent les dunes en termes de protection côtière sont communiqués correctement, il est possible de minimiser l'opposition à ces projets.

Aux États-Unis, des responsables de gestion des côtes ont parfois construit des dunes qui n'étaient pas optimales afin de minimiser l'opposition de l'opinion publique et de familiariser les communautés locales avec la présence des dunes. Grâce à ce compromis, il sera possible dans le futur d'obtenir l'approbation du public pour des dunes de plus larges dimensions offrant de meilleurs niveaux de protection (Nordstrom et al., 2000).

L'espace occupé par les dunes peut également être à l'origine de l'opposition. Côté mer, des dunes plus larges pourraient réduire la surface de plage tandis que côté terre, elles seront très proches des habitations.

Les dunes de sable sont une forme dynamique de défense qui répond aux processus côtiers tels que le régime des vagues et du vent. Durant les mois d'été par exemple, les dunes peuvent croître en accumulant des sédiments tandis que durant les tempêtes d'hiver, la plage peut avoir accès aux sédiments en réserve dans les dunes pour lutter contre l'érosion. De nombreuses communautés sont uniquement familières avec les défenses statiques qui ne peuvent s'adapter aux conditions locales. Les dunes réagissant de manière drastiquement différente aux tempêtes, cela peut amener les communautés à protester contre leur usage, notamment là où la stabilisation du littoral est l'objectif à long terme (Nordstrom et al., 2000).

Les facteurs favorisant la mise en œuvre

La restauration de dunes peut signifier beaucoup plus qu'une simple atténuation du problème ou une réparation. En effet, ce processus peut conduire à une meilleure compréhension et appréciation d'un écosystème menacé (Nordstrom et al., 2000). Les programmes de restauration peuvent être liés à des initiatives d'éducation à l'environnement destinées à rétablir la reconnaissance des paysages côtiers

naturels. Cela peut augmenter les chances de mise en œuvre de programmes similaires à d'autres endroits (Nordstrom et al., 2000).

En raison de facteurs tels que l'urbanisation, l'exploitation, le piétinement et la conversion, les dunes de sable sont en passe de se détériorer davantage et sont en déclin (French, 2001). Avec une meilleure compréhension du rôle joué par les dunes de sable dans la défense des côtes et une plus grande sensibilisation sur leur importance écologique pour les espèces vivant sur le littoral, la construction et la réhabilitation des dunes devrait devenir une méthode plus populaire. Ceci aura des effets bénéfiques sur la défense des côtes et sur la nature du littoral.

La protection des dunes répond à de multiples objectifs, tels que la protection de l'habitat, l'accès public aux ressources environnementales et récréatives, et la réduction des risques. Pour tous ces avantages et parce qu'elles sont moins onéreuses et plus esthétiques que d'autres solutions techniques, les dunes devraient rencontrer un soutien plus large de l'opinion publique dans le futur (Moser, 2000).

Etude de cas: Avalon, New Jersey, USA

Les auteurs n'ayant pu trouver d'études bien documentées sur la construction ou la réhabilitation de dunes artificielles dans des pays en voie de développement, le programme d'Avalon aux Etats-Unis est utilisé ici comme exemple. Les principes peuvent être mis en application partout dans le monde.

Avalon est situé à l'extrémité nord d'une île-barrière face à l'Atlantique dans l'Etat du New Jersey aux Etats-Unis. La région est fortement urbanisée et des infrastructures sont largement développées dans la zone côtière. La stratégie actuelle de gestion côtière sur le site consiste en un programme agressif d'aménagement des dunes. Ce choix a été fait pour (1) protéger un large nombre de maisons situées en zone basse et (2) parce que l'évacuation en cas d'inondation est rendue difficile par la présence des nombreux estivants et les routes situées en zone inondable. L'étude de cas qui suit est le résumé d'une étude menée par Nordstrom et al. (2002).

Le programme de gestion des dunes a commencé autour de deux activités: (1) construire des dunes tout le long du front de mer à l'aide de palissades et de végétation ; et (2) lever des fonds pour acquérir des lots de territoire côtiers inexploités afin de créer un segment en friche sur le littoral qui fournit assez d'espace aux formations naturelles pour évoluer naturellement. Cela offre ensuite une source de sable pour réapprovisionner les zones soumises à une forte érosion et un lieu d'expérimentation des stratégies de gestion compatibles avec l'environnement. Cela a aussi permis d'empêcher un développement plus poussé dans la zone à risques. Un autre aspect de la stratégie de gestion a été d'autoriser les propriétaires des terrains à planter de la végétation afin d'initier des processus naturels de croissance de dunes.

Bien que le programme ait commencé par rencontrer une résistance lors de son lancement en raison des coûts associés, de l'accès réduit à la plage et des vues sur la mer altérées, ceci a pu être surmonter par la suite en sensibilisant l'opinion sur l'efficacité des dunes en tant que moyens de protection côtière. Au cours du projet, il a même été possible d'augmenter graduellement la hauteur et le volume des dunes conformément au conseil prodigué par des organisations expérimentées en technologie d'inondation : le Corps des ingénieurs de l'armée des Etats-Unis (USACE, acronyme anglais) et l'Agence fédérale des situations d'urgence (FEMA, acronyme anglais). Le renforcement des dunes a été complété par un rechargement de plage répétitif utilisant les sédiments issus d'un canal proche.

Le début des années 1990 a marqué un changement dans la gestion du site. La municipalité a acquis trois grosses machines de terrassement, employées pour retirer le sable des parties de la côte ayant un surplus

en sable et le déposer ensuite dans les sections soumises à une forte érosion afin d'entretenir la plage et de maintenir les dimensions des dunes. C'est une solution efficace qui n'implique pas de technologie complexe et qui pourrait être mise en application dans les pays développés comme dans les pays en voie de développement.

Les pratiques de gestion de dunes en cours à Avalon se concentrent sur la lutte contre les inondations. Les dunes sont fertilisées par voie aérienne au printemps tandis que des volontaires locaux se chargent d'y planter de la végétation à l'automne. Un suivi de la plage et des dunes trimestriel est entrepris afin de s'assurer que le volume des dunes est suffisant pour surmonter les phénomènes météorologiques extrêmes, tandis que des inspections visuelles sont effectuées au printemps et à l'automne à la recherche de potentiels dégâts. Les sections soumises à une forte érosion sont rechargées en sédiments à l'aide de l'équipement de terrassement ainsi que des camions, tandis que les palissades endommagées le long des dunes sont réparées et remplacées si nécessaire.

Le programme de gestion de plage et des dunes a eu à ce jour de nombreuses conséquences bénéfiques pour les résidents. Tout d'abord, les primes d'assurance inondation ont connu une baisse en raison de la réduction des risques associés. De plus, la plage a gardé un profil naturel tout en permettant une large utilisation par la population, et enfin, les propriétés reconnues des dunes en matière de réduction des risques d'inondation ont permis de qualifier ces systèmes pour des financements externes qui serviront au remplacement des sédiments perdus.

Le succès du dispositif a été attribué à plusieurs facteurs. L'une des caractéristiques essentielle du programme est le volet éducation et sensibilisation auprès du public. Les parties prenantes concernées sont encouragées à s'éduquer elles-mêmes activement en lisant les informations affichées et en assistant à des réunions locales. Une lettre d'informations sur le quartier ainsi que des mises à jour sur les risques d'inondation sont également envoyées régulièrement aux propriétaires de terrains afin d'entretenir l'attention collective sur ces questions. De plus, acquérir une bonne connaissance du budget sédimentaire local est considéré comme essentiel pour garder le contrôle sur les réserves locales de sédiments. Pour minimiser l'opposition de l'opinion publique à ces activités, il peut être utile d'entreprendre l'acquisition de terrains et le lancement des programmes de construction de dunes au même moment que de forts épisodes de tempêtes. Enfin, la construction et l'entretien des dunes doivent se faire en harmonie avec les processus naturels. Cela permet d'améliorer l'efficacité de ces mesures et aide à maintenir l'apparence naturelle de la côte.

Cette stratégie de gestion peut servir de modèle pour une mise en œuvre dans d'autres municipalités développées du littoral qui souhaitent entreprendre des programmes de restauration et de gestion des dunes. Les principes devraient pouvoir être appliqués dans tous les pays, développés ou en voie de développement.

4.1.3 Les brise-lames

Définition

Les brise-lames ou murs de protection sont des constructions ayant pour fonction principale de protéger le littoral de l'avancée de l'érosion. Ils sont installés parallèlement au trait de côte et visent à retenir ou empêcher le glissement de terrain tout en offrant une protection contre l'action des vagues (CCNUCC, 1999). Bien que leur fonction principale soit la réduction de l'érosion, ils ont aujourd'hui acquis une mission secondaire de défenses contre l'inondation des côtes.

La forme physique de ces structures varie largement; les brise-lames peuvent être verticaux ou inclinés et construits avec des matériaux très divers. Ils peuvent également être désignés par les termes de revêtement ou de digue.

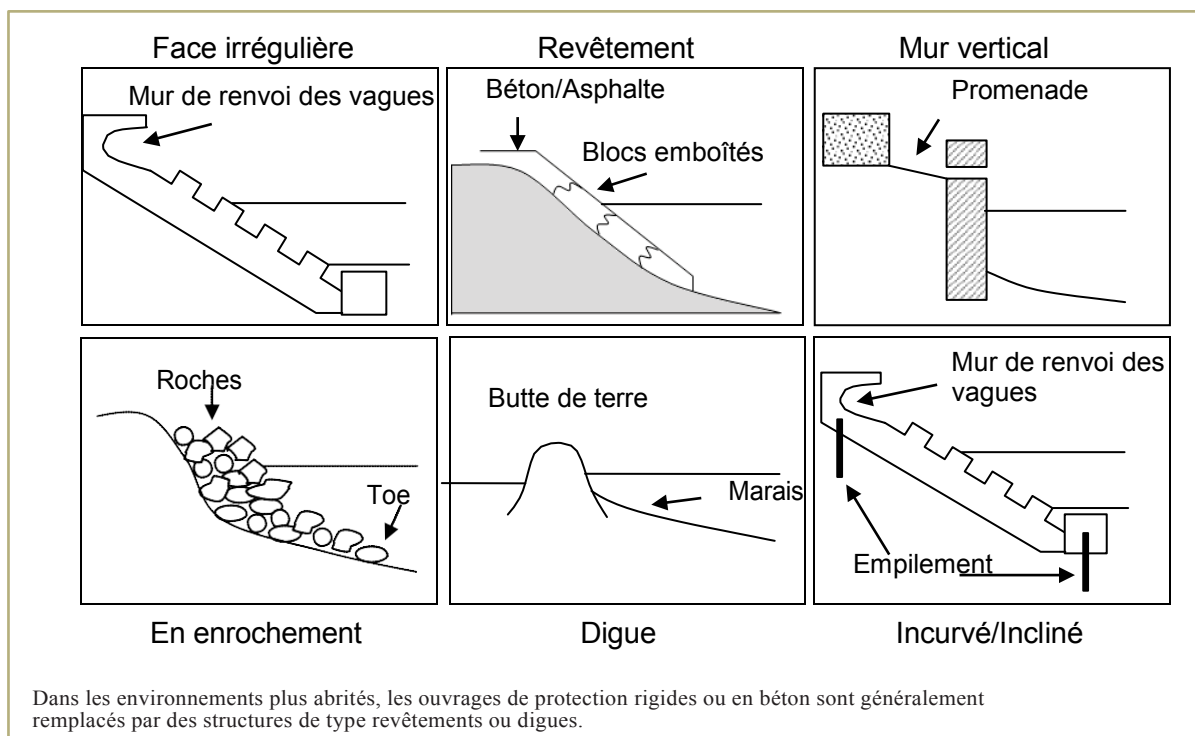
Description

Les brise-lames sont largement utilisés dans le monde et l'on trouve nombre de ces structures construites de manière ad hoc dans les pays en développement. Les exemples détaillés ici sont des modèles de bonne pratique mais les principes mentionnés peuvent être appliqués à des structures plus ponctuelles.

Ces murs de protection forment une frontière définie entre terre et mer. Ils sont souvent utilisés dans les endroits où un niveau d'érosion plus avancé causerait des dégâts importants, par exemple lorsque des routes et des bâtiments sont en train de s'effondrer dans la mer. Cependant, tandis qu'ils luttent contre l'avancée de l'érosion sur le littoral, ils ne traitent pas les causes de celle-ci (French, 2001).

Ces structures sont de plusieurs types et peuvent être des cloisons en acier, des blocs de béton monolithiques, des monticules en enrochement, de murs de briques, de blocs de béton ou de gabions⁵ (Kamphuis, 2000). Des formes typiques de brise-lames sont montrées à la figure 4.7. Ce sont généralement des constructions lourdes et inflexibles qui sont souvent coûteuses à ériger et qui exigent une supervision rigoureuse au moment de la conception et de la construction (CCNUCC, 1999).

Figure 4.7: Variation des formes de brise-lames



Source: Adapté de French, 2001

5 Casiers métalliques remplis de pierres

La forme de la face maritime du brise-lames est importante car elle influence l'absorption de l'énergie des vagues ; les surfaces souples réfléchissent cette énergie tandis que des surfaces irrégulières en dispersent la réflexion dans plusieurs directions (French, 2001). Les vagues sont susceptibles d'attaquer la structure avec force et d'éloigner le sable vers le large et le long de la côte (Kamphuis, 2000). Les brise-lames étant souvent construits en tant que dernier recours, la plupart de ces structures sont constamment soumises à une forte pression des vagues.

Les brise-lames ont généralement des fondations profondes pour garantir leur stabilité. Afin de surmonter la pression sur le côté terrestre de la structure, des corps-morts ou des ancrs terrestres peuvent être enterrés et reliés à la cloison par des barres (Dean & Dalrymple, 2002).

Les avantages liés aux brise-lames

L'avantage principal du brise-lames est qu'il fournit un haut degré de protection contre l'inondation et l'érosion des côtes. Une structure bien entretenue et conçue de façon adéquate va également fixer la limite entre la terre et la mer, ce qui garantit la fin de l'avancée de l'érosion- cela est bénéfique dans le cas où le littoral accueille des infrastructures importantes ou d'autres bâtiments.

En plus de fixer cette limite entre terre et mer, les brise-lames fournissent également une protection contre les inondations en cas de niveaux d'eau extrêmes. Construits de manière à supporter les forces supplémentaires, ils peuvent offrir une protection face à des niveaux d'eau allant jusqu'à leur propre hauteur. Dans le passé, la hauteur de nombreuses structures était calculée par rapport au plus haut niveau de crue enregistré (van der Meer, 1998).

Les brise-lames requièrent aussi bien moins d'espace que d'autres défenses côtières telles que les digues (section 4.1.4), notamment le brise-lames de type vertical. Il arrive souvent que les terrains situés sur la côte soient hautement convoités; en réduisant les besoins d'espace nécessaire pour les défenses côtières, les coûts généraux de construction pourraient diminuer. La plus grande sécurité garantie par la présence du brise-lames stimule de plus les valeurs foncières de l'arrière-pays et peut encourager les investissements et l'exploitation de la zone (Nicholls et al., 2007b). Par ailleurs, s'ils sont bien conçus les brise-lames ont une valeur d'aménité élevée – dans de nombreux cas, une promenade de front de mer a été intégrée à la structure ce qui encourage les loisirs et le tourisme.

Concernant l'adaptation au changement climatique, un autre avantage lié aux brise-lames est qu'il est possible de les améliorer progressivement en augmentant leur hauteur par rapport à la SLR. Il convient cependant que cette modification ne compromette pas l'intégrité de la structure. En effet, cette action laissera un « joint de construction » entre la nouvelle section et la structure préexistante. Les modifications doivent donc prendre en compte cette partie plus fragile et suffisamment la renforcer.

S'ils sont entretenus avec attention, les brise-lames peuvent se maintenir longtemps. Celui de Galveston au Texas par exemple, fut construit en 1903 et continue aujourd'hui de fournir une protection à la ville contre l'inondation et l'érosion côtières (Dean & Dalrymple, 2002).

Les inconvénients liés aux brise-lames

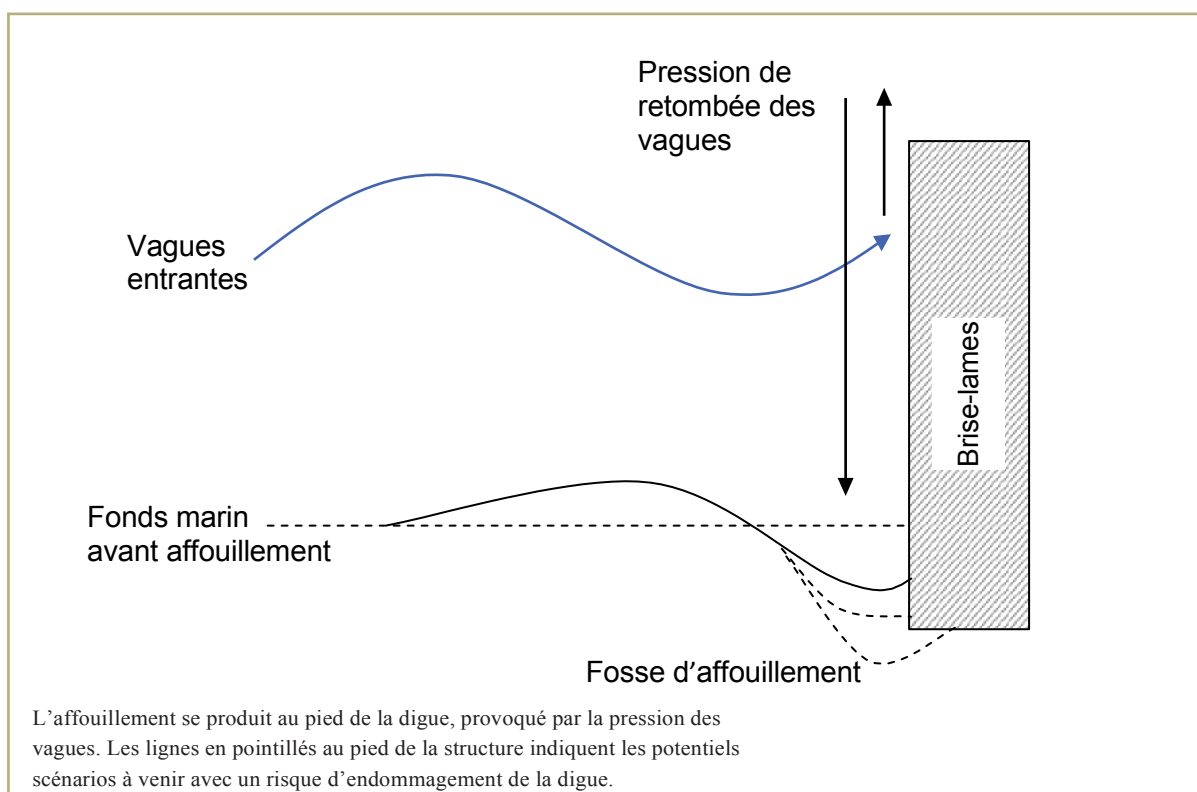
Les brise-lames sont soumis à des charges importantes causées par l'impact des vagues. Ces charges augmentent avec la profondeur de l'eau en face de la structure, car les vagues sont plus larges près de la côte. Les brise-lames sont conçus pour dissiper ou réfléchir l'énergie des vagues entrantes et ainsi, ils doivent être capables de rester stables sous des charges extrêmes de vagues. Les effets de la SLR, les

vagues plus hautes et les tempêtes plus intenses provoquées par le changement climatique sont autant d'éléments à prendre en compte.

Les digues verticales à surface lisse sont les moins efficaces pour dissiper l'énergie des vagues; les structures réfléchissent plutôt l'énergie en direction de la mer. Cette réflexion crée des turbulences risquant de mettre les sédiments en suspension (Bush et al., 2004), les rendant ainsi plus vulnérables à l'érosion. Le pire scénario est que l'énergie réfléchie interagisse avec les vagues entrantes en créant ainsi une onde stationnaire qui va causer de forts affouillements (French, 2001).

L'affouillement qui a lieu au pied de la digue est un problème particulier à la forme verticale. Ce phénomène est causé par le processus montré à la figure 4.8. Les vagues entrantes frappent la structure, faisant jaillir l'eau vers le haut. Lorsqu'elle retombe, la force qui frappe le fonds creuse un fossé d'affouillement devant la structure. Cela peut causer l'instabilité de la structure et est un facteur important d'échec pour de nombreux ouvrages de défense. Par conséquent, les coûts de maintenance peuvent s'avérer élevés (Pilarczyk, 1990a). Un processus similaire s'opère avec les digues inclinées, mais dans ce cas, l'affouillement a lieu plus loin du pied de la structure (voir la figure 4.12)

Figure 4.8: Coupe transversale illustrant l'affouillement lié aux brise-lames



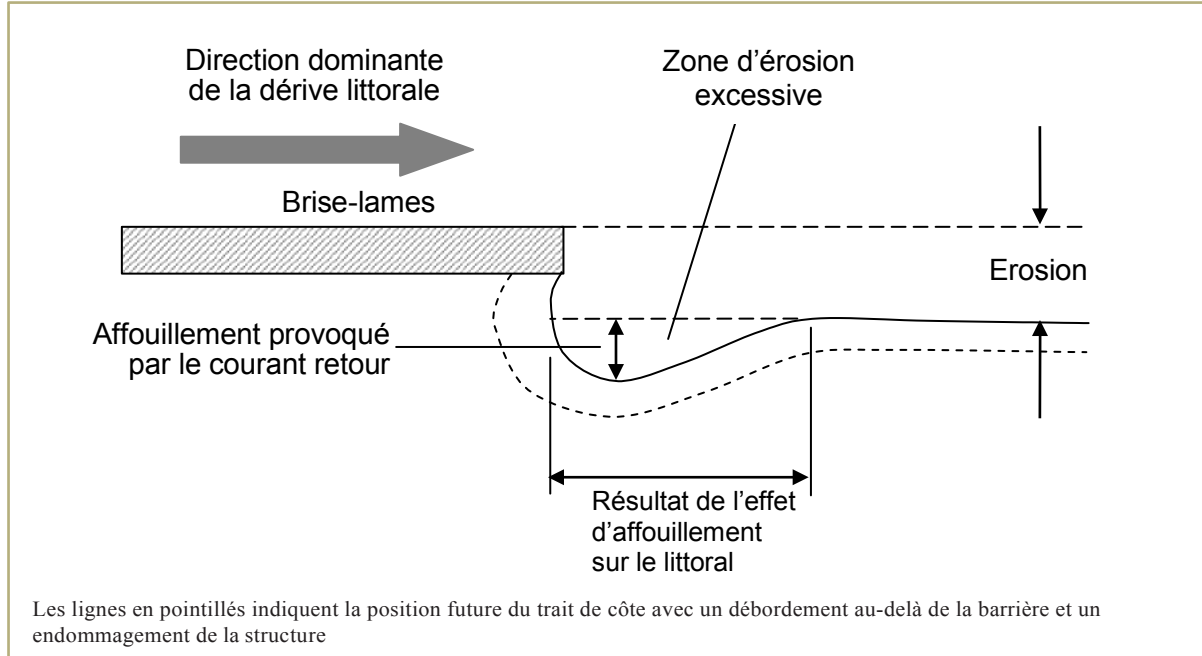
Les problèmes de réflexion des vagues et d'affouillement peuvent être en partie réduits en incorporant des pans inclinés et des surfaces irrégulières à la structure. Les pentes aident à briser les vagues et permettent ainsi de dissiper l'énergie tandis que les surfaces irrégulières divisent la direction de l'énergie réfléchie (French, 2001). Pilarczyk (1990a) recommande l'utilisation de pentes à 1: 3 pour minimiser l'affouillement dû à la réflexion d'énergie.

La disponibilité en sédiments est également affectée par la construction de ces structures. Le problème est causé par le fait que l'on remplace un trait de côte souple et érodable avec un autre non érodable. Tandis que cela permet de protéger l'arrière-pays, ce qui est important, cela cause également des problèmes en termes de déficit sédimentaire ; l'érosion en face de la digue va continuer à son niveau historique ou même plus rapide mais les sédiments ne seront plus remplacés par l'érosion de l'arrière-pays (French, 2001). Cela peut avoir pour conséquence un abaissement de la plage ce qui réduit la valeur d'aménité de celle-ci et augmente les charges des vagues sur la digue en laissant s'approcher des vagues plus larges de la côte.

En l'absence de brise-lames, l'érosion naturelle de la côte fournirait des sédiments aux bandes adjacentes de côte, à travers un processus désigné par le terme de dérive littorale (voir la figure 4.3). Cependant lorsqu'une digue est construite, le littoral est protégé de l'érosion et l'approvisionnement en sédiments n'a plus lieu. Cela provoque un déficit en sédiments sur les sites situés le long de la côte dans la direction de la dérive littorale, entraînant l'érosion de ceux-ci.

Bien que les digues empêchent l'érosion des côtes qu'elles protègent, là où la structure s'arrête, la côte reste soumise aux conditions naturelles. Cela signifie que les zones adjacentes non défendues sont susceptibles de reculer vers les terres, causant ainsi des décalages de niveaux sur la côte (French, 2001). L'extrémité de la digue est aussi typiquement soumise à une érosion plus forte due aux processus naturels (voir la figure 4.9). Cet effet latéral peut, dans les cas extrêmes, endommager la structure ou la rendre instable.

Figure 4.9: Vue du dessus d'un brise-lames montrant les effets caractéristiques associés à la structure



Source: Adapté de McDougal et al., 1987

Les brise-lames étant des défenses inamovibles, il arrive qu'ils interfèrent avec des processus naturels tels que la migration d'un habitat qu'implique l'évolution du niveau de la mer. Les brise-lames bloquent la migration nécessaire de systèmes côtiers vers les terres due à la SLR, causant ainsi une compression

côtière (traitée au Chapitre 2). Ce processus provoque la réduction des habitats intertidaux tels que les plages de sable et les marais salants, car ces environnements sont coincés entre un niveau d'eau qui monte et des défenses dures qui ne peuvent se déplacer.

Dans les estuaires, les brise-lames provoquent également des modifications dans la zone submergée par les marées, réduisant ainsi la zone d'occupation de l'eau disponible à marée haute. Avec le même volume d'eau entrant dans l'estuaire, le niveau d'eau après la construction de la digue sera plus élevé. Cela peut signifier que les zones situées en face de l'ouvrage de défense restent immergées plus longtemps et plus profondément. Cela est susceptible d'affecter la distribution de la végétation et pourrait augmenter le coefficient des marées en amont de la structure (French, 2001).

Un autre problème qui se pose est le phénomène de débordement. Cela se produit quand les niveaux d'eau dépassent la hauteur du brise-lames, provoquant un écoulement dans les zones situées derrière la structure. Le débordement n'est pas un processus continu, mais se produit généralement lorsque de hautes vagues attaquent individuellement le brise-lames, causant une élévation momentanée du niveau de l'eau qui dépasse alors la hauteur de la structure (Goda, 2000). Si celle-ci est trop basse, un débordement important peut emporter des volumes considérables de terre ou de sable situés derrière le mur, et ainsi l'affaiblir. De plus, l'eau issue du débordement sature et affaiblit la terre, augmentant les pressions venant du côté terrestre de la structure, ce qui peut avoir pour conséquence de détruire sa base (Dean & Dalrymple, 2002). Ce phénomène va devenir de plus en plus problématique avec la SLR, les vagues plus hautes et les tempêtes plus fortes.

Comme mentionné dans la section traitant des avantages, les brise-lames assurent une meilleure sécurité en réduisant le risque d'inondation et d'érosion. Cependant, la zone côtière reste un lieu à haut risque, notamment à cause des risques résiduels. Afin d'éviter des choix peu judicieux, il est nécessaire de planifier rigoureusement les futurs développements. En soutenant le développement, les défenses dures nécessitent de plus un investissement continu d'entretien et d'amélioration, limitant de manière effective les options futures de gestion côtière. Bien que les autorités n'aient pas nécessairement la responsabilité de maintenir le processus de protection de la côte, retirer les structures de défense serait probablement non seulement onéreux, mais également controversé politiquement (Nicholls et al., 2007b).

Les brise-lames réduisent par ailleurs l'accès à la plage pour les personnes handicapées et les services de secours. Cela peut s'avérer problématique si la plage faisant face à ces structures accueille des activités de loisirs. De plus, l'apparence des brise-lames peut être déplaisante esthétiquement ce qui présente un autre effet négatif pour les plages dépendantes de l'économie touristique.

Les coûts et besoins financiers

Une étude réalisée par Linham et al. (2010) indique que le coût unitaire pour la construction d'1 km de brise-lames de type vertical est de l'ordre de 0.4 à 27.5 millions US\$. L'étude présente les coûts pour une dizaine de pays. La plupart d'entre eux font partie des pays développés, bien que des pays récemment développés ou en voie de développement soient également représentés comme l'Egypte, Singapour et l'Afrique du Sud. Le problème posé par ces chiffres est le fait que l'incidence de la hauteur de la structure sur le prix unitaire de construction soit rarement prise en compte. Ainsi ces coûts réfèrent probablement à des brise-lames de différentes tailles ; ceci explique certaines variations des coûts significatives entre les projets.

L'une des meilleures sources d'information sur le coût unitaire de construction est l'Agence Anglaise pour l'Environnement (2007), et uniquement concernant les coûts liés au Royaume Uni. Le prix moyen donné

pour la construction d'un brise-lames est de 2.65 millions US\$ (au niveau de prix de 2009). Ceci comprend les coûts directs de construction, les frais généraux directs, les coûts des travaux associés, le travail associé mineur, les travaux temporaires, les événements ouvrant droit à des compensations ainsi que les coûts de retard. Cela n'inclut ni la taxe de la valeur ajoutée (TVA) ni les coûts externes tels que les consultants, le terrain et les paiements compensatoires.

La variation des coûts entre les projets est la conséquence de plusieurs facteurs détaillés à l'encadré 4.3.

Encadré 4.3: Facteurs influençant les coûts unitaires de construction du brise-lames

- La hauteur de construction est un facteur majeur qui influe sur les coûts par unité de longueur du brise-lames. La hauteur a une incidence sur le volume requis de matériaux pendant la période de construction.
- La charge estimée des vagues va déterminer dans quelle mesure la structure doit être résistante ; des eaux profondes et des côtes exposées ont pour conséquence des charges de vagues plus fortes ce qui implique que la structure soit plus robuste et ainsi des coûts plus élevés.
- Une construction en une ou plusieurs étapes ; les coûts sont plus bas pour une construction en une seule phase (Nicholls & Leatherman, 1995)
- Le choix du type de brise-lames et le niveau de protection souhaité. Certains éléments de construction augmentent les coûts et des brise-lames plus robustes coûteront plus cher.
- Les matériaux de construction (blocs de gravats, éléments en béton préfabriqué, métal, terre, etc.)
- Proximité et disponibilité de matériaux de construction bruts
- Disponibilité et coût des ressources humaines, y compris de l'expertise.

Le coût de maintenance est une autre dépense courante importante lorsque l'on choisit de construire un ouvrage de défense dure. Ces coûts durent le temps que dure la structure et sont de ce fait susceptibles de représenter des niveaux assez élevés d'investissement au cours du cycle du projet. Il est recommandé d'investir en continu dans l'entretien des structures afin de s'assurer qu'elles continuent de fournir les niveaux de protection prévus (Linhm et al., 2010).

Les coûts de construction et de maintenance sont susceptibles d'augmenter dans le futur en réponse à la SLR (Burgess & Townend, 2004; Townend & Burgess, 2004). Cela est dû à la plus grande profondeur de l'eau en face de la structure, ce qui a pour conséquence d'augmenter la hauteur des vagues et la charge de celles-ci sur la défense.

Les coûts de maintenance sont également susceptibles d'être plus élevés si les brise-lames sont mal conçus ou construits avec des matériaux inappropriés. Dans de nombreux cas, la forme est de moindre importance par rapport à la disponibilité des matériaux, notamment dans les endroits où les matériaux de construction nécessaires sont rares. Cela a été observé dans une étude sur la protection du littoral aux Fiji réalisée par Mimura et Nunn (1998). Ces derniers soulignent le fait qu'une structure mal conçue conduit souvent à des effets défavorables tels que la réflexion de l'énergie des vagues et un phénomène d'affouillement à la base. Même en présence d'une conception adéquate, il n'est pas rare que celle-ci soit

reproduite aveuglément sur un autre site. Une telle approche est susceptible d'être à l'origine de coûts environnementaux et socioéconomiques excessivement élevés (CCNUCC, 1999). Dans de nombreux cas, le partage de conseils et de bonnes pratiques, même simples, augmenterait le rendement du projet.

Les capacités institutionnelles et organisationnelles requises

La construction de brise-lames est possible au niveau local. Il existe de nombreux exemples de constructions ponctuelles visant à protéger les propriétés individuelles et les communautés. Cependant, ces structures ad hoc risquent d'être bien moins efficaces en cas de phénomène météorologique extrême pour répondre aux niveaux d'eau élevés et à la hauteur et la charge importante des vagues. Ceci est largement dû au fait que ces événements sont difficiles à prévoir sans une science et une base technologique bien développées. Aux Fidji par exemple, les méthodes traditionnelles de construction de brise-lames impliquent de planter des bâtons dans le sol pour former une palissade derrière laquelle un ensemble de rondins, de sable et de déchets sont empilés pour constituer un obstacle pour la mer. Dans de nombreux cas, ce type de construction est cependant peu efficace pour lutter contre des phénomènes climatiques significatifs et les structures se font emportées (Mimura & Nunn, 1998). Il serait bénéfique de partager des conseils et une certaine orientation concernant la conception et la construction de brise-lames performants. Cela améliorerait leur efficacité durant les phénomènes extrêmes et permettrait également de réduire les répercussions négatives sur les régions adjacentes du littoral.

Bien qu'il soit possible de construire au niveau local des défenses ad-hoc ou traditionnelles n'impliquant pas un haut degré de technologie, il a été observé que ces structures offraient des niveaux moins élevés de protection contre les phénomènes extrêmes que celles dont la conception était soutenue par une base solide de sciences et de technologie. Il est même avéré qu'elles exacerbent les problèmes existants.

Actuellement, les conseils fournis aux pays en voie de développement en matière de construction de brise-lames modernes, quand il y en a, sont de nature informelle. Pour obtenir une conception et une construction performantes, il convient de fournir aux communautés locales un minimum d'orientation sur le sujet. Cela pourrait être fait par le gouvernement ou par des associations bénévoles.

L'entretien des brise-lames est susceptible d'être pris en charge au niveau de la communauté à condition qu'elle bénéficie d'une formation adéquate. Cela pourrait comprendre la formation d'ingénieurs sur les mécanismes de défaillance plausibles, la fréquence nécessaire d'inspections de la structure, ce qu'il y a à surveiller et l'identification des faiblesses au niveau de la conception. Dans le cas où de graves faiblesses sont observées, il peut être nécessaire d'engager une organisation professionnelle pour réparer la structure de manière efficace.

Les facteurs entravant la mise en œuvre

L'un des obstacles principaux pour la mise en œuvre d'un brise-lames performant est son coût élevé. La conception d'une structure efficace exige des données environnementales à long terme et de bonne qualité comme par exemple la hauteur des vagues ou les niveaux d'eau extrêmes.

Il est souvent impossible de se les procurer dans les pays en développement et cela peut s'avérer coûteux. De plus, les brise-lames étant exposés à des pressions importantes de la part des vagues, leur architecture doit être très robuste, ce qui exige une bonne conception, des quantités importantes de matériaux bruts et potentiellement des méthodes de construction complexes. Là où l'énergie des vagues

est forte, il est nécessaire d'allouer des coûts supplémentaires pour les mesures de protection telles que des enrochements⁶ pour protéger la base de la structure.

Une étude de cas issue des îles pacifiques des Fidji (Mimura & Nunn, 1998) démontre que la construction de brise-lames reste très coûteuse, même lorsque des matériaux locaux ont été utilisés en conjonction avec d'autres matériaux fournis par le gouvernement. Les habitants consacrent beaucoup de temps à la construction de brise-lames, ce qui implique également une certaine dépense de temps et d'argent pour approvisionner les ouvriers en nourriture.

L'expérience, les matériaux, la main d'œuvre et l'équipement spécialisé nécessaires pour la construction de ces structures peut aussi poser problème pour la mise en pratique de cette technologie.

French (2001) recommande une construction proactive de brise-lames à une certaine distance à l'intérieur des terres. Cela réduit l'interférence avec les processus côtiers et crée une zone de protection contre l'inondation et l'érosion du littoral. L'obstacle principal lié à ce type de stratégie réside dans le fait de convaincre et de former les propriétaires des terrains côtiers sur la nécessité et les avantages de telles mesures (Mimura & Nunn, 1998).

Les facteurs favorisant la mise en œuvre

La construction de brise-lames est l'une des options disponibles lorsqu'un terrain de valeur ne peut être protégé autrement. Cette approche fournit un haut degré de protection aux zones côtières et sa viabilité sur le long terme est également à souligner et à prendre en compte.

Des architectures moins avancées technologiquement peuvent être utilisées à un niveau local à l'aide des connaissances et de l'artisanat traditionnels. Cela implique un investissement moins élevé et réduit le besoin d'impliquer les institutions telles que le gouvernement national et infranational ou les organisations non gouvernementales (ONG). Si une construction ad-hoc est possible, un suivi technologique de la part d'organisations d'experts est préférable pour assurer des niveaux satisfaisants de protection.

Il est également possible d'inclure la construction de brise-lames dans un plan plus global d'aménagement de la zone côtière qui emploie d'autres technologies telles que le rechargement de plage (cf. section 4.1.1) et le repli aménagé (cf. section 4.3.1). La mise en place de brise-lames à l'intérieur des terres à la suite d'un retrait organisé, réduit les interférences avec les processus de zone côtière et crée une zone de protection contre l'inondation et l'érosion côtières (French, 2001). Des structures agissent donc comme une ultime ligne de défense. Leur utilisation conjointement avec le rechargement de plage peut aussi répondre à certains effets négatifs liés à la construction des brise-lames, tels que l'abaissement de la plage ou l'érosion du littoral en aval.

Etude de cas: Bar Beach, Victoria Island, Nigeria

Le Nigéria se situe sur la côte ouest de l'Afrique et est bordé par l'Océan Atlantique. Victoria Island se trouve à l'ouest du pays dans la ville de Lagos ; l'île elle-même est dans le lagon de Lagos.

Bar Beach sur l'île de Victoria a été soumis à une forte érosion depuis la construction de deux jetées à l'entrée du port de Lagos (Awosika et al., 2002). Les jetées sont de longues structures, positionnées à

6 Larges pierres de carrière généralement utilisées comme couche de protection contre l'érosion (Coastal Research, 2010)

angle droit par rapport à la côte. Elles sont conçues de façon à intercepter le transport le long du littoral de grandes quantités de sédiment. Cela est bénéfique pour le port, ces sédiments risquant d'ensabler le chenal de navigation. Cependant, l'interception de ces derniers se fait au détriment de Bar Beach. En effet, en l'absence des jetées, ces sédiments viendraient naturellement se déposer sur la plage, participant à maintenir le volume sédimentaire de la plage.

Au niveau local, les taux d'érosion à Bar Beach peuvent atteindre jusqu'à 30m par an (Mehrotra et al., 2009). Le problème d'érosion de la plage est aggravé par des tempêtes périodiques. Ces ondes sont accompagnées de vagues plongeantes ce qui provoque le transport vers le large des sédiments restants. (Awosika et al., 2002).

Depuis 1958, un certain nombre de solutions techniques a été mis en application sur cette plage comme le montre le tableau 4.4 qui suit. Cependant, elles n'ont eu qu'un succès limité dans la lutte contre le problème d'érosion. Plus important encore, les informations et les données historiques inadéquates sur les modifications du trait de côte ont rendu impossibles l'établissement et l'exécution d'un plan de gestion efficace de l'érosion du littoral (Sunday & John, 2006).

Tableau 4.4: Historique des mesures de contrôle de l'érosion, Bar Beach, Nigeria

Période	Mesures appliquées
1958	Construction d'un épi au pied du brise-lames de l'ouest pour éviter l'endommagement de la structure
1958-60	Déversement de sédiments issu du dragage dans le chenal du port afin qu'il soit dispersé le long de la plage grâce aux vagues.
1960-68	Construction d'une station de pompage permanent sur le brise-lames de l'ouest transportant un volume moyen de 0.66 millions m ³ de sédiments du chenal vers la plage.
1964	Un épi en bois est construit parallèlement à la côte à 26m au large de la plage.
1969-74	Rapprovisionnement artificiel de sable
1974-75	3 millions m ³ de sable sont déversés et répartis sur la plage
1981	2 millions m ³ sont déversés et répartis sur la plage
1985-86	3 millions m ³ de sable sont déversés sur la plage
1990-91	5 millions m ³ de sable sont déversés sur la plage (dans la plupart des endroits, tout le sable déposé entre 1985 et 1986 a été emporté)
1995-97	6 millions m ³ de sable sont déversés sur la plage (2 million m ³ par an)
1998	Construction d'un épi
1999	2 millions m ³ de sable sont déversés et répartis sur la plage à l'aide de dragues.
2002-03	Dragage de plus de 2 millions m ³ de sable

Source: Sunday & John, 2006

Suite au peu de succès remporté par les mesures décrites au tableau 4.4, le gouvernement local a lancé en 2006 de nouveaux travaux pour lutter contre l'érosion. L'élément principal de ce dispositif était un brise-lames d'un kilomètre de long, constitué de larges blocs de béton préfabriqués taillés en X. Il a été pensé de façon à s'encastrer dans les vagues et à dissiper leur énergie lorsqu'ils rentrent en contact. Le sommet de la structure est à 4m au-dessus du niveau moyen de la mer (MSL) (Chagoury Group, 2006) et les blocs qui la composent sont conçus pour supporter l'impact de vagues modélisées numériquement avec une période de retour de 100 ans (HiTech, 2006).

Le brise-lames est couplé avec d'autres technologies de défense côtière afin de fournir la réponse la plus efficace possible aux problèmes d'érosion de la zone. La plage a ainsi connu un nouveau rechargement en sédiments et l'installation d'un enrochement supplémentaire. La crête du brise-lames a été plafonnée par une dalle en béton de 10m de largeur ce qui offre une promenade qui peut être utilisée à des fins récréatives. La structure finie est montrée sur la photo de la figure 4.10.

Figure 4.10: Le brise-lames de Bar Beach, Victoria Island, Lagos, Nigeria



Source: Photo B. Winde

4.1.4 Les digues

Définition

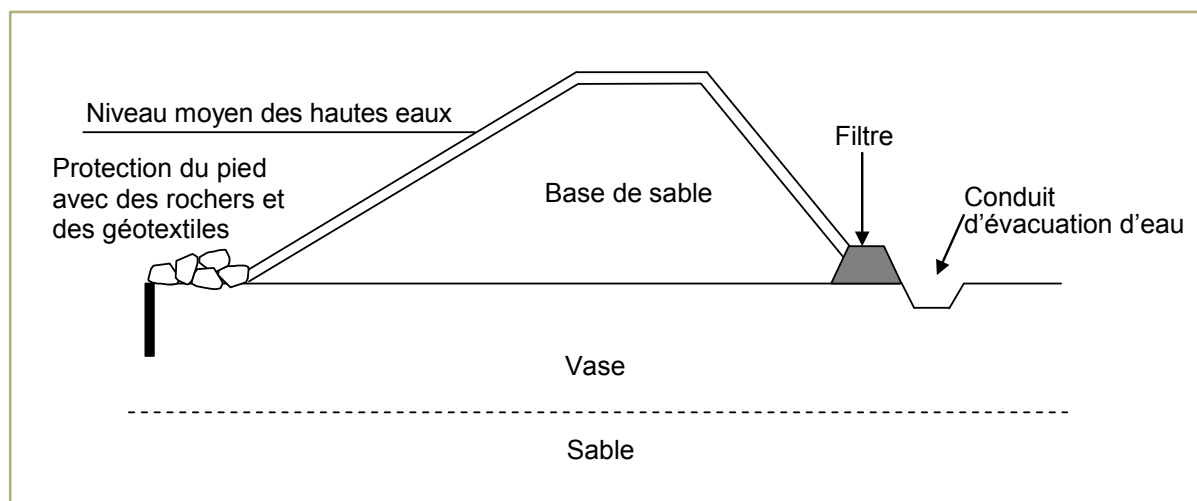
La fonction principale des digues est de protéger les zones côtières basses de l'inondation par la mer durant des conditions météorologiques extrêmes (Pilarczyk, 1998a). Les digues ne sont pas conçues pour protéger les plages situées devant la structure ou toute autre région adjacente non protégée.

Ces structures ont un volume important qui leur permet de résister à la pression de l'eau, des côtés inclinés pour réduire la charge des vagues et une hauteur suffisante pour empêcher le débordement des eaux. Elles sont aussi désignées par les termes de remblai, levée ou quai.

Description

Les digues sont communément utilisées pour protéger les zones basses contre l'inondation. Elles ont ainsi largement été mises en pratique dans des pays comme le Vietnam, le Bangladesh, la Thaïlande, les Pays-Bas et les USA. La figure 4.11 montre une coupe transversale d'une digue. C'est une structure majoritairement terrestre qui consiste en une base de sable, une couche externe de protection étanche, un renforcement à la base et un conduit d'évacuation d'eau. Les digues sont conçues pour résister à l'action des vagues et empêcher ou atténuer le débordement.

Figure 4.11: Coupe transversale d'une digue



Les digues ont beaucoup été utilisées aux Pays-Bas comme moyen de protection contre les inondations durant les dernières quelques centaines d'années. Les Hollandais ont ainsi une large expérience en matière d'architecture des digues et de nombreux pays appliquent par conséquent leurs pratiques de construction.

La pratique hollandaise suit les directives suivantes:

- La face maritime inclinée avec une pente entre 1: 3 et 1: 6 – cela peut réduire les charges de vagues
- La face terrestre inclinée avec une pente entre 1: 2 et 1: 3 – cela minimise l'occupation de l'espace et maximise la stabilité.
- Une couche externe imperméable– elle se compose souvent de vase mais est parfois complétée par de l'asphalte. Cela sert à protéger le centre sableux (Barends, 2003).

- Protection de la base – utilisé comme protection supplémentaire pour la plage, cela empêche les vagues de provoquer un affouillement ou de ronger la structure (Pilarczyk, 1998b)
- Le centre est normalement composé de sable afin de s'assurer que l'eau qui parvient à entrer puisse s'évacuer ensuite. Le centre fournit le soutien nécessaire à la couche protectrice et donne à la structure le volume et le poids suffisant pour résister aux pressions des hautes eaux (Barends, 2003)
- Canal d'évacuation d'eau – il permet à toute eau pénétrant la structure de s'évacuer, garantissant ainsi que la structure ne soit pas affaiblie par une saturation d'eau (Barends, 2003).

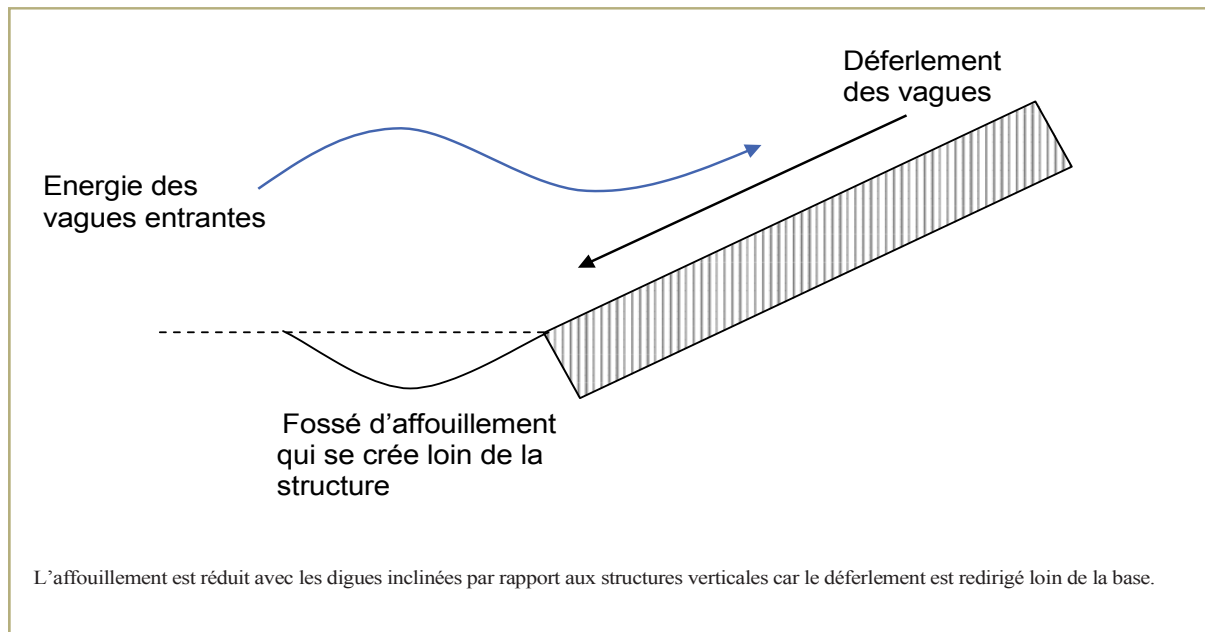
Il est possible de distinguer plusieurs zones sur la pente inclinée d'une digue face à la mer. La base de la structure est régulièrement submergée jusqu'au niveau moyen des hautes eaux (MHW) et subit en continu des charges de faible intensité. La zone au-dessus du MHW peut, elle, être violemment attaquée par les vagues, mais à une fréquence qui se réduit au fur et à mesure que l'on remonte la pente. Vers la crête, au-dessus du niveau d'eau maximum anticipé, la structure ne devrait être soumise qu'à des montées de vagues.

Les avantages liés aux digues

Les digues fournissent un haut niveau de protection contre l'inondation dans les zones côtières basses. Elles représentent souvent le dispositif de défense dure le moins coûteux lorsque le prix des terrains est peu élevé (Brampton, 2002).

Le pan maritime incliné de la digue permet une meilleure dissipation de l'énergie des vagues et réduit davantage la charge des vagues sur la structure que les structures verticales. Ceci s'explique par le fait que l'inclinaison force les vagues à se briser, l'eau devenant moins profonde. Le déferlement des vagues entraîne la dissipation de leur énergie et le processus est d'autant plus bénéfique que les vagues perdent également une portion significative de leur énergie durant le processus. Celles-ci sont ainsi moins susceptibles d'être à l'origine d'effets négatifs tels que l'érosion du trait de côte. En réduisant la charge des vagues, la probabilité d'une catastrophe ou de réels dommages durant les événements climatiques extrêmes est également réduite.

Figure 4.12: Processus d'affouillement au pied des structures inclinées



Comparées aux structures verticales, les digues connaissent un affouillement réduit à leur pied. Ceci s'explique par le fait que le déferlement des vagues est redirigé loin de la base de la structure, comme montré à la figure 4.12. Cela est bénéfique pour sa stabilité et aide à réduire le risque d'endommagement.

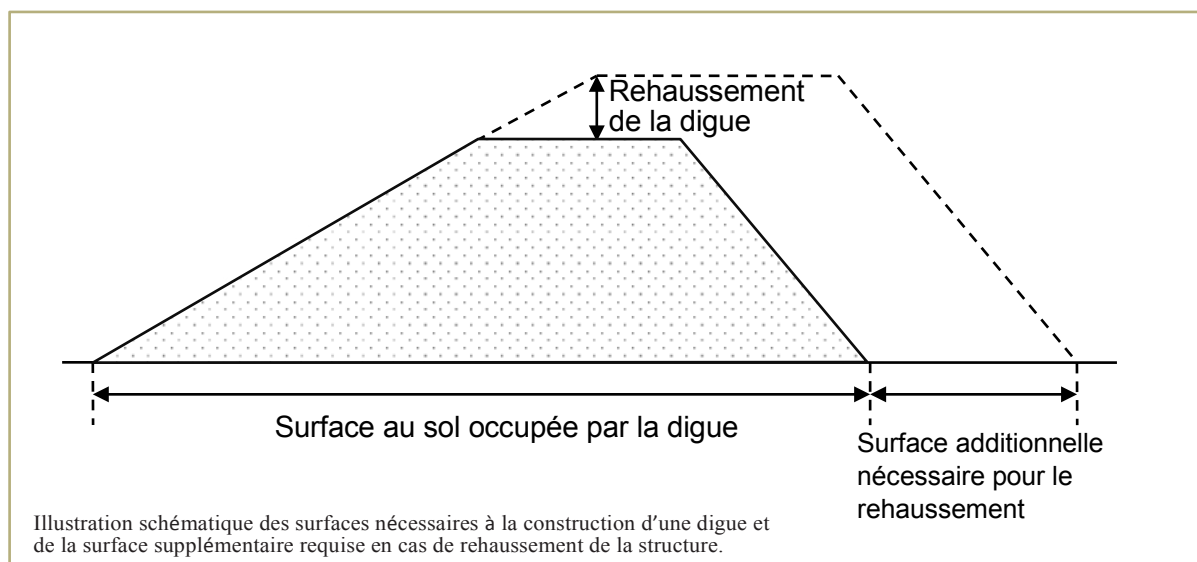
Les inconvénients liés aux digues

Les digues requièrent de grands volumes afin de résister aux pressions des hautes eaux sur leurs faces maritimes (Barends, 2003). Par conséquent, leur construction implique de larges quantités de matériaux, notamment du sable, de la vase et de l'asphalte, ce qui peut être coûteux.

Un autre inconvénient lié à l'utilisation des digues réside dans ses pans inclinés qui certes permettent la dissipation de l'énergie des vagues mais qui occupent une large surface au sol; autrement dit leur construction exige des espaces assez importants. Cela peut augmenter le coût de construction dans les zones où le prix des terrains est élevé.

La construction de digues pour lutter contre la SLR peut augmenter le besoin d'espace nécessaire à la construction si les degrés de pente sont maintenus (voir la figure 4.13). Cette occupation du sol peut poser problème, les zones côtières ayant des valeurs foncières élevées. De plus, la construction de digues empêche d'autres types d'exploitation de la côte, créant ainsi une concurrence accrue pour les terrains. L'extension des structures dans l'eau pourrait répondre au problème, mais cela augmente significativement le coût de construction.

Figure 4.13: Les besoins des digues en matière de surface



De même que pour tous les ouvrages de défenses dures, les digues peuvent créer une impression erronée de sécurité sur la partie des terres sur laquelle elles sont construites, encourageant la poursuite du développement à cet endroit. Une fois la protection mise en place, il est ainsi difficile de changer de politique de gestion.

La construction de défenses dures fixe la position du trait de côte de façon permanente. Cela peut avoir des répercussions néfastes, la côte étant un système naturellement dynamique. Déterminer la position du

trait de côte peut empêcher le déroulement des processus naturels, tels que l'adaptation aux évolutions du niveau de l'eau, les interactions plage/dunes et l'apport en sédiments lié à l'érosion côtière (French, 2001). Le fait de bloquer ces processus a des répercussions non seulement sur l'environnement immédiat, mais étant donné que le partage des sédiments dans le système côtier se fait au sein d'une cellule, cela peut également entraîner d'autres effets ailleurs sur la côte.

Certaines mesures de renforcement du trait de côte peuvent être esthétiquement déplaisantes, notamment dans les régions dépendantes de l'économie touristique où les paysages naturels sont particulièrement prisés (IOC, 2009).

Les coûts et besoins financiers

La meilleure source d'information concernant les coûts de construction des digues provient de Hillen et al. (2010), sous la forme d'une étude faite au Vietnam, aux Pays-Bas et à la Nouvelle-Orléans donnant le coût du rehaussement d'une digue en millions de dollars par kilomètre linéaire de structure. Il y est rapporté que le coût du rehaussement varie entre 0.9 à 29.2 millions US\$ par mètre de hauteur ajouté, par km (valeur du dollar en 2009) (Hillen et al., 2010).

Les coûts de construction au Vietnam rapportés par Hillen et al. (2010) sont peut-être plus pertinents pour les pays en voie de développement. Ces coûts varient entre 0.9 et 1.6 millions US\$ par mètre ajouté, par km – c'est à dire significativement moins élevés qu'aux Pays-Bas et à la Nouvelle-Orléans (Hillen et al., 2010). Les coûts sont variables car ils dépendent des prix également variables des matériaux, des terrains et de la couche de protection interne ou externe des pentes de la digue. Comparés avec d'autres projets réalisés au Vietnam, il a été observé que les coûts de main d'œuvre variaient même considérablement dans le pays.

Il est montré par Hillen et al. (2010) que les coûts de construction d'une digue diffèrent grandement entre les régions rurales et urbaines, les premières affichant des prix beaucoup moins élevés. Ceci est vrai dans le monde entier. Les coûts sont également influencés par plusieurs facteurs, détaillés dans l'encadré 4.4.

Encadré 4.4: Les facteurs influençant les coûts de construction d'une digue

- La disponibilité et le prix du terrain. Comme montré à la figure 4.13, une digue demande une surface au sol importante. Des études détaillées font souvent la distinction entre la construction de digues dans les régions rurales et urbaines afin de traduire les différences des valeurs foncières.
- La structure choisie et la marge de sécurité inhérente. Cela peut avoir un effet sur le volume de la digue et sur les matériaux requis.
- Les charges de vagues; des charges plus fortes requièrent des structures plus robustes et plus coûteuses. Celles-ci sont déterminées par les types de brise-lames, la netteté avec laquelle la vague se brise, la forme du fonds marin et les caractéristiques individuelles des tempêtes telles que la durée, la force du vent et l'orientation par rapport à la structure.
- Le nombre d'étapes de la construction; les coûts sont plus bas lorsqu'il n'y a qu'une étape (Nicholls & Leatherman, 1995).
- Proximité et disponibilité de matériaux de construction bruts
- Disponibilité et coût en matière de ressources humaines, notamment l'expertise.

Il est nécessaire de prendre en compte les coûts d'entretien concernant la digue afin de garantir que la structure continue de fournir les niveaux de protection prévus. Les informations sur ces derniers sont limitées, même si la maintenance annuelle par km linéaire de digues coûterait de 0.03 millions USD au Vietnam (Hillen, 2008) à 14 millions USD aux Pays-Bas (AFPM, 2006) (valeur du dollar en 2009). Ces variations sont largement dues au fait que si la maintenance des digues est bien organisée et est une priorité aux Pays-Bas, ces programmes sont moins rigoureux dans beaucoup d'autres endroits. Dans une moindre mesure, les facteurs locaux tels que les coûts de la main-d'œuvre et des matériaux, ainsi que l'existence de différents types de digues et de mesures de défenses côtières auront une influence sur les coûts (Hillen, com.. pers.).

Les coûts de construction et de maintenance sont susceptibles d'augmenter dans le futur en réaction à la SLR (Burgess & Townend, 2004; Townend & Burgess, 2004). Cela est dû à la plus grande profondeur de l'eau en face de la structure, ce qui a pour conséquence d'augmenter la hauteur des vagues et la charge de celles-ci sur la défense.

Les capacités institutionnelles et organisationnelles requises

La construction peut être prise en charge au niveau local (Section 4.1.2). Cependant, une meilleure base scientifique et technologique fournie par de grandes organisations peut considérablement améliorer l'efficacité de la structure. Cela a été démontré au Vietnam (une étude de cas détaillée est présentée à la fin de cette section) où une mauvaise conception et un financement insuffisant ont abouti à des digues fournissant des niveaux de protection moins élevés que prévu (Mai et al., 2008).

La construction de défenses côtières ad hoc est susceptible d'être bien moins efficace en cas de phénomène météorologique extrême pour répondre aux niveaux d'eau élevés et à la hauteur et la charge importante des vagues. Ceci est en grande partie dû au fait que ces événements sont difficiles à prévoir sans une science bien développée. Les défenses ponctuelles offrent donc généralement des niveaux de protection moins élevés.

Les digues conçues et construites par les communautés locales utiliseront probablement des matériaux locaux et des méthodes traditionnelles. Cela n'est pas nécessairement l'approche la plus efficace, mais peut être la seule option disponible. Si ces communautés pouvaient bénéficier de conseils et d'une orientation en matière de conception et de construction, même en ce qui concerne de petits détails comme l'inclinaison et les matériaux recommandés, cela pourrait améliorer les résultats de ces structures de défense.

Comme montré ci-après, les digues peuvent être des mesures coûteuses à mettre en place, avec des coûts allant de 1 à 7.6 millions USD par km de digue selon les endroits (Linham et al., 2010) auxquels il faut ajouter les coûts de maintenance. Des financements externes peuvent ainsi être nécessaires pour qu'un projet réussi de construction de digue puisse être entrepris.

Si la mise en œuvre se fait au niveau communautaire, il est essentiel que les répercussions élargies des défenses dures sur la côte ne soient pas ignorées. Lorsque l'on entreprend un projet au niveau local, il est tentant de se concentrer sur les avantages locaux et de négliger le contexte plus large. Comme il a été mentionné dans les inconvénients liés aux digues, certains effets liés à la construction d'une digue peuvent se faire ressentir à des distances considérables. La mise en œuvre au niveau local pourrait voir ces effets ignorés.

Une extrême prudence est de mise dans le cas d'une construction ad hoc de digues au niveau local. Celles-ci étant souvent conçues pour protéger des zones de basse terre, une défaillance grave due à une mauvaise conception est susceptible de mettre en danger la vie d'un nombre significatif de personnes.

Les facteurs entravant la mise en œuvre

L'espace important nécessaire à la construction d'une digue est un obstacle à leur mise en œuvre. Ce facteur est particulièrement important dans les zones où la valeur des terrains côtiers joue un rôle important dans la décision de mettre en application les technologies d'adaptation. La disponibilité des matériaux, de la main-d'œuvre et de la machinerie spécialisée pour la construction de digues peut également être un frein à la mise en œuvre de cette technologie.

Le coût que représente la construction d'un système efficace de digues peut être un obstacle dans certains cas. Cela est particulièrement vrai dans les zones où l'énergie des vagues est forte et où des éléments de protection supplémentaires sont nécessaires, tels que l'enrochement (IOC, 2009).

Les digues les plus efficaces sont celles qui sont conçues par rapport à des données environnementales enregistrées sur le long terme et de bonne qualité, telles que les informations relatives à la hauteur des vagues ou le niveau extrême de l'eau. C'est pourquoi l'un des freins principaux à la construction de digues efficaces qui prennent en compte les conditions locales est la mise à disposition de fichiers de données sur le long terme. Le coût lié à la collecte de telles données peut être élevé. Cependant, en prenant en compte les conditions locales, la conception de la digue est généralement performante. Les coûts additionnels liés à cette collecte de données et à la forme individualisée de la structure peuvent également être un obstacle à la mise en œuvre dans certains cas.

Les facteurs favorisant la mise en œuvre

Là où l'on trouve de larges zones de terrains de valeur se situant à un niveau proche ou en deçà du niveau de la mer et qui ne peuvent être cédées par une politique de repli organisé, il existe souvent un certain nombre d'options possibles autres que la construction de digues.

Les digues ont la capacité de fournir de très hauts niveaux de protection contre l'inondation des côtes si elles sont conçues de manière adéquate. Cela peut permettre un développement avancé de la zone qu'elles protègent, même si ce sont des basses terres. Cela a été démontré par l'aéroport de Schiphol à Amsterdam aux Pays-Bas – cette zone est entourée de digues et se situe à 4,5m en dessous du niveau de moyen de la mer (Pilarczyk, 2000). Cependant, il convient de garder à l'esprit les questions de la durabilité à long terme de ces structures lors de la mise en application de cette technologie.

La digue est une méthode qui a fait ses preuves en matière de protection côtière. Les méthodes de construction et les principes de conception de ces structures sont connus et bien relayés. Bien que les digues spécialisées qui sont conçues de façon à s'adapter aux conditions locales offrent les meilleurs résultats, il est également possible de mettre en application des modèles plus génériques et de moins bonne qualité à plus bas coût. Cela rend la mise en œuvre plus abordable mais compromet la sécurité et les niveaux de protection de la digue.

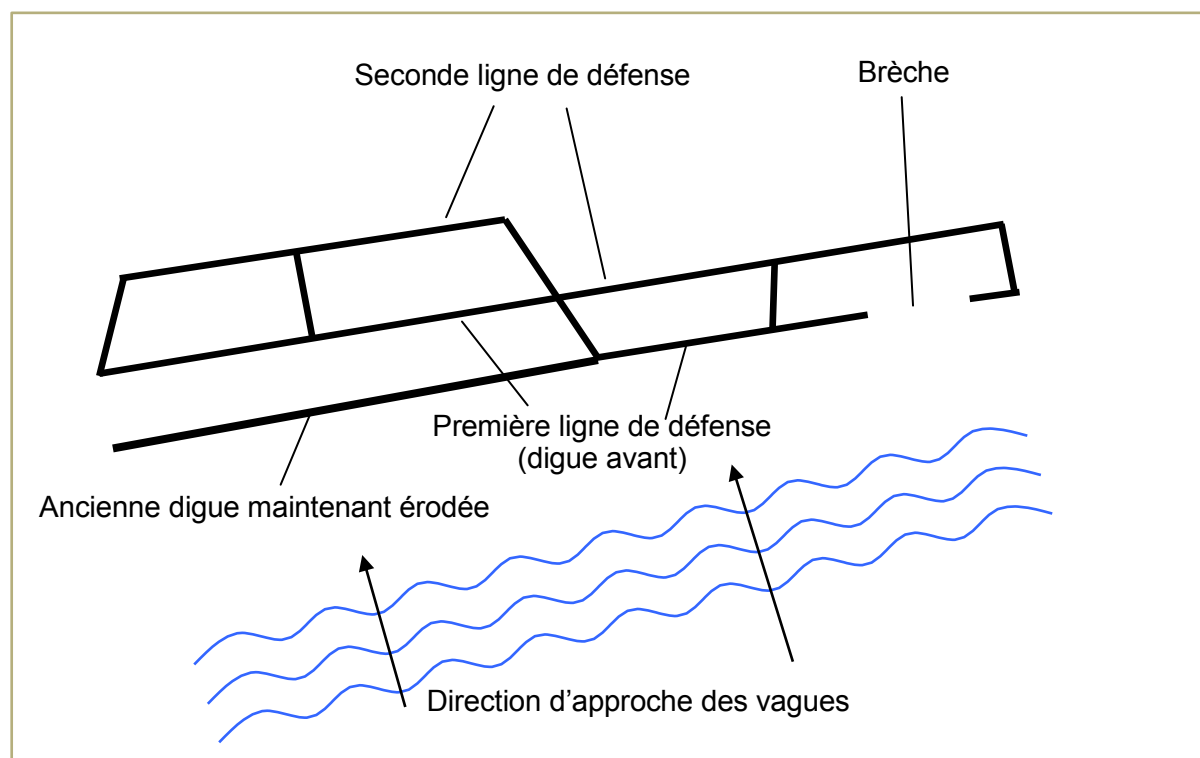
Les digues peuvent être utilisées conjointement avec d'autres ouvrages de protection contre l'érosion et l'inondation des côtes, tels que le rechargement de plage (section 4.1.1) et le repli aménagé (section 4.3.1). Cela peut permettre de lutter contre les répercussions négatives associées à l'utilisation de cette méthode tout en maintenant les avantages liés à chaque technologie.

Etude de cas: La province de Nam Dinh, Vietnam

Le Vietnam est situé dans une région soumise aux moussons tropicales au Sud-Est de l'Asie, et qui est également sujette à des typhons. Une large proportion de la population vietnamienne est concentrée dans des basses plaines inondables, des deltas et autres marges côtières. Les secteurs principaux d'activité sont l'agriculture et la pêche (Mai, 2004).

La province de Nam Dinh fait partie du Delta de Red River dans la partie nord du Vietnam. Cette région est de faible altitude et la province possède une côte longue d'environ 70 km, dont 95% sont protégés par des digues (Mai, 2004). La majorité de cette bande littorale est protégée par deux longueurs de digues, construites l'une derrière l'autre comme illustré dans la figure 4.14. Cela permet de limiter l'inondation des terres en cas de brèche dans la structure (Mai, 2008).

Figure 4.14: Schéma du système de double digues utilisé dans la province de Nam Dinh, Vietnam

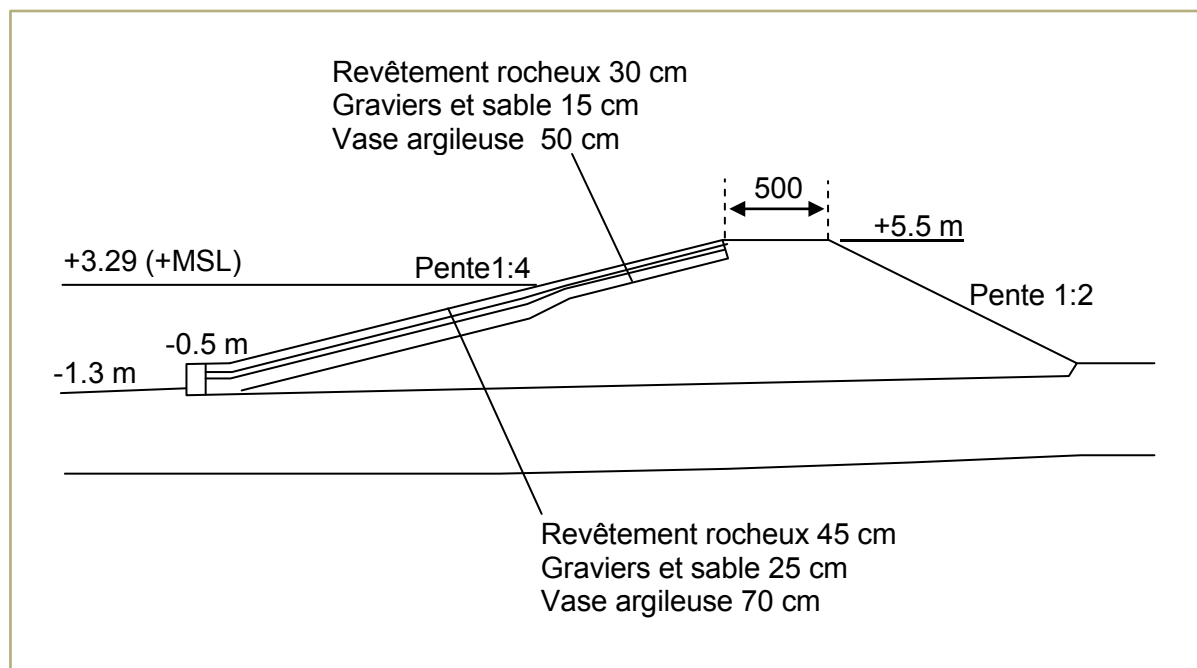


Source: Adapté de Mai, 2004

La côte de Nam Dinh est soumise à une érosion importante et de fortes ondes de tempête. Le système côtier a ainsi deux fonctions : (1) la défense contre l'inondation et (2) la protection des terres contre l'érosion (Mai, 2004). Il est important d'empêcher ces deux processus car l'érosion réduit les terres cultivables disponibles tandis que l'inondation et le débordement de la défense présentent un danger pour les vies humaines et entraînent l'intrusion d'eau salée ce qui diminue la production agricole. De plus, le risque permanent d'inondation décourage les fermiers d'adopter de nouvelles technologies ou d'investir dans d'autres sources de revenus (Mai, 2004).

Les digues de Nam Dinh ont des hauteurs de crête calculées par rapport aux marées hautes, aux ondes de tempête et à la remontée des vagues. Elles ont également une marge supplémentaire de sécurité. Cependant, les problèmes de financement et un manque d'équipement ont affecté la construction et abouti à des structures fragilisées et à des débordements (Mai, 2004). Une coupe transversale de digue de Nam Dinh est montrée à la figure 4.15. Ces structures possèdent généralement un centre terreux composé du sable local et d'argile et des revêtements faits de pierres naturelles, de blocs artificiels ou d'une couche d'argile. L'utilisation de la glaise locale est problématique, le matériau étant fin et ainsi aisément emporté par la mer (Mai, 2004).

Figure 4.15: Une coupe transversale des digues dans la province de Nam Dinh, Vietnam



Source: Mai, 2008

Bien que construites pour résister à des charges ayant un taux d'occurrence d'une fois en vingt ans, les digues de Nam Dinh ont en réalité un standard bien moins élevé et des défaillances sont à attendre presque chaque année (Mai et al., 2008). Les normes de conception revues à la baisse sont largement le fait des limitations de budget, du manque d'informations sur les conditions de la limite maritime comme les niveaux d'eau et la hauteur des vagues, et une absence de méthodes adéquates (Mai et al., 2008).

En réponse à ces problèmes, le gouvernement vietnamien a mis en place un grand programme de chantier de digues à qui deux tâches importantes ont été confiées :

1. Faire des recherches sur les normes de sécurité et les conditions locales afin de trouver les solutions optimales de défenses maritimes pour tout le pays.
2. Concevoir et construire de nouvelles digues aux endroits où elles sont absentes ou endommagées. Cela comprend le renforcement des digues existantes fondé sur les résultats de la tâche 1.

Le cas de Nam Dinh souligne plusieurs points importants à retenir pour la mise en œuvre de toute mesure d'adaptation des côtes :

1. Il convient de sélectionner une stratégie de gestion côtière adéquate. Etant donné les taux élevés d'érosion de la côte aux alentours de Nam Dinh et les financements disponibles limités pour la construction de défenses dures, les options d'adaptation et de repli pourraient être envisagées sur le long terme.
2. Il est vital d'ajuster la conception des mesures aux conditions locales. La réalisation d'une structure de défense côtière efficace exige des informations sur les conditions maritimes telles que les niveaux d'eau et le régime des vagues.
3. La capacité de financement des mesures de protection côtière est primordiale. Au Vietnam, les limitations de budget ont conduit à des structures fragilisées entraînant une illusion de sécurité. La construction de défenses qui ne respectent pas les normes peut encourager le développement dans des zones à haut risque.
4. Un investissement continu est nécessaire pour l'entretien des structures afin de réparer les dégâts causés par les événements météorologiques extrêmes.

4.1.5 Les barrières anti-tempête et les barrages de retenue

Définition

Les barrières anti-tempête et les barrages de retenue sont des constructions « en dur » ayant comme fonction principale de protéger les côtes des inondations. Ces structures ont de plus pour rôle de raccourcir la longueur nécessaire des défenses présentes sur les territoires derrière elles. Cela permet d'atténuer leur risque de défaillance et de réduire le coût lié à l'ajout de structures supplémentaires. Les barrières anti-tempête sont des structures fixes ou amovibles, ou des vannes qui peuvent être fermées en cas de prévision de niveaux extrêmes d'eau afin d'empêcher les inondations. Les barrages quant à eux sont des constructions fixes permanentes qui clôturent l'embouchure d'une rivière ou d'un estuaire. Dans ce cas comme pour les barrières fixes, l'eau est évacuée par les structures ou bien pompée (IOC, 2009).

Description

Les barrières anti-tempête et les barrages sont des projets de défense côtière de grande échelle, capables de protéger les passes, les rivières et les estuaires des ondes de tempête occasionnelles (CCNUCC, 1999). Ils fournissent une barrière physique qui empêche les ondes de s'étendre. Cela permet de maintenir les niveaux d'eau en amont relativement bas et de minimiser ainsi l'inondation. Ces deux solutions sont fréquemment mises en application là où l'on trouve des passes étroites, aux endroits où il n'est pas nécessaire d'avoir une structure très longue et où les défenses en place derrière la barrière peuvent être réduites en hauteur comme en longueur. Un exemple de barrage de retenue construit au Bangladesh est montré sur la photo de la figure 4.16.

Les barrières anti-tempête consistent généralement en une barrière flexible et amovible à travers l'embouchure d'une passe de marée ou d'un estuaire. Tandis qu'il n'existe pas d'exemples connus dans les pays en développement, un certain nombre de projets ont été réalisés dans les pays développés, principalement en Europe. On y trouve par exemple la barrière de la Tamise à Londres, celle de Maeslantkering à Rotterdam ou encore la barrière de protection anti-inondation de Saint-Pétersbourg, tandis que le chantier du projet MOSE à Venise prévoit de se terminer en 2012. Alors que chacun de ces projets poursuit globalement le même objectif, leur conception varie de manière significative.

Figure 4.16: Barrage de retenue en construction sur la rivière de Jamuna, Bangladesh

Des sacs d'argile sont utilisés pour la construction de ce barrage – on peut les voir empilés sur l'embouchure de la rivière à l'arrière-plan

Source: Photo K. Pilarczyk

Les barrières fixes et les barrages de retenue sont des options faisant appel à une technologie peu avancée ce qui en fait un choix approprié pour les pays en développement. Ils consistent en des barrières inamovibles situées sur les passes ou les estuaires et qui sont construites pour obtenir la fermeture graduée ou totale d'une passe d'eau. La fermeture graduée peut être accomplie au moyen d'une construction terrestre réduisant au fur et à mesure l'arrivée d'eau. Elle peut sinon se faire à l'aide d'une barrière sous-marine s'élevant progressivement niveau après niveau. Une autre alternative est la fermeture soudaine qui bloque l'accès de la passe en une opération à l'aide de vannes préinstallées ou par le placement d'un caisson⁷.

Parmi les exemples de barrages, on trouve celui de Feni au Bangladesh construit principalement pour fournir un réservoir d'eau douce à des fins d'irrigation, ou encore plusieurs projets en Corée de fermeture de bassins créés par la marée pour des raisons foncières (van Houweninge & de Graauw, 1982) ainsi que l'Afsluitdijk aux Pays-Bas qui sépare l'actuel lac IJsselmeer de la Mer du Nord.

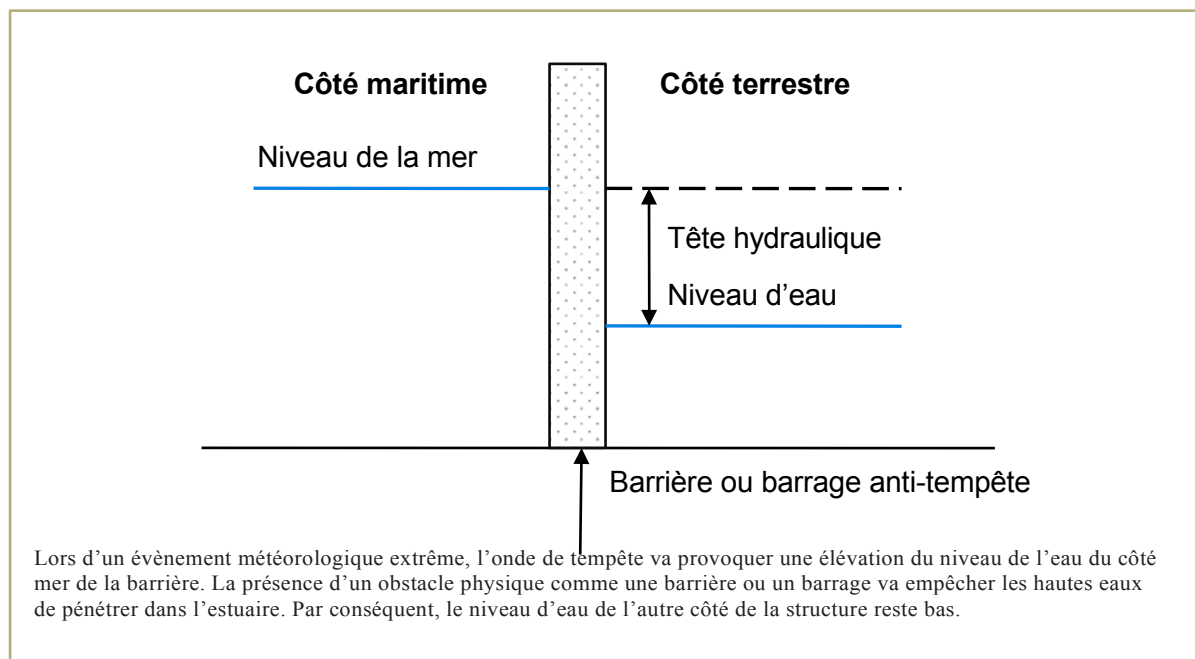
Les barrières amovibles nécessitent la mise en œuvre simultanée d'un système de surveillance et de prévision des ondes de tempête (une option d'adaptation en tant que telle présentée à la section 4.2.5).

⁷ Structure de retenue étanche

Cela permet de mettre en place la barrière avant l'arrivée d'une tempête. Les barrages de retenue étant des structures fixes, ils ne nécessitent pas de tels systèmes.

Tandis qu'il existe des différences claires entre les barrières anti-tempête et les barrages de retenue, l'objectif de protection côtière de ces structures est le même ; elles visent à empêcher les niveaux d'eau extrêmes de pénétrer dans l'estuaire. La méthode employée pour cela est illustrée sur la figure 4.17

Figure 4.17: Schéma illustrant la manière dont les barrières anti-tempête et les barrages empêchent l'inondation côtière.



Les barrières anti-tempête et les barrages peuvent aisément être intégrés à des systèmes plus larges de prévention des inondations. Les barrières peuvent par exemple être utilisées avec d'autres ouvrages de protection comme les digues et les systèmes d'alerte anti-inondation (Sections 4.1.4 et 4.2.5).

Une importante caractéristique des barrières anti-tempête est qu'elles sont amovibles. Elles sont en effet souvent partiellement ouvertes lorsque les conditions météorologiques sont normales. Cela permet aux marées et à l'eau salée de pénétrer dans les zones situées derrière la barrière (Hillen et al., 2010) et permet un accès continu aux voies d'eaux pour la navigation et les transports. A l'inverse, les barrages de retenue coupent en permanence l'accès aux estuaires. Cela empêche les interactions entre l'eau douce et l'eau de mer et également l'utilisation des voies navigables.

Les avantages liés aux barrières anti-tempête et aux barrages de retenue

Les barrières ainsi que les barrages de retenue fournissent un degré élevé de protection contre l'inondation côtière en empêchant l'onde de tempête de pénétrer dans les zones estuariennes. Bien qu'une fermeture permanente de l'estuaire à l'aide d'un barrage de retenue aboutisse au même résultat, l'utilisation d'une barrière amovible permet aux voies navigables de rester accessibles lorsque les conditions météorologiques

sont normales. Cela peut être bénéfique pour le commerce si l'estuaire abrite un port de commerce et est également une bonne chose pour les espèces vivant dans l'estuaire et qui sont adaptées aux eaux saumâtres.⁸

Ces deux technologies réduisent efficacement les niveaux extrêmes d'eau dans la zone située derrière la structure, à condition qu'elles soient fermées de manière opportune. Cela permet aux défenses existantes dans cette zone de ne plus être aussi robustes (Hillen et al., 2010) ce qui va réduire leurs coûts de construction et de maintenance.

Les niveaux extrêmes d'eau étant moins élevés, la longueur du système de protection contre les inondations peut également être raccourcie (Hillen et al., 2010). Cela peut aussi participer à la réduction des coûts de construction et de maintenance des défenses situées sur les terres protégées par la structure.

Il est possible de construire plusieurs barrières dans le but de fermer d'étroits passages d'eau au sein d'un système soumis aux marées, comme par exemple un lagon. C'est le cas à Venise avec le projet MOSE dans le cadre duquel trois barrières sont en cours de construction pour permettre la fermeture de trois passes d'eau étroites dans le lagon. En construisant celles-ci, le dispositif présente l'avantage supplémentaire d'encourager la capacité naturelle du lagon à se vidanger lui-même. Cela est permis par l'ouverture et de la fermeture indépendante des barrières sélectionnées selon la direction du vent. Le fait de fermer les barrières stimule la capacité du vent à pousser l'eau en dehors du lagon, augmentant ainsi le renouvellement de l'eau et permettant la dispersion des polluants.

Par ailleurs, les barrages de retenue ont l'avantage de former une frontière permanente entre l'eau douce et la mer. Au Bangladesh par exemple, le barrage de Feni a été construit principalement pour fournir un réservoir d'eau douce à des fins d'irrigation. Les barrages peuvent également être mis en œuvre conjointement avec la technologie de récupération territoriale (cf. section 4.1.6) et peuvent même servir à la production d'énergie marémotrice (van Houweninge & de Graauw, 1982).

Les inconvénients liés aux barrières anti-tempête et aux barrages de retenue

L'un des principaux inconvénients liés aux barrières anti-tempête est le coût élevé du capital et de la maintenance. Un investissement significatif est requis pour la construction de ces structures et leur entretien. De plus, les barrières amovibles exigent un investissement supplémentaire dans des systèmes d'alerte anti-inondation qui permettent de déterminer quand la barrière doit être fermée. Ces dépenses peuvent être évitées par l'utilisation d'un barrage de retenue, qui implique également des coûts moins élevés de maintenance.

Un autre inconvénient lié aux deux technologies est le fait qu'elles puissent potentiellement causer des inondations dans les terres situées derrière la barrière lorsque les niveaux d'eau des rivières montent et, dans le cas des barrières amovibles, si la défense reste fermée sur une longue période. Dans ce cas, l'inondation est causée par l'eau qui reflue vers les terres, la barrière obstruant le débit continu de la rivière. Cela ne devrait cependant pas poser problème, étant donné que les barrages sont conçus pour s'adapter à des débits fluviaux extrêmes et que dans les cas des barrières amovibles, des études poussées ont été menées afin de déterminer la durée maximum de fermeture.

8 Un mélange de sel et d'eau douce – les eaux saumâtres sont salées, mais pas autant que l'eau de la mer.

Tableau 4.5: Aperçu des types de barrière anti-tempête et de leurs coûts

Nom et lieu	Type de barrière	Tête hydraulique (m)	Coûts de construction (niveaux de prix de 2009) (mil. US\$)
Ems, Allemagne	Vannes secteur	3.8	519
Barrière de la Tamise, Londres, Royaume-Uni	Vannes secteur	7.2	2043
IHNC Barrier, Nouvelle Orléans, USA	Vannes secteur	4	730
Seabrook Barrier, Nouvelle Orléans, USA	Vannes relevables verticales/vannes secteur	4	162
Hartel Barrier, Canal d'Hartel, PB	Vannes relevables verticales	5.5	202
Eastern Scheldt Barrier, PB	Vannes relevables verticales	5	5670
Maeslantkering Rotterdam, PB	Vanne secteur flottante	5	925
Projet MOSE, Venise, IT	Clapets	3	6596
Ramspol, Près d'IJssellake, PB	Barrière par en-dessous	4.4	186

Source: Hillen et al., 2010

Les barrières comme les barrages de retenue sont capables de modifier les propriétés chimiques, physiques et biologiques des systèmes des estuaires en altérant les flux d'entrée et de sortie de l'eau. Cela peut impliquer une altération de la salinité de l'eau, des températures, des matières en suspension et des nutriments, qui tous ont une influence sur l'ensemble des organismes estuariens (Elgershuizen, 1981). Ces répercussions seront plus importantes dans le cas des barrages de retenue, leur fermeture étant permanente. L'installation de vannes amovibles plutôt que fixes peut atténuer ces effets (IOC, 2009).

Les coûts et besoins financiers

Le tableau 4.5 décrit les coûts de construction de barrières anti-tempête concernant des projets terminés ou près de l'être. N'ayant pu trouver d'exemples connus de barrières amovibles dans les pays en développement, il n'a malheureusement pas été possible d'inclure les estimations de coûts pour ces pays.

Les coûts de construction sont très variables, comme montré dans le tableau 4.5. L'architecture de la structure et la tête hydraulique au-dessus de la barrière (voir la figure 4.17) sont parmi les facteurs déterminants.

Hillen et al. (2010) ont fait des recherches sur le coût des barrières anti-tempête et ont découvert que la tête hydraulique est un élément important pour déterminer les forces exercées sur la barrière et les propriétés et coûts de construction nécessaires. Ils ont également observé qu'il n'y a qu'une faible relation entre la tête et les coûts à l'unité, bien que les facteurs impliqués dans le calcul de ces coûts restent encore à préciser. Ils ont estimé que les coûts à l'unité pour la construction de barrières anti-tempête varient entre 0.7 et 3.5 millions par mètre de largeur (niveaux de prix de 2009). Les coûts de maintenance sont des dépenses courantes qu'il est également nécessaires de prendre en compte ; ils ont été estimés à environ 5-10% du capital par an pour les barrières amovibles (Nicholls et al., 2007b).

Les coûts de construction des barrages au Bangladesh sont détaillés dans le tableau 4.6. Les trois projets pour qui les données sont disponibles sont majoritairement composés de matériaux traditionnels mais ont bénéficié des conseils de sociétés de conseils expérimentées en ingénierie côtière. Des méthodes hollandaises de construction ont notamment été utilisées dans les trois projets.

Tableau 4.6: Coûts de barrages réalisés au Bangladesh

Project	Year Completed	Barrier width x depth (m)	Construction Materials	Cost (2009 value) ¹
Feni River	1985	1200 m de largeur Profondeur inconnue	Sacs remplis d'argile Bambous Bottes de roseaux Poutres en acier Briques et blocs	US\$38 million
Chaka Maya Khal	1979	210 x 5.5	Bambous Feuilles de palmiers Bottes de roseaux Piles de bois Jute	US\$1.3 million
Amtali Khal	1982	130 x 8	Bottes de roseaux Feuilles de golpata Sacs remplis d'argile Bois empilé	Tk ² 16 million

1. En raison de l'absence de données sur l'historique des taux de change, il n'a pas été possible de convertir les coûts dans la même monnaie.

2. Le Taka, monnaie du Bangladesh.

Source: DHV Haskoning, 2007

Encadré 4.5: Facteurs influençant les coûts de construction des barrières anti-tempête et des barrages de retenue

- Type de barrière
- Caractéristiques des sols locaux
- Hauteur désirée de la barrière
- Tête hydraulique requise pour la structure
- Charges anticipées des vagues; des charges plus fortes exigent des structures plus robustes et plus coûteuses
- Etapes de la construction; les coûts sont plus bas pour une construction en une seule phase (Nicholls & Leatherman, 1995)
- Les matériaux de construction (blocs de gravats, éléments en béton préfabriqué, métal, terre, etc.)
- Proximité et disponibilité de matériaux de construction bruts
- Disponibilité et coût des ressources humaines, y compris de l'expertise.

Comme montré dans les tableaux 4.5 et 4.6, les coûts de construction sont très variables et peuvent être influencés par les facteurs détaillés dans l'encadré 4.5.

De plus, les coûts de construction et de maintenance sont susceptibles d'augmenter dans le futur en réaction à la SLR (Burgess & Townend, 2004; Townend & Burgess, 2004). Cela est dû à la plus grande profondeur de l'eau en face de la structure qui provoque une augmentation de la hauteur des vagues et de la charge de celles-ci sur la défense.

Les capacités institutionnelles et organisationnelles requises

Une mise en œuvre efficace des barrières anti-tempête requiert des études techniques approfondies au préalable afin de les concevoir et les installer (IOC, 2009). La conception est susceptible d'être complexe au niveau technologique et presque impossible à entreprendre au niveau communautaire. De plus, comme mentionné dans la section traitant des besoins financiers, ces structures peuvent être très coûteuses et les fonds peuvent manquer au niveau local. Il est donc possible d'obtenir une aide technique de la part de sociétés de conseils spécialisées en solutions côtières ou d'autres organisations expérimentées, et des fonds de la part d'organisations externes comme des ONG, le gouvernement local ou des entreprises qui vont bénéficier de la structure.

En plus de l'aspect matériel, une prévision efficace ainsi que des systèmes d'alerte performants sont nécessaires pour la mise en œuvre d'une barrière anti-tempête amovible (cf. la section 4.2.5 pour plus d'informations sur les services d'alerte à l'inondation). Cela peut exiger une capacité institutionnelle assez importante (IOC, 2009). De plus, la mise en place d'un système d'alerte implique de réaliser certaines ou toutes les tâches suivantes: conception du système, gestion et prévision des crues, opération, détection des tempêtes et diffusion de l'alerte (Sene, 2008).

Les barrages de retenue et les barrières fixes sont des alternatives requérant un niveau de technologie moins élevé que pour les barrières amovibles. Un certain nombre de ces projets ont été réalisés avec succès dans des pays comme le Bangladesh ou la Corée. Afin de rendre ces projets plus faisables au niveau local, les méthodes de constructions peuvent utiliser des matériaux et de la main-d'œuvre locaux, bien que des conseils provenant de sociétés externes expérimentées dans ce domaine puissent se révéler bénéfiques (DHV Haskoning, 2007).

Les facteurs entravant la mise en œuvre

Le coût élevé de la construction des barrières anti-tempête (montré dans le tableau 4.5) et le besoin de connaissances spécialisées pour les phases de conception et de construction peuvent présenter un obstacle à la mise en œuvre de ces structures.

De plus, les barrières et les barrages de retenue ne conviennent pas à tous les lieux. Ils sont plus adaptés aux endroits où une embouchure étroite de rivière ou une passe d'eau peuvent être closes. Ils sont sinon pertinents dans le cas où la longueur des défenses situées derrière la barrière peut être substantiellement réduite ; dans le cas de défenses assez courtes, il peut être plus efficace de les améliorer plutôt que de construire une barrière.

Bien que la construction de barrières sur des passages étroits soit moins coûteuse, il apparaît que les barrières anti-tempête puissent aussi être mises en œuvre à une plus grande échelle, à condition de s'assurer que des financements suffisants soient disponibles et qu'une volonté politique existe pour la soutenir. La barrière de protection anti-inondation de Saint-Pétersbourg, par exemple, consiste en deux barrières anti-tempête amovibles rassemblées dans une longue barrière de 25,4 km de long, construite sur l'embouchure de la Neva Bay sur le Golfe de Finlande.

Les facteurs favorisant la mise en œuvre

Les possibilités de mise en œuvre des barrières anti-tempête sont nombreuses. Le projet MOSE à Venise, en Italie, a démontré qu'en plus de la protection contre les inondations, les barrières présentaient, des avantages annexes. Par exemple, l'ouverture et la fermeture de certaines barrières selon la direction du vent peut faciliter la dispersion des polluants, participant ainsi à améliorer la qualité de l'eau sur le littoral. Cela est bénéfique pour le tourisme et les loisirs.

Les barrières anti-tempête peuvent également offrir des services supplémentaires en termes de loisirs, infrastructures et approvisionnement en eau lorsqu'elles sont bien conçues. Le Marina Barrage à Singapour a été terminé en 2008 et est un excellent exemple des bénéfices annexes qui peuvent être obtenus par la construction d'une barrière performante. En plus d'offrir une protection contre l'inondation côtière, cette barrière fournit également un large réservoir qui permet de répondre aux besoins en eau de l'un des secteurs les plus urbanisés de l'île (Moh & Su, 2009). L'effet des marées étant supprimé à l'intérieur du réservoir, cette zone est maintenant idéale pour accueillir des activités de loisirs telles que le bateau, la planche à voile et le ski nautique (Moh & Su, 2009). Avec l'installation d'une galerie d'arts et de commerces à l'intérieur de la structure, la barrière est même devenue une attraction touristique importante.

Certains projets de barrière anti-tempête ont également montré qu'ils agissaient comme catalyseur de développement dans les régions protégées. Cela a pu être observé après la construction de la Barrière de la Tamise, lorsque les « docklands » abandonnés ont gagné un nouveau souffle à travers l'aménagement d'un nouveau réseau de transports, de nouvelles habitations, l'installation d'entreprises ainsi que le quartier des affaires autour de Canary Wharf (Nicholls, 2006).

Il pourrait même y avoir des possibilités dans le futur d'intégrer les barrières anti-tempête et les barrages de retenue à la production d'hydroélectricité renouvelable. Cela permettra de fournir de l'énergie durable sur le long terme ainsi que l'assurance d'un approvisionnement énergétique pour les communautés locales.

Etude de cas: Le barrage de retenue de Chaka Maya au Bangladesh

Chaka Maya est situé dans le district sud-ouest de Patuakhali au Bangladesh. En 1978-1979, un barrage de retenue fut construit sur le canal de l'Andharmanik River, avant tout afin de contrôler des inondations. Les informations qui suivent sont extraites de DHV Haskoning (2007).

Le canal sur lequel le barrage a été construit fait 210m de large avec une profondeur moyenne de 5,5m en dessous du MWL. En raison de la taille et de la profondeur du canal, les méthodes traditionnelles ne pouvaient pas être employées pour la construction. Par conséquent, le barrage fut érigé selon la méthode hollandaise, recommandée par une société de conseils internationale spécialisée en ingénierie côtière. Cette méthode consistait à l'utilisation de matériaux et de main d'œuvre disponibles sur place pour fermer progressivement le canal en construisant la barrière couche par couche à partir du fonds.

Le barrage a été construit en quatre étapes. Premièrement, de larges matelas de protection mesurant 17 x 45 m ont été installés au fond du canal. Leur fonction est d'empêcher l'érosion due aux grandes vitesses d'écoulement et aux turbulences. Les matelas se composent de couches de bambous, roseaux et de feuilles de palmier, attachés par des cordes de jute.

Puis, un total de 5500 sacs remplis d'argile a été utilisé pour construire un rebord pour le niveau d'eau le plus bas. Celui-ci fut ensuite recouvert de matelas de protection supplémentaires lestés de sacs de terre. Le but de cette étape était de bloquer l'arrivée d'eau. Le compartiment créé, appelé le cofferdam, consiste en trois compartiments avec des passerelles sur des pieux en bois.

Pour finir, le compartiment étanche de 8m de large a été rempli de terre selon les dimensions et les niveaux prévus à la conception. Ce barrage de terre a été conçu de manière à ce que la section transversale et la hauteur des parois puissent résister à un niveau d'eau et un régime de vagues correspondant à une tempête modélisée avec une probabilité d'occurrence de 1 en 20 ans.

En 1979, le coût final du projet a atteint 500,000 US\$ et a requis 180,000 jours de travail effectif, réalisés par des habitants des communautés locales. En réajustant ce montant pour prendre en compte l'inflation, le coût représente environ 1.3 million US\$ en 2009.

4.1.6 La récupération territoriale

Définition

L'objectif principal de la récupération territoriale n'est ni la réduction de l'érosion ni la protection contre les tempêtes. Le but de cette méthode est d'aménager des zones qui étaient auparavant immergées à marée haute pour en faire de nouveaux espaces exploitables. Cependant, si elles sont bien conçues en prenant en compte les répercussions potentielles liées au changement climatique, ces mesures peuvent servir à réduire l'exposition des zones alentours au risque d'inondation. A Singapour et à Hong-Kong par exemple, il existe des niveaux minimum d'assèchement imposés afin d'anticiper l'élévation du niveau de la mer dans le futur.

Ce type de récupération territoriale est souvent réalisé en construisant des enceintes ou en comblant des zones sur les côtes ou à proximité (Bird, 2005). Cette méthode peut être désignée par plusieurs termes tels que la récupération territoriale, l'assèchement ou le remblai des sols ou encore le fait de faire avancer la position du trait de côte.

Description

Cette technique représente une forme plus agressive de protection côtière qui pourrait s'appeler « attaque » ou « avancée de position » dans la typologie de gestion des côtes détaillée à la figure 3.2. Elle est généralement employée pour l'acquisition de terres à des fins agricoles ou de développement urbain (French, 1997). On la retrouve plus particulièrement aux alentours des villes côtières comme Singapour et Hong-Kong où la valeur des terrains est très élevée, justifiant ainsi les coûts associés à la mise en œuvre. Des aménagements de terres immergées ont également été entrepris à Dubaï dans le but de développer des zones résidentielles ou pour des activités de loisirs et de divertissement. L'île « The Palm » et l'archipel « The World » en font notamment partie.

En diminuant la longueur de la côte, la récupération territoriale peut contribuer à la défense du littoral, comme cela a été le cas sur la côte allemande de la Mer du Nord (Sterr, 2008). Cette méthode restera essentiellement bénéfique en matière d'acquisition de terres supplémentaires mais avec la hausse du niveau de la mer, il est utile d'envisager son utilisation en tant que moyen de défense côtière.

La récupération territoriale est plus fréquemment utilisée dans les estuaires ou les deltas en raison des potentielles exploitations industrielles qui s'y trouvent comme des ports. De plus, la présence de larges terrains plats et peu coûteux, accessibles à la fois par la terre et par la mer est un grand avantage (French, 1997). Dans les zones qui ont un budget sédimentaire positif comme les deltas, l'assèchement des terres a souvent été facilité par le processus constant d'ensablement (cf. Li et al., 2004). Cela devrait être de moins en moins fréquent au 21ème siècle, les réserves en sédiments s'épuisant (cf. Syvitski et al., 2009). Cependant, l'aménagement artificiel de nouveaux territoires devrait continuer, comme avec le projet The Palm à Dubaï, en prenant en considération les implications de la SLR.

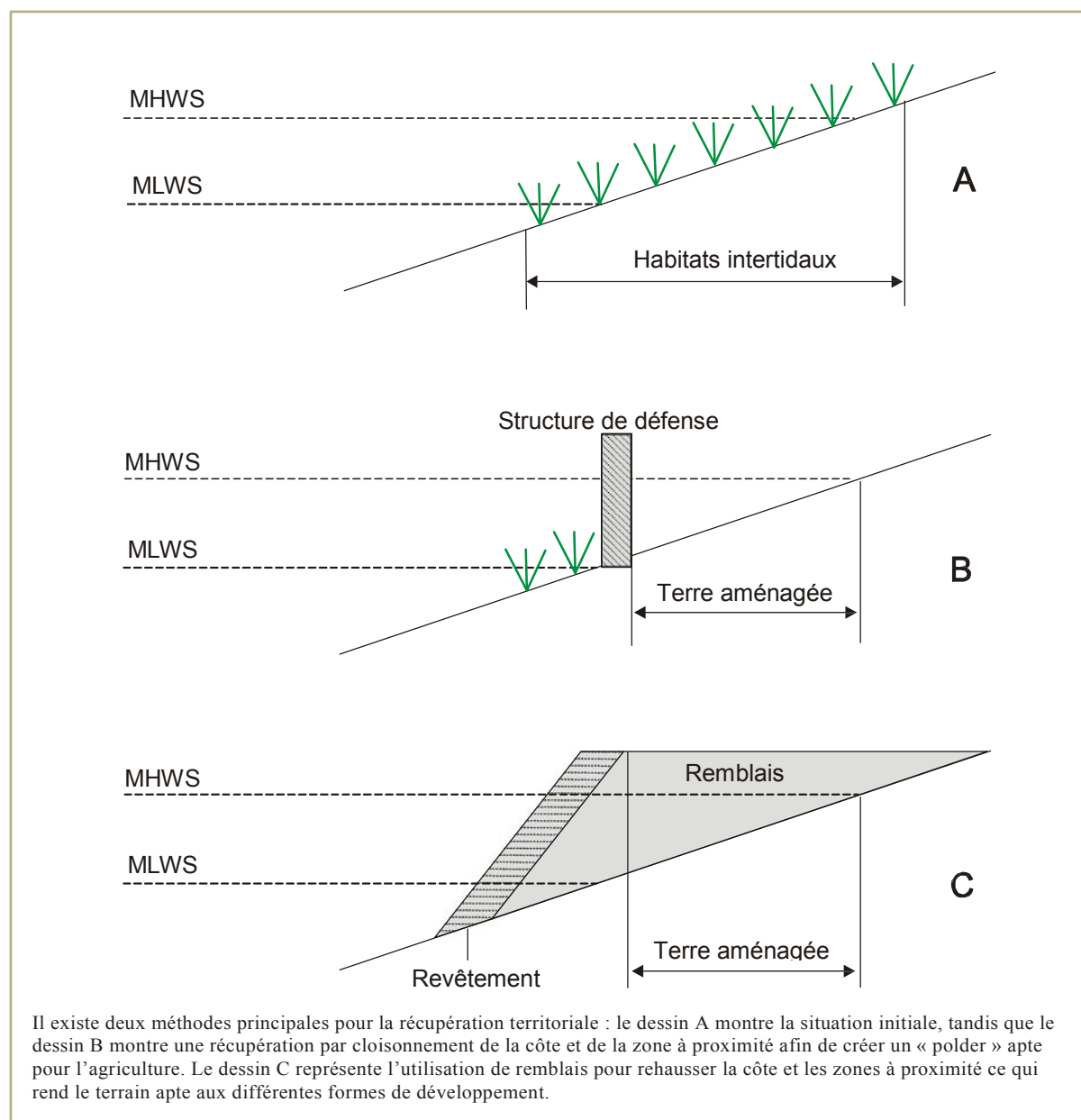
Afin de fermer les zones pour les aménager, des défenses dures doivent être construites sur les bords du trait de côte existant. Des digues (section 4.1.4) et des murs de protection (section 4.1.3) sont généralement employés pour protéger le terrain concerné des inondations causées par la mer (Burgess et al., 2007).

Cette technologie est généralement mise en œuvre dans les parties les plus élevées de la zone intertidale, car l'énergie des vagues est réduite au contact des habitats intertidaux moins profonds. Cela signifie donc que moins de remblais seront nécessaires pour aménager l'espace concerné. Les parties hautes sont également choisies car les défenses associées n'auront pas besoin d'être très élevées pour les protéger du débordement. Enfin, si la terre est destinée à des fins agricoles, la partie haute de la zone intertidale est celle qui présente le sol le plus riche et qui conviendra mieux à ce type d'exploitation que les parties basses (French, 1997).

Les zones intertidales basses et infratidales peuvent également être utilisées pour la récupération de terres, bien que ces projets exigent une ingénierie et un investissement plus importants. Dans le cas où cela arrive, il convient de fortement protéger ces zones de l'inondation ou d'augmenter significativement leur hauteur au moyen de dépôt de sédiments. Cette dernière action peut être réalisée de la même façon que pour le rechargement de plage (cf. section 4.1.1). Des projets ambitieux de récupération territoriale ont été entrepris à des fins d'urbanisation à Singapour et à Hong-Kong, à la fois sur des zones intertidales basses et des zones infratidales en rehaussant le terrain.

Comme il a été mentionné plus haut, les deux méthodes principales utilisées consistent à : (1) cloisonner des parties du littoral ou des zones à proximité de la côte et les protéger ; et (2) combler ces zones avec des matériaux appropriés en utilisant souvent les mêmes techniques que pour le rechargement artificiel de plage. Ces approches sont illustrées à la figure 4.18. Lorsqu'il s'agit de l'adaptation au changement climatique, la méthode de comblement semble être la plus appropriée car elle n'entraîne pas de risque élevé d'inondation.

Figure 4.18: Les principales méthodes de récupération territoriale



Les avantages liés à la récupération territoriale

Le principal avantage apporté par cette technologie est le gain de terres côtières supplémentaires qu'elle entraîne, qui pourront ensuite être employées à différents usages tels que l'exploitation agricole ou le développement économique. Concernant ce dernier, la zone côtière offre un potentiel considérable en raison de son double accès par la terre et la mer qui est essentiel pour le développement portuaire, et du fait d'être un lieu prisé pour les habitations et les infrastructures de loisirs.

Les inconvénients liés à la récupération territoriale

Cette technologie remonte à environ 2000 ans. A l'époque, la récupération territoriale était entreprise afin de fournir plus de terres agricoles, en particulier dans les zones où l'arrière-pays était inexploitable. Plus récemment, cette méthode est davantage utilisée pour la construction d'infrastructures portuaires ou de sites industriels (French, 1997). Bien que le gain de terres généré soit bénéfique, il est aujourd'hui généralement admis que cette méthode est également à l'origine d'un certain nombre de répercussions négatives.

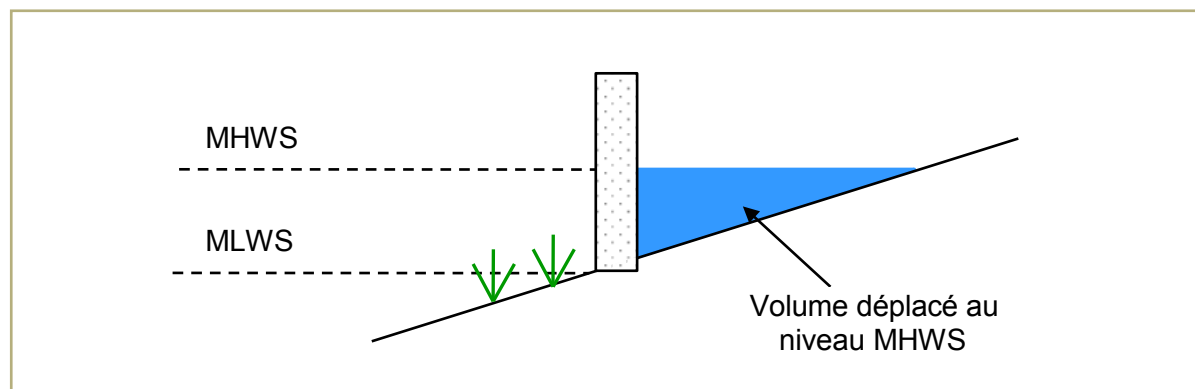
Le processus de récupération requiert soit une enceinte de défenses dures entourant les habitats intertidaux soit une élévation de la hauteur des terrains au-dessus du niveau de la mer pour empêcher l'inondation. Cela entraîne la perte directe des habitats tels que les marais salants, les plats intertidaux ainsi que les dunes de sable (French, 1997). Cet aspect est important à prendre en compte, de nombreuses espèces d'oiseaux et de plantes s'étant adaptés spécifiquement à la vie dans ces zones. De plus, ces habitats sont déjà en déclin en raison de la compression côtière et du développement d'origine humaine.

Un autre inconvénient lié à cette méthode est le dessèchement. A la suite du drainage opéré sur le terrain qui a une teneur élevée en eau, celui-ci s'assèche, se tasse et se réduit (French, 1997), diminuant ainsi son élévation par rapport au niveau de la mer. Cela entraîne des différences de niveau de terrain entre l'intérieur des défenses où ce processus a lieu et l'extérieur où les environnements intertidaux naturels continuent d'amasser des sédiments. Cette différence est exacerbée par la SLR et rend les défenses d'autant plus indispensables (Burgess et al., 2007). Cela demande par ailleurs un engagement continu pour la défense de ces zones (French, 1997).

L'emploi de défenses dures pour la récupération territoriale tel que montré dans la figure 4.18 peut avoir des répercussions négatives car ces structures entraînent un phénomène d'érosion et d'affouillement du littoral. Elles empêchent également l'adaptation naturelle de l'habitat à des facteurs évolutifs tels que la SLR (French, 1997). D'autres effets négatifs liés aux défenses dures sont présentés dans les sections 4.1.3 et 4.1.5.

Quel que soit le type de récupération employé, cela entraînera un déplacement d'eau pendant le cycle naturel des marées, comme illustré sur la figure 4.19. A cause de ce déplacement, les marées montantes bénéficient d'une zone plus petite d'inondation ce qui peut potentiellement avoir des conséquences biologiques négatives et peut également augmenter le coefficient des marées en amont (French, 1997).

Figure 4.19: Illustration du volume d'eau déplacé au niveau MHWS provoqué par la récupération



En déplaçant de larges volumes d'eau, cette technologie peut également altérer les caractéristiques des estuaires concernant l'érosion/l'accrétion. Celles-ci dépendent largement de la magnitude des marées montantes et descendantes. Les estuaires accumulent généralement des sédiments lorsqu'ils sont en grande partie immergés, c'est-à-dire lorsque la marée montante est d'une magnitude plus élevée que celle descendante. Cependant, en déplaçant l'eau durant les marées montantes, la récupération peut changer cette tendance et soumettre l'estuaire à un reflux dominant, encourageant le transport des sédiments vers le large et augmentant ainsi l'érosion (Friedrichs et al., 1992). Si le volume de terrain concerné est important, cela peut créer de réels problèmes d'érosion dans un estuaire auparavant stable.

La construction de défenses dures empêche les interactions entre la mer et l'arrière-pays. Si les dépôts côtiers comme les dunes, les vasières ou les marais salants sont situés derrière ces défenses, ils ne peuvent pas contribuer au budget sédimentaire local. Cela peut s'avérer problématique, ces contributions étant nécessaires en cas d'érosion. Sans elles, un déficit en sédiments risque d'apparaître ainsi que les problèmes d'érosion qui y sont associés. (French, 1997).

La récupération territoriale peut de plus créer une contamination de la zone côtière et une acidification des eaux côtières. Cela peut être un problème si le terrain concerné est destiné à des fins agricoles ou si les eaux côtières connaissent une activité de pêche importante. Des contaminants risquent d'être introduits par l'utilisation de sédiments issus de dragage pour rehausser le niveau de terrain. Ceux-ci proviennent de produits chimiques dangereux utilisés par des industries situées sur la côte ou par des bateaux, ou issus de sources en amont. D'autre part, l'acidification est liée à l'action de bactéries présentes dans les sédiments estuariens qui créent de l'acide sulfurique lorsqu'elles sont en contact avec l'air (Anderson, 1991).

Les coûts et besoins financiers

Le travail de recherche effectué sur les coûts unitaires des défenses côtières par Linham et al. (2010) évalue le coût de la récupération territorial par rehaussement du sol en Asie du Sud-Est entre 3 et 5USD par mètre cube de matériel utilisé (niveaux de prix de 2009). Pour le port de Hong-Kong, Yim (1995) décrit des coûts à hauteur de 3.9USD par mètre carré de terrain récupéré dans le cas de remblais marins, et de 6.4USD si le matériel de remblai provient des terres (prix harmonisés à ceux de 2009).

Encadré 4.6: Facteurs influençant le coût des projets de récupération territoriale

- Méthode choisie (cloisonnement de zones intertidales au moyen de défenses dures ou rehaussement des sols auparavant immergés)
- Disponibilité et proximité de matériaux de remblai provenant de sites sur la côte ou au large
- Nombre, type, taille et disponibilité de dragues
- Besoin ou non de mesures de défenses dures pour protéger le nouveau terrain de l'inondation et l'érosion côtières.
- Taille du projet et économies d'échelle potentielles
- Pertes estimées en matériaux

Dans le cas où la récupération territoriale s'effectue par le cloisonnement des zones intertidales, il faudra compter avec des coûts supplémentaires importants associés à la construction de mesures de protection telles que les brise lames ou les digues (voir les sections 4.1.3 et 4.1.4) pour empêcher l'inondation et l'érosion de ces zones. Les coûts entraînés par la construction de ces structures sont déjà été décrits dans les sections 4.1.3 et 4.1.4. Il convient de plus d'y ajouter les frais d'entretien.

Si la méthode employée est le rehaussement de terres immergées, le facteur déterminant est le coût des matériaux de remblai, qui est à son tour déterminé par l'accès aux matériaux appropriés, leur proximité du site de construction et les caractéristiques du site concerné qui influencent le type d'équipement pouvant être employé pour le dragage. Le prix des matériaux de remblai sont susceptibles d'augmenter dans le futur en raison de la demande croissante et des restrictions plus fortes sur le dragage.

Les capacités institutionnelles et organisationnelles requises

Les capacités institutionnelles et organisationnelles requises pour les projets de récupération territoriale dépendent largement de l'échelle et de l'ambition du projet. Les petites opérations menées à des fins agricoles sont plus susceptibles d'être menées au niveau communautaire qu'un gros projet d'élargissement ou de création d'une île comme cela s'est vu à Singapour ou Dubaï. Ces derniers impliquent la participation de grandes organisations et des financements importants.

La récupération de terres sur les parties hautes des marges intertidales peut être aisément réalisée au niveau local en raison de l'énergie des vagues moins élevées à cet endroit et aux besoins peu élevés en matériaux. La même technologie dans des fonds plus profonds requiert la construction de mesures de défense et fait appel à des quantités importantes de matériaux de remblai.

Des projets de récupération à plus petite échelle sont menés depuis des siècles, les besoins en technologie étant moindres. Les projets de l'époque consistaient souvent à la construction d'une digue pour isoler la zone concernée de la mer, suivie d'activités de drainage. Cependant, ce type de méthode a conduit à des problèmes environnementaux importants qui n'avaient pas été anticipés. Ceux-ci sont discutés dans la section traitant des inconvénients liés à cette technologie. C'est pourquoi, si ces projets peuvent être menés au niveau local, il convient pour autant de prendre en compte ces répercussions et de bien les peser par rapport aux avantages. Si la mise en œuvre d'un projet est finalement décidée, l'implication de grandes organisations ayant une base scientifique et technologique solide peut permettre de réduire les effets négatifs.

Les facteurs entravant la mise en œuvre

L'un des facteurs entravant l'utilisation de cette technologie est le coût potentiel à long terme. Le processus de récupération crée un terrain qui aura besoin d'être protégé contre l'inondation et/ou l'érosion. La construction de défenses telles que des brise lames ou des digues (section 4.1.2 et 4.1.4) est donc rendue nécessaire, causant des coûts supplémentaires de construction et d'entretien.

Les questions environnementales peuvent présenter un autre obstacle à la mise en œuvre. La récupération territoriale a lieu plus fréquemment dans les estuaires en raison de l'abri qu'ils offrent et la présence de larges zones de terrain plat peu coûteux et accessible de la terre comme de la mer (French, 1997). Cependant, un certain nombre d'espèces de plantes et d'oiseaux sont spécifiquement adaptés à cet habitat. En aménageant ces terres, des environnements naturels importants sont détruits et des effets en chaîne peuvent avoir lieu telles qu'une dominance de reflux ou d'immersion dans l'estuaire. Par conséquent, une opposition à cette technologie pourrait apparaître pour des raisons environnementales. Dans l'Union Européenne, il est obligatoire de verser une compensation pour les habitats perdus ; cela est susceptible de se généraliser dans d'autres pays au cours du 21^{ème} siècle.

Comme expliqué dans la section traitant des inconvénients, les répercussions négatives de la récupération territoriale sont aujourd'hui mieux comprises que par le passé. Selon un principe de précaution, notre connaissance actuelle de tels impacts plaiderait pour une réduction de l'usage de cette technologie

Les facteurs favorisant la mise en œuvre

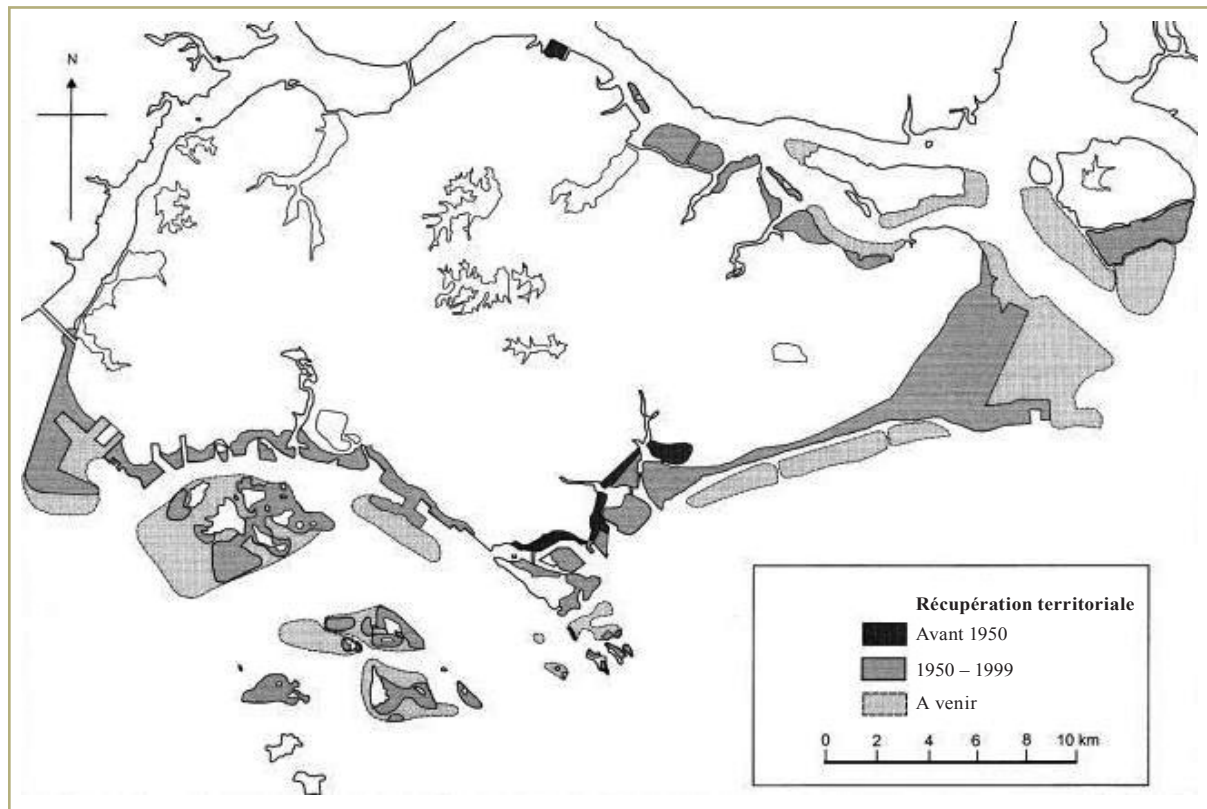
Des opportunités de mise en œuvre existent là où la demande en terrain sur la côte est élevée. Généralement, ils sont convoités pour trois usages; (1) transports – principalement les ports et les aéroports ; (2) loisirs ; et (3) et résidentiel. En raison de ces principaux usages, la récupération de terres a surtout lieu aux alentours des villes. Au vu de l'augmentation prévue de la population dans les zones côtières, cette méthode pourrait fournir une source foncière précieuse. La création de terres côtières de grandes valeurs peut également avoir des effets bénéfiques sur le développement de ces zones.

La pratique du rehaussement des niveaux de terrain peut également être une méthode rentable d'utilisation des matériaux provenant du dragage dans les ports et les chenaux de navigation. Cela pourrait réduire les coûts généraux et supprimer le besoin d'identification des sites de décharge au large pour les matériaux provenant du dragage. De même que pour le rechargement de plage, les niveaux en polluants doivent être surveillés avec attention.

Etude de cas: Singapour

La petite nation de Singapour qui se trouve sur une île située dans la Mer de Chine méridionale a mené plusieurs projets de récupération territoriale à grande échelle depuis les années 1960. En 1991, il était estimé que l'ensemble du territoire acquis par cette méthode représentait 10% de la surface du pays (Glaser & Walsh, 1991). L'étendue de ces territoires est illustrée à la figure 4.20 avec les futurs projets planifiés.

La récupération territoriale fait partie de l'histoire de l'île depuis la constitution du territoire en 1819. Les premiers projets employaient des matériaux provenant des collines environnantes pour rehausser les niveaux des terrains qui étaient inondés lors des marées hautes particulièrement importantes. Le territoire était récupéré en particulier à travers le drainage de mangroves (Glaser & Walsh, 1991).

Figure 4.20: Travaux passés et à venir de récupération territoriale à Singapour

Source: Schwartz, 2005

Depuis que le pays a déclaré son indépendance en 1963, Singapour a observé une rapide croissance. Cela conduit à une augmentation de la demande foncière pour l'industrie, les transports, les infrastructures, le commerce et les logements (Glaser & Walsh, 1991). Les grands projets étaient considérés comme un moyen viable d'obtenir l'espace supplémentaire dont l'on avait besoin. L'ampleur du phénomène depuis l'autonomie peut être considérée comme une réponse à la croissance économique rapide et la hausse des activités de construction qu'elle engendre (Glaser & Walsh, 1991).

Plus récemment, les opérations de récupération territoriale ont cessé d'employer des matériaux provenant des collines de l'île. La plupart d'entre elles utilisent maintenant du sable prélevé au large de pays comme l'Indonésie et la Malaisie. Ce dernier est ensuite importé par les entrepreneurs spécialisés dans la récupération territoriale (Eisma, 2006).

Le projet de construction Jurong Industrial Estate est un récent exemple de projet conçu pour répondre au besoin de terrain par l'industrie. Il consiste à la récupération d'environ 6km² (Glaser & Walsh, 1991) et à la fusion de sept îles plus petites situées au large de la côte de Singapour en un grand ensemble à travers la récupération progressive des chenaux situés entre les îles (Eisma, 2006). Un certain nombre de zones offshore ont également été récupérées à des fins d'expansion de l'industrie pétrochimique (Glaser & Walsh, 1991).

En 1984, le gouvernement singapourien a de plus approuvé un dispositif de récupération sur la côte Nord. Une fois terminé, le projet concernait 8.75 km² d'estran et de terrains marécageux peu profonds et a servi principalement à la construction de propriétés résidentielles (Omar, 2007). Le projet comprenait de plus l'installation de digues autour des marécages et des baies afin d'encourager/d'initier les processus de remblai des terres (Glaser & Walsh, 1991). Un volume estimé à 76 millions de m³ de terre était nécessaire pour l'opération; la moitié duquel fut obtenue des sites d'exploitation de l'Office du développement immobilier et l'autre moitié importée (Omar, 2007). Le développement de la zone avait été freiné pour des raisons économiques mais a depuis été relancé.

Plusieurs approches ont été mises en application pour protéger les nouveaux territoires. Sur les côtes Est et Nord, les terrains sont protégés par des séries de brise-lames qui agissent comme des promontoires. Des plages se forment entre ces derniers et peuvent ainsi être employées à des fins récréatives (Wong & Pask, 2008). Ailleurs, des murs de protection et des revêtements sont souvent utilisés en tant que mesures de protection. Cela se fait davantage dans les zones qui ont peu de valeur récréative.

Les risques d'inondation des côtes sont pris en compte dans la conception des projets de récupération territoriale à Singapour, en appliquant un niveau minimum de +3 m au-dessus du MSL sur la côte Sud et +3.5 m au-dessus du MSL sur la côte Nord. Cela permet une protection contre l'inondation côtière sans avoir besoin de recourir aux digues. L'élévation du niveau de la mer à venir en raison du changement climatique est susceptible d'entraîner une hausse d'1m des niveaux minimums de récupération (Linhm et al., 2010). Certains terrains issus de cette méthode pourraient également faire l'objet d'un rehaussement dans le cadre de leur réaménagement.

4.2 Les stratégies de compromis

Cette stratégie d'adaptation privilégie l'occupation et l'utilisation des régions vulnérables en améliorant la capacité de la société à s'ajuster aux effets des événements climatiques extrêmes. Cette approche exige une mise en œuvre proactive de l'adaptation en ce sens qu'elle requiert une planification approfondie et l'acceptation par tous que la valeur de certaines zones côtières pourrait changer (IPCC CZMS, 1990).

Les technologies d'adaptation traitées dans ce chapitre peuvent être organisées en une ou deux sous-parties : (1) les technologies impliquant des modifications physiques afin de s'adapter aux phénomènes croissants d'inondation et d'érosion ; et (2) les systèmes d'information encourageant la compréhension et la vigilance envers les risques côtiers et permettant aux populations locales de prendre les mesures appropriées afin de minimiser l'impact de ces événements. Ces deux stratégies ont en commun de permettre aux populations de continuer à vivre dans les zones vulnérables. Dans le chapitre qui suit, la protection contre les crues, les systèmes agricoles flottants ainsi que la restauration des zones humides représentent la première approche, tandis que la cartographie des risques d'inondation et les alertes appartiennent à la seconde.

4.2.1 La protection contre les crues

Définition

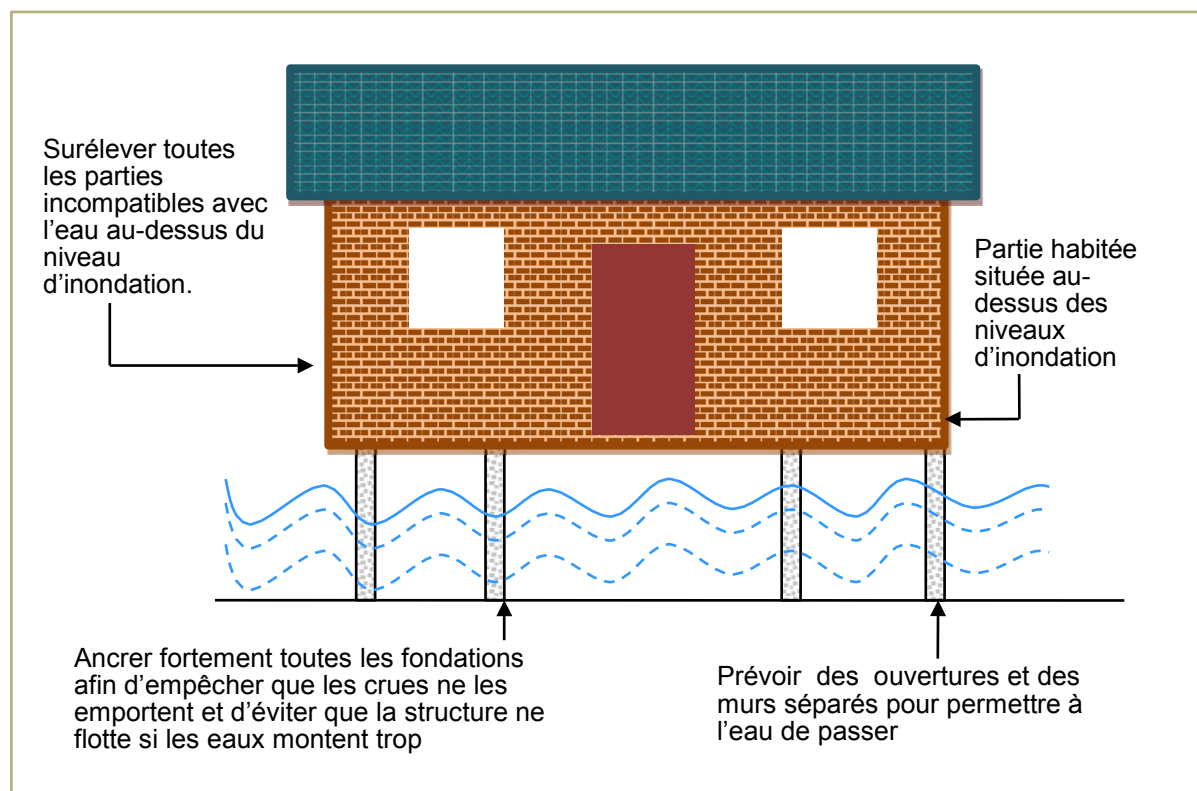
L'objectif principal de la stratégie anti-inondation sur les côtes est de réduire ou de supprimer les effets des inondations sur les structures. Cela peut se faire notamment en les rehaussant au-dessus du niveau des crues, en employant des formes de structure et des matériaux de construction qui rendront celles-ci davantage résilientes face aux dégâts causés par les crues, et enfin en empêchant l'eau de s'infiltrer dans les structures situées dans la zone d'inondation.

Description

Les mesures de protection contre les crues sont largement mises en application aux Etats-Unis où deux types de solutions anti-inondation sont reconnus: partielle et totale. La protection contre les crues dite partielle permet de réduire les dégâts liés à l'inondation de trois manières; (1) permettre aux crues d'entrer et de sortir aisément dans la structure afin de minimiser les dommages structurels; (2) utiliser des matériaux résistants à l'inondation; et (3) surélever les biens matériels importants. Par ailleurs, la protection contre les crues dite totale consiste à rendre les constructions imperméables ou majoritairement étanches aux crues par rapport au niveau prévu (FEMA, 2008).

Les mesures de protection partielle contre les crues comprennent généralement des mesures structurelles, telles qu'ancrer suffisamment les structures pour contrer les flots d'inondation, utiliser des matériaux résistants en-dessous du niveau attendu d'inondation, protéger les équipements mécaniques et utilitaires et prévoir des ouvertures ou des murs séparés (breakaway walls, terme anglais) pour permettre le passage des crues sans causer de dommages structurels majeurs (FEMA, 2010). Un exemple de ce type de mesures est montré sur la figure 4.21.

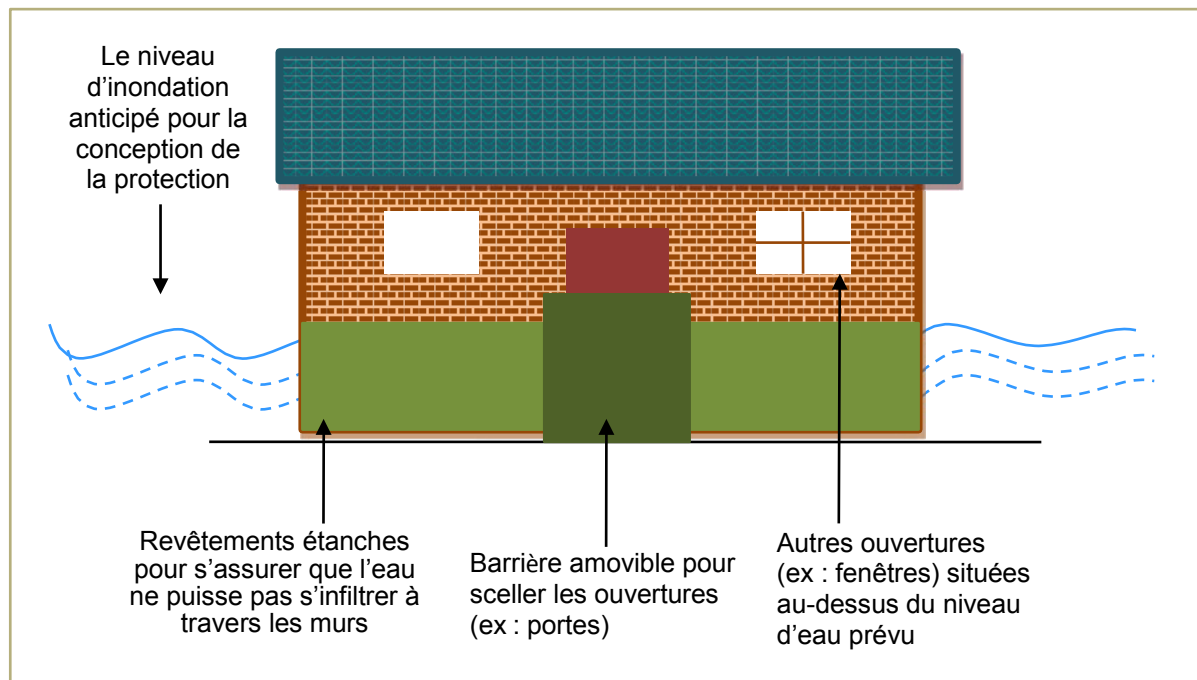
Figure 4.21: Mesures de protection partielle contre les inondations pour une structure résidentielle



Une structure ayant une protection totale contre les crues est conçue pour rester étanche au niveau d'inondation prévu afin d'empêcher dès le départ l'eau de pénétrer la structure. Cela requiert l'étanchéisation des murs avec des revêtements adaptés, des membranes imperméables ou l'ajout d'une couche supplémentaire de maçonnerie ou de béton, l'installation de protections étanches devant les ouvertures ainsi que des mesures adéquates pour empêcher le refoulement d'égout (FEMA, 2007). Un exemple de ce type de protection est montré sur la figure 4.22.

La protection contre les crues peut être mise en application sur les bâtiments, résidentiels ou non, et les principes de conception peuvent également être appliqués à d'autres infrastructures importantes comme les sous-stations électriques et celles liées au processus de traitement des eaux usées. Le choix d'utiliser un type de protection plutôt que l'autre est évidemment déterminé par l'utilisation faite de la structure à protéger et de la compatibilité de ces activités avec les crues.

Figure 4.22: Mesures de protection totale contre l'inondation pour une structure résidentielle



Les avantages liés à la protection contre les crues

L'un des avantages principaux de la protection contre les crues est qu'elle permet d'éviter de devoir surélever, démolir ou déplacer les structures, ce qui en fait souvent une approche bien plus rentable de réduction des risques d'inondation (Powell & Ringler, 2009). Ces mesures sont également beaucoup moins coûteuses que la construction d'un ouvrage de protection élaboré comme les systèmes de brise-lames ou de digues (FEMA, 2007).

Ce type de protection est également avantageux car il ne requiert pas de terrains supplémentaires pour fournir le même niveau de protection contre l'inondation qu'avec les brise-lames ou les digues.

Les mesures de protection partielle sont intéressantes car elles permettent d'équilibrer la pression hydrostatique⁹ contre les parois intérieures et extérieures des murs pendant les crues, diminuant ainsi les charges subies par les murs et les sols (FEMA, 2007). Cela signifie que les structures sont moins susceptibles de s'écrouler pendant les crues.

9 Relatif à des fluides qui ne sont pas en mouvement (par exemple, le niveau d'eau maximum suite à des événements météorologiques extrêmes)

Bien que ce type de mesures ne permette pas aux habitants de continuer à vivre dans leur logement pendant les crues, celles-ci rendent le processus de nettoyage et de réparation des dégâts bien plus simple et rapide. (FEMA, 1992).

Ce type de protection est de plus à la portée des individus sans qu'ils soient obligés de recourir à des financements des autorités publiques. Même des efforts de protection de petite échelle et peu coûteux sont susceptibles d'aboutir à des réductions significatives des dégâts provoqués par l'inondation. Cependant, la disponibilité de financements pour mettre en place des mesures de protection plus coûteuses encouragera sans doute leur utilisation.

Les inconvénients liés aux mesures de protection contre les crues

Les mesures de protection contre les crues exigent de connaître le risque présent d'inondation et de la communiquer au public à l'aide d'études de cartographie des risques et des systèmes d'alerte (voir les sections 4.2.4 et 4.2.5 pour plus d'informations). Cela permettra aux mesures d'être mises en pratique de manière adéquate et donnera le temps aux habitants de quitter les bâtiments concernés en cas d'urgence. Dans le cas d'un système de protection totale, cela permettra notamment de fermer les barrières à temps. Même si la cartographie des risques d'inondation et les systèmes d'alerte ont un intérêt en soi, cela représente également un coût supplémentaire qu'il est nécessaire de prendre en compte lors de la mise en œuvre de ces mesures de protection.

Les résidents n'ayant pas la possibilité de continuer à vivre dans les logements protégés durant les crues, des infrastructures d'accueil doivent être mises à la disposition des personnes évacuées. Ces aménagements devront peut-être continuer à servir pendant une période suivant les inondations, le système de protection partielle pouvant laisser la structure inhabitable pendant une courte période.

Les mesures de protection contre les inondations sont plus efficaces lorsqu'elles sont appliquées là où les crues sont peu profondes. Elles n'ont que peu d'effet sur la réduction des dégâts provoqués par des flots à grande vitesse et des vagues de grande ampleur (FEMA, 2007). Si une crue plus importante que prévu lors de la conception a lieu, tout se passera comme s'il n'y avait aucune protection (FEMA, 2001).

Un autre inconvénient est lié au fait qu'en cas de protection totale, les protections extérieures ne sont pas très esthétiques (FEMA, 2007). Celles associées aux portes et aux fenêtres sont laissées en place la plupart du temps afin de pouvoir les fermer rapidement si nécessaire. Cependant, cela signifie que ces mesures sont en place en permanence. Il est aussi nécessaire de procéder à leur entretien continu afin de garantir une protection adéquate (FEMA, 2007).

Lorsque des mesures de protection partielle sont utilisées, les eaux pénètrent dans la structure. Un nettoyage important peut donc être nécessaire à la suite d'inondations afin de retirer les matériaux véhiculés par l'eau tels que les sédiments, les eaux usées ou les produits chimiques (FEMA, 2007). Cependant, le choix des matériaux de construction de la structure devrait permettre un nettoyage bien plus rapide que dans des structures non protégées.

Dans le cas d'une protection totale, si les charges dépassent les prévisions, les murs pourraient s'écrouler, les sols céder et les maisons pourraient aller jusqu'à flotter. Cela risque de causer plus de dégâts que dans une maison normale laissée aux effets de la crue (FEMA, 2009).

Les coûts et besoins financiers

En l'absence d'informations disponibles sur les pratiques des pays en voie de développement, les estimations de coûts pour un certain nombre de mesures de protection contre les crues sont données pour les Etats-Unis. Les USA sont un pays qui met beaucoup en pratique ce type de mesures.

Aux Etats-Unis, le coût pour surélever une structure au-dessus du niveau de crues est estimé entre 29 US\$ et 96 US\$ au pied carré de superficie au sol de la maison (FEMA, 2009). L'écart entre les prix est dû aux différents types de construction et de fondation utilisés et aux niveaux d'élévation requis.

Les mesures de protection partielle sont susceptibles d'inclure des coûts pour l'ajout d'ouvertures dans les murs pour l'entrée et la sortie des eaux, l'installation de pompes, le réarrangement ou le déplacement des systèmes utilitaires et de l'électroménager, et enfin la pose d'enduit dans les revêtements ce qui facilite le nettoyage après la crue. Selon FEMA (2009), le coût de la protection partielle aux USA devrait varier entre 2.20US\$ et 17.00US\$ au pied carré de superficie au sol de la maison, en tenant compte d'une cave protégée contre les inondations allant jusqu'à environ 2.4 m de profondeur.

Aux Etats-Unis, les mesures de protection totale contre l'inondation comprennent l'étanchéisation des murs avec des revêtements étanches, des membranes imperméables ou des couches supplémentaires de maçonnerie ou de béton, ainsi que l'équipement des portes, fenêtres et autres ouvertures situées en-dessous du niveau de crue avec des protections permanentes ou amovibles. Et il faudra probablement y ajouter l'installation de vannes anti-reflux sur les conduites et les drains d'égout (FEMA, 2009). Les coûts estimés pour ces mesures sont donnés dans le tableau 4.7.

Tableau 4.7: Coûts approximatifs des mesures de protection totale contre les inondations aux USA

Composante	Coût	Par
Ciment pulvérisé	\$55.10	Mètre linéaire de mur couvert
Membrane étanche	\$18.70	Mètre linéaire de mur couvert
Asphalte	\$39.36	Mètre linéaire de mur couvert
Conduite de drainage autour du périmètre de la maison	\$101.68	Mètre linéaire
Clapet de retenue pour tuyaux	\$1060	Unité
Puisard et pompe de puisard	\$1710	Montant forfaitaire
Protection anti-inondation en métal	\$1230	Mètre linéaire de la surface de protection
Protection anti-inondation en bois	\$383.76	Mètre linéaire de la surface de protection

Ces coûts sont valables pour une protection contre des crues d'environ 0.9m de haut. Ils sont donnés en dollars, aux niveaux de prix de 2009.

Source: FEMA, 2009

La protection partielle est généralement moins coûteuse que la protection totale, toute action visant à réduire le nombre d'éléments exposés aux dégâts provoqués par l'inondation étant considérée comme une mesure de protection partielle (FEMA, 2007). Par exemple, déplacer des objets de valeur sur un rangement plus élevé est une mesure de protection partielle au coût négligeable.

Les coûts liés à la protection totale d'une structure dépendent des facteurs suivants (FEMA, 2007):

- La taille de la structure
- La hauteur requise pour la protection
- Les types d'enduit et de matériaux de protection utilisés
- Le nombre d'ouvertures à recouvrir d'une protection
- Les mesures de plomberie nécessaires pour empêcher le reflux des eaux

Au niveau communautaire, les coûts de la protection contre les crues dépendent en grande partie du nombre de propriétés situées dans la zone à risques et des coûts associés tels que ceux liés à la cartographie des risques d'inondation ou les exercices de modélisation permettant de déterminer les propriétés à risques (cf. section 4.2.4 pour plus d'informations).

Les capacités institutionnelles et organisationnelles requises

Les mesures de protection contre les crues peuvent tout à fait être mises en œuvre au niveau de la communauté. Dans sa version la plus simple, cela consiste à déplacer les objets de valeur plus haut du sol afin de les protéger de l'inondation. Les coûts étant négligeables, la protection partielle est donc aisément faisable au niveau local, à condition que l'alerte soit donnée suffisamment à l'avance.

La mise en œuvre de mesures plus avancées n'exige pas une intensité de capital aussi forte que la construction ou le réaligement de défenses côtières et devrait donc être réalisable au niveau local. La mise en œuvre de cette technologie exige cependant une stratégie de planification proactive.

Il devrait même être possible pour les foyers individuels de financer eux-mêmes les mesures de base de protection. Cela peut consister à surélever les éléments et équipements de valeur au-dessus de niveau prévu des crues. Mais cela n'est possible que si les foyers sont informés de manière adéquate. Cependant, les mesures plus avancées sont susceptibles de nécessiter l'assistance de spécialistes. Par exemple, la construction de maisons dans la zone sujette aux inondations requiert l'implication d'ingénieurs et d'architectes professionnels pour développer et/ou réviser l'architecture des structures afin de garantir qu'elles seront aptes à fonctionner comme prévu à la conception.

Bien que ce type de protection soit possible à réaliser au niveau communautaire, son efficacité dépend de l'usage qu'en fait la population et des normes en vigueur pour leur mise en œuvre. Les résultats seront moindres si l'utilisation qui en est faite n'est pas suffisante ou si les mesures ne respectent pas des standards assez élevés. Un potentiel manque de volonté d'utiliser ces mesures de protection a été souligné par Mathis and Nicholson (2006) qui ont découvert que seuls 63% des bâtiments étaient conformes aux réglementations américaines en la matière. En raison de cette réticence au niveau individuel, il peut être nécessaire d'établir des inspections dans la zone à risques afin de s'assurer que les mesures de protection contre les crues ont bien été mises en application et respectent un certain standard.

Il est possible pour les communautés locales de recevoir des financements visant à soutenir les projets de protection contre les inondations. Cela peut permettre d'encourager leur mise en œuvre dans les

communautés plus pauvres, et peut aider à protéger celles qui en ont besoin plutôt que celles qui ont les moyens d'appliquer de telles mesures. Il est possible d'obtenir des résultats similaires dans les régions où les assurances anti-inondation sont importantes. Réduire les primes pour les propriétés protégées contre les crues encouragera l'utilisation de ces mesures.

Avant que les communautés ne puissent mettre en œuvre une stratégie de protection, il leur faut mener une forme de cartographie des risques d'inondation (cf. section 4.2.4). Cela permettra d'informer les décideurs sur les bâtiments qui nécessitent une protection et dans quelle mesure. Cela peut également soutenir la conception de mesures adéquates.

Les facteurs entravant la mise en œuvre

Bien que ce type de mesures de protection puisse être appliqué à peu de frais, le coût de mise en œuvre des mesures plus avancées peut être prohibitif pour les communautés moins riches. Pour éviter que cela n'empêche leur mise en œuvre, il est possible de leur apporter des possibilités de financement.

Les mesures de protection plus avancées telles que l'ancrage des structures et l'installation de murs séparés exigent un savoir-faire spécialisé ce qui peut signifier de devoir impliquer des architectes ou des ingénieurs expérimentés.

Dans les zones qui n'ont pas encore été l'objet d'une cartographie des risques, l'adoption de telles mesures peut s'avérer problématique. L'absence de cartes des risques rend l'identification des propriétés concernées et les exigences minimales de protection difficiles à définir.

Les facteurs favorisant la mise en œuvre

Le facteur principal favorisant la mise en œuvre des mesures de protection contre les crues réside dans le fait de permettre malgré tout l'exploitation des zones à risques encadrée par des limitations explicites. Là où il existe une forte demande foncière sur le littoral, les mesures de protection présentent une opportunité d'utilisation des terres. Cette stratégie contraste avec celle des zones de retrait imposées sur la construction (cf. section 4.3.2) empêchant l'exploitation du littoral.

Etude de cas: Le Programme national d'assurance contre les inondations, USA (The National Flood Insurance Programme, NFIP)

Il n'existe pas de programme anti-inondation suffisamment documenté dans les pays en voie de développement. Le programme américain NFIP est donc utilisé ici à titre d'exemple. Le NFIP offre des assurances contre les inondations garanties par le gouvernement fédéral aux communautés qui acceptent de réguler le développement en cours sur les plaines inondables définies comme telles. Si celles-ci font leur part en s'assurant que certains critères sont respectés dans ces zones, l'Agence fédérale de gestion des situations d'urgence (FEMA) fournit des assurances anti-inondation pour les propriétés de la communauté.

Le programme NFIP exige que tous les nouvelles exploitations de type non résidentiel dans les zones à risque soient soit surélevées au-dessus de la partie inondable soit composées de structures étanches. Les bâtiments résidentiels doivent être situés au-dessus du niveau de base d'inondation. Les mesures de protection décrites sur la figure 4.21 et la figure 4.22 sont extraites des publications de la FEMA conformes au NFIP.

Dans le but de réguler les nouvelles constructions, le NFIP définit la protection contre les inondations par des mesures intégrées à la conception des bâtiments de manière à ce que sous le niveau d'inondation :

- Les murs soient étanches
- Les composantes structurelles puissent résister aux pressions hydrostatiques et hydrodynamiques¹⁰ ainsi qu'aux effets de poussée
- Les équipements utilitaires soient protégés des dommages liés à l'inondation

En plus de ces réglementations, un ingénieur ou un architecte professionnel certifié doit préparer les plans de construction et certifier que les mesures de protection seront respectées (FEMA, 1998). Le niveau minimum requis par le NFIP est une protection à hauteur d'un niveau de crue centennale (probabilité d'apparition 1 fois en 100 ans).

Selon le NFIP, les bâtiments dans la zone soumise à des risques d'inondation doivent être ancrés de manière adéquate dans le sol afin de stabiliser la structure contre les forces des crues. Il est donc nécessaire de garantir une protection adaptée contre les forces hydrostatiques et hydrodynamiques, l'érosion et l'affouillement qui peuvent endommager les fondations (FEMA, 1998).

Dans les zones d'inondation peu profondes, des pratiques de construction normales peuvent suffire. Là où les crues sont plus fortes, un ancrage supplémentaire peut être nécessaire tel que des boulons supplémentaires pour connecter le soubassement et les fondations, ou l'ajout de barres dans les fondations. Cela est recommandé dans trois cas (FEMA, 1998):

- Si les flots de crues sont plus rapides que 1.5m/s approximativement.
- Sur les littoraux sujets à de fortes vagues et des vents violents
- Dans les maisons préfabriquées ou des mobil-homes

Selon le NFIP, toutes les parties des bâtiments faisant l'objet d'une protection qui sont exposées aux eaux des crues doivent être composées de matériaux résistants aux inondations. Ces matériaux comprennent des produits de construction aptes à résister au contact direct et prolongé avec les eaux des crues sans subir de dommage conséquent. Une liste des matériaux recommandés par le NFIP est présentée dans le tableau 4.8.

¹⁰ Relatif à des fluides en mouvement (en l'occurrence, potentiellement causé par l'action des vagues ou par le débit des eaux de crue)

Tableau 4.8: Les matériaux résistants à l'inondation recommandés par le NFIP

Béton, blocs de béton ou briques vernissées
Tuiles en argile, béton ou céramique
Clous en acier galvanisé ou inoxydable, attaches et connecteurs spécialisés pour les ouragans
Pose intérieure et extérieure de tapis avec un support synthétique (ne pas les fixer)
Sols en vinyle, granite ou caoutchouc recouverts avec des adhésifs étanches
Portes et cadres de fenêtres en métal
Peinture époxy polyester
Pierre, ardoise ou pierre composite (avec mortier étanche)
Joints FIP (formed in place, terme anglais) en mastic, silicone ou polyuréthane
Bois traité sous pression ou naturellement résistant au pourrissement et contreplaqué résistant à l'eau
Colle résistante à l'eau

Source: FEMA, 1998

Le NFIP américain est un programme national existant de longue date qui vise à soutenir la protection contre les inondations des propriétés situées dans les zones à risques. Ce programme pourrait servir de modèle d'application pour les pays en développement. Par exemple, le fait que le NFIP soit géré par la FEMA, une organisation nationale ayant une expertise avancée en matière de réduction et d'atténuation des risques d'inondation côtière permet d'avoir une organisation compétente dédiée qui peut fournir conseils et orientation en la matière. L'établissement de telles organisations serait très bénéfique pour les pays en développement. De plus, bon nombre des lignes directrices utilisées par le NFIP sont aussi applicables dans ces pays, par exemple l'utilisation comme référence de la crue centennale et les indications sur les débits des crues qui présentent un danger. L'étude de cas souligne également le besoin de renforcer les capacités des pays en voie de développement afin de former des architectes et des ingénieurs pour la construction de structures résistantes aux inondations.

4.2.2 La restauration des zones humides

Définition

L'objectif principal de la restauration des zones humides est triple. Ces projets peuvent servir à réduire l'inondation des côtes et l'érosion, et peuvent également fournir de nouveaux habitats et jouer un rôle positif en matière d'environnement.

Le terme de « zone humide » traduit un ensemble divers d'eaux peu profondes et d'habitats intertidaux, qui existe à plusieurs endroits du monde. La restauration des milieux humides renvoie à la réhabilitation d'une zone déjà existante mais en mauvais état général et que l'on tente de rendre à nouveau fonctionnelle.

Bien que similaire au recul stratégique (section 4.3.1), cette technologie se distingue par son objectif de maintenir la position du trait de côte telle qu'elle est à l'origine au lieu de le reculer vers l'intérieur des terres comme c'est le cas pour le recul.

Description

Les écosystèmes qui sont le plus souvent restaurés pour des raisons de protection côtière sont les marais salants et les mangroves. S'il arrive aussi que les plantes marines soient employées comme moyen de défense des côtes pour réduire la force des vagues, elles sont rarement considérées comme une alternative adaptée de protection du littoral en tant que telle (USACE, 1989).

Les habitats des zones humides sont importants car ils remplissent des fonctions essentielles en termes de gestion de l'érosion et de l'inondation des côtes. Ils entraînent la dissipation de l'énergie à la fois des vagues et des marées (Brampton, 1992) et agissent comme un piège naturel à sédiments, favorisant ainsi la création de territoire. De plus, le dense réseau de racines que forment les plantes aquatiques dans ces zones aide à stabiliser les sédiments de la côte, réduisant ainsi l'érosion (USACE, 1989). La restauration de ces milieux rétablit donc ces fonctions bénéfiques pour la protection contre l'érosion et l'inondation des côtes.

Ces opérations sont nécessaires car de nombreuses zones humides dans le monde ont été dégradées par des activités naturelles et humaines.

Des techniques ont été développées pour réintroduire les zones humides sur des littoraux où elles existaient auparavant et d'autres où les conditions le permettaient simplement. La diversité des types de zones humides appelle à différentes méthodes pour les restaurer. L'une ou l'autre est adoptée selon le type d'habitat qui est concerné.

Les marais salants sont généralement restaurés au moyen de dispositifs de recul stratégique (cf. section 4.3.1). Cependant, cela implique de repousser la ligne de défense existante. Les marais salants peuvent également être rétablis tout en maintenant le trait de côte à la même position en utilisant des transplants de végétaux provenant d'environnements sains. Ils peuvent se composer de branches, de tiges et feuilles ou de plantes en pot ; l'ensemencement risque de ne pas être efficace sur les sites soumis à l'érosion (USACE, 1989). Le rétablissement des marais salants requiert d'élever le niveau du terrain à l'aide de matériaux de remblai adéquats.

Concernant la restauration des mangroves, il est nécessaire de collecter des propagules de plantes¹¹ issues d'une source durable, puis de préparer le site avant de planter directement les propagules à intervalles réguliers au moment de l'année opportun (de Lacerda, 2002). Il peut également être souhaitable d'établir des pépinières pour stocker les semis en préparation de futures opérations de restauration (de Lacerda, 2002). Le rétablissement de mangroves peut par ailleurs s'effectuer à l'aide des herbes de dune. Celles-ci fournissent un support protecteur et stable permettant aux mangroves de s'enraciner. Cependant, lorsque les mangroves se développent, elles finissent par ombrager les herbes et par provoquer leur mort. Les mangroves deviennent ensuite l'espèce dominante (USACE, 1989).

11 Tout organe qui permet la propagation d'une plante tel qu'une bouture, un semis ou une spore

Les avantages liés à la restauration des zones humides

En matière d'adaptation au changement climatique dans les zones côtières, l'avantage principal lié à la restauration des zones humides est la dissipation de l'énergie des vagues et des marées dans les zones intertidales aboutissant à une baisse significative. Cela est rendu possible par la plus grande rugosité des surfaces traversées par les vagues et les marées (Nicholls et al., 2007b). Cela atténue leur pouvoir érosif et aide à réduire le risque d'inondation sur les côtes en diminuant la hauteur des ondes de tempête.

Les défenses côtières peuvent voir leur coût d'installation et d'entretien baisser lorsqu'elles sont situées derrière de larges zones de marais salants (cf. section 4.3.1). Les mangroves ont un effet similaire car elles absorbent l'énergie et ralentissent le débit des ondes de tempêtes (Barbier, 2008). L'observation des douze pays de l'Océan Indien qui ont été touchés par la catastrophe du tsunami de 2004 a prouvé que les zones côtières ayant de denses forêts de mangroves en bonne santé ont subi moins de pertes et moins de dégâts matériels que celles dans lesquelles les mangroves avaient été dégradées ou converties à d'autres usages (Kathiresan & Rajendran, 2005). D'autre part, les observations indiquent que la présence d'une frange de mangroves matures réduit les coûts d'entretien des digues de 25 à 30%, à condition que la largeur de cette frange soit au moins comparable à la longueur des ondes incidentes (Tri et al., 1998).

A la différence des défenses « en dur », les zones humides sont capables de s'adapter de manière autonome à la SLR ; à travers une plus grande accumulation de sédiments pour permettre l'élévation du terrain de ces zones suivant les évolutions du niveau de la mer (Nicholls & Klein, 2005). Etant donné que les zones humides ne sont pas soumises à la compression côtière et que le taux de SLR n'est pas trop rapide, ces zones sont aptes à s'adapter naturellement à celle-ci sans avoir besoin d'investissements supplémentaires.

Les zones humides du littoral assurent également un certain nombre de services écosystémiques importants tels que la qualité de l'eau et la régulation du climat. Ces sites connaissent une forte accumulation de sédiments, de polluants, de carbone et de nutriments, et ils fournissent aussi des zones de reproduction et de couvaison pour une variété d'oiseaux, poissons, coquillages et mammifères. Ces sites sont de plus une source durable de bois, combustible et de fibres (White et al., 2010).

La restauration et la recréation de zones humides peuvent par ailleurs permettre de réduire ou même d'inverser la tendance des pertes causées par l'exploitation du littoral. Cela est important pour entretenir les zones humides au niveau mondial et pour maintenir leur existence face au changement climatique. La création de zones humides peut par ailleurs être réalisée dans le cadre d'obligations légales en compensation des habitats détruits suite au développement de la région.

Les inconvénients liés à la restauration des zones humides

Il y a très peu d'inconvénients liés à la restauration des zones humides. La réhabilitation des services écosystémiques naturels, et notamment la protection contre l'érosion et l'inondation, compense largement les inconvénients.

Un inconvénient potentiel est le besoin d'espace dans des régions qui ont un fort potentiel de développement. Cela doit être pesé avec attention en prenant en compte tous les bénéfices acquis.

Cette technologie risque de plus d'exiger un certain degré d'expertise, notamment dans les endroits où la recolonisation des zones humides doit être soutenue par le transplante de végétation. Certains habitats seront certainement plus difficiles à recréer que d'autres et pourraient nécessiter une expertise plus approfondie.

Les coûts et besoins financiers

Tri et al. (1998) ont étudié les coûts et les bénéfices de la restauration de mangroves au Vietnam. Le projet consistait à l'expansion d'une forêt de mangroves existante située sur le flanc maritime d'une digue. L'étude estime l'ensemble des coûts de plantation, de capital et des frais récurrents à environ 41 US\$ (niveaux de prix de 2009) par hectare de mangroves planté. Ce calcul prend en compte les coûts de plantation et d'élagage sur six ans (Tri et al., 1998).

Le terme de « zone humide » faisant référence à un ensemble varié d'habitats, il est difficile de donner une estimation précise des coûts. Un certain nombre de facteurs susceptibles de rentrer en ligne de compte dans les variations des coûts est présenté dans l'encadré 4.7.

Encadré 4.7: Facteurs influençant les coûts de la restauration des zones humides

- Le type de zone à restaurer, l'accès à une expertise et les chances de succès associées
- Le degré de dégradation du site et les besoins de restauration associés
- Le degré de restauration souhaité (par exemple, il peut ne pas être possible de restaurer toutes les fonctions écosystémiques de la zone si elle est située dans un environnement fortement industrialisé/urbanisé ce qui a pour conséquence des mesures de restauration moins ambitieuses)
- Prix des terrains si une acquisition est nécessaire pour convertir la surface en zone humide
- Coûts de main d'œuvre
- Distance de transport entre la source des semis et le site de plantation
- Le taux de mortalité des semis entre la collecte et la plantation
- Le coût lié à la culture d'espèces spécifiques dans des pépinières avant leur transfert, ne pouvant pas être plantées directement dans des sols vaseux en raison des vents forts et de la force des vagues
- Ampleur des opérations de suivi après la mise en œuvre

Source: Adapté de Tri et al., 1998

Il est clair qu'estimer les coûts dans le cas de la restauration de zones humides est complexe et dépend d'un grand nombre de facteurs. Il convient donc de calculer le coût des projets individuels au cas par cas.

Les capacités institutionnelles et organisationnelles requises

Au niveau local, des mesures proactives peuvent être mises en œuvre afin de garantir que les habitats sont entretenus et utilisés de manière viable. Cela va permettre de les préserver dans le futur et de réduire ou même supprimer le coût des dispositifs de restauration et de plantation. En empêchant la perte ou la dégradation des zones humides, il est également possible d'éviter de nombreux problèmes potentiels rencontrés durant le travail de restauration (NRC, 1992).

Il est important que les multiples organismes impliqués dans l'aménagement du littoral évitent de fournir des orientations contradictoires. Dans les îles du Pacifique, il a été conseillé à de nombreuses communautés dans les années 1930 et 1940 de défricher les mangroves pour raisons médicales, les

sites étant considérés comme un terrain propice aux moustiques transmetteurs du paludisme. Aujourd'hui cependant, les services écosystémiques fournis par les mangroves, notamment leur fonction de protection contre l'inondation, sont valorisés. Les communautés ont donc été encouragées à replanter les mangroves pour lutter contre l'érosion du littoral (Mimura & Nunn, 1998).

D'anciens projets de restauration des zones humides ont été conduits sur une base expérimentale à travers un processus d'apprentissage par la pratique soutenu par une expérience technologique limitée (cf. par exemple, Sanger & Siddiq, 1993). Selon cette approche, il semble donc logique que les communautés prennent en charge la mise en œuvre de ces projets au niveau local. Cependant, avec une meilleure expertise à disposition, certaines défaillances pourraient être minimisées et les coûts réduits.

A plus grande échelle, il convient que les gouvernements adoptent de manière proactive des plans d'aménagement du littoral relatifs à la protection, au soutien, à la restauration ou à la création des habitats marins. En l'absence d'un tel cadre, l'action visant à restaurer les zones humides risque d'être fragmentée et mal coordonnée (NRC, 1994). Cela est dû à l'implication d'institutions fédérales multiples ayant des responsabilités qui se chevauchent et des politiques divergentes (NRC, 1994).

Les facteurs entravant la mise en œuvre

L'un des obstacles les plus importants à l'utilisation de ce type de mesure est le manque de sensibilisation de l'opinion publique sur les bénéfices fournis par ces écosystèmes en matière de protection contre l'inondation et l'érosion. Le lien existant entre protection et restauration des zones humides risque de ne pas être clair, à moins que les personnes aient été informées sur le sujet. Cela est une entrave à l'adoption de tels projets, les communautés insistant pour des options de défenses « en dur » plus tangibles, dont les bénéfices en termes de protection sont plus communément compris.

Un autre obstacle à la mise en œuvre est le manque de connaissances quant à la capacité de la zone dégradée à se rétablir et quant aux taux de réussite des projets de création. Les besoins des plantes et des animaux vivant dans ces zones ne sont pas encore pleinement compris. Une incertitude persiste donc autour de l'efficacité des activités de restauration et de savoir si le plein rétablissement des fonctions écosystémiques de la zone aura lieu après sa réparation. Le suivi des dispositifs mis en place permettra d'améliorer notre compréhension concernant le processus de restauration.

L'adoption de cette méthode pour lutter contre l'inondation et l'érosion du littoral exige un plan de gestion côtière préventif et axé sur la durabilité des résultats. L'établissement de zones humides aptes à fournir une protection complète prend du temps et cette approche ne permet pas des bénéfices immédiats. La recréation de zones humides peut donc ne pas être une option possible là où la gestion côtière est réactive et axée sur l'utilisation de défenses « en dur ». Il doit de plus y avoir une volonté existante d'améliorer ces habitats avant de mettre en place une stratégie. Cela peut impliquer la sensibilisation de l'opinion publique sur les bénéfices qu'offrent la restauration et la recréation de zones humides.

Ces écosystèmes ne peuvent exister que dans certaines conditions et il n'est pas toujours aisé de savoir si leur restauration sera possible ou réussie, notamment lorsque les gestionnaires ont des capacités de prévision limitées en matière de modifications du trait de côte (NRC, 1994). Bien que des études aient montré qu'il est possible de créer des zones humides à des endroits où elles n'existaient pas auparavant (Platong, 1998), les sites ayant un potentiel adéquat pour de telles activités doivent être identifiés au cas par cas.

L'identification d'individus et d'organisations qualifiés pour mener des activités de restauration et de récréation peut s'avérer difficile et être un obstacle à leur mise en œuvre. Les qualifications et le savoir-faire des organisations d'exécution influencent directement l'efficacité d'application des connaissances scientifiques et des capacités d'ingénierie et pour finir, les résultats du projet (NRC, 1994). Afin de répondre aux problèmes associés aux limitations de savoir-faire et de capacités, il est conseillé d'associer des organisations expérimentées et qualifiées dans ce domaine ou de leur demander conseils.

Les facteurs favorisant la mise en œuvre

L'une des plus grandes opportunités en matière de mise en œuvre des programmes de restauration des zones humides est l'inquiétude croissante concernant les pertes de ces sites et celles associées des fonctions écosystémiques comme les habitats qu'ils fournissent, la production de nourriture et l'amélioration de la qualité de l'eau. La mise en œuvre des projets de restauration des zones humides non seulement compense ces pertes causées par le développement d'origine humaine et les processus naturels mais fournit également des avantages supplémentaires de protection contre l'inondation et l'érosion du littoral. Cette option aide aussi à réduire les pertes en zones humides dues au changement climatique.

La création de nouveaux écosystèmes apporte par ailleurs divers bénéfices économiques, sociaux et environnementaux aux communautés locales. Cela peut par exemple améliorer la productivité de pêche des eaux côtières. Étant donné l'importance de ce secteur pour de nombreuses communautés vivant sur le littoral des pays en voie de développement, cet aspect devrait être très bénéfique, un tel effet pouvant augmenter leurs revenus et contribuer au développement durable de la région. D'autres biens et services fournis par les zones humides pourraient se révéler très bénéfiques pour ces populations et spécialement dans les pays en développement, tels que l'apport en bois et fibres. La récréation de ces écosystèmes peut également ouvrir des possibilités de développement de l'écotourisme et multiplier les opportunités d'activités de loisirs. La création de milieux humides dans des zones urbaines ou à proximité de celles-ci peut même servir à attirer l'attention du public sur l'importance des fonctions de ces habitats.

Les activités de restauration répondant à de multiples objectifs de gestion, tels que la protection d'habitat, l'accès du public à des ressources environnementales et récréatives ainsi que l'atténuation des risques, et étant moins coûteuses et plus agréables esthétiquement que d'autres solutions techniques, cette approche est susceptible de trouver un large soutien du public dans le futur (Moser, 2000).

Il existe également la possibilité de mettre en œuvre la restauration ou la création de zones humides conjointement avec d'autres ouvrages de défenses dures telles que les digues et les brise-lames. Dans de tels cas, la présence de zones humides sur le flanc maritime de la structure conduit à réduire les coûts de maintenance de celle-ci sur la durée (Tri et al., 1998).

Etude de cas: Reboisement de mangroves, Bangladesh

Les zones côtières du Bangladesh connaissent de fréquents cyclones et certains d'entre eux ont causés dans le passé des dégâts importants et de lourds bilans humains et un nombre significatif de blessés.

Il a été observé que les forêts de mangroves dans les Sundarbans au Sud-Ouest du Bangladesh protégeaient les côtes locales des dommages provoqués par les cyclones. C'est ainsi qu'un programme de plantation de mangroves a vu le jour en 1966 sur les flancs maritimes des digues de défense dans les districts côtiers de Patuakhali, Barisal, Noakhali et de Chittagong. Les informations présentées ici sont extraites de Saenger et Siddiqi (1993).

L'objectif initial du programme de reboisement était de créer une ceinture de défense pour protéger les vies et les propriétés des communautés visant sur le littoral. Les premiers succès de ces plantations aboutirent à l'addition de nouveaux objectifs tels que : (a) fournir des produits forestiers ; (b) développer les ceintures de défense composées de forêts pour protéger les vies humaines et les biens matériels à l'intérieur des terres des ondes de marées ; (c) produire des ressources pour l'économie nationale telles que le bois ; (d) créer des opportunités d'emplois dans les communautés rurales ; et (e) offrir un environnement viable pour la faune locale.

En 1990, ce sont environ 1200km² de mangroves qui ont été plantés avec le soutien financier de la Banque Mondiale. En complément du dispositif de plantation accélérée, une recherche plus systématique a été menée concernant les techniques afin d'affiner les méthodes de pépinières et de plantation. Les organisations en charge de cette enquête ont également identifié le besoin d'un programme de recherche axé sur la gestion qui permette de traiter les infestations de parasites, l'établissement de calendriers d'élagage, les projets pilote, etc.

Le programme de plantation du Bangladesh a principalement utilisé deux espèces de mangroves, malgré la présence d'environ 27 espèces dans le pays. Celles-ci ont été choisies pour leurs taux de survie élevés.

Les techniques employées pour la pépinière et la plantation sont différentes selon les espèces. Les mangroves utilisées dans le dispositif du Bangladesh ont donc été propagées au moyen de l'un des méthodes suivantes selon leur espèce:

- Collecter et planter les graines, faire pousser les semis dans une pépinière et les transplanter ensuite sur les sites de reboisement lorsqu'ils sont assez développés.
- Semer les graines directement dans des zones intertidales abritées
- Collecte de propagules et plantation directe dans des zones abritées
- Collecte de propagules pour les faire pousser dans des pépinières avant de les planter sur les sites de reboisement
- Un certain nombre d'enseignements ont été tirés lors de la mise en œuvre de ce dispositif:
- En raison de la nature très dynamique du trait de côte au Bangladesh, le taux de survie des mangroves a pu se révéler bas et des replantations ont souvent été nécessaires pour une durée de trois ans maximum.
- Après 4 à 5 ans, les arbres se sont congestionnés et un élagage a été nécessaire.
- Il est possible de planter des semis de mangroves quand les taux d'accrétion sont élevés.
- L'étouffement des semis peut avoir lieu quand l'action des vagues agit sur de larges volumes de sédiments sur la côte.
- Durant les périodes de tempête, les sédiments fins peuvent être transportés ce qui a des conséquences négatives sur le développement des semis.
- Il semblerait que les infestations de parasites et les maladies soient plus fréquentes lorsqu'une seule espèce de mangroves est plantée dans une frange.

Il s'avère qu'en plus de fournir une protection contre l'érosion côtière, la plantation de mangroves aide également à créer de larges bandes de terres grâce à leur taux d'accrétion, fournit de larges quantités de bois et d'autres produits forestiers et de l'emploi pour les villageois locaux tout au long de la durée du dispositif. De plus, il a été observé que bien que les plantations de mangroves subissent parfois des dommages lors de fortes tempêtes, leur rétablissement complet est prévu; le système est donc auto-entretenu.

4.2.3 Les systèmes d'agriculture flottante

Définition

L'agriculture flottante est un moyen d'utiliser des zones inondées pendant de longues périodes à des fins de production alimentaire. Cette technologie vise en premier lieu à accompagner l'adaptation des côtes à des crues plus régulières et plus longues.

Cette stratégie consiste à employer des couches de végétation en décomposition agissant comme du compost pour la croissance des cultures. En flottant à la surface de l'eau, ces herbiers créent ainsi des espaces de terres cultivables dans les régions inondées. En termes scientifiques, l'agriculture flottante correspond à l'hydroponie. Au Bangladesh, elle est désignée par des appellations locales comme baira, dhap et îlot.

Description

L'agriculture flottante peut être utilisée dans des zones où les terres arables sont inondées pendant de longues périodes ; cette approche est assez répandue au Bangladesh où les terres de culture sont longuement immergées durant la saison des moussons (APEIS & RIPSO, 2004). Les pratiques sont similaires à l'agriculture hydroponique selon laquelle les plantes peuvent être cultivées dans l'eau sur un îlot flottant de jacinthes d'eau, d'algues ou d'autres résidus de végétaux (Saha, 2010).

Un exemple caractéristique de cette technologie au Bangladesh est d'utiliser une couche flottante de jacinthes d'eau, de la paille de riz ou des chaumes auxquelles sont ajoutées des couches externes de petits végétaux du type élatine qui ont une rapide décomposition et font un bon engrais (APEIS & RIPSO, 2004). La structure de cet îlot flottant est renforcée avec du bambou, tandis que des tiges de bambou sont également utilisées pour en fixer la position afin d'éviter des dégâts dus à l'action des vagues et à la dérive (Saha, 2010). Cet ensemble peut être transféré n'importe où à des fins agricoles, à condition que la zone soit immergée (APEIS & RIPSO, 2004). Un exemple d'agriculture flottante est montré sur la figure 4.23.

Figure 4.23: Système d'agriculture flottante sur le lac Inle, Birmanie



Source: Photo: Wikimedia Commons

Les avantages liés aux systèmes agricoles flottants

Cette technologie aide à atténuer les pertes de terrains causées par l'inondation en permettant de continuer malgré tout à cultiver ces zones. De cette manière, l'ensemble des terres arables peut être augmenté et les communautés plus aptes à subvenir à leurs propres besoins. De plus, la zone d'agriculture flottante a un rendement jusqu'à 10 fois supérieur à celui des méthodes de culture traditionnelles (Haq et al., 2004) et ce, sans avoir besoin d'utiliser de fertilisants ou d'engrais. Une fois que les cultures ont été récoltées et que les radeaux végétaux ne sont plus utiles, ils peuvent être employés en tant que fertilisants organiques dans les champs ou incorporés aux systèmes flottants des années suivantes (AEPIS & RIPSO, 2004; Saha, 2010).

Cette approche fait un usage bénéfique des jacinthes d'eau, une herbe extrêmement envahissante aux taux de croissance prolifiques. Les récolter permet de nettoyer les zones envahies par ces herbes créant ainsi un effet secondaire positif en réduisant les terrains propices aux moustiques et en améliorant les conditions de pêche en eaux libres (Saha, 2010). L'agriculture flottante permet également de pêcher simultanément les poissons vivant dans les îlots végétaux (AEPIS & RIPSO, 2004).

L'utilisation de l'agriculture flottante aide de plus à compléter le revenu des communautés locales et contribue à diminuer la pauvreté (Saha, 2010). Cela permet une plus grande sécurité alimentaire par le biais de l'augmentation des productions agricoles et le soutien des capacités des personnes pauvres ou n'ayant pas accès à des terrains (Irfanullah et al. 2007). Celles qui utilisent cette méthode d'agriculture bénéficient d'un meilleur niveau économique que celles vivant dans des zones inondables et qui n'ont pas encore adopté cette pratique (Saha, 2010).

Ce système exigeant une main d'œuvre importante, cela peut également fournir des possibilités d'emplois parmi les communautés (Haq et al., 2004). De plus, les activités liées à l'agriculture flottante étant réalisables par les hommes comme par les femmes, cela peut conduire à améliorer l'égalité entre les sexes.

Les inconvénients liés aux systèmes agricoles flottants

Tandis que cette technologie fonctionne bien aujourd'hui dans certaines zones, on ignore les effets qu'auront sur ces pratiques la SLR et les hausses de salinité susceptibles de se produire avec le changement climatique. De plus, tandis que cette technique est applicable dans plusieurs grands deltas tels que le Ganges-Brahmaputra, une mise en pratique plus générale risque d'échouer et il convient d'être prudent dans l'expansion de l'utilisation de cette technologie.

Les méthodes utilisées pour l'agriculture flottante ont l'inconvénient d'encourager l'infestation de moustiques et de rongeurs. Cela peut causer des problèmes d'ordre sanitaire et des dégâts dans les cultures (Saha, 2010).

Cette technologie peut également provoquer des conflits au sein des communautés si des zones de propriété publique sont dédiées à cet usage. Une telle approche peut aussi conduire des individus plus influents politiquement à tenter d'acquérir ces zones pour leur profit (Islam & Atkins, 2007).

Par ailleurs, bien que cette méthode fournisse l'avantage d'une continuité dans la production alimentaire, il peut s'avérer difficile de transporter les récoltes jusqu'aux marchés, la zone restant la plupart du temps immergée (AEPIS & RIPSO, 2004).

Les coûts et besoins financiers

Les activités d'agriculture flottante ont un besoin en infrastructures minimal et n'exige que peu de capital (Saha, 2010). Les coûts peuvent également restés peu élevés, les matériaux bruts pour la construction des îlots flottants étant déjà disponibles localement.

Haq et al. (2004) ont mené une analyse sur les coûts de mise en œuvre de l'agriculture flottante au Bangladesh. Leurs conclusions sont présentées dans le tableau 4.9.

Tableau 4.9: Coûts de mise en œuvre d'un système d'agriculture flottante au Bangladesh

Activité	Durée	Coûts totaux (Tk)	Coûts totaux convertis en US\$ (niveau du US\$ en 2009)
Construction d'îlots flottants	60 jours-hommes	3000	63
Collecte des matériaux bruts (herbes)	20 jours-hommes	1000	21
Semis et/ou achat de jeunes plants		600	13
Bambou, corde, récolte des cultures et entretien		1000	21
Total		Tk 5600	US\$ 118

L'utilisation de l'agriculture flottante en tant que mesure d'adaptation fournit également des bénéfices économiques directs. Les légumes et les épices produits sur les îlots flottants peuvent être vendus sur les marchés et puisque cette approche est entièrement organique, la production attire l'attention des acheteurs et consommateurs locaux (Haq et al., 2004).

Les capacités institutionnelles et organisationnelles requises

En raison d'un manque de connaissances du public en matière d'agriculture flottante et de ses méthodes, il est nécessaire de sensibiliser et d'éduquer les communautés locales. Au Bangladesh, un dispositif récent a été promu par la Wetland Resource Development Society (une organisation internationale axée sur la recherche et le développement) qui propose à celles-ci une formation et un soutien technique.

Si les communautés ont accès aux connaissances adéquates, la mise en œuvre des systèmes d'agriculture flottante devrait être réalisable au niveau local. Cela est dû au fait que les matériaux bruts sont disponibles partout et que les coûts sont peu élevés et compensés par la production et la vente de denrées alimentaires.

Afin de mettre en œuvre ces dispositifs au niveau local, il est nécessaire que les communautés travaillent en collaboration. Ce faisant, il a été observé que l'harmonie au sein du groupe se trouvait renforcée et ainsi au sein de la communauté elle-même (APEIS & RIPS0, 2004).

Par le biais d'un programme visant à encourager l'agriculture flottante au Bangladesh, il a été découvert que l'un des aspects les plus importants était d'impliquer de petits agriculteurs pauvres au niveau local et de renforcer au fur et à mesure leur capacité à gérer de petites entreprises (LEISA, 2009). Cela permet aux agriculteurs les plus démunis d'obtenir des bénéfices et peut être réalisé au niveau local.

Les facteurs entravant la mise en œuvre

L'accès à d'importants volumes de matière organique à croissance rapide peut être limité dans certaines régions et peut donc poser problème si la mise en pratique de cette technologie se répand. Etant un élément essentiel de l'agriculture flottante, un approvisionnement insuffisant constituerait un obstacle à l'utilisation de cette technologie.

Il est essentiel de transmettre les connaissances sur cette méthode aux communautés locales dans les régions où l'agriculture flottante n'est pas mise en pratique. Dans une certaine mesure, cela s'est naturellement produit au Bangladesh où la méthode d'est répandue à travers le pays (APEIS & RIPSO, 2004). A l'échelle mondiale, un processus de sensibilisation au niveau local sera cependant nécessaire.

Il peut arriver que les agriculteurs plus pauvres soient exclus des dispositifs d'agriculture flottante si leurs droits d'accès au bien commun et à la technologie ne sont pas défendus. Tandis qu'il existe de nombreuses zones humides débordantes de jacinthes d'eau, elles seront probablement récupérées par les castes supérieures de la société rurale comme urbaine si un vaste plaidoyer n'est pas exercé en continu par les organes exécutifs (LEISA, 2009).

Les facteurs favorisant la mise en œuvre

L'agriculture flottante est une option respectueuse de l'environnement permettant d'augmenter la surface cultivable disponible. Cette méthode pourrait donc s'avérer durable et bénéfique dans les pays en voie de développement, offrant des compléments de revenus et permettant une plus grande sécurité alimentaire (APEIS & RIPSO, 2004).

Les méthodes traditionnelles de culture des sols exigent la protection du terrain par des talus ou une conversion de terres dans les systèmes estuariens. Ces deux activités peuvent avoir des effets secondaires néfastes sur l'environnement et l'économie locale. En revanche, l'agriculture flottante peut être menée sans avoir besoin d'aménager de nouveaux terrains ou de construire des défenses « en dur » (cf. section 4.1.6). La procédure peut même contribuer à maintenir les zones humides en bon état (Haq et al., 2004), elles qui remplissent des fonctions de protection du littoral et soutiennent également une riche biodiversité.

Les espèces envahissantes de végétaux aquatiques utilisées dans l'agriculture flottante sont considérées comme la deuxième cause la plus néfaste pour la biodiversité dans le monde (Haq et al., 2005). Débarrasser les voies navigables de ces plantes est donc bénéfique pour la santé des écosystèmes humides concernés et pourrait contribuer à maintenir une large biodiversité et entretenir ainsi les avantages associés.

Cette méthode est déjà largement mise en application dans les pays en voie de développement comme le Bangladesh, et l'utilisation de cette technologie est en voie d'expansion en raison de ses aspects positifs et durables (APEIS & RIPSO, 2004).

Etude de cas: Le dispositif d'agriculture flottante de Chandra au Bangladesh

En 2004, un projet d'agriculture flottante fut initié au village de Chandra au Bangladesh. Le projet était proposé par la Wetland Resource Development Society (WRDS), une organisation bénévole de recherche et développement et la mise en œuvre financée par l'ACDI (l'Agence canadienne de développement international). L'étude de cas suivante est fondée sur les recherches de Haq et al. (2004).

Chandra est située au sud-ouest du Bangladesh sur les rives de la rivière Kabodak. Dans le passé, les habitants dépendaient de la rivière pour l'agriculture, l'aquaculture, les transports et d'autres activités. Les crues annuelles déposaient du limon sur les terres arables, les rendant fertiles et prêtes à être utilisées pour les activités agricoles.

Avec le temps cependant, les crues sont devenues davantage une nuisance et dans les années 1960, la Régie de l'aménagement de l'eau et de l'électricité du Pakistan Oriental a mis en œuvre le projet de protection côtière visant à aménager des zones humides sujettes aux inondations saisonnières à des fins d'usage agricole permanent. Bien que cela ait permis des bénéfices temporaires, la terre aménagée est maintenant isolée des limons fertiles des crues qui sont à la place déposés dans la rivière, bloquant le drainage et conduisant à un engorgement permanent.

En raison des crues régulières, de l'inondation des terres et de la disponibilité de plantes aquatiques, il a été décidé que la situation locale était favorable à l'utilisation de l'agriculture flottante. On espérait également que le système fournirait des espaces de production aux agriculteurs dépourvus de terres.

Les institutions soutenant l'initiative ont offert aux habitants du village des formations et un soutien technique en matière de méthodes d'agriculture flottante. Auparavant, ces derniers ne connaissaient pas cette technique, bien qu'elle prévale dans d'autres régions du pays. Plus de 150 agriculteurs ont ainsi commencé à mettre en application les méthodes dans les zones immergées et après une courte période, beaucoup d'autres ont compris en quoi le système pouvait leur apporter des bénéfices.

La population de Chandra cultive actuellement 23 types de légumes et 5 épices au moyen de systèmes agricoles flottants (Haq et al., 2005). Les techniques qu'ils emploient sont très similaires à celles décrites au début de cette partie.

Le projet s'est déroulé de 2003 à 2005, puis au vu de son succès, une seconde phase a été entreprise durant 2007-2008 dans le District de Jessore au Bangladesh, cette fois financée par ActionAid (LEISA, 2009). Bien que le projet n'ait duré que peu de temps, des résultats directs ont pu être observés. Les agriculteurs pouvaient produire et vendre des produits hors saison pour un rendement élevé. Lorsque le Cyclone Sidr traversa la région, les agriculteurs participant au projet n'ont pas eu à subir d'effets négatifs sur leurs plantations de légumes et d'épices et ont même pu vendre leurs produits à un prix plus élevé (LEISA, 2009). Cela montre clairement les avantages liés à l'adaptation aux tempêtes plus intenses dues au changement climatique.

Tandis que cette approche s'est montrée efficace jusqu'à ce jour, les résultats en cas d'élévation du niveau de la mer sont moins connus, des phénomènes comme l'intrusion d'eau salée pouvant détruire les cultures. Continuer de mettre en pratique cette technique exige donc un suivi rigoureux et des stratégies flexibles pour faire face aux effets les plus néfastes.

4.2.4 La cartographie des risques d'inondation

Définition

Cartographier les risques d'inondation est un exercice visant à définir les zones du littoral qui présentent des risques d'inondation lors de conditions météorologiques extrêmes. Son objectif premier vise à réduire l'impact des inondations côtières. Cependant, cartographier les zones soumises à de forts risques d'érosion pourrait également servir à atténuer ces derniers. Cette méthode agit comme un système d'information et permet d'améliorer la compréhension et la sensibilisation aux risques côtiers.

Description

La cartographie des risques d'inondation est une composante essentielle d'une planification adaptée de l'aménagement des terres dans les zones sujettes aux inondations. Elle permet la création de tableaux et de cartes lisibles et rapidement accessibles qui facilitent l'identification des zones sensibles aux crues, aident à prioriser les effets du changement climatique et les moyens d'intervention pour y faire face (Bapulu & Sinha, 2005).

Les cartes des zones inondables sont conçues dans le but d'accroître la sensibilisation du public, des autorités locales et d'autres organisations à la probabilité des inondations. Elles encouragent également les personnes vivant et travaillant dans les zones à risques à s'informer davantage sur ces derniers dans leurs localités et à prendre les mesures appropriées (Agence pour l'Environnement, 2010).

Il est important de souligner ici que le changement climatique doit être dûment pris en compte lors de la mise en œuvre d'une cartographie des risques d'inondation. Cette étude fournit un instantané des risques d'inondation à un moment précis et pour une période donnée. Cependant, lors de l'examen des effets du changement climatique, il convient de prendre en compte la nature dynamique de ces risques. Par exemple, l'élévation du niveau de la mer et l'intensité plus forte des tempêtes causées par le changement climatique provoqueront des altérations dans les zones sujettes aux inondations. Se référer pour exemple à la figure 4.24.

En raison du changement climatique et des modifications du niveau relatif de la mer, il est important de souligner que les cartes des régions inondables requerront des mises à jour périodiques dans le but de refléter l'évolution des risques. Ces mises à jour devront tenir compte de la RSLR, de l'érosion, des changements dans la fréquence et l'intensité des tempêtes etc.

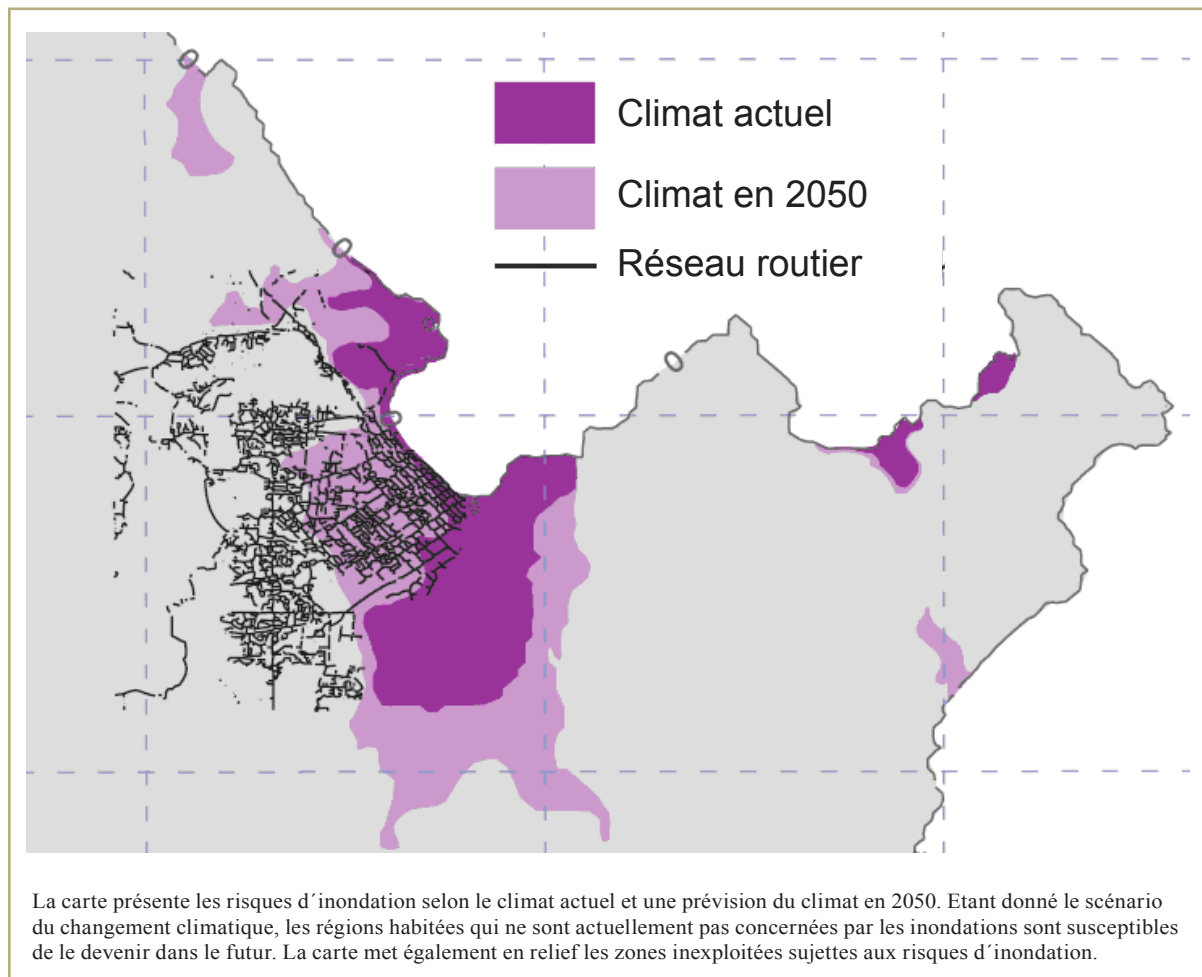
Les cartes des zones inondables peuvent être utilisées par des promoteurs pour déterminer si une zone est sujette aux risques d'inondation, et par des assureurs pour déterminer les primes d'assurance inondation dans les zones couvertes.

En raison du peu de données empiriques et de la rareté des statistiques relatives aux événements climatiques extrêmes sur les côtes, la prédiction des inondations côtières repose souvent sur des modèles numériques complexes qui tentent de refléter au mieux les processus et phénomènes conduisant à l'inondation des côtes (Water Science and Technology Board, 2009). Les crues sont déterminées par l'interaction des ondes de tempête et des vagues avec la bathymétrie des fonds marins et l'occupation des terres du littoral. Ce sont ces facteurs qui influencent le degré d'inondation des terres. Les modèles d'inondation des côtes doivent ainsi prendre en compte ces éléments ainsi que les processus liés aux ondes de tempête et aux vagues (Water Science and Technology Board, 2009).

La création de cartes des zones inondables associe normalement les données topographiques à l'historique ou à l'information modélisée des niveaux extrêmes de la mer et des hauteurs des vagues. Cela permet de déterminer le niveau de l'eau sur les côtes lors de conditions météorologiques extrêmes et de refléter dans quelle mesure les crues pourraient inonder l'intérieur des terres. Cela impliquera probablement l'utilisation de la modélisation d'ondes de tempête et de vagues.

Le niveau de protection offert par les ouvrages de défense côtiers préexistants doit aussi être pris en compte. Cela permet de déterminer le moment où les crues vont dépasser la capacité des ouvrages de défense, causant l'inondation des zones protégées.

Figure 4.24: Carte des risques d'inondation aux alentours de Cairns, Australie



Source: Nicholls et al., 2007a

Les systèmes d'information géographique (SIG) sont fréquemment utilisés pour la réalisation des cartes des zones inondables. Ils constituent un moyen efficace pour assembler des informations provenant de différentes cartes et de modèles numériques d'élévation (Sanyal&Lu, 2003). A l'aide du SIG, l'ampleur des inondations peut-être calculée en comparant les élévations locales avec les niveaux d'eau extrêmes.

Les avantages liés à la cartographie des risques d'inondation

L'identification des zones à risques permettra de façonner les interventions d'urgence en cas d'inondation. Par exemple, les zones qui sont susceptibles de requérir une évacuation peuvent être identifiées, et des routes d'évacuation peuvent ainsi être mises en place et clairement signalisées afin que les communautés locales soient averties en avance en cas d'urgence. Cela permettra également de localiser les emplacements des abris pour les personnes évacuées.

L'identification des zones à risques d'inondation est susceptible d'aider à mettre en place une intervention d'urgence plus efficace. Il est essentiel que certaines infrastructures, telles que les sources d'approvisionnement électrique et d'épuration des eaux, ainsi que les services, tels que les services d'urgence, continuent de fonctionner durant une inondation. La création de cartes de zones inondables permettra donc aux personnes responsables de la planification de localiser ces infrastructures dans les zones à bas risques afin qu'elles restent opérationnelles lors d'un événement météorologique extrême. Dans d'autres cas, une cartographie pourrait mettre en évidence les besoins pour protéger ces infrastructures des crues.

La cartographie va également permettre de quantifier ce qui risque d'être touché par les inondations comme par exemple le nombre d'habitations ou de commerces concernés. Cela aidera à déterminer le niveau d'urgence et les opérations de nettoyage à prévoir.

Les cartes des zones inondables devraient promouvoir une meilleure sensibilisation aux risques d'inondation. Ces cartes peuvent aider les résidents à mieux prendre conscience la manière dont il faut se préparer aux inondations. Pour atteindre cet objectif, les autorités locales doivent cependant s'assurer que les procédures d'urgence soient en place et que les informations sur l'attitude à adopter en cas d'inondation soient bien mises à disposition du public.

En identifiant les constructions qui présentent des risques d'inondation, les campagnes de sensibilisation peuvent aussi cibler les propriétés à haut risque. Cela peut inclure une plus grande sensibilisation aux procédures d'intervention ainsi que la promotion des mesures à prendre en cas de crues (cf. section 4.2.1).

A plus long terme, les cartes des zones inondables peuvent soutenir la planification et le développement en identifiant les endroits à haut risque et ainsi orienter le développement vers d'autres zones. Cela limitera les risques d'inondation dans le futur et encouragera le développement durable. Pour cela, les cartes des zones inondables doivent être intégrées aux mesures de planification.

Les inconvénients liés à la cartographie des risques d'inondation

Seule, la cartographie des risques d'inondation ne réduit pas les risques. Il convient de l'intégrer à d'autres procédures, comme la planification des mesures d'urgence et l'aménagement urbain, avant qu'il soit possible d'en tirer pleinement les bénéfices.

Plus perfectionnée, une cartographie précise des risques d'inondation est susceptible de se fonder sur des modèles numériques complexes en raison du manque de données sur les événements météorologiques lors de conditions extrêmes. Cela exige des moyens d'expertise importants. La collecte de données topographiques et de données bathymétriques complétant les informations sur les niveaux d'eau extrêmes et la hauteur des vagues peut également s'avérer coûteuse.

Afin de tirer parti au maximum de la cartographie, il est important de fournir à la population qui vit dans ces zones à risques des informations sur les procédures à suivre en cas d'urgence et sur les moyens pour réduire les risques d'inondation. Si l'information sur le comportement à adopter en cas d'urgence n'est pas adéquate, une cartographie des risques d'inondation ne pourra servir qu'à alimenter la peur et l'anxiété, les résidents ayant davantage conscience des risques.

Les coûts et besoins financiers

Les coûts de la cartographie des risques d'inondation sont méconnus. Il n'est donc pas possible de fournir ici une estimation. Cependant, l'encadré 4.8 décrit un certain nombre de facteurs qui sont susceptibles d'influencer le coût de cette cartographie.

Encadré 4.8: Les facteurs influençant le coût de la cartographie des risques d'inondation

- Expertise interne sur la modélisation numérique des risques d'inondation effectuée par des établissements universitaires ou des entreprises commerciales
- Etudes topographiques (LIDAR ou télédétection) fournissant des informations sur l'élévation du terrain qui sont intégrées ensuite aux modèles de risques d'inondation
- Historique des coûts de collecte des données sur les conditions météorologiques extrêmes comme les niveaux d'eau, la hauteur des vagues etc.
- Le coût d'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG)

Les capacités institutionnelles et organisationnelles requises

La cartographie des risques d'inondation peut être difficile à entreprendre à un niveau communautaire en raison du besoin d'une modélisation numérique complexe pour prévoir les niveaux d'eau extrêmes, les ondes de tempêtes et les hauteurs des vagues. Il est peu probable que cette capacité d'expertise et de modélisation soient disponibles au niveau local, particulièrement dans les pays en voie de développement. Ainsi, il semble nécessaire de mobiliser l'aide d'organisations externes. A l'instar des pays développés, ce type de cartographie a été accompli dans le cadre de programmes nationaux.

Les facteurs entravant la mise en œuvre

La cartographie des risques d'inondation repose sur la disponibilité de données topographiques, de données à long terme sur les conditions météorologiques extrêmes ainsi que sur des techniques de modélisation numérique complexes. Cela requiert des capacités d'expertise et de modélisation qui peuvent s'avérer difficilement disponibles.

Le manque de connaissances du public sur les avantages de la cartographie des risques d'inondation pourrait aussi représenter un obstacle à sa mise en œuvre. Si le public ignore les bénéfices de la cartographie, il préférera probablement voir l'argent public investi dans des mesures de protection contre les crues et l'érosion plus tangibles.

Les facteurs favorisant la mise en œuvre

La cartographie des risques d'inondation complète et renforce d'autres options d'adaptation comme les mesures de protection contre les crues (cf. section 4.2.1), la planification des mesures d'urgence, la mise à disposition d'abris en cas d'inondation ainsi que des plans d'évacuation. Cette approche pourrait ainsi être appliquée de manière presque universelle, quelles que soient les autres technologies d'adaptation utilisées.

Etude de cas: Montego Bay, Jamaïque

Entre 1994 et 1997, le projet d'atténuation des effets des catastrophes dans les Caraïbes (CDMP, acronyme anglais) a entrepris trois évaluations des dangers liés aux tempêtes à Montego Bay, en Jamaïque. L'objectif était de produire des cartes des ondes des ouragans à utiliser dans le cadre de la gestion des situations d'urgence et des plans d'aménagement du territoire à Montego Bay. L'étude de cas suivante est tirée de Smith Warner International (1999).

La cartographie des risques d'inondation a été entreprise par le CDMP, un effort conjoint entre l'Organisation des Etats américains (OEA) et l'Agence des États-Unis pour le développement international (USAID). Le CDMP a été lancé en réponse à l'augmentation considérable de dégâts dans les Caraïbes causés par les ouragans et les tempêtes tropicales.

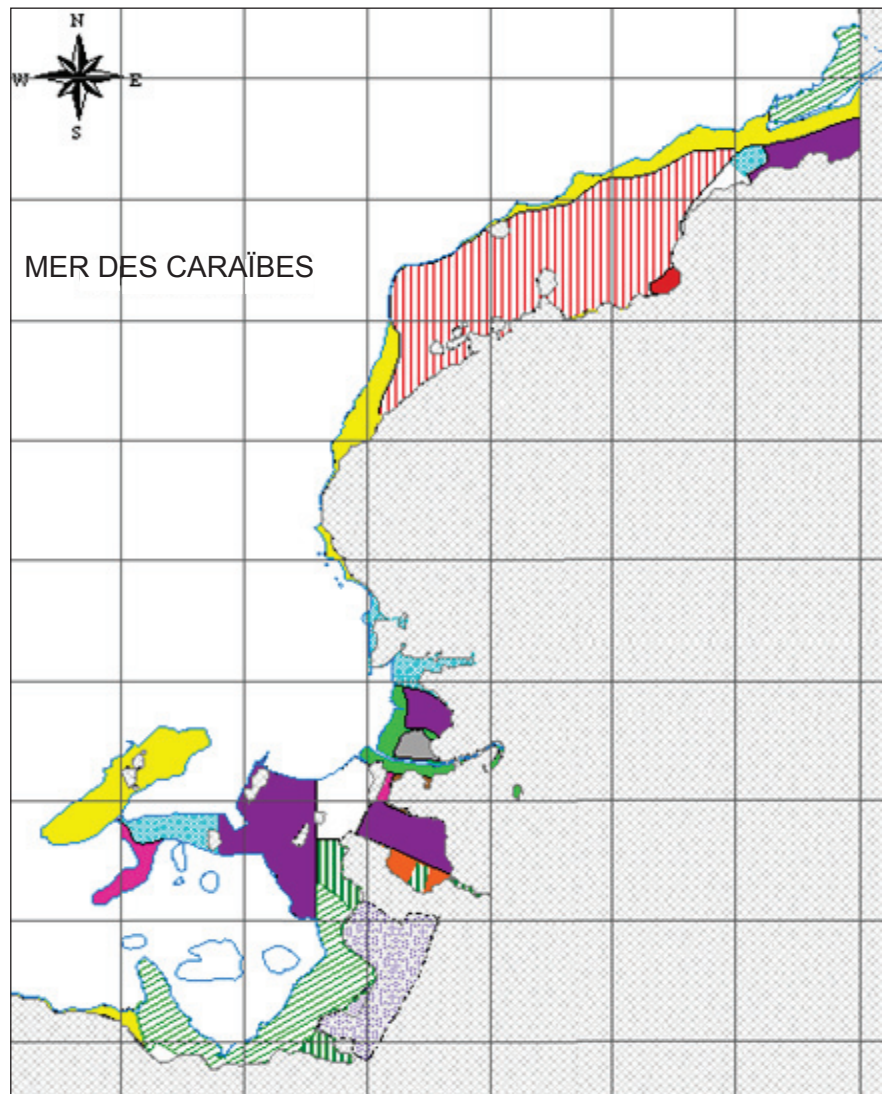
L'étude a produit des cartes reflétant la hauteur des ondes de tempête dont la période de récurrence est de 1, 10, 25, 50 et 100 ans. Cette étude a été menée grâce à l'utilisation du modèle TAOS, un modèle de simulation des ondes de tempête spécialement conçu pour la zone des Caraïbes.

Le modèle TAOS est basé sur un modèle numérique sur PC. Il est capable d'estimer la hauteur d'une onde de tempête associée à n'importe quelle tempête passée ou à venir dans les Caraïbes. Ceci est rendu possible par l'utilisation d'équations complexes qui représentent les effets du vent, des vagues, des courants et d'autres facteurs importants aidant à déterminer la hauteur des ondes de tempête. La SLR à long terme est également prise en compte dans le modèle TAOS car elle va avoir des répercussions au fil du temps sur les données par rapport auxquelles sont faits les calculs. Le PNUE recommande une estimation prudente de la SLR dans les Caraïbes de 5mm/an.

Le modèle TAOS a été utilisé pour prédire la hauteur des ondes de tempête à Montego Bay en exécutant le même modèle pour toutes les tempêtes enregistrées dans la base de données du Centre National des Ouragans. A partir de ces résultats, les hauteurs annuelles maximales des ondes ont été extraites et fixées sur une répartition statistique. Cela produit un type de graphique depuis lequel il est possible d'estimer les hauteurs des ondes de tempêtes associées à n'importe quelle période de retour.

Les hauteurs des ondes de tempête établies par le modèle TAOS ont par la suite été comparées à d'autres modélisations numériques et à des données historiques et anecdotiques. Cette approche a permis de valider le modèle et de vérifier que les résultats obtenus étaient réalistes.

Une fois les hauteurs des ondes de tempête connues pour une période donnée, les résultats ont pu être retranscrits sur une carte. Il a été décidé de représenter les résultats sur une carte créée à partir des photographies aériennes de la région qui a par la suite été importée sur un système d'information géographique (SIG). Le SIG a permis une manipulation et une analyse aisées des informations. Son utilisation facilite également la production de cartes et de statistiques. Les informations sur les différents usages des sols dans la ville ont également été importées dans le SIG afin de permettre l'évaluation des répercussions des tempêtes associées. Les résultats de cette analyse sont présentés dans la figure 4.25.

Figure 4.25: Carte des risques d'inondations de Montego Bay, Jamaïque

Les zones colorées sur la carte montrent l'ampleur de l'inondation causée par une onde de tempête qui se produit tous les 50 ans. Les différentes couleurs indiquent les différents usages des terres (résidentiel, industriel, agricole etc.)

Source: Smith Warner International, 1999

A cette période, l'aménagement du littoral de Montego Bay était planifié pour permettre le développement de complexes hôteliers, de quartiers résidentiels et de bâtiments commerciaux parmi d'autres usages. La carte des zones inondables a permis de mettre en relief les zones qui devaient rester inexploitées. Elle a aussi révélé que la marge de recul pour les constructions de 30,48 m (100 ft) au-dessus de la ligne des hautes eaux n'était pas suffisante pour protéger bon nombre des infrastructures (cf. section 4.3.2 pour en savoir plus sur les zones de retrait du littoral). De plus, l'étude a souligné la vulnérabilité d'infrastructures importantes, comme le poste de police, les installations de pompage des eaux usées ou encore l'aéroport en cas d'inondations ou d'ondes de tempêtes et particulièrement en cas de SLR. Des mesures de planification d'urgence ont donc été nécessaires afin de s'assurer que ces infrastructures puissent de nouveau fonctionner le plus rapidement possible à la suite d'inondations.

Cette étude de cas illustre la manière dont une cartographie des risques d'inondation peut-être mise en œuvre efficacement dans un pays en voie de développement. Dans ce cas de figure, le modèle TAOS a été bénéfique car il peut être utilisé depuis un ordinateur. Il a donc une base potentielle d'utilisateurs bien plus large que les modèles requérant l'utilisation de systèmes complexes. De plus, ce modèle a été conçu pour être facile d'utilisation et ne nécessite donc pas une longue période de formation. La production de cartes de zones inondables a permis d'améliorer l'éducation publique ainsi que la planification de mesures d'urgence et celle du développement.

4.2.5 Les systèmes d'alerte aux inondations

Définition

Un système d'alerte aux inondations est un moyen de détecter en avance les menaces. Cela permet d'avertir en masse la population et de pouvoir prendre des mesures afin de réduire les effets néfastes induits par ces crues. Ainsi, l'objectif premier d'un système d'alerte est d'atténuer l'exposition aux inondations côtières.

Description

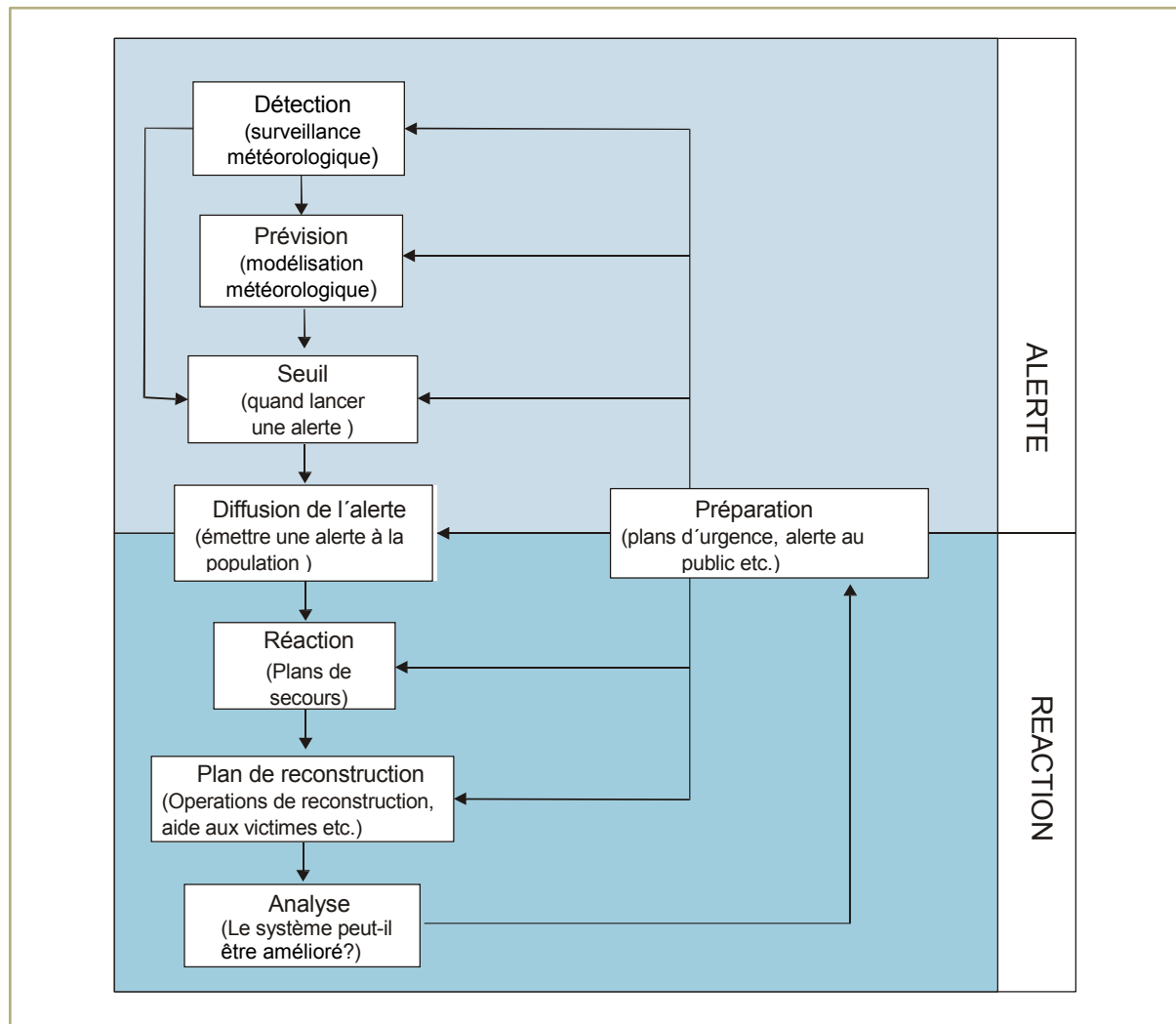
La finalité des services d'alerte aux inondations est de détecter et de prévoir les épisodes d'inondation importants afin d'alerter en avance la population qui peut ainsi prendre des mesures pour en minimiser les impacts. Ces technologies sont particulièrement importantes dans les pays en voie de développement où les crues sont synonymes de lourdes pertes humaines et matérielles.

Les alertes aux inondations sont des mesures importantes et flexibles dans des endroits où la protection à grande échelle n'est pas toujours désirable ou possible. Cela peut être le cas si les moyens de défense contre les crues sont susceptibles de causer des problèmes environnementaux ou sociaux, ou encore lorsque le coût de ces mesures est trop prohibitif.

Un processus d'alerte présente deux phases distinctes: (1) l'alerte inondation et (2) l'intervention. Ces phases comportent un certain nombre de volets et sont liées par la diffusion de l'alerte comme montré dans la figure 4.26.

L'étape de l'alerte requiert une surveillance constante des conditions météorologiques. Il convient de détecter et d'analyser les événements météorologiques menaçants avant qu'ils ne touchent la population. Les prévisions météorologiques doivent être prises en compte afin de permettre aux décideurs de modéliser la manière dont un événement météorologique peut se développer, la proportion que peut prendre la crue associée et quelles fractions de la population sont en danger. Cette opération est importante car la simple détection d'une inondation ne laissera pas suffisamment de temps pour élaborer des procédures d'intervention adéquates. Pour réaliser la surveillance et la prévision, il est probable qu'il faille y associer des systèmes de détection météorologique et des marées ainsi que des modèles de prévisions des crues côtières et fluviales.

Une fois qu'un événement météorologique a franchi un certain seuil, une alerte est lancée. Il est probable que cette alerte soit diffusée à la population « à risque » par le biais de différents canaux. Les médias, les services de polices, les pompiers ainsi que des signaux basiques tels que les alarmes et drapeaux jouent un rôle important dans ces situations.

Figure 4.26: Les composantes d'un système d'alerte aux inondations

Source: Basé sur Sene, 2008

Après que la population concernée a été prévenue, la deuxième phase du système d'alerte aux inondations est lancée : l'intervention. Il convient que les communautés se trouvant dans les zones dangereuses limitent leur exposition aux risques et essayent de contenir les effets des crues. Il est important que les comportements appropriés soient communiqués au public par le biais de campagnes de sensibilisation en amont d'une situation d'urgence. Ce faisant, ces actions peuvent être rapidement effectuées et les dégâts être atténués au maximum.

Un système d'alerte aux inondations efficace requiert une coopération entre différents acteurs tels que le gouvernement, les organismes de secours et les communautés locales. Cette approche présente donc non seulement des défis techniques mais également des défis organisationnels.

En résumé, l'alerte aux inondations consiste à répondre aux cinq questions suivantes (EMA, 1999):

1. Quelle hauteur atteindra la crue et quand?
2. A quel endroit l'eau atteindra-t-elle l'amplitude prévue?
3. Qui sera affecté par l'inondation?
4. Quels informations et conseils doivent être suivis par les personnes touchées par une inondation ?
5. Quel est le meilleur moyen pour transmettre des informations appropriées aux personnes touchées par une inondation?

Une alerte aux inondations efficace requiert des éléments essentiels qui sont présentés dans le tableau 4.10.

Tableau 4.10: Les composantes du système d'alerte aux inondations, de prévision et d'intervention d'urgence

Etape	Composante	Exemples
Alerte aux inondations	Détection	Surveillance météorologique, rivières et régime des marées, prévision météo (ex: le temps)
	Seuils	Les conditions météorologiques, des rivières et des côtes par rapport auxquelles les alertes sont émises
	Diffusion	Procédures et techniques pour lancer des alertes au public, autorités locales, services d'urgence etc.
Prévision des crues	Rivières/ côtes	Modèles pour la prévision des futures conditions des rivières et des côtes
Intervention	Réaction	Travaux d'urgence tels que les barrières temporaires, le contrôle du débit de l'eau, l'évacuation, le sauvetage, la gestion des incidents, le soutien à la décision
	Reconstruction	Réparation, élimination des débris, rassemblement des familles, accords pour les fonds d'urgence Mise à disposition d'abris, de nourriture, d'eau, de soins médicaux et des services de conseils et d'écoute
	Evaluation	Effectuer une analyse de la performance de tous les éléments du système, recommandations pour des améliorations
	Préparation	Campagnes de sensibilisation au public, formation, améliorations du système, diminution des risques

Source: Sene, 2008

Il est important de souligner qu'un système d'alerte aux inondations n'est pas l'unique réponse pour minimiser les impacts des inondations côtières. Un système d'alertes rapide devrait être associé à des mesures de préparation aux situations d'urgence telles que des voies d'évacuation et des abris, et devrait également contenir un volet de sensibilisation. Ces systèmes sont seulement efficaces si chacun connaît la définition d'un système d'alertes, quelles en sont les différentes étapes et quelle est l'attitude à adopter en cas de danger (Tompkins et al. 2005).

Associer cette mesure à d'autres technologies comme la cartographie des risques d'inondations (cf. section 4.2.4) améliorera l'efficacité des alertes et participera à la sensibilisation aux risques existant au niveau local.

Les avantages liés aux alertes aux inondations

HR Wallingford (2006) affirme que les systèmes d'alerte aux inondations fournissent une alerte précoce de l'arrivée des crues qui peut permettre de:

- Limiter les pertes humaines
- Évacuer les groupes vulnérables
- Donner le temps aux résidents de déplacer leurs biens (bétail, biens personnels, nourriture) dans des endroits plus sûrs
- Mettre en place de manière opportune les structures de protection contre les inondations (barrières anti-tempête, mesures de défense temporaires contre les crues etc.) afin d'empêcher l'inondation des biens et des terres
- Installation des mesures de protection contre les crues (sacs de sable, barrières de protection pour les biens etc.)
- Exécuter une opération de maintenance avant que n'ait lieu l'inondation afin d'assurer le bon fonctionnement des voies d'acheminement

Si les alertes peuvent être diffusées au public, il est également possible de donner des conseils à la population sur l'attitude à adopter et sur les moyens de limiter les pertes. Il convient d'informer sur les zones à évacuer, les voies d'évacuation et les endroits où il est possible de se réfugier. Il est probable que les conseils et instructions puissent être émis par les mêmes canaux utilisés pour alerter la population des risques d'inondations, et ce avant que l'alerte ne survienne.

Les technologies d'alerte aux inondations sont relativement peu coûteuses et ont été utilisées de différentes manières avec succès, tant dans des pays développés comme les Etats-Unis que des pays en voie de développement comme le Bangladesh (IOC, 2009).

Les inconvénients liés aux alertes aux inondations

Comme souligné précédemment, utilisé seul, un système d'alerte aux inondations n'est pas suffisant pour réduire les effets des crues. La réaction de la population aux avertissements, son attitude et ses actions, a une réelle importance dans le processus des systèmes d'alerte (Haque, 1995). Le fonctionnement de ces systèmes doit être connu des communautés locales et des mesures doivent être prises pour minimiser les risques. Sans ces éléments, leur efficacité est compromise. Il est primordial d'effectuer auprès du public une communication efficace sur les alertes et que des mesures d'intervention soient mises en place. Il est donc essentiel d'informer la population sur les comportements à adopter en cas de crues, et ce en amont des situations d'urgence.

Il est également primordial que les systèmes d'alerte aux inondations soient précis. Des inexactitudes peuvent conduire à un excès de confiance si les précédentes alertes étaient infondées ou causer des peurs inutiles (Convention-Cadre des Nations unies sur les changements climatiques, CCNUCC, 1999). Il est essentiel que la population prenne en compte l'alerte lancée pour qu'un système soit efficace et sûr, ce qui requiert qu'elle ait confiance dans l'institution émettant ce signal.

Les coûts et besoins financiers

Les coûts de mise en œuvre des systèmes d'alerte aux inondations peuvent différer considérablement selon le niveau de sophistication des technologies de contrôle et de prévision.

Dans les pays en voie de développement, les observations météorologiques sont fréquemment effectuées par le biais de méthodes de base comme des méthodes de radar au sol ou des observations par ballon-sonde souvent couplées avec des moyens informatiques limités. Dans de tels cas, les coûts annuels de fonctionnement s'expriment en termes de centaines de milliers de livres. Dans les pays en voie de développement, il n'est pas rare que les systèmes d'alerte aux inondations soient financés en grande partie par des organisations internationales de la société civile (UK POST, 2005).

Dans les pays plus développés dans lesquels sont réalisées des observations météorologiques plus sophistiquées et où les moyens informatiques sont plus avancés, les coûts annuels de fonctionnement sont supposés s'élever à des centaines de millions de livres (UK POST, 2005).

Les systèmes technologiques moins avancés ne sont pas nécessairement moins efficaces en matière de protection contre les crues. Les systèmes d'alerte aux inondations précoces axés sur la population qui sont souvent employés dans les pays en voie de développement peuvent parfois être plus efficaces que les systèmes centralisés et hiérarchisés. Cela s'explique par le fait que ces systèmes peuvent assimiler plus directement la réaction au niveau local et les stratégies de réduction des risques (DFID, 2004).

L'efficacité des alertes aux inondations peut même être améliorée en impliquant les populations locales à la création des cartes de zones inondables, au projet de surveillance scientifique et au plan de secours, car ces activités aident à développer la conscience et la compréhension des dangers des inondations (UKPOST, 2005). Les stratégies centrées sur les populations permettant l'accès à l'information et à la compréhension des mesures entreprises peuvent même aider à développer des interventions plus efficaces, en limitant les tensions des populations face à un certain nombre de dangers, non seulement ceux liés aux changements climatiques.

Etant donné leurs capacités à réduire considérablement les pertes matérielles et humaines, les systèmes d'alerte aux inondations peuvent être vus comme des moyens rentables de gestion des risques. C'est notamment visible lorsqu'ils sont comparés aux technologies dures comme les digues et les brise-lames dont le coût est souvent prohibitif.

Certain des facteurs clés contribuant à la variation des coûts des systèmes d'alerte aux inondations sont présentés dans l'encadré 4.9.

Encadré 4.9: Facteurs influençant les coûts de mise en œuvre des systèmes d'alerte aux inondations

- Extension du réseau de surveillance météorologique
- Coût des données météorologiques
- Coût des systèmes de diffusion des alertes et leurs degrés de sophistication
- Coûts liés à la formation et à l'engagement d'analystes de données météorologiques
- Coût des mesures associées:
 - Mise à disposition des abris
 - Création de routes d'évacuation
 - Mesures de sensibilisation
 - Formation de services d'urgence

Les capacités institutionnelles et organisationnelles requises

L'organisation des services d'alerte aux inondations varie énormément d'un pays à l'autre et selon l'envergure du système souhaité. Sene (2008) indique que l'organisation de ces services peut inclure certaines ou toutes les activités suivantes:

- Détection: conception, installation et suivi de la pluviométrie, du niveau des rivières, du niveau des marées, du vent, des vagues et de tout autre système de surveillance
- Conception: concevoir les mécanismes d'alerte aux inondations, notamment contribuer aux décisions afin de déterminer qui reçoit l'alerte, quel est seuil d'alerte aux inondations, quelle communication adopter pour lancer une alerte et dans quelles circonstances
- Diffusion: des mesures de surveillance et de prévision des seuils des alertes en suivant les procédures convenues ainsi que les activités de sensibilisation du public
- Intervention: suggestion d'actions qui devraient être développées afin de limiter les risques/pertes
- Gestion: les activités générales de gestion qui incluent les rotations du personnel, l'approvisionnement, le suivi des performances et les rapports, la recherche et le développement etc.
- Prévision: développement et conduite des modèles de prévision de crues afin de fournir des estimations sur le niveau des rivières, le débit des rivières, les marées, les vagues déferlantes etc.

Plusieurs de ces tâches peuvent ne pas être utiles pour les systèmes d'alerte à petite échelle et axés sur la communauté pour lesquels les besoins principaux sont la détection et la diffusion des alertes. Pour des programmes nationaux ou régionaux, la plupart de ces activités seront cependant nécessaires, certaines pouvant toutefois être partagées avec d'autres organisations (Sene, 2008).

Il est possible d'employer des méthodes technologiques économiques pour les services d'alerte. Au Bangladesh, les alertes sont par exemple lancées par des volontaires ou diffusées par des canaux comme la télévision, la radio ou les journaux. Faire appel à des bénévoles a été un réel succès au Bangladesh, les alertes étant considérées comme d'autant plus pertinentes si elles sont délivrées par d'autres membres de la communauté. Ce modèle présente un réel potentiel pour l'émission des alertes dans les pays en voie de développement.

Les interventions liées aux alertes aux inondations peuvent aussi être réalisées au niveau communautaire. Cela peut par exemple être l'approvisionnement en sacs de sable, l'élaboration et la mise en place de procédures d'évacuation ou la distribution de produits de secours. Au Bangladesh, ces activités sont prises en charge par des volontaires locaux. Des mesures éducatives peuvent aussi être offertes aux communautés concernées en amont d'un événement important. Ces mesures sont susceptibles de rendre la population plus consciente des effets des inondations et des mesures préventives existantes (Haque, 1995).

Enseigner les stratégies d'adaptation peut aussi s'avérer bénéfique au niveau communautaire. Ces stratégies peuvent comprendre des cours de natation ou fournir des informations sur les mesures d'évacuation. Haque (1995) a relevé que la majorité des communautés au Bangladesh n'avaient reçu aucune information de la part du gouvernement concernant les stratégies face aux cyclones.

On constate que les systèmes d'alerte requièrent le développement, la mise en œuvre et la coordination d'outils technologiques assez divers pour être efficaces (IOC, 2009). Cela peut être stimulant pour les communautés locales de participer à ces différentes missions, notamment compte tenu de l'investissement de multiples organisations dans les alertes aux inondations.

Bien que ces actions puissent être mises en œuvre au niveau local, impliquer des organisations plus importantes disposant de davantage de ressources, de connaissance et de savoir-faire peut s'avérer être bénéfique et améliorer la qualité des messages d'alerte. Mieux encore, en travaillant main à main avec les pays voisins gérant un système d'alerte, il peut être possible d'obtenir des données météorologiques plus complètes et plus précises ainsi qu'une meilleure diffusion des alertes et des mesures d'intervention renforcées.

Les facteurs entravant la mise en œuvre

Dans les pays en voie de développement, le manque de canaux de communication par lesquels les alertes au public peuvent être émises est un des principaux obstacles à la mise en œuvre de systèmes d'alerte aux inondations. Dans les pays développés, les avertissements peuvent être lancés par la radio, la télévision ou internet, mais ces ressources sont moins accessibles dans les pays en voie de développement. C'est pourquoi transmettre une alerte à temps à la population concernée peut s'avérer problématique.

Cette approche requiert également de collecter et d'analyser des volumes assez importants d'informations détaillées afin de détecter les risques d'inondations. Cela demande un investissement significatif en matériel et en formation. Cela a néanmoins été réalisé dans plusieurs pays en voie de développement, notamment au Bangladesh (Haque 1995; Mirza et al., 2005), au Vietnam (Pilarczyk et Nuoi, 2010) avec l'aide d'organisations étrangères capables de fournir des informations et des données en temps réel sur les changements climatiques (Haque, 1995). Les indicateurs ayant fait leurs preuves au niveau local peuvent aussi se révéler importants lorsqu'ils sont développés par les collectivités situées sur le littoral et qui ont un lien fort à la terre et à la mer.

Même après la mise en place d'un système d'alertes, des obstacles significatifs peuvent encore entraver l'efficacité de cette approche. Lors d'une étude de terrain effectuée après le passage d'un cyclone en avril 1991 au Bangladesh, Haque (1995) a constaté que les populations n'avaient délibérément pas pris de mesures d'intervention malgré le fait d'avoir reçu des messages d'alerte. Une partie importante de la population est ainsi restée vulnérable face aux crues. Trois raisons principales peuvent expliquer cette situation:

1. La peur de perdre les biens du foyer à cause de pillages pouvant survenir en cas d'abandon de la maison
2. Le fatalisme
3. Les alertes n'ont pas été prises au sérieux

Mettre à disposition un réseau plus dense d'abris plus petits dans le but de réduire la distance qui les sépare des maisons peut permettre une meilleure protection des propriétés et de réduire ainsi la peur des pillages (Haque, 1995). Une meilleure application des lois est également indispensable pour permettre une meilleure protection de la propriété privée lors de catastrophes naturelles.

Le fatalisme est généralement synonyme de sentiments d'impuissance face à la situation. Il a été suggéré que certaines personnes pensent que les inondations reflètent la volonté de Dieu et que les individus doivent apprendre à vivre avec les conséquences que les crues entraînent (Haque, 1995).

Les doutes quant aux alertes aux inondations pourraient s'expliquer par de fausses alarmes qui ont été lancées par le passé. Il peut être difficile de prévoir les inondations à cause de leur nature imprévisible. Il convient donc d'évaluer la situation et de décider s'il n'est pas préférable de ne pas avertir la population trop tôt lorsque le risque d'inondation est peu élevé, et de gagner ainsi en crédibilité si le nombre de fausses alarmes est réduit (Haque, 1995).

Haque a souligné (1995) que d'autres raisons pourraient expliquer la passivité de certaines personnes face aux crues: certains individus ont pu douter de l'apparition d'inondations dans cette région car ils n'en avaient jusqu'alors jamais vécues; des abris pleins; des femmes ont pu être rebutées par le fait que les abris soient remplis d'hommes, et un manque de connaissance sur le peu de protection fournie par les maisons.

Les facteurs favorisant la mise en œuvre

Il est possible de mettre en œuvre un système d'alerte aux inondations en complément d'autres mesures dans le cadre de la gestion intégrée des risques d'inondation. Des actions complémentaires peuvent être incorporées dans une stratégie de protection, de compromis ou de repli. A Londres, les systèmes d'alerte ont une incidence sur le fonctionnement d'une barrière anti-tempête, en plus d'enrochements qui ont été construits sur une grande partie de la rive.

Les coûts de la mise en place d'un système d'alerte aux inondations pourraient être compensés par la construction d'abris multifonctionnels qui peuvent aussi servir d'écoles, d'établissements de santé ou peuvent être dédiés à l'agriculture (Haque, 1995). Cette méthode a déjà fait ses preuves en Inde (Mishra & Prakash, 1982).

La technologie utilisée pour détecter les risques d'inondations peut également être exploitée pour prévoir les précipitations lorsque les risques de crues sont bas. Cette mesure pourrait être bénéfique pour les pratiques agricoles dans ces régions.

Etude de cas: Les systèmes d'alerte aux cyclones, Bangladesh

Le golfe du Bengale sur la côte bangladaise est une des régions les plus actives dans le développement de systèmes de basse pression atmosphérique qui peuvent être à l'origine de cyclones tropicaux (Haque, 1995).

Les cyclones tropicaux au Bangladesh ont historiquement un taux très haut de mortalité et de pertes qui s'explique notamment par le fait que le faible revenu par habitant a rendu impossible un investissement dans des mesures permettant de prévenir ou de supprimer les risques (Haque, 1995). Le Bangladesh a donc pris la décision de mettre en œuvre le Programme de préparation aux cyclones (CPP, acronyme anglais). Les activités du CPP s'organisent autour de trois infrastructures: le système d'alerte précoce aux cyclones, des abris publics en cas d'évacuation lors d'une pré-crise, des abris pour le bétail durant les tempêtes (Paul, 2009).

Comme souligné précédemment, les systèmes d'alerte se composent de trois phases qui sont reliées: (1) l'évaluation (2) la diffusion de l'alerte et (3) l'intervention. Au Bangladesh, la procédure d'alerte aux inondations suit ces trois étapes et implique la collaboration de multiples organismes et d'un flot d'informations continu.

L'évaluation est réalisée par le Département Météorologique du Bangladesh (BMD, acronyme anglais), qui est responsable de toutes les prévisions météorologiques et des alertes aux catastrophes. Ce centre recueille des informations provenant de différentes sources dont:

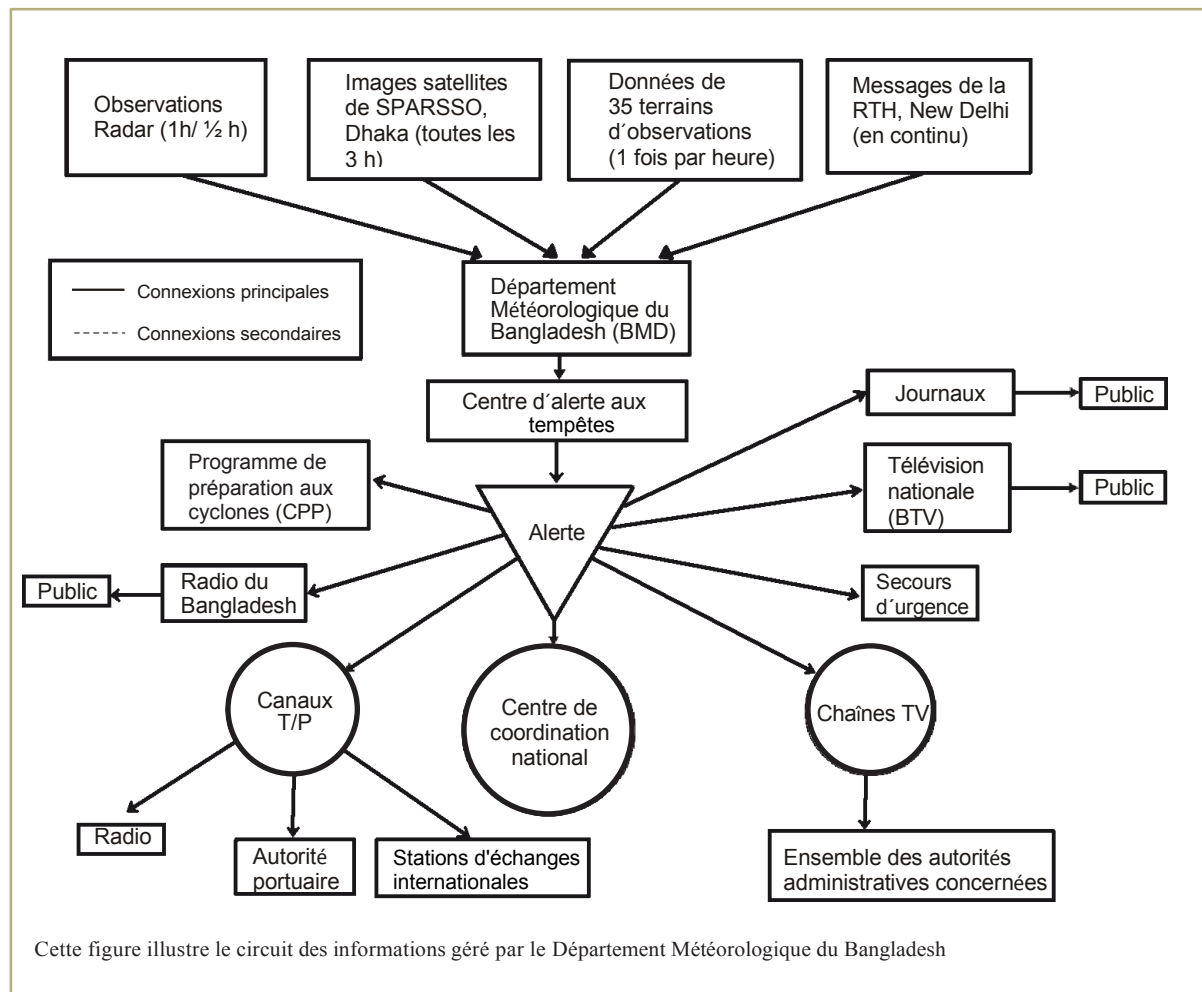
- Des observatoires recueillant des informations toutes les heures sur la vitesse du vent, les sens du vent, le taux d'humidité, la température de l'air et d'autres informations météorologiques
- Des stations radar qui transmettent des données sur le temps heure par heure ou par demi-heure
- Les images satellites de l'Agence fédérale américaine NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)
- Des images satellites japonaises via l'Organisation du Bangladesh pour la recherche spatiale et la télédétection (SPARRSO, acronyme anglais)
- Le réseau de l'Organisation météorologique mondiale (OMM)

Les experts en prévision météorologique hautement qualifiés du Département Météorologique bangladais étudient les données reçues afin de déterminer si une tempête se prépare. Au Bangladesh, les experts en prévision météorologique sont sans cesse à l'affût de menaces imminentes telles que les ondes de tempête ou les cyclones. Une fois que l'une d'elle est détectée, les alertes aux tempêtes et aux cyclones sont diffusées par le Département Météorologique bangladais par le biais de différents canaux. Ce circuit d'informations est illustré dans la figure 4.27.

Le Centre d'alerte aux tempêtes du Bangladesh (SWC, acronyme anglais) envoie les alertes à différentes organisations associées à la communication sur les risques d'inondation et aux mesures d'intervention. Ces organisations sont détaillées dans le chapitre 4.11. Le SWC envoie également des alertes directement au Comité national de coordination du Bangladesh (NCC, acronyme anglais), une organisation qui centralise la communication sur les risques d'inondations et les mesures d'intervention.

Le Programme de préparation aux cyclones (CPP) compte près de 43 000 volontaires localisés dans les régions côtières du Bangladesh qui sont responsables de la diffusion des messages d'alertes aux cyclones auprès des habitants des villages. Ils utilisent des mégaphones et opèrent selon une méthode de porte à porte pour lancer l'alerte. Ils assistent également les personnes lors des processus d'évacuation, exécutent des plans de sauvetage, fournissent des soins et distribuent des produits de premiers secours (Paul, 2009). L'armée, la marine et la force aérienne du pays ont également des responsabilités et des missions spécifiques avant, pendant et après la catastrophe (Haque, 1995).

Figure 4.27: Circuits d'informations du Programme de préparation aux cyclones (CPP) au Bangladesh



Source: Haque, 1995

Lorsque la population a reçu une alerte, il lui est recommandé de prendre refuge dans les abris anticyclones. Ces bâtiments de plusieurs étages sont surélevés afin de résister aux ondes de tempêtes. Près de 4000 abris anticyclones ont été construits sur les zones côtières du Bangladesh. Chacun peut accueillir entre 500 et 2500 personnes. Bien qu'il soit conseillé à la population d'utiliser ces abris en cas d'inondations, le récent cyclone Sidr en 2007 a montré qu'il était nécessaire de construire plus d'abris pour accueillir toutes les personnes vivant dans ces zones. Dans certains cas, ces derniers sont construits à plus de 3,5 miles des villages, des distances difficiles à parcourir en cas d'urgence (Paul, 2009). Les abris existants comptent d'autres problèmes comme un éclairage insuffisant, des portes et des fenêtres cassées, un manque d'espaces réservés aux femmes et enfin un manque d'eau et d'installations sanitaires (Paul & Dutt, 2010).

Malgré tout, le système d'alerte aux inondations du Bangladesh est considéré comme un succès par beaucoup. Pour preuve, la réduction de nombre de victimes durant les derniers cyclones. Celui de 1970 avait conduit à la mise en place d'un système d'alerte aux inondations après avoir causé la mort de 300 000 personnes. Ce sont 138 000 personnes qui avaient trouvé la mort lors d'un cyclone de la même

intensité en 1991 (ADRC, 2005). En comparaison, le cyclone Sidr en 2007, pourtant le deuxième plus grand cyclone dans l'histoire du Bangladesh depuis 1877, a fait 3406 morts (Paul & Dutt, 2010), un chiffre très inférieur aux deux autres.

Cependant le manque de proximité et de contenance des abris demeurent problématiques. Lors du cyclone Sidr, plus de 25% des victimes ont indiqué que le manque d'accessibilité des abris les avait dissuadées d'y trouver refuge (Paul & Dutt, 2010). De plus, un grand nombre de personnes a continué d'adopter une attitude passive face aux alertes (Haque, 1995; Paul, 2009; Paul & Dutt, 2010).

Tableau 4.11: Dissémination du système de message d'alertes du centre d'alerte aux tempêtes du Bangladesh (SWC)

Organisations informées par le SWS
Secrétariat du premier ministre
Bangladesh Betar (Radio)
Télévision du Bangladesh (BTV)
Poste de contrôle, ministère des Situations d'urgence et de l'assistance en cas de catastrophes
Poste de contrôle, Bureau de la gestion des catastrophes
Programme de préparation aux cyclones (CPP)
Bénévoles
Médias
Grand public
Forces armées
Flotte du Bangladesh
Armée de l'air du Bangladesh
Ports marins et fluviaux
ONG
Prévisions des inondations et centre d'alertes

Source: adapté d'ADRC, 2005

Les raisons de l'inaction de la population concernée par le danger sont nombreuses. Plusieurs personnes ont souligné ne pas avoir cru à l'alerte – ceci est souvent dû à des fausses alertes lancées par le passé. D'autres n'ont pas réussi à recevoir l'information car ils étaient situés contre le vent par rapport aux signaux auditifs comme les alarmes ou les sirènes. La condition et la proximité des abris sont également des raisons qui ont poussé certaines personnes à ne pas y trouver refuge. D'autres personnes n'ont pris aucune mesure car elles avaient sous-estimé le danger des inondations ou parce qu'elles n'avaient

jamais encore vécu de phénomène d'ondes de tempête. D'autres ont signalé avoir craint de se faire piller s'ils quittaient leur maison (Haque, 1995; Paul & Dutt, 2010). Il convient d'investir davantage dans la construction d'abris et dans la sensibilisation aux risques d'inondations afin d'améliorer l'efficacité du CPP dans le futur.

4.3 Les stratégies de repli

Le terme désigne ici un repli planifié des zones côtières plutôt qu'un recul imprévu ou forcé, d'ailleurs envisageable dans le contexte de la SLR et du changement climatique. Les options de repli limitent les risques des phénomènes liés à l'érosion et aux inondations en diminuant leurs impacts potentiels. Cette stratégie pourrait entraîner une limitation du développement dans les zones côtières. Des activités pourraient être autorisées à la condition que les infrastructures construites soient abandonnées en cas de danger. Le gouvernement ne jouerait aucun rôle dans cette zone. Il ne fournirait pas de subventions en cas de dommages mais soulignerait bien entendu les dangers pouvant être encourus (IPCC CZMS, 1990).

Les efforts gouvernementaux pour limiter le développement du littoral impliquent généralement le rachat de terrains, une restriction sur l'utilisation des terres, l'interdiction de reconstruire les habitations endommagées par les tempêtes, la réduction de subventions et la dissuasion de construire dans les zones vulnérables (IPCC CZMS, 1990). Ces stratégies présentent de nombreux avantages dont des mesures de protection contre les inondations et contre l'érosion ainsi que la création de nouveaux espaces pour des habitations et des activités de loisirs. Les exemples de stratégie de repli présentés dans ce livret sont le recul stratégique et les zones de retrait.

4.3.1 Le recul stratégique

Définition

Le recul stratégique de la côte, permet de réduire les effets des inondations et de l'érosion. C'est un processus délibéré d'altération des mesures de protection existantes contre les inondations, afin de laisser les crues se répandre dans certaines zones jusqu'alors protégées. Adopter cette stratégie permet d'éviter des résultats incertains et des effets négatifs. Cela permet aussi de maximiser les effets positifs potentiels (Leggett et al., 2004). Un certain nombre de termes peuvent être employés pour désigner le recul stratégique, par exemple le repli contrôlé, le déplacement ou la réouverture de digue, ou encore le processus de dépoldérisation.

Description

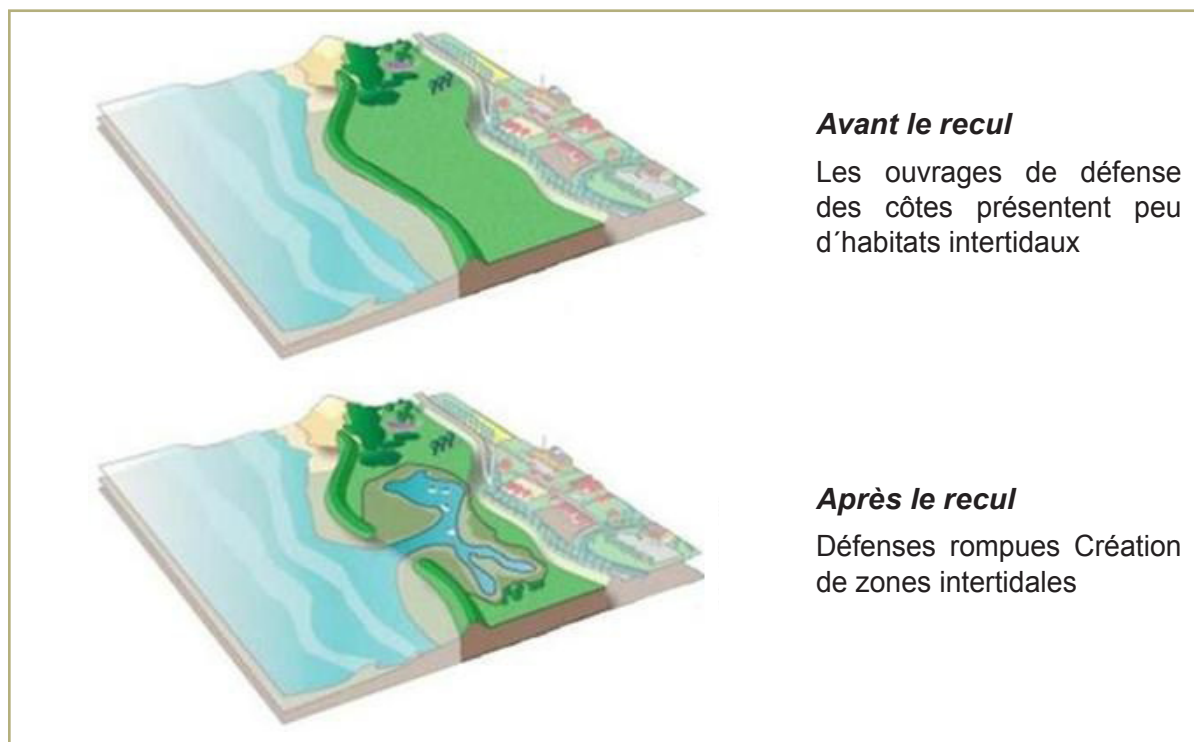
Le repli implique généralement de repousser la ligne des structures de défense activement entretenues vers les terres ou de préférence sur un terrain plus élevé. Cela devrait permettre de créer une zone intertidale entre les anciennes et les nouvelles défenses comme montré dans la figure 4.28. Dans la plupart des cas, l'objectif de la stratégie de recul est de créer des marais salants. Les marais salants se développent entre les niveaux de marées hautes de grande amplitude (vive-eau, MHWS, acronyme anglais) et celles de basse amplitude (MLWS, acronyme anglais), dans des zones principalement formées par les marées et où la vase et la boue prédominent (French, 1997).

L'avantage de la création d'habitats intertidaux repose sur le fait qu'ils sont capables d'atténuer considérablement l'énergie des vagues. Cela permet de réduire le transport de sédiments au large et

donc l'érosion. Les habitats intertidaux forment également des amas denses qui augmentent la stabilité des sédiments intertidaux aidant ainsi à réduire les taux d'érosion (USACE, 1989).

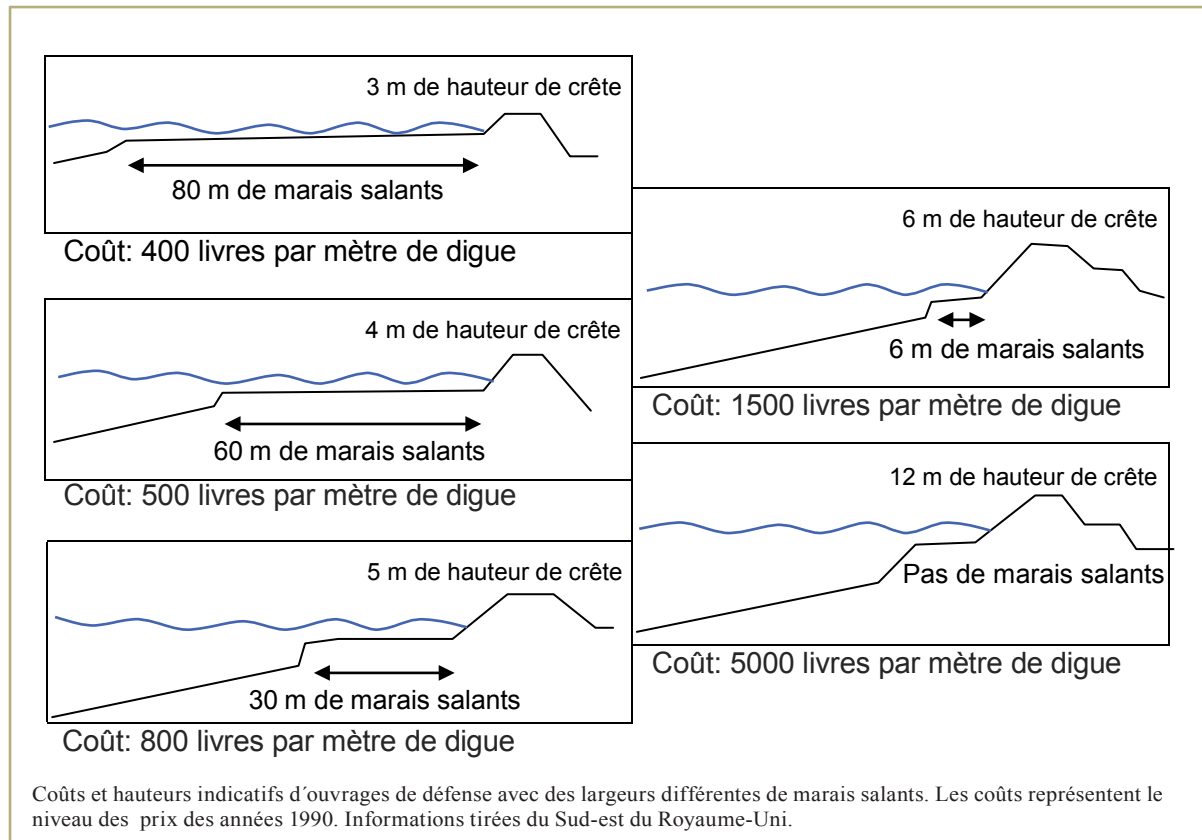
Cette section présente la création de marais salants à travers la stratégie du recul à titre d'exemple, car à l'heure actuelle, cette méthode a seulement été appliquée en Europe du Nord-Ouest et en Amérique du Nord, là où les marais salants sont dominants dans les zones intertidales. Aucune démonstration n'écarter le développement d'autres zones humides telles que les mangroves dans les stratégies de recul, bien qu'une telle approche n'ait encore jamais été mise en œuvre.

Figure 4.28: Le processus des plans de recul stratégique



Source: Adapté de ComCoast, 2006

Des études sur les marais salants montrent qu'ils sont capables d'atténuer jusqu'à 97% de l'énergie des vagues en fonction de leur largeur (Doody, 2008). Ce phénomène présente des répercussions positives pour la protection des côtes. Par exemple, si les ouvrages de défense sont déplacés vers les terres, la présence d'habitats intertidaux peut considérablement réduire le coût de l'installation et l'entretien des mesures de protection (Doody, 2008) comme illustré dans la figure 4.29. Si le repli est mis en place sur un niveau de terrain encore plus élevé, des mesures de défense pourraient même ne pas être nécessaires.

Figure 4.29: Effet des marais salants sur les standards des digues et leurs coûts

Source: Adapté de Doody, 2008

Il se peut que le recul entraîne une rupture délibérée ou un retrait complet des ouvrages de défense des côtes. Ce processus peut se faire de manière planifiée à travers l'abandon ou la relocalisation des structures existantes, ou de manière non planifiée à travers un simple abandon des défenses, dans le cas où les ressources financières pour les maintenir sont indisponibles (Nicholls et al., 2007b).

Afin de mettre en œuvre un plan de recul, un certain nombre de conditions doivent être réunies. On trouve parmi les plus importantes (Gardiner et al., 2007; Rupp-Armstrong and Nicholls, à paraître):

1. L'existence d'ouvrages de défense des côtes
2. La disponibilité de terres basses
3. La volonté ou le besoin d'améliorer les ouvrages de défense contre les inondations
4. La volonté de mettre en place une approche durable
5. La volonté ou le besoin de créer des espaces intertidaux
6. La prise de conscience collective des bienfaits d'un plan de recul

Les avantages liés au recul stratégique

Comme évoqué précédemment, un plan de recul stratégique peut réduire significativement le coût des mesures de protection contre les inondations et l'érosion. Les habitats intertidaux atténuent l'énergie des vagues qui atteignent ainsi le rivage en étant moins hautes et moins puissantes. Ceci est avantageux car les moyens de défense côtiers ne seront plus nécessaires ou pourront être de taille réduite et moins robustes. L'atténuation de l'énergie des vagues peut également diminuer les coûts de maintenance des systèmes de défense. La réduction des ouvrages de défense ou leur abandon peuvent également permettre de faire de grandes économies (Nicholls et al., 2007b).

Grâce aux marais salants qui ont la capacité d'atténuer l'énergie des vagues, les zones côtières sont moins dépendantes des ouvrages de défense car moins vulnérables aux risques d'inondations et d'érosion. A travers le soutien des capacités naturelles de protection des côtes contre les crues et les tempêtes, on favorise une approche plus durable (Leggett et al., 2004). Une application générale des plans de repli pourrait significativement réduire la nécessité d'avoir recours dans le futur à des ouvrages de défense (Nicholls et al., 2007b). De plus, cette approche permet de faire face aux futurs changements climatiques qui sont prévisibles tout en encourageant la résilience face aux évolutions incertaines (Nicholls et al., 2007b).

En plus de nous permettre de faire face à des événements imprévus, cette approche permet d'atténuer les émissions de dioxyde de carbone et de méthane, les gaz étant stockés dans les dépôts de sédiments. Un autre avantage majeur des plans de recul est qu'ils favorisent le retour des habitats intertidaux dans les zones abandonnées. Cela est un réel avantage car la compression côtière et le développement humain ont en effet provoqué, ces dernières années, un déclin de ces habitats dans de nombreuses zones. Les plans de repli contribuent au rétablissement de ces derniers, essentiels pour la survie de certaines espèces d'oiseaux, de plantes ou encore de poissons et crustacés exploités commercialement (Leggett et al., 2004; UK POST, 2009). La création de ces écosystèmes représente un autre avantage: ceux-ci peuvent être utilisés pour le développement de zones de loisirs et d'écotourisme (Nicholls et al., 2007b). Au Royaume-Uni par exemple, les estrans sont des espaces populaires pour se promener, naviguer et observer les oiseaux.

En plus d'être bénéfique en matière d'habitat, la création de nouvelles zones intertidales pourrait également aider à maintenir la qualité de l'eau et éviter l'intrusion d'eau salée causée par un mauvais usage des terres. Cela est rendu possible par la réduction des effets indésirables de l'eutrophisation (Leggett et al., 2004). La création d'estrans serait positive là où l'approvisionnement en eau potable est menacé par l'élévation du niveau de la mer, aux endroits densément peuplés où l'approvisionnement en eau potable est limité ou encore dans les zones où les plans d'eau doivent répondre à certaines normes.

Les inconvénients liés au recul stratégique

L'un des plus grands inconvénients du recul stratégique est que cela exige de céder les terres à la mer. Cela peut impliquer le déplacement d'infrastructures ou de bâtiments importants, ce qui risque d'être coûteux. A la place, le littoral devrait pouvoir être converti à d'autres usages comme par exemple des zones de détente. Dans les deux cas, les terrains sur les fronts de mer devront être abandonnés.

Pour cette raison, l'option du recul stratégique est souvent controversée sur le plan politique et social. Les projets souffrent souvent d'un manque d'acceptation de la population. Ceci peut s'expliquer par le rapprochement de la menace représentée par la mer ou encore par la réticence de perdre des terres que leurs ancêtres ont défendu contre les eaux (Rupp-Armstrong & Nicholls, à paraître).

Les plans de recul se compliquent encore davantage en raison des interventions fréquentes des nombreux propriétaires terriens. Il est important d'impliquer les personnes affectées dans la planification et dans le processus décisionnel afin d'augmenter les chances de soutien de leur part.

Le recul stratégique est susceptible d'avoir un effet très perturbateur et peut s'avérer coûteux si une relocalisation des infrastructures côtières est nécessaire (Nicholls et al., 2007b). Dans le cas d'un abandon des infrastructures, il convient de s'assurer que les zones alentours ne deviennent pas isolées ceci pouvant conduire à une hausse de la pauvreté (Nicholls et al., 2007b). Un plan de recul doit ainsi être planifié stratégiquement afin de minimiser les problèmes et d'éviter les incidences néfastes au niveau local. Si un projet est bien planifié, il peut même permettre de créer de nouvelles opportunités.

Cette méthode présente un autre aspect négatif qui pourrait s'aggraver dans le futur. En effet, elle oppose le besoin de création de zones humides et l'importance de conserver des sites historiques et agricoles de valeur. Actuellement, une portion significative des projets de recul est mise en œuvre sur des terres agricoles, en grande partie car ces sites ne représentent pas un processus complexe de relocalisation des infrastructures. Cependant, l'inondation des zones agricoles pourraient conduire à la réduction de la production agricole locale. Cet aspect est susceptible de devenir une problématique importante dans le futur. En effet, la question de la sécurité alimentaire est en passe de devenir essentielle et pourrait s'avérer problématique dans les pays en voie de développement.

Bien que l'expérience concernant les plans de recul stratégique soit grandissante, cette technique reste encore relativement récente et des incertitudes subsistent. Par exemple, on connaît encore mal le temps nécessaire aux habitats intertidaux artificiels pour offrir les mêmes avantages que ceux créés naturellement (UK POST, 2009). De plus, cette méthode n'est pas nécessairement propice à tous les environnements. Les milieux humides et les marais salants tendent à se développer dans des zones où l'énergie des vagues est faible et où un grand volume de sédiments est disponible. Il est, par conséquent, important d'évaluer attentivement la faisabilité et les effets de cette approche dans des endroits bien spécifiques.

Les coûts et besoins financiers

Aucune référence n'ayant été trouvée sur la mise en œuvre d'un plan de recul stratégique dans des pays en voie de développement, les auteurs n'ont pas été en mesure de présenter des coûts pour cette partie du globe. Cette étude se fonde donc sur les coûts d'un plan de recul dans les pays développés afin de fournir une estimation de ceux-ci et la mesure dans laquelle ils pourraient varier.

Rupp-Armstrong and Nicholls (à paraître) affirment que le coût approximatif d'un plan de recul stratégique en Grande-Bretagne s'élève à 97 000 US\$ par hectare (niveaux de prix de 2009) dans le cas où la construction d'une nouvelle défense est nécessaire. Cependant, le coût d'un plan peut varier considérablement en raison de différents facteurs indiqués dans la figure 4.10.

Encadré 4.10: Facteurs influençant le coût unitaire des plans de recul stratégique

- Le coût des terres où le recul stratégique va avoir lieu
- Les indemnités compensatoires aux propriétaires terriens et aux personnes qui vivent sur ces terres
- Le démantèlement des constructions humaines sur le site afin d'éviter la pollution marine
- Les besoins et la taille des ouvrages de défense
- La disponibilité et le coût des ressources humaines notamment pour l'expertise
- L'ampleur et la fréquence des contrôles

Dans les pays développés où les plans de recul sont les plus souvent mis en œuvre, acquérir les terres qui vont être inondées représente la majeure partie des coûts. Cela peut être différent dans le cas des pays en développement où les prix fonciers ne sont pas aussi élevés et où les terrains peuvent déjà appartenir à l'Etat. Le prix des terrains, et donc celui de la méthode, dépend grandement de l'usage qui en est fait. Les terres agricoles sont, par exemple, souvent moins coûteux que les terrains sur lesquels se trouvent des habitations ou des industries, car ils présentent moins d'infrastructures. Il peut aussi s'avérer nécessaire de prévoir des compensations additionnelles si un terrain est utilisé à des fins résidentielles ou industrielles.

Les coûts risquent encore d'augmenter si la destruction des constructions humaines dans la zone de repli s'avère nécessaire. Ces infrastructures peuvent par exemple être des bâtiments, des routes, des canalisations souterraines de gaz, des câbles électriques d'alimentation, des câbles TV, internet etc.

Il est possible que les coûts soient moins élevés si les ouvrages de défense existants ne sont pas démantelés, la structure se détériorant d'elle-même avec le temps. Cela permet d'économiser l'argent qui aurait dû être dépensé dans la création de brèches artificielles. En Allemagne, le coût du recul stratégique est un des obstacles majeurs à sa mise en place puisque la majorité des ouvrages de défense de la mer du Nord est en excellente condition (Rupp & Nicholls, 2002).

De plus, l'ampleur des opérations de suivi à effectuer à la suite du repli influencera les coûts. Plus un calendrier d'évaluation est rigoureux plus les coûts risquent d'être élevés.

Les capacités institutionnelles et organisationnelles requises

Les plans de recul, qu'ils soient planifiés ou non, peuvent être entrepris au niveau communautaire. L'abandon d'ouvrages de défense est une mesure économique et simple. Par conséquent, un abandon ne nécessitera certainement pas l'implication d'organisations externes. Cependant, il convient que le plan de recul soit mis en œuvre de manière bien planifiée si l'on veut en tirer le maximum d'avantages. La réalisation d'un suivi et d'une modélisation avant la mise en œuvre du projet aidera à déterminer l'effet qu'aura le plan de recul et aidera à maximiser ses bénéfices.

Un plan détaillé et des études sur la mise en œuvre du projet doivent être conduits pour éviter des résultats indésirables. Ces modélisations fourniront aux décideurs des informations sur le fonctionnement du dispositif et les objectifs qui vont être remplis. Les plans de recul stratégique existants ont fait appel à une modélisation avant de détruire les ouvrages de défense afin de déterminer si le fait d'effectuer des altérations sur le terrain tels que des creusements ou des élévations, pourraient s'avérer bénéfiques. De plus, réaliser une étude avant la mise en œuvre du projet permet d'obtenir des informations sur les impacts du plan sur l'environnement tels que les modifications qui s'opèrent dans le rapport reflux/inondation dans les estuaires. Une meilleure connaissance de la dynamique des sites peut être apportée via ces modélisations, qui sont néanmoins susceptibles de nécessiter l'implication d'organisations externes.

Il est essentiel que les responsables de l'aménagement et de la gestion des côtes impliquent les communautés locales dans la planification du processus de recul. Leggett et al. (2004) affirment qu'une participation efficace des parties prenantes et un engagement de la communauté locale sont essentiels pour la réussite du projet. Ils soutiennent également que cette participation peut permettre de:

1. Comprendre les préoccupations légitimes et les intérêts des communautés
2. Expliquer et convaincre la communauté locale des avantages du plan proposé

3. Répondre aux attentes
4. Développer l'appropriation du plan par les parties prenantes

Les facteurs entravant la mise en œuvre

Les facteurs entravant la mise en œuvre ont seulement été étudiés dans les pays développés, en Amérique du Nord et Europe du Nord-Ouest, là où des plans de recul stratégique ont été expérimentés. Cependant, les problématiques dans les pays développés resteront les mêmes pour les pays en voie de développement.

Rupp-Armstrong et Nicholls (à paraître) ont enquêté sur les obstacles majeurs aux plans de repli en Angleterre, Ecosse, Hollande et en Allemagne. Leurs observations sont résumées ici.

Le manque d'acceptation du public représente l'obstacle majeur aux plans de recul stratégique. La perte de terres serait en effet perçue comme une régression, et le fait que les terrains aient une valeur élevée sur le marché de l'immobilier ou un potentiel de développement contribue certainement à alimenter l'opposition (Leggett et al., 2004). Le manque de connaissances de la population sur la manière dont les technologies atténuent les inondations et l'érosion joue un rôle dans ce manque de soutien. Il convient donc d'informer sur tous les avantages et les inconvénients que représentent les plans de repli afin d'associer pleinement les acteurs locaux et les aider à surmonter leurs doutes.

Les collectivités agricoles s'opposent également souvent à ces projets. Ces groupes sont fréquemment affectés par les plans de repli développés sur les terres agricoles. En effet, les agriculteurs reçoivent généralement une indemnité inadéquate pour la perte de leurs terres. Si des contreparties suffisantes étaient fournies, nombre d'entre eux seraient plus enclins à vendre leurs terres (Rupp-Armstrong & Nicholls, à paraître).

Le coût potentiellement élevé des plans de recul représente également un obstacle. Une analyse des projets britanniques a montré que le coût moyen d'un plan de recul s'élevait à 97 000 US\$ par hectare lorsque le plan implique la construction d'un nouveau système de défense. De plus, la relocalisation des infrastructures se trouvant dans la future zone de recul est une opération qui peut s'avérer coûteuse.

D'autres études ont identifié les difficultés légales et financières comme étant des obstacles majeurs. Comme évoqué précédemment, il arrive fréquemment que les plans de recul doivent gérer l'implication de nombreux propriétaires terriens côtiers affectés par le projet. Ainsi des difficultés peuvent émerger concernant les responsabilités et les dettes de certains propriétaires ou des autorités.

La disponibilité des terres est également un obstacle majeur à la mise en œuvre. La relocalisation des infrastructures présentes dans la zone de repli nécessite de nouveaux terrains. Dans les zones côtières à forte densité de population ceci peut s'avérer difficile.

Comme évoqué au début de ce chapitre, le recul stratégique n'est pas nécessairement une option applicable sur tous les types de terrain. Rupp-Armstrong et Nicholls (à paraître) ont identifié un certain nombre de critères nécessaires à la mise en œuvre d'un plan de recul stratégique. Tout d'abord, la présence de zones de terres de basse altitude protégées par des défenses côtières est un préalable essentiel. Sans cela, le recul ne pourra pas être mené à bien ou risque de se heurter à d'autres obstacles importants. Ce dernier point doit être conjugué avec une volonté de développer un projet durable sur la zone côtière et la détermination du public à envisager les plans de recul. Sans ces conditions, un réalignement contrôlé ne pourra soit pas être bien mené ou risque de se heurter à d'autres obstacles importants.

L'existence d'habitats protégés ou importants localisés derrière les défenses côtières peut également représenter un autre obstacle à la mise en œuvre. Un plan de recul stratégique peut avoir des impacts négatifs sur ces zones en raison de l'inondation par la marée. Au Royaume-Uni, il arrive souvent que des marais côtiers de pâturage se trouvent à l'arrière des défenses côtières. Ces environnements sont essentiels pour de nombreuses plantes, animaux, invertébrés aquatiques et sont pour cette raison très importants au niveau national et international pour la conservation de la nature. Le recul stratégique peut conduire à la destruction de tels habitats et avoir des impacts négatifs sur l'environnement local.

Les facteurs favorisant la mise en œuvre

Le recul stratégique peut faire partie d'un plan de gestion « stratégique » des côtes. Ces plans examinent des dizaines de kilomètres du littoral dans une optique holistique et traitent les besoins de la zone étudiée. Cette approche est souvent vue comme une méthode efficace pour maximiser les bénéfices de ces projets et surmonter les obstacles potentiels (Leggett et al., 2004).

Les plans de repli peuvent également aider à recréer des estrans disparus à cause du développement humain et de la SLR. Ainsi des ouvrages de défense côtiers peuvent être prévus mais cela ne doit pas être au détriment des zones intertidales. Dans certains cas, des obligations juridiques pour contrebalancer et prévoir la perte de ces habitats existent. Un plan de recul stratégique pourrait aider à répondre à ces exigences.

La mise en œuvre d'un plan de recul stratégique peut également avoir lieu en raison de facteurs spécifiques à un site (Leggett et al., 2004). Ils peuvent inclure l'opportunité de réduire les frais d'entretien du système de défense, de créer une nouvelle réserve naturelle ou simplement le fait que des financements soient disponibles pour le faire.

Etude de cas: Abbots Hall Farm, Essex, Royaume-Uni

A l'heure actuelle, aucun exemple de plan de recul stratégique n'a été répertorié dans les pays en voie de développement. Ainsi l'exemple d'un pays européen est développé ici.

En 2002, un plan de recul stratégique a été mis en œuvre à Abbots Hall Farm dans le comté d'Essex au Royaume-Uni. La superficie du site représente 0,84 km² et a été protégée des inondations par des digues pendant plus de 200 ans (ABPMER, 2010b).

Le repli a été mené sur ce terrain avec pour objectifs principaux la réduction des frais du système de défense contre les inondations ainsi que la création d'habitats intertidaux et d'habitats côtiers. Ces objectifs ont été retenus car la digue existante était en mauvais état et les habitats côtiers en déclin global au Royaume-Uni.

Des observations ont été menées par l'Agence pour l'Environnement, English Nature et Essex Wildlife Trust durant trois ans avant la mise en œuvre du projet. Ces études ont permis de s'assurer que le plan permettrait d'obtenir les résultats souhaités. Ce suivi a également permis de constituer une base de référence afin de pouvoir évaluer les effets du projet. Après la mise en place du recul stratégique, le projet a fait l'objet d'un suivi pendant cinq ans de plus afin d'évaluer ses impacts et de fournir des informations pour aider à la conception de futurs projets (Essex Wildlife Trust, 2003).

Le suivi effectué avant la mise en place du projet comprenait diverses études sur l'hydrodynamique¹² locale, la bathymétrie, le niveau de l'eau, la salinité, la température, la qualité de l'eau et la présence de plantes, d'animaux et d'oiseaux (Essex Wildlife Trust, 2003).

Pendant les sept ans qui ont précédé le lancement du plan, le site a été soumis à une régulation des flux de marées¹³ sur une surface de 0.2 km². Ceci a permis de faciliter l'élévation du terrain sur le site et de créer les conditions nécessaires de sols et la présence de plantes adéquates pour initier la colonisation d'espèces intertidales (Nottage & Robertson, 2005).

Le repli a été effectué par la création de cinq brèches sur 3km d'ouvrages de défense. La brèche la plus importante était de 100 mètres de large et d'une hauteur environ égale au niveau MHW. Les quatre autres étaient plus petites, avec une largeur d'environ 10 ou 20 mètres et à un niveau plus élevé (ABPMER, 2010a). Aucun nouvel ouvrage de défense n'a été créé puisque la hauteur du terrain représentait déjà une protection secondaire suffisante (Agence pour l'Environnement, 2003). Il a été cependant nécessaire de construire des cloisons afin de prévenir l'inondation des terres adjacentes (Essex Wildlife Trust, 2010). Un nouveau système de ruisseau a également été creusé afin de faciliter la création de marais salants (Essex Wildlife Trust, 2003).

Le site a continué d'être l'objet d'un suivi après la mise en œuvre du projet. Les observations se concentraient sur plusieurs aspects : l'accrétion/l'érosion sur et hors site, l'affouillement au niveau des brèches, la bathymétrie, les niveaux des marées et leur vélocité, les particules solides en suspension hors site, la salinité hors site, les invertébrés hors site ainsi que la végétation, les oiseaux, les poissons, les amphibiens et les reptiles sur la nouvelle zone créée (ABPMER, 2010b).

Aucun impact environnemental majeur n'a été observé en dehors de la zone de recul stratégique (Agence pour l'Environnement, 2003). Cela signifie que le projet n'a pas eu de répercussions négatives sur le milieu environnant. Au printemps 2003, le site avait été colonisé par différentes espèces pionnières de marais salants (Agence pour l'Environnement, 2003) et en 2010 il était devenu un refuge pour de nombreux oiseaux et poissons (ABPMER, 2010b).

Le coût final de ce projet s'élève à 7,7 millions de dollars (niveaux des prix en 2009) et a été fondé par le Fonds Mondial pour la Nature (WWF) et l'English Heritage Lottery Fund. Ce projet a été considéré comme un succès puisque les objectifs de protection contre les inondations, de réduction des coûts et de création d'habitats côtiers ont été atteints comme l'ont confirmé les observations de suivi. L'étendue des systèmes de défense a de plus été réduite de 87 %, tandis qu'environ 0,4 km² de marais salants, 0.35 km² de savane côtière et 0.09 km² de vasières ont été créés (ABPMER, 2010b). De plus, les nombreuses espèces d'oiseaux et de poissons vivant désormais dans cette zone prouvent la création réussie du nouvel habitat (Essex Wildlife Trust, 2010).

12 Relatif à des liquides en mouvement

13 Un flux régulé des marées implique l'utilisation de tuyaux, de caniveaux ou de vannes permettant la régulation du renouvellement de l'eau par les marées et facilitant ainsi la création d'habitats en milieu saumâtres et marins derrière les digues (Sharpe et al., 2002).

4.3.2 Les zones de retrait du littoral

Définition

La zone de retrait du littoral est « une distance prescrite par rapport à un point défini de la côte, comme par exemple une ligne de végétation permanente, et à l'intérieur de laquelle certains ou tous types de développement sont interdits » (Cambers, 1998). Une zone de retrait peut imposer une distance minimale du littoral à respecter pour la construction de nouveaux immeubles ou de nouvelles infrastructures, ou encore définir un niveau d'élévation minimum par rapport au niveau de la mer, que l'on appellera également une cote altimétrique minimale. Celle-ci permet une adaptation aux inondations tandis que les zones de retrait visent à lutter contre l'érosion (voir la figure 4.30).

Description

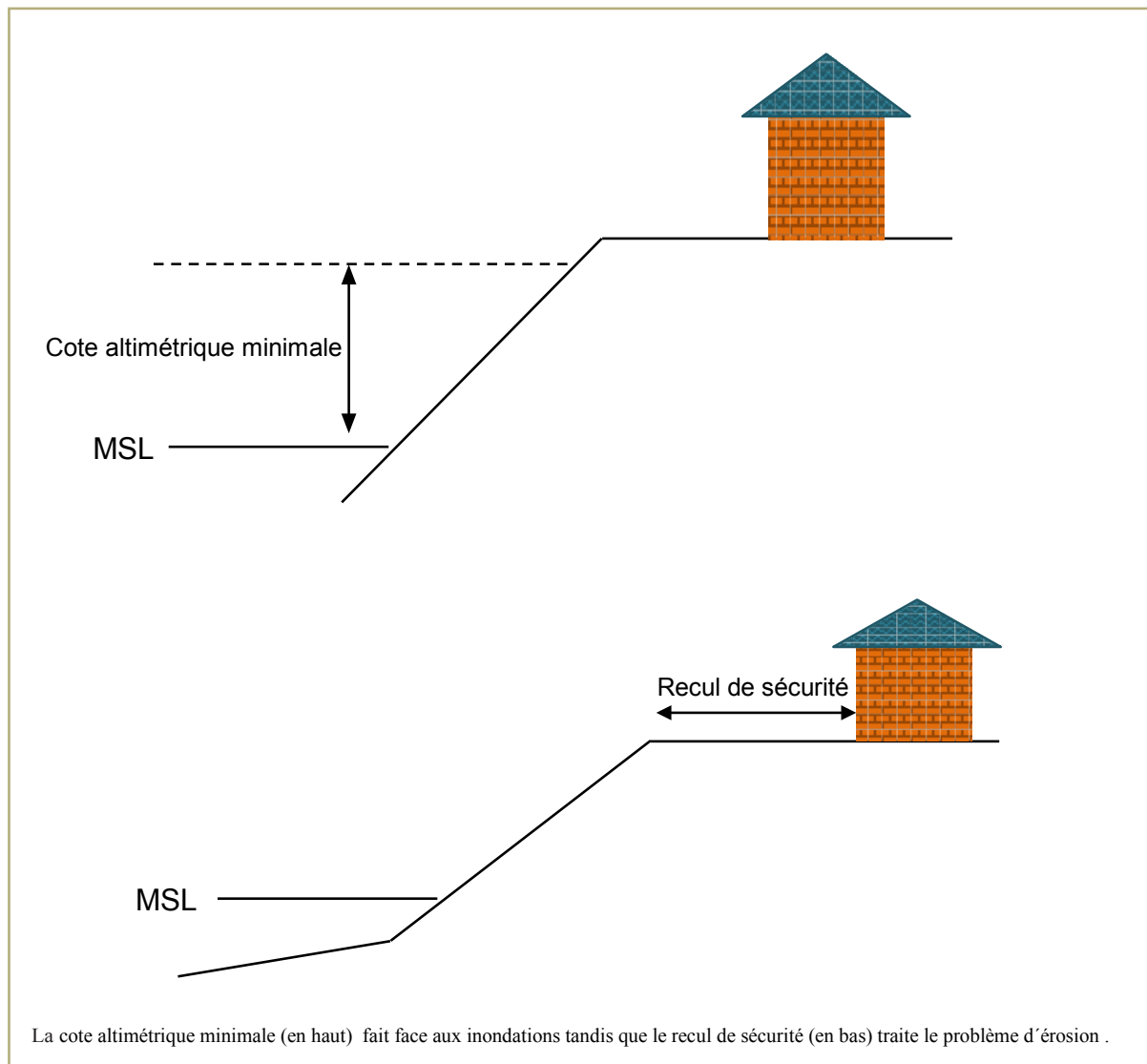
Une zone de retrait est un espace tampon entre une zone considérée comme dangereuse et la partie aménagée des côtes (Fenster, 2005). L'idée est de laisser un espace suffisant à la ligne moyenne des hautes eaux pour lui permettre de se déplacer vers les terres en réaction à la SLR. Les zones de retrait fournissent une protection contre les inondations et l'érosion en s'assurant que les constructions humaines ne soient pas localisées dans des zones sujettes aux inondations. Deux différents types de distance minimale imposée peuvent être distingués: la cote altimétrique minimale qui permet de faire face aux inondations et la zone de retrait qui traite du problème de l'érosion (voir la figure 4.30).

Cette approche permet à l'érosion de continuer son action sur une partie des côtes tandis que les activités humaines sont limitées. Les sédiments érodés peuvent ainsi être transportés le long du littoral et participer à renforcer le niveau de protection en maintenant de larges plages naturelles. En aménageant les côtes tout en préservant leur état naturel, il sera possible d'y effectuer des ajustements pour faire face aux évolutions à venir telles que la SLR sans pour autant engendrer de pertes matérielles (Kay, 1990).

Les zones de retrait sont définies par: (1) un recul fixe qui interdit le développement du littoral jusqu'à une certaine distance dans les terres par rapport à un point de repère précis ou (2) un recul variable calculé par rapport à des phénomènes naturels dynamiques afin de déterminer les lignes de retrait. Celui-ci peut changer selon la topographie et l'ampleur du déplacement des traits de côte (Fenster, 2005).

Le contrôle des activités d'exploitation s'effectue soit par la définition d'une zone d'exclusion linéaire comprenant toute une unité administrative, soit en spécifiant différents espaces d'exclusion (Kay, 1990). Idéalement les marges de retrait devraient être établies sur la base de données antérieures concernant les taux d'érosion ou les niveaux d'eau extrêmes plutôt que d'adopter des distances arbitraires qui ne reflètent pas vraiment les dangers des inondations et de l'érosion.

Les stratégies de retrait sont très répandues dans le monde. Des projets ont été développés dans de nombreux pays dont le Canada, La Barbade, Aruba, Antigua, le Sri-Lanka, les Etats-Unis, l'Australie (McLean et al., 2001), le Danemark, l'Allemagne, la Norvège, la Finlande, la Pologne, l'Espagne, la Suisse et la Turquie (Fenster, 2005).

Figure 4.30: Les différents types de zones de retrait**Les avantages liés aux zones de retrait**

Les zones de retrait sont des méthodes très efficaces pour minimiser les dommages causés par les inondations et l'érosion en supprimant les constructions humaines dans les zones dangereuses. Elles représentent une alternative peu coûteuse aux ouvrages de défense et de protection contre l'érosion et les inondations des côtes tels que les brise-lames ou les digues qui présentent également des inconvénients (cf. sections 4.1.2 et 4.1.4).

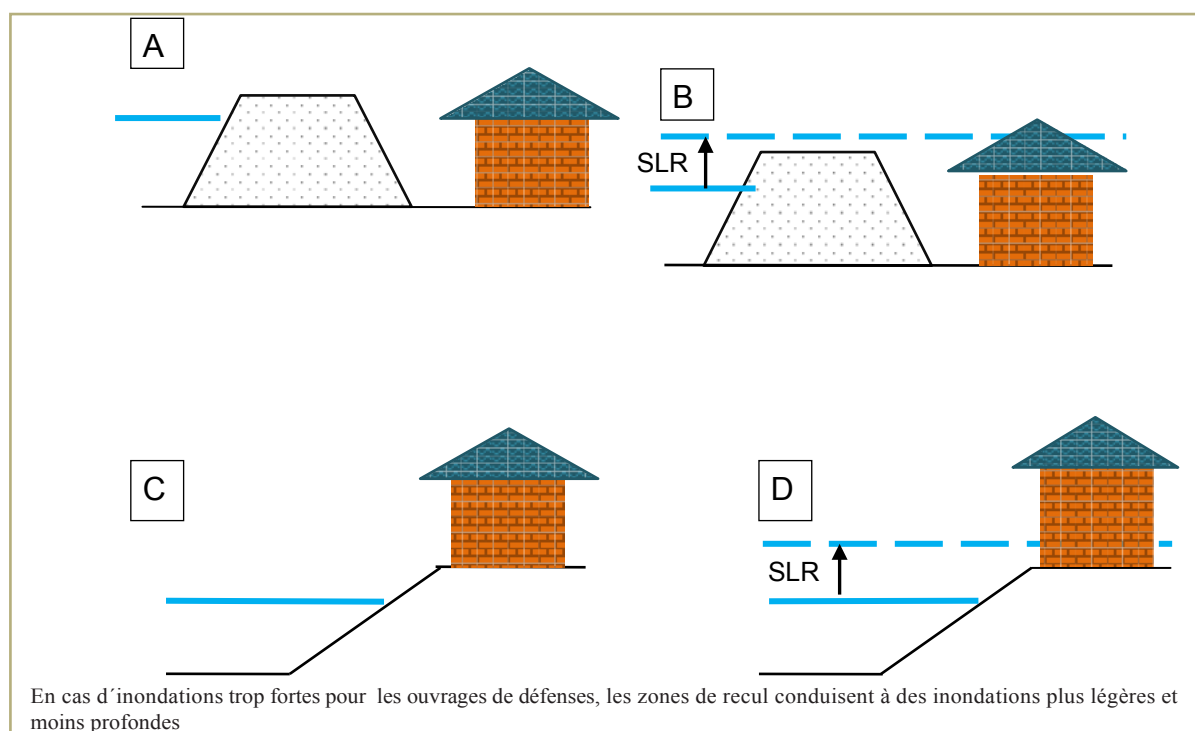
Contrairement aux défenses dures, les zones de sécurité aident à maintenir l'apparence naturelle des côtes et à préserver la dynamique naturelle du littoral (NOAA, 2010). Ceci permet aux cycles d'érosion et d'accrétion de suivre leur cours et aide à maintenir le budget sédimentaire local (Fenster, 2005). Il a déjà été observé que les défenses dures favorisait l'érosion des zones situées en aval. Ceci est moins

susceptible d'arriver avec cette méthode. Ainsi, les zones de retrait peuvent participer notablement au développement durable des zones côtières (Fenster, 2005).

Une distance minimale imposée permet de maintenir un accès au littoral en empêchant l'exploitation du front de mer (NOAA, 2010) et en mettant à disposition des espaces naturels pour le public. Les zones de retrait sont fréquemment utilisées comme des espaces publics de loisirs offrant souvent un accès à la mer.

Une cote altimétrique minimale fournit également un niveau plus élevé de protection que les structures de défenses dures. Par exemple, tandis que les ouvrages de défense ne sont pas en mesure de contenir une crue de trop grande ampleur, une hauteur minimale de sécurité limitera davantage la gravité de l'inondation dans les zones aménagées. Ceci est démontré dans la figure 4.31.

Figure 4.31: Les différents impacts à la suite d'une inondation trop forte pour les ouvrages de défense et les zones de recul



Source: Linham et al., 2010

Les inconvénients liés aux zones de retrait

Avec le temps, la SLR va réduire la taille des zones tampons entre les constructions humaines et la mer. Par conséquent, les zones de sécurité devront être réexaminées périodiquement afin de s'assurer que les zones tampons continuent de fournir une protection suffisante. Dans les états américains de Caroline du Sud et de Floride, les zones de retrait sont réévaluées tous les dix ans (Healy & Dean, 2000).

Il est important de souligner que la création de zones de recul ne garantit pas que les côtes soient protégées des fortes tempêtes, et des inondations et de l'érosion associées (Healy & Dean, 2000). Comme avec toutes les mesures d'adaptation des zones côtières, il existera toujours un risque résiduel. Cela signifie

que les espaces protégés seront toujours soumis au danger d'événements météorologiques imprévisibles de trop grande ampleur pour les mesures de sécurité. Seules des mesures de protection renforcées peuvent être prises afin de réduire le risque résiduel.

Des problèmes peuvent surgir suite à une réévaluation du retrait. Une zone peut, par exemple, être classée comme non constructible, ce qui peut devenir une source de conflit si certains terrains ont déjà été achetés pour l'exploitation. De plus, une révision des zones de retrait peut signifier que des structures existantes se retrouvent dans une zone de sécurité non constructible. En général, ces structures sont autorisées à demeurer, mais en cas de dommages ou de destruction causés par une tempête, elles devront probablement être reconstruites en accord avec la distance minimale imposée. Dans ces deux cas, les propriétaires ayant dû renoncer au potentiel de développement de leur terrain ou qui ont subi des pertes matérielles sont susceptibles de recevoir une compensation (NOAA, 2010).

Des données scientifiques ou historiques pertinentes sont nécessaires pour établir des zones de retrait correspondant aux menaces réelles d'érosion et d'inondation. Ces informations ne sont pas toujours faciles à obtenir, spécialement dans les pays en voie de développement où les programmes de suivi ne sont pas bien implantés. En l'absence de telles données, il est possible que les zones de sécurité ne fournissent pas une protection suffisante ou soient au contraire trop restrictives envers le développement de la côte (Fenster, 2005).

Les zones de retrait n'ont pas pour objectif de protéger les constructions existantes dans la zone exposée aux dangers climatiques. Si ces constructions doivent être protégées, il convient de sélectionner une autre stratégie d'adaptation. De plus, les politiques de retrait ne font que prolonger la durée de vie des structures situées sur le littoral. Compte tenu des taux d'érosion et de la SLR, si elles doivent être préservées, il sera nécessaire de mettre en place une autre politique de gestion du littoral (NOAA, 2010).

Les coûts et besoins financiers

Les coûts de mise en œuvre des zones de retrait varient selon les conditions locales. Quelle que soit la situation, un certain nombre de coûts seront engagés lors de la mise en œuvre des zones de retrait. Ceux-ci sont décrits ci-après.

Tout d'abord, il faut établir à quelle distance la zone de retrait sera créée. Il convient donc de collecter et d'analyser les taux d'érosion ainsi que les niveaux d'eau, de définir les coûts de modélisation des évolutions probables du littoral et les frais associés aux services de modélisation et de consultation d'experts. A ce stade, les coûts pourront varier selon la méthode utilisée pour délimiter les zones de retrait. Les moyens moins techniques seront probablement plus économiques.

De plus, la politique de retrait doit être communiquée aux organismes compétents afin qu'elle soit prise en compte dans le processus de planification. A ce stade, des coûts additionnels peuvent survenir afin que la politique de retrait soit incorporée aux politiques locales de planification.

Enfin, l'étape de la mise en vigueur est essentielle. Les coûts peuvent cependant être peu élevés s'il est possible de la réaliser via les instances territoriales préexistantes.

Des coûts additionnels pourraient s'ajouter en cas de dédommagement des propriétaires privés pour compenser la baisse de la valeur marchande de leurs terres ou lorsque les zones de retrait font l'objet de révisions périodiques.

Les zones de retrait sont généralement considérées comme étant des solutions peu coûteuses. Une étude de Shows (1978) montre que les coûts d'ingénierie pour la mise en œuvre d'une distance minimale de sécurité en Floride aux Etats-Unis, a été estimée à 11 700 dollars par km. Un réexamen ayant lieu tous les 5 ans devrait coûter 23 000 dollars par km. Les coûts administratifs annuels ont été estimés à environ 4800 dollars par km (niveau des prix en 2009) (Shows, 1978).

La mise en œuvre d'une politique de retrait a probablement un coût moins élevé lorsqu'elle est développée de manière proactive avant l'apparition de développements inadéquats sur le littoral. De cette manière, il devrait être possible de minimiser les indemnités compensatoires aux propriétaires privés.

Les capacités institutionnelles et organisationnelles requises

Afin de mettre en œuvre une zone de retrait en réponse au changement climatique, il est nécessaire d'appliquer les mesures de manière proactive. L'érosion est par nature prévisible et la SLR est un processus de long terme. Ainsi, les politiques de planification peuvent être mises en place dès à présent. Cela permettra de réduire les effets d'un développement susceptible d'avoir un impact négatif sur l'habitat et risquant de favoriser les inondations et l'érosion dans le futur (Kay, 1990).

Par le passé, les techniques de défense dures ont pu être employées pour des raisons politiques afin de montrer que des mesures tangibles étaient prises. Pour mettre en place une politique de retrait proactive, il convient de garder à l'esprit cette dimension politique et de chercher l'adhésion du public à travers des programmes de recherche et de suivi, l'éducation publique et la participation de la population au projet (Kay, 1990).

Il devrait être relativement facile de mettre en place une politique de retrait au niveau local. Cette mesure peut être intégrée à une réglementation préexistante sur l'aménagement du territoire et aux codes du bâtiment. Afin de mener une politique de retrait judicieuse plutôt qu'arbitraire, il convient de prendre en compte le type de la côte, la présence de défenses naturelles ainsi que l'impact que pourrait avoir ce processus sur les côtes (Sanò et al., 2010)

En plus des différentes politiques de recul qui peuvent être mises en œuvre, il existe des variations sur la manière dont est administrée la politique et qui en est responsable. Les normes techniques relatives aux projets varient fortement en pratique (Fenster, 2005).

Bien que les marges de recul soient mieux renseignées si elles se fondent sur des modèles scientifiques¹⁴, les définir ne représente pas une entreprise scientifique très complexe. Les reculs déterminés arbitrairement nécessitent des technologies moins avancées et sont plus facilement mis en œuvre au niveau local. Même en utilisant des technologies avancées, le degré d'incertitude lors de la définition d'une zone de recul peut-être important. Par conséquent, investir beaucoup d'argent dans des solutions de modélisation de haute technologie peut malgré tout donner lieu à un résultat erroné. Il est donc préférable d'être prudent (Healy & Dean, 2000) même si cela peut donner lieu à la mise en œuvre d'une marge de retrait qui n'est pas optimale.

¹⁴ Le modèle SCAPE (Walkden & Hall, 2005) prévoit l'érosion des berges selon les matériaux dont se composent les côtes, les conditions des vagues et autres facteurs de forçage du climat. CLIFFPLAN (Meadowcroft et al., 1999) est un autre modèle de simulation de l'érosion des falaises.

Les facteurs entravant la mise en œuvre

L'un des obstacles les plus importants à la mise en œuvre des zones de retrait est l'opposition du public. Cela risque d'être le cas si la population pense que les marges de retrait sont trop vastes ou que les propriétaires terriens voient leurs terres être classées dans la nouvelle zone non constructible. Il convient donc de communiquer sur la nécessité de larges marges de retrait. Compenser les propriétaires qui ont dû renoncer au potentiel de développement de leurs terrains est également susceptible de faciliter la mise en œuvre du projet.

Les résidents qui sont supposés vivre dans la nouvelle zone de retrait sont aussi susceptibles de s'opposer au projet. Dans la plupart des cas, les constructions pourront demeurer à leur place. Cependant, des restrictions quant à la reconstruction ou à la rénovation des habitations en cas de dommages causés par les tempêtes peuvent être fixées. Il est souvent admis que la reconstruction ou des rénovations importantes ne soient pas permises.

Une application rétroactive des zones de retrait est peu probable dans les cas suivants: (1) les villes zones urbaines côtières (2) les zones industrielles et usages associés aux activités maritimes, (3) les projets traditionnels intégrés aux paysages côtiers (Sanò et al., 2010). Ceci peut se révéler être un obstacle à l'efficacité des marges de retrait puisque la vulnérabilité de la zone côtière persiste pour ceux qui sont autorisés à demeurer dans la zone exposée aux risques.

Afin de mettre en œuvre des zones de recul efficaces, il convient d'étudier les données antérieures sur les taux d'érosion ou les variations des niveaux d'eau extrêmes. Sans ces informations, il sera problématique de définir des marges efficaces. Il est également recommandé d'utiliser les modèles numériques concernant les processus côtiers pour prédire l'évolution de l'érosion du littoral. Une certaine expertise est nécessaire pour pouvoir exploiter ces modèles. Bien que les zones de retrait puissent être mieux définies grâce à cette méthode, il est néanmoins possible de se passer de technologies avancées en définissant des marges prudentes et plus arbitraires.

De nombreuses zones côtières sont soumises à une forte pression pour exploiter le littoral, notamment pour encourager le tourisme. Par conséquent, les règlements relatifs aux zones côtières sont souvent inefficaces et des constructions peuvent être aménagées dans la zone protégée indépendamment de la réglementation en vigueur (Sanò et al., 2010).

Les facteurs favorisant la mise en œuvre

Etablir le lien entre les politiques de recul et la réglementation foncière existante favorise la création des zones de retrait. Les mêmes instances qui régulent les normes de construction et les permis de construire peuvent s'assurer qu'il n'y a pas de nouveaux aménagements dans la zone de sécurité.

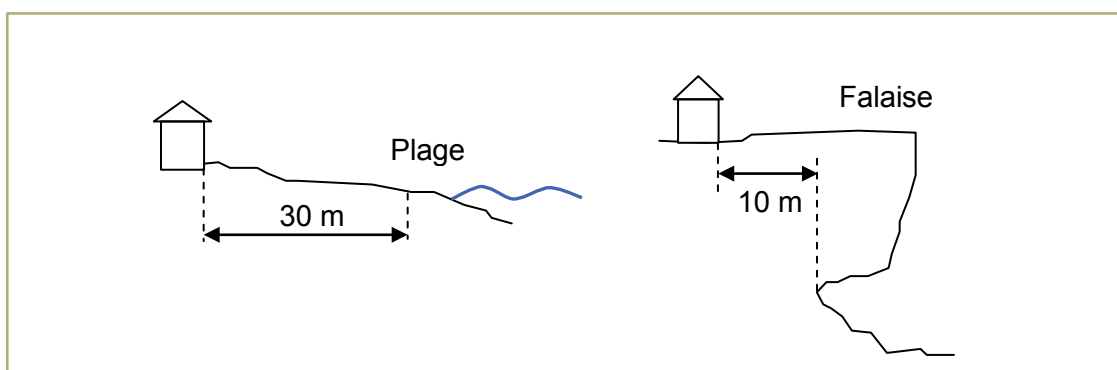
Les zones de retrait peuvent aussi être mises en œuvre conjointement avec un dispositif complémentaire comme la reconstitution de dunes de sable (section 4.1.2) ou la restauration des zones humides (section 4.2.2). Les zones de retrait fournissent l'espace nécessaire à ces environnements pour se développer et s'adapter au changement climatique. Cela permet de maintenir des éléments naturels de protection contre les dangers météorologiques et de fournir une zone tampon contre l'érosion et les inondations.

Etude de cas: La Barbade, île des Caraïbes

L'île des Caraïbes de la Barbade a employé les zones de retrait comme mesure réglementaire pour le développement de son littoral durant les trente dernières années. La mise en vigueur de celles-ci est soutenue par la Loi d'aménagement des zones urbaines et rurales, la Loi sur la gestion des zones côtières et le Plan de gestion intégrée des zones côtières.

Deux distances de retrait minimales sont imposées sur cette île. Le long des plages de sable, les bâtiments doivent se trouver à un minimum de 30 mètres du niveau moyen des hautes eaux (MHW, acronyme anglais). En cas de construction sur les falaises, une distance minimum de 10 mètres du bord du gouffre doit être respectée. Lorsque la falaise est en *porte-à-faux*, la marge de sécurité est mesurée depuis la partie entaillée de la falaise la plus éloignée du littoral. Ceci est décrit dans la figure 4.32.

Figure 4.32: Les distances de sécurité mises en place à la Barbade



Source: CZMU, 2005

Dans des cas très précis, ces zones de retrait peuvent être élargies, lorsque des écosystèmes sont menacés ou en danger, ou en présence de sites archéologiques ou historiques. Ces zones peuvent par exemple abriter des sites de nidification de tortues ou de mangroves. A l'inverse, une diminution des zones de retrait peut survenir lorsque des constructions existent déjà dans la zone concernée (CZMU, 2010).

L'adoption de zones de retrait fixes a simplifié le processus de mise en œuvre de cette politique sur toute l'île. Cependant, ce dernier point a aussi été critiqué car il ne tient pas compte du caractère historique de l'érosion de certaines plages (Daniel & Abkowitz, 2005). De plus, l'utilisation du MHW comme référence pour la mesure des marges de recul peut créer des problèmes puisque ce repère varie d'un jour à l'autre. Par conséquent, les planificateurs et promoteurs du projet peuvent avoir des interprétations différentes des limites de la zone de retrait (Mycoo, 2006).

La distance des marges de recul a aussi été mise en doute car certains domaines peuvent toujours subir les effets des inondations durant des tempêtes tropicales ou des ouragans. La distance adoptée à La Barbade est nettement inférieure à celle adoptée sur l'île voisine Nevis qui exige que les complexes hôteliers soient situés à au moins 91 mètres de la marée haute (Mycoo, 2006). En Jamaïque, où une marge de recul de 30 mètres a été mise en place, la cartographie des risques d'inondations a souligné le fait que cette distance était insuffisante pour assurer une protection contre les inondations (cf. section 4.2.4).

Cependant il est évident que fixer une zone de recul côtière est une tâche particulièrement délicate qui requiert une évaluation rigoureuse des avantages et des inconvénients. Les zones de retrait sont localisées sur des terrains qui ont une forte valeur marchande. Cela est particulièrement important compte tenu de l'ampleur de l'industrie du tourisme à la Barbade et dans les îles des Caraïbes, et de la nécessité de la présence d'hôtels et de logements. Les promoteurs protestent souvent contre les zones de retrait comptant sur le fait que les assurances prendront en charge les coûts des dégâts causés par les événements météorologiques (Mycoo, 2006). De plus, des marges de recul larges et précises peuvent signifier que les autorités perdent les recettes fiscales des propriétés en bordure de plage (Mycoo, 2006). Ce dernier point peut-être particulièrement préoccupant pour un pays en voie de développement.

Néanmoins, les zones de retrait restent bénéfiques pour l'île de la Barbade. Elles aident à préserver la capacité naturelle des côtes à se protéger contre les événements météorologiques extrêmes, permettent de maintenir le paysage naturel, protègent les zones informelles de loisirs et aident à conserver la biodiversité de l'île.

4.4 Les exigences en matière de connaissances et de renforcement de capacités

Ce paragraphe traite des exigences en matière de connaissances et de renforcement de capacité associées à la mise en œuvre des treize technologies d'adaptation présentées dans ce livret. Ces dernières présentent des similitudes en la matière.

Tableau 4.12: Connaissances essentielles et secondaires pour la mise en œuvre des 13 technologies d'adaptation

	Essentielle	Rechargement des plages	Dunes artificielles et réhabilitation des dunes	Brise-lames	Digues	Barrières anti-tempête et barrages de retenue	Récupération territoriale ¹	Protection contre les crues	Restauration des zones humides	Systèmes agricoles flottants	Cartographie des risques d'inondation	Alertes aux inondations	Recul stratégique ²	Zone de retrait
	Secondaire													
	Non pertinente													
Scénarios de RSLR														
Niveaux d'eau extrêmes ³														
Régime des vagues ³														
Bathymétrie du littoral														
Régime des marées ⁴														
Historiques des informations sur les inondations														
Occupation des terres														
Topographie côtière														
Niveau de protection côtier														
Tassement du sol ⁵														
Caractéristiques des														

sédiments													
Disponibilité de sites de dragage adaptés ⁶		7				8					9		
Budget sédimentaire local													
Largeur des plages													
Historique des taux d'érosion												10	
Historique de distribution des habitats et les causes de leur déclin													
Végétation													
Vélocité des inondations													
Débit fluvial ³					11								
Observations météorologiques/prévisions					11								
Diffusion d'une alerte efficace													
Seuil d'alerte aux inondations					11								
Construction d'îlots flottants													
Systèmes de culture													

Notes

- 1 Les structures de défense dures sont susceptibles d'être employées le long des nouvelles terres aménagées. Un certain nombre de connaissances essentielles et secondaires sont associées à ces ouvrages de défense.
- 2 Les connaissances requises associées au plan de recul varient selon les objectifs du retrait (par exemple : défenses côtières, création d'habitats etc.).
- 3 Conditions actuelles ou futures, selon le cas.
- 4 En cas de marées normales, à la différence des niveaux d'eau extrêmes
- 5 De la structure ou de ses environs
- 6 Sites de dragage pour fournir des matériaux appropriés
- 7 En cas de rechargement

- 8 En cas de récupération territoriale par élévation de terrain
- 9 Si une élévation de terrain est entreprise
- 10 Ceci devrait sans doute être essentiel dans la définition d'une distance de retrait, mais les sources documentaires précisent le contraire
- 11 Dans le cadre d'un système d'alerte aux inondations

Les connaissances requises peuvent être divisées en deux catégories: essentielles et secondaires. Les connaissances essentielles sont cruciales pour la réussite du projet. Les exigences secondaires, elles, ne sont pas fondamentales, bien que ces dernières améliorent la performance du projet et minimisent les impacts de l'adaptation sur l'environnement local. Les connaissances requises sont décrites dans la figure 4.12 et sont détaillées ci-après.

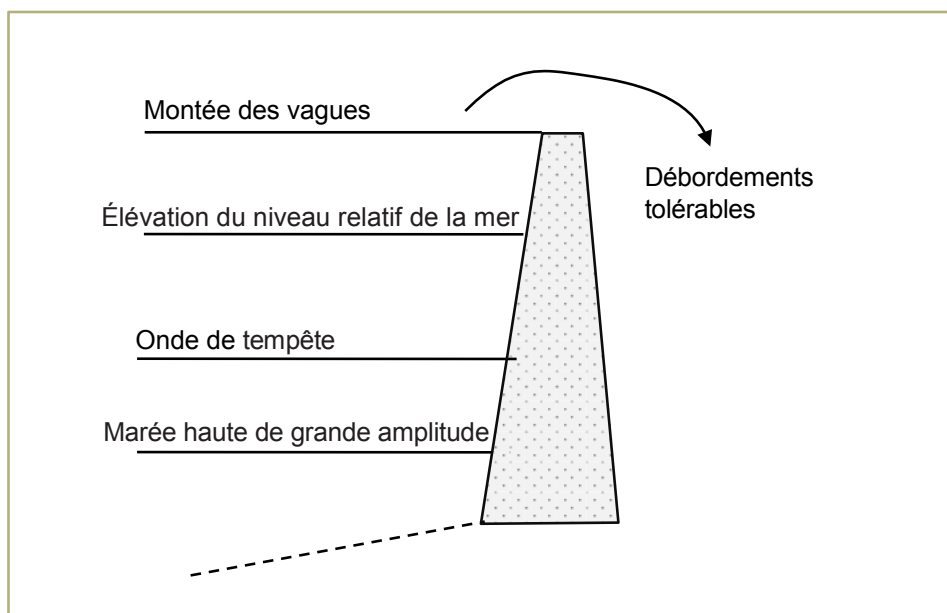
4.4.1 Les connaissances requises pour les stratégies de protection

La connaissance des différents scénarios de la RSLR est cruciale pour toute stratégie de protection. Cela n'est pas surprenant puisque ces technologies visent avant tout à s'adapter à la SLR et à l'érosion des côtes. Ces connaissances permettront donc d'intégrer les considérations relatives au changement climatique au concept initial d'un projet d'adaptation. Ceci est profitable car réaliser la conception et la construction d'un système solide offrant une protection efficace dès son installation est moins coûteux qu'un système moins performant nécessitant des améliorations périodiques pour faire face au changement climatique.

Tenir compte de la RSLR est particulièrement important pour les technologies implantées dans les milieux estuarien ou deltaïque. En raison de la présence de sédiments relativement jeunes dans ces milieux, les estuaires et les deltas sont particulièrement sensibles à l'accélération de l'élévation du niveau relatif de la mer.

La connaissance des niveaux d'eau extrêmes est également très importante afin que les structures douces ou dures soient conçues avec une hauteur de crête suffisante de manière à limiter les débordements à des niveaux acceptables. Cette hauteur doit rendre compte de l'hydrostatique et de l'hydrodynamique des niveaux d'eau (cf. Figure 4.33). Les niveaux de risque jugés acceptables dépendront probablement de l'usage qui est fait des terres protégées par les ouvrages de défense et sont par conséquent susceptibles de varier fréquemment (cf. Pullen et al. (2007) pour plus d'informations).

Les niveaux d'eau extrêmes peuvent survenir lors de la concomitance d'une marée haute et d'une onde de tempête, phénomène causé par une faible pression atmosphérique et des vents forts (Pugh, 1987). Basées sur les probabilités conjointes de ces phénomènes, des séries de niveaux d'eau et leur période de retour peuvent être déterminées. Idéalement, ces informations pourront être tirées des données sur les niveaux marins bien qu'elles soient rarement disponibles. Lorsque c'est le cas, des modèles doivent être utilisés afin de faire des prévisions. Pour ce faire, connaître le régime des marées d'une zone ainsi que l'historique des inondations est important. Généralement, l'exercice de planification des niveaux d'eau est effectué avec prudence car les sous-estimer peut entraîner des catastrophes (Kamphuis, 2000).

Figure 4.33: Les facteurs déterminant le niveau d'eau et la hauteur de crête des ouvrages de défense

Le régime des vagues d'une zone contribue significativement aux niveaux d'eau extrêmes comme souligné dans la figure 4.33. A l'inverse, celui-ci peut être très influencé par la bathymétrie du littoral. Pour les structures de défense dures, le régime des vagues est un point déterminant quant aux charges auxquelles les structures sont exposées car elles doivent être assez solides pour prévenir les dommages et les destructions durant les tempêtes. Des vagues plus fortes sont synonymes d'une augmentation de leur charge et de leur puissance, facteurs qui doivent être pris en compte lors de la conception initiale des ouvrages de défense.

Pour les techniques de défense douces, comme le rechargement de plages et la création de dunes, l'influence principale du régime des vagues s'exerce sur la redistribution des sédiments et les taux potentiels de l'érosion. Des vagues plus énergiques causent un effet de mouvement des sédiments plus en profondeur (Hallermeier, 1981; Nicholls et al., 1998); cela signifie que les matériaux déposés sur les plages seront ensuite redistribués sur une zone plus large. Par conséquent, un plus grand volume de matériaux pourrait être nécessaire pour le réapprovisionnement. La direction d'approche des vagues est importante étant le facteur principal déterminant la dérive littorale. Ce processus est pris en compte dans le calcul de budget sédimentaire et permet d'évaluer les évolutions à long terme des plages (CIRIA, 1996).

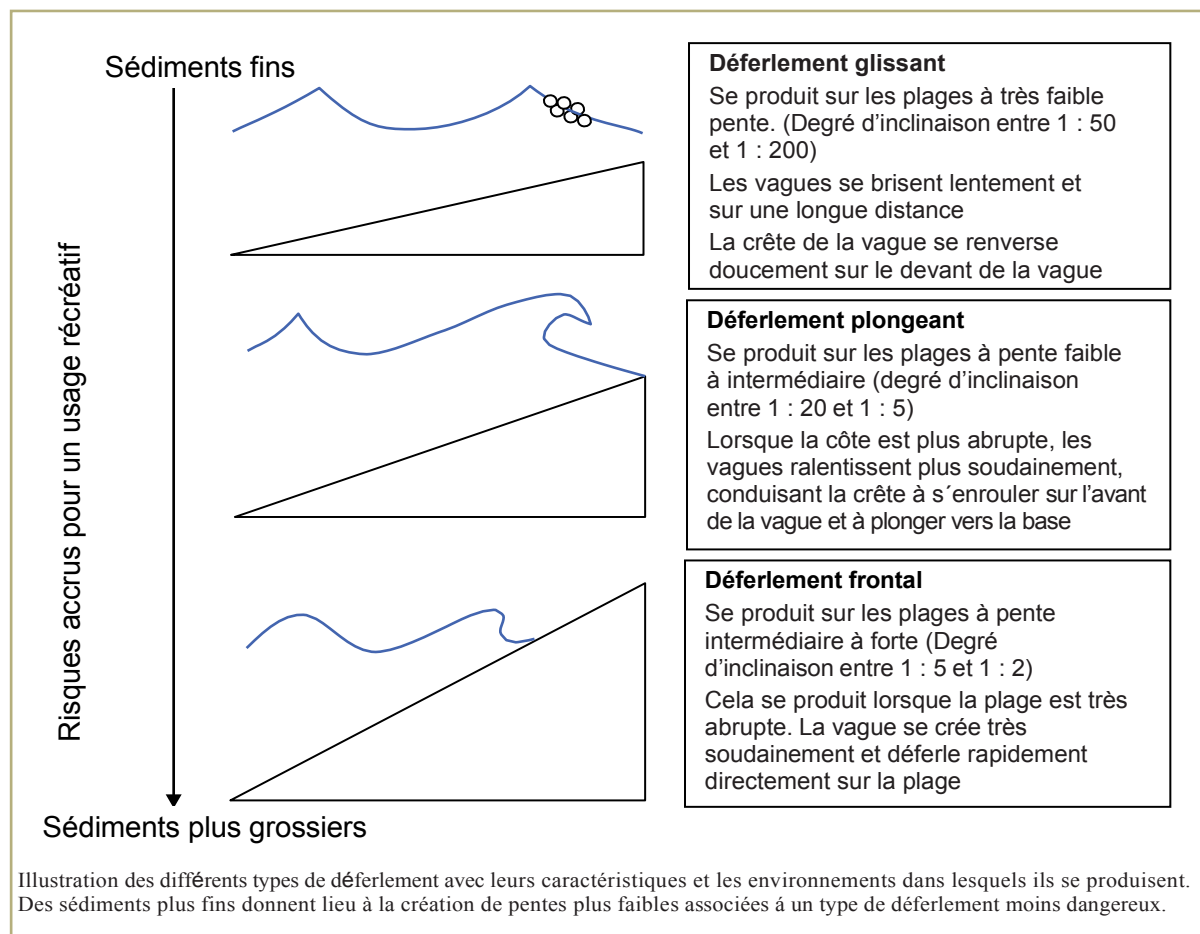
D'une manière générale, les observations sur le régime des vagues sont très limitées. Ainsi la connaissance que l'on en a repose principalement sur des extrapolations ou sur de la modélisation. L'étude des évolutions du régime des vagues en raison du changement climatique en est aux premières étapes de développement et il est peu probable que des données soient disponibles à des fins de calcul. L'un des facteurs qui pourrait être utilisé pour cette étude est l'effet de la SLR sur l'ampleur des vagues de taille moyenne. La SLR pourrait en effet entraîner une augmentation de la hauteur des vagues, ce point mériterait donc d'être examiné.

Prendre en compte le tassement du sol est important pour évaluer la hauteur des ouvrages de défense par rapport aux niveaux d'eau extrêmes. Ce phénomène provoque une déviation ou une rupture de certaines parties des structures durant ou après leur construction. Cette action peut entraîner une réduction du niveau de protection contre les niveaux d'eau extrêmes. Ceci peut arriver avec les structures de défense dures et souples et là où cela est un risque, des frais prévisionnels devraient être pris en compte lors de

la conception du projet. Un tassement peut survenir au niveau de la structure d'adaptation elle-même, par exemple une digue, une dune ou une plage artificiellement rechargée, ou dans le sous-sol sur lequel l'ouvrage est situé. Ce phénomène est fortement influencé par les caractéristiques des sédiments à l'endroit où se situe le projet.

Connaître les caractéristiques des sédiments se révèle également important pour les ouvrages d'adaptation souples qui requièrent un apport de sédiments comme les plages artificiellement rechargées ou la création de dunes. Lorsque ces projets sont entrepris, il est important de maintenir le caractère local du site en ajoutant des sédiments de calibre similaire, de même composition et de même couleur. Dans les régions qui sont pertinentes pour le tourisme, ces caractéristiques sont également importantes. Les plages de sable moins fin sont moins populaires auprès des personnes et sont associées à des vagues déferlantes plus dangereuses (cf. figure 4.34), ainsi qu'une plus grande fréquence et une plus forte intensité des courants de retour, phénomènes dangereux et indésirables sur les plages dédiées aux loisirs (Reeve et al., 2004). La taille et la couleur des grains de sable sont aussi importants pour maintenir les conditions¹⁵ écologiques des plages. Le plus souvent, les grains de sable utilisés sont un peu plus gros que les grains locaux afin d'augmenter la longévité des projets.

Figure 4.34: Pentas des plages et différents types de déferlement des vagues



Source: Adapté de Coastal Carolina University (2010) *Oceans in Motion: Waves and Tides*. Carolina: Kingfish. Disponible sur <https://risowa.risoe.dk/exchweb/bin/redirect.asp?URL=http://kingfish.coastal.edu/biology/sgilman/770Oceansinmotion.htm> et <http://kingfish.coastal.edu/biology/sgilman/770Oceansinmotion.htm> [Consulté le 07/07/10].

¹⁵ La couleur du sable peut affecter les températures d'incubation pour la nidification des tortues et leur taille le compactage des sédiments et ainsi la qualité de l'habitat pour la nidification.

L'identification de sources potentielles de sédiments est essentielle lorsqu'un ajout artificiel de sédiments sur la côte est nécessaire dans le cadre de l'adaptation. Les sites de dragage adéquats doivent contenir un volume suffisant de sédiments similaires à ceux de la plage, se trouver à une distance raisonnable afin de minimiser les coûts du transport, ne pas dépasser des niveaux inacceptables de contamination et ne doivent pas causer de répercussions néfastes sur l'environnement du site d'emprunt. Il faut également que ses caractéristiques bathymétriques soient adéquates pour cette opération.

Avant que de tels sites puissent être identifiés, le volume nécessaire de matériaux de remblai doit être évalué. Une vision claire du budget sédimentaire local renseignera le choix du site de dragage et aidera à quantifier l'afflux et l'écoulement de sédiments sur le littoral (cf. section 4.1.1). Cela aidera à calculer le volume de sable nécessaire pour maintenir la largeur et le volume de la plage concernée, paramètres susceptibles d'être influencés par la largeur désirée de la partie sèche de la plage et l'historique des taux d'érosion.

Lorsqu'il s'agit des mesures de défense dures, cette connaissance du budget sédimentaire local est une condition secondaire. En effet, ces mesures de protection empêchent l'érosion du littoral et ce faisant, éliminent l'apport en sédiments du stock local. Cela peut, à son tour, causer un déficit de sédiments et provoquer l'érosion le long des côtes limitrophes. Une connaissance approfondie du budget sédimentaire peut promouvoir une gestion plus globale des zones côtières et une conception plus adaptée des structures des côtes.

Enfin, concernant la plantation de végétation sur les dunes, une connaissance de la végétation locale est importante afin d'éviter la plantation d'espèces non autochtones pouvant avoir des répercussions négatives sur l'écosystème du site. En effet, cela pourrait perturber l'environnement local d'une zone. Cette analyse est nécessaire lorsque la végétation sert à stabiliser la plage. Pour la restauration de dunes de sable, une connaissance de la répartition historique des habitats et les raisons du déclin de certaines espèces est également bénéfique, car si l'adaptation se limite à des actions de réparation et de reconstruction sans traiter les causes, les problèmes risquent de réapparaître.

4.4.2 Les connaissances requises pour les stratégies de compromis

Un aspect très important pour l'application des stratégies de compromis est de déterminer quels sites présentent des risques d'inondation et ainsi, là où il convient de mettre en œuvre des mesures d'adaptation. Les différents scénarios de la RSLR sont importants et représentent l'une des connaissances requises, essentielle ou secondaire, pour toutes les technologies d'adaptation. La connaissance de ces scénarios permet de concevoir les projets d'adaptation de manière à ce que soient pris en compte les changements du niveau relatif de la mer attendus dans le futur. Cela aide également à évaluer le caractère évolutif des risques d'inondation et à déterminer si certains projets spécifiques sont réalisables. Par exemple, la restauration de zones humides ne serait pas viable si la RSLR surpassait leur capacité d'accrétion de sédiments.

La connaissance des niveaux d'eau extrêmes aide également à déterminer les sites présentant des risques d'inondation. Comme mentionné dans la section 4.4.1, les niveaux d'eau extrêmes sont susceptibles de survenir lorsqu'il y a une concomitance entre une grande marée et des ondes de tempête, phénomène causé par une faible pression atmosphérique et des vents forts (Pugh, 1987). Ainsi, être bien informé sur le régime des marées dans une zone se révèle important pour déterminer les niveaux des marées hautes et le régime des vagues. De même, la bathymétrie du littoral est essentielle pour établir le niveau de montée des vagues et l'historique des inondations dans la zone permet d'évaluer la profondeur potentielle des crues. Ces informations peuvent servir à renseigner un modèle des risques d'inondation comme abordé dans la section 4.4.1.

Il convient par ailleurs de disposer de données sur la topographie côtière afin de définir les zones qui présentent des risques d'inondation. Il est probable que ces informations doivent être combinées avec la connaissance des niveaux d'eau extrêmes et la hauteur des vagues afin de permettre de cartographier la manière dont la montée des eaux est susceptible de toucher l'intérieur des terres.

Pour déterminer dans quelle mesure les ondes de tempête pourraient s'étendre sur les terres, il est nécessaire de connaître le degré de protection des côtes au niveau local et l'occupation des sols. Par exemple, la présence de défenses côtières naturelles ou artificielles empêchera l'eau des crues d'inonder l'intérieur des terres. Ainsi, connaître l'emplacement des structures et le niveau de protection qu'elles fournissent est essentiel pour mettre en œuvre des technologies telles que la protection contre les crues, la cartographie des risques et l'alerte aux inondations. L'utilisation des sols est importante pour déterminer les mécanismes des processus d'inondation et leur étendue ainsi que les ressources qui pourraient être affectées.

Une fois l'étendue et la hauteur potentielles des inondations estimées, il pourrait s'avérer utile de connaître la vitesse des inondations. Cette donnée est importante car des vitesses élevées peuvent être préjudiciables pour les infrastructures et dangereuses pour les populations. La prise en compte de ce facteur permettra de construire des bâtiments résistants aux inondations, en s'assurant, par exemple, que les structures soient bien ancrées au sol et que les murs soient capables de résister au fort débit des crues. Là où le niveau de vitesse est dangereux pour l'Homme, cette information peut aider à la cartographie des risques d'inondations et être un facteur important lors de l'émission d'une alerte.

Les systèmes d'alerte aux inondations requièrent un certain nombre de connaissances spécifiques. Tout d'abord, les observations météorologiques sont nécessaires afin de concevoir une modélisation numérique et prédictive des risques d'inondation. Pour être utiles, ces données doivent être transmises rapidement. Des capacités de prévision sont donc requises pour pouvoir analyser les conditions météorologiques et ainsi prévoir l'étendue et la sévérité d'une inondation. Les données sur les niveaux d'eau, la hauteur des vagues et le débit des rivières sont autant d'informations météorologiques essentielles pour une prévision efficace. Les données sur le débit fluvial concernent, bien entendu, uniquement les endroits où une rivière est présente. En cas de barrières amovibles et de barrages de retenue, les modèles de structures devraient tenir compte des débits des rivières les plus forts. Les scénarios des modifications provoquées par le changement climatique devraient également être pris en compte.

Lorsqu'un système d'alerte aux inondations détecte des menaces, il doit également identifier le seuil d'alerte. Il est important de trouver l'équilibre entre lancer l'alerte suffisamment à l'avance et minimiser les risques de fausses alarmes. Cette étape est suivie de la diffusion de l'information qui nécessite l'identification des canaux d'informations les plus efficaces afin d'alerter le plus de monde possible dans la zone concernée.

La restauration des zones humides nécessite également la connaissance d'un certain nombre de critères. Ceci est dû en grande partie au fait que ces habitats se développent en présence de régimes de vagues abrités à modérés et de caractéristiques de sédiments spécifiques, par exemple en cas d'accrétion de sédiments fins organiques. De plus, les zones humides n'existent que dans une partie spécifique de l'espace de marée, entre les limites extrêmes des plus hautes et des plus basses marées astronomiques. Ainsi, la connaissance du régime des marées et de la topographie des côtes d'une région est essentielle. Ces informations permettront aux gestionnaires des zones côtières de savoir si les zones humides seront viables. Les endroits où la topographie des côtes est trop basse ou trop haute pourront être aménagés

afin d'encourager la création de zones intertidales, ce qui est l'une des connaissances secondaires nécessaires concernant les sites de dragage adéquats.

Lorsque qu'il s'agit de planter de la végétation dans les zones humides, la connaissance des espèces locales est importante car le type d'habitat qui se développe naturellement dépend de sa position géographique et des conditions environnementales. Par exemple, l'on trouve les mangroves le long des côtes protégées et des estuaires des zones tropicales et subtropicales (Alongi, 2002), alors que les marais salants se développent dans les estuaires à moyennes et hautes latitudes (Allen & Pye, 1992). Il existe de nombreuses sous-catégories de zones humides ; on dénombre plus de 50 espèces de mangroves dans le monde (Woodroffe, 2004) et une multitude d'espèces de prés salés qui sont toutes associées à des conditions spécifiques comme la durée de l'inondation des terres par les marées, la salinité, le niveau de nutriments et une certaine quantité d'oxygène. Une connaissance de l'historique de ces habitats naturels et des causes de leur déclin est essentielle de manière à déterminer les endroits où ces environnements ont existé dans le passé et pour connaître les conditions préalables à leur rétablissement. Ces informations permettront de lutter contre les causes du problème de perte en habitats et ainsi contre leur déclin. Enfin, la connaissance du budget sédimentaire local sera utile puisque la restauration des zones humides entraîne l'interception de l'approvisionnement en sédiments, provoquant par conséquent des incidences néfastes sur les côtes adjacentes. Ces données pourraient donc permettre d'atténuer ces impacts négatifs.

Enfin, les systèmes agricoles flottants requièrent des connaissances très spécifiques notamment sur les différentes méthodes de culture et de construction des îlots flottants. A l'heure actuelle, de nombreuses communautés ne savent rien des possibilités de culture sur ces îlots et n'ont donc aucune idée de comment les construire. Former les communautés locales et leur apporter un appui technique pourrait contribuer à une meilleure connaissance de cette méthode. Ce savoir-faire pourrait ensuite être partagé avec les autres communautés et les régions voisines et être transmis d'une génération à l'autre. De plus, l'agriculture flottante permettant de cultiver de plantes hors saison et d'espèces parfois méconnues des agriculteurs locaux, il convient d'informer les communautés sur les cultures appropriées et la période adéquate de plantation et de récolte.

4.4.3 Les connaissances requises pour les stratégies de repli

La connaissance des différents scénarios de la RSLR fait partie des informations secondaires à connaître pour la mise en place du recul stratégique et des zones de retrait du littoral. En incorporant les données de la RSLR à la conception des mesures d'adaptation, leur efficacité peut être maintenue durant toute la durée de vie du projet. Concernant le recul stratégique, ces différents scénarios permettent aux responsables de la gestion de la côte de déterminer si la création de zones humides est réalisable ou si la RSLR est vouée à dépasser la capacité de celles-ci à accumuler suffisamment de sédiments.

Les informations sur les niveaux d'eau extrêmes sont également utiles et peuvent être combinées avec les données topographiques des côtes afin de déterminer les zones sujettes aux risques d'inondations. Ces informations peuvent également être nécessaires pour éclairer les décisions sur la taille requise des zones de retrait. Une vision claire des niveaux d'eau extrêmes peut être obtenue à l'aide d'études de modélisation comme détaillé dans la section 4.4.1. Pour ce faire, il convient de disposer de données sur le régime des marées, le climat des vagues, la bathymétrie du littoral et l'historique des inondations. Ces informations peuvent être ensuite combinées avec des données sur la topographie des côtes, l'occupation des sols et le niveau de protection côtière afin d'établir l'étendue potentielle des inondations sur les terres comme détaillé dans la section 4.4.2.

En plus de déterminer les zones à risques, établir des zones de retrait efficaces exige d'avoir des informations supplémentaires sur l'historique des taux d'érosion ainsi que sur les caractéristiques des sédiments. Il est possible d'extrapoler l'historique des taux d'érosion afin d'estimer ceux du futur, voire d'évaluer ces données à la hausse pour prévoir l'accélération de la SLR. Les caractéristiques des sédiments disponibles au niveau local sont étroitement liées à l'érodabilité. Cette information contribue à notre compréhension des taux d'érosion passés et futurs.

D'autres informations supplémentaires sont requises pour mettre en œuvre de manière efficace les plans de recul stratégique. Les principaux bénéfices de cette méthode proviennent de la création de zones intertidales et il convient donc de comprendre et d'établir si le site de repli permettra le développement de ces habitats. Par exemple, les zones humides ont besoin de conditions particulières en termes de régime de vagues, de type de sédiments, de topographie des côtes et de régime des marées. En l'absence de ces conditions spécifiques, ces habitats ne pourront probablement pas se développer. Pour plus d'informations, se référer à la section 4.4.2 sur la restauration des zones humides. De plus, l'existence de sites de dragage adéquats fait partie des connaissances secondaires requises si le site de projet nécessite l'intervention de solutions techniques afin d'encourager la formation d'habitats intertidaux. Enfin des relevés topographiques permettront de définir si des nouveaux ouvrages de défense sont nécessaires à l'arrière des zones de retrait.

Connaître la répartition de certains habitats, la cause de leur déclin, le budget sédimentaire local ainsi que la végétation est susceptible d'être utile pour les projets de recul stratégique (pour plus d'informations, cf. section 4.4.2 sur la restauration des zones humides).

4.4.4 Les sources d'informations

Chacune de ces connaissances requises peut être obtenue à l'aide des sources d'informations présentées dans le tableau 4.13.

Tableau 4.13: Sources d'informations possibles pour les connaissances requises exposées dans le tableau 4.12

Connaissances requises	Sources d'informations possibles
Elévation du niveau relatif de la mer	- Scénarios de changement climatique à échelle réduite
Niveaux d'eau extrêmes	- Relevés des marégraphes - Modélisation numérique
Régime des vagues (actuel et futur)	- Bouées météorologiques - Simulation rétrospective des vagues ¹ - Télédétection ²
Bathymétrie du littoral ³	- Cartes marines - Echosondeurs à simple faisceau - Echosondeur multifaisceaux - GPS différentiel (dGPS) - LiDAR (profondeurs moins importantes)
Régime des marées	- Horaires des marées - Mesures du terrain - Marégraphes

Contd...

Connaissances requises	Sources d'informations possibles
Inondations potentielles	- Historique des inondations - Faits anecdotiques⁴ - Modélisation numérique
Occupation des terres	- Photographies aériennes - Photographies au niveau du sol - Télédétection - Etudes de terrain - Etudes de terrains
Topographie côtière	- Tachéomètre⁵ - Scanners laser terrestres - GPS différentiel (dGPS) - LiDAR
Niveau de protection existant des côtes	- Etude locale - Photographies aériennes - Appréciation d'un spécialiste - Evaluation de la solidité de la structure
Tassement du sol	- Etudes géotechniques
Caractéristiques des sédiments d'origine	- Analyses d'échantillons
Disponibilité de sites de dragage adéquats	
- Taille des grains des sédiments	- Collection de base - Essais de sablage et analyses
- Proximité	- Cartes de la zone
- Impacts environnementaux	- Evaluation des impacts environnementaux
- Caractéristiques des sites de dragage	- Détection des couches de sédiment⁶ - Sonar latéral⁷ - Cartographie bathymétrique⁸
Budget sédimentaire local	- Décisions relatives à la conception
Largeur de plage sèche désirée	- Analyse du bilan sédimentaire (Voir CIRIA, 1996)
Historique des taux d'érosion	- Cartes historiques - Photographies aériennes - Chartes nautiques et cartes topographiques
Historique de distribution des habitats et les causes de leur déclin	- Cartes historiques - Photographies aériennes - Faits anecdotiques
Végétation	- Relevés biologiques
Vélocité des inondations	- Modélisation numérique
Débit fluvial	- Stations de jaugeage de rivière (actuel) - Scénarios (futur)

Contd...

Connaissances requises	Sources d'informations possibles
Observations météorologiques: - Précipitations - Débit fluvial - Vitesse du vent - Niveaux des marées - Pression atmosphérique - Hauteurs de vague	- Observatoires, jauges et capteurs - Ballons sondes météorologiques - Télédétection ² - Organisations externes (telles que les observations NOAA et WMO)
Prévision météorologique: - Précipitations - Débit fluvial - Vitesse du vent - Niveaux des marées - Pression atmosphérique - Hauteurs de vague	- Modélisation numérique - Techniques de prévision immédiate ⁹ - Organisations externes
Seuil d'alerte aux inondations et diffusion de l'alerte	- Etude locale - Enquêtes en sciences sociales
Construction des îlots flottants	- Agences de développement - Programmes de surveillance et de sensibilisation-
Systèmes de culture	- Agences de développement - Plans de sensibilisation

Notes

1. Simulation rétrospective utilisant les données Proxy (Données sur les vents extrêmes pour le régime des vagues).
2. Collecte d'informations sur un matériau ou un processus sans y toucher. Souvent utilisé pour désigner l'observation de la Terre via des plateformes à satellite utilisant des capteurs électromagnétiques (Heywood et al., 2006).
3. Mesures de la profondeur de la mer ou des océans afin de produire des modèles numériques d'altitude subaquatique.
4. Pour de nombreux pays en voie de développement, ceci est susceptible d'être une source d'informations essentielle, son importance ne devrait pas être sous-estimée.
5. Un outil de sondage qui combine un théodolite et un mesureur de distance électroniques pour mesurer les distances et les angles jusqu'à un certain point.
6. Méthode d'arpentage qui identifie et mesure les couches de sédiments existant sous le fond marin supérieur.
7. Méthode d'arpentage qui crée des images 3D du plancher océanique.
8. Méthode d'arpentage qui mesure la profondeur de l'eau et la forme du fond marin.
9. Une technique de prévision météorologique à très court terme qui analyse la météo en cours et utilise ensuite une estimation de sa vitesse et de son mouvement pour prévoir le temps un peu plus tard (Met Office, 2010).

4.5 Les technologies de suivi

Le suivi est un aspect important des stratégies d'adaptation puisque cela permet d'évaluer si les projets ont atteint leurs buts, et d'apporter un nouvel éclairage et de nouvelles informations afin d'ajuster la stratégie si nécessaire (Klein et al., 2001).

Nombre des exigences dans ce domaine étant les mêmes pour différentes options d'adaptation, les modalités de suivi n'ont pas été détaillées entre les sections 4.1.1 et 4.3.2 pour chaque technologie individuelle. Ces exigences sont décrites dans le tableau 4.14 et les méthodes de collecte de données dans le tableau 4.15.

Ce sont les objectifs des projets qui dictent en grande partie les modalités de contrôle. Il est probable que la défense des côtes et la création/l'amélioration d'habitat soient partagés par beaucoup. Les objectifs des stratégies d'adaptation devraient être définis avant le lancement du plan et le processus de suivi devrait permettre de collecter les informations nécessaires pour évaluer s'ils ont été atteints.

Les modalités en la matière variant selon les objectifs du projet, il est probable que l'application d'une même technologie d'adaptation sur deux sites fasse appel à des conditions de suivi différentes en lien avec chacun des projets.

4.5.1 Les exigences en matière de suivi

Les exigences principales en matière de suivi pour évaluer les 13 technologies d'adaptation décrites dans ce manuel sont présentées dans le tableau 4.14. Elles sont ensuite examinées plus en détail ci-dessous. Il existe des similarités quant aux connaissances nécessaires en matière de suivi (cf. Section 4.4). Les études topographiques et bathymétriques sont, par exemple, utilisées tant à des fins de contrôle que d'analyse de la topographie des côtes et de la bathymétrie du littoral en amont de la mise en œuvre du projet.

Relevés topographiques

Les relevés topographiques visent essentiellement à surveiller la forme d'une plage au-dessus de la ligne des basses-eaux, à des endroits précis de la côte. Conduit sur toute la longueur de la plage, ce relevé permet d'estimer le volume de la plage et de mettre en relief différents problèmes comme l'affouillement en face des ouvrages de défense. Les résultats peuvent aussi être utilisés pour la création de cartes digitales de la superficie des plages qui peuvent par la suite être importées vers un système d'information géographique (SIG), ce qui permettra de comparer aisément les changements annuels.

Les relevés topographiques peuvent enregistrer des élévations dans le profil transversal de la plage ou il est sinon possible d'effectuer des mesures sur un réseau dense de points pour élaborer une carte détaillée de la topographie de la plage.

Lors du rechargement de plage, les relevés topographiques sont susceptibles d'être utilisés conjointement avec les relevés bathymétriques allant jusqu'à la profondeur de fermeture. Ces données permettent d'estimer le volume total de sédiments disponible dans une zone réapprovisionnée ce qui est très utile pour un certain nombre de raisons (CIRIA, 1996):

- Identifier lorsqu'un rechargement des plages est nécessaire
- Déterminer le rapport coût-efficacité d'un projet
- Calibrer des modèles mathématiques de transport de sédiments qui pourront servir à améliorer des futurs projets de réapprovisionnement en sédiments
- Déterminer le type et la composition des matériaux de rechargement dans l'idéal.

Tableau 4.14: Les mesures de surveillance des 13 technologies d'adaptation

	Rechargement de plages	Dunes artificielles et réhabilitation des dunes	Brise-lames	Digues	Barrières anti-tempête et barrages de retenue	Récupération territoriale ¹	Protection contre les crues	Restauration des zones humides	Systèmes agricoles flottants	Cartographie des risques d'inondation	Alertes aux inondations	Stratégie de recul stratégique ²	Zone de retrait
Relevé topographique													
Relevé Bathymétrique													
Position du littoral								2					
Inondations													
Etude écologique	3	3						3			3	3	
Intégrité structurelle							4						
Affouillement et changements morphologiques													
Conformité aux réglementations													
Processus d'accrétion en zone intertidale et érodabilité								2					
Rendements des cultures													
Utilisation de la technologie													

Notes

- 1 La récupération territoriale requiert une surveillance des mesures de protection employées telles que les brise-lames et les digues (voir aussi les conditions en matière de suivi qui sont pertinentes pour ces structures)
- 2 Si la réduction de l'érosion est un objectif du projet
- 3 Si la création ou l'amélioration d'un habitat est un objectif du projet
- 4 Concernant les mesures individuelles de protection contre les crues

Les études topographiques sont importantes pour définir les dimensions des projets de construction des dunes de sable. Il est important que les dunes aient un volume et un poids suffisant pour résister à l'érosion durant les tempêtes. Le volume de sable requis peut-être calculé via l'équation Vellinga (1983) cf. section 4.1.2). Les études topographiques permettront d'identifier si une addition de sable est nécessaire ou si les dunes limitent l'accès à la plage ou aux vues côtières.

Les études topographiques sont également nécessaires afin de surveiller les plages et les fonds marins adjacents aux structures de protections des côtes (CIRIA, 1996). Ces études permettent d'identifier les problèmes tels que l'érosion des plages et l'affouillement. Les niveaux des marées doivent être soigneusement contrôlés puisque l'affouillement peut entraîner des problèmes structurels et une instabilité.

Les études topographiques sont également utiles lors du règlement de revendications territoriales, spécialement lorsque des côtes altimétriques minimales ont été effectuées. Un suivi continu permettra d'assurer que les terres sont assez éloignées du dessus du niveau de la mer afin de prévenir les inondations. Ce dernier élément est particulièrement important puisque la phase de post-construction, le tassement des sédiments et la RSLR sont susceptibles de conduire à une diminution des élévations de terrain.

Enfin, lors de la mise en œuvre de recul stratégique, les études topographiques permettent généralement de révéler quels sites présentent des risques d'érosion. Cela permet d'évaluer si les conditions sont réunies pour le développement de certains habitats.

Relevés bathymétriques

Les relevés bathymétriques et les relevés topographiques sont souvent entrepris au même moment. Lorsque c'est le cas, ces études devraient être intégrées de manière à se recouper entre les basses et hautes eaux et à avoir les mêmes référentiels. Ainsi, une cartographie de la forme du profil de la plage peut être réalisée, allant de la partie apparente de la plage jusqu'à la profondeur de fermeture.

Les relevés bathymétriques sont une des conditions essentielles pour le suivi des projets de rechargement de plages, permettant l'estimation du volume total de sédiments nécessaires. Cela présente un certain nombre d'avantages, comme souligné dans la section concernant les relevés topographiques.

Les relevés bathymétriques sont également importants lors de la mise en œuvre d'ouvrages de défense comme les digues. En surveillant le profil de la partie de la plage immergée, il est possible d'identifier différents problèmes comme l'abaissement de la plage et l'affouillement. Ces phénomènes sont un signe de l'érosion et peuvent causer des instabilités structurelles.

La position du littoral

Le suivi de la position du littoral peut fournir une indication sur l'évolution de l'environnement de la plage au fil du temps. Cela donne également des informations sur les taux d'érosion et d'accrétion, données importantes pour l'évaluation des projets visant à réduire ces taux.

Pour les zones de retrait, le suivi de la position du littoral est important puisque cela fournit des informations sur les tendances de l'érosion et aide à évaluer si les distances minimales imposées procurent une protection suffisante. Ce suivi permet également de donner des indications sur la longévité réelle de la zone de retrait par rapport à celle prévue initialement. Par exemple, lorsque le littoral recule plus vite que prévu, la longévité de la zone de retrait telle qu'elle a été fixée est également réduite. Dans

ce cas de figure, les distances minimales imposées devront être réévaluées en se fondant sur ces nouvelles tendances.

Les inondations

Concernant la cartographie des risques d'inondation et les systèmes d'alerte, comparer l'occurrence et l'ampleur des inondations par rapport aux prévisions fournies par les modèles procure une validation importante des méthodes utilisées. Cela permet également de partager certains commentaires ce qui améliorera l'exactitude des prévisions et des alertes aux inondations dans le futur.

De même, le contrôle du niveau des eaux côtières fournit des informations utiles pour valider les prévisions et les modèles utilisés pour déterminer les distances de sécurité.

Les études écologiques

Les études écologiques peuvent être importantes si la création d'habitats ou leur amélioration est un objectif du projet. De telles études devraient devenir de plus en plus indispensables lorsqu'il s'agit de mettre en œuvre des technologies là où l'écologie est capable de pourvoir également à la protection des côtes. Les marais salants, par exemples, atténuent l'énergie des vagues, stabilisent les zones intertidales et contribuent par conséquent à leur prospérité.

Les études écologiques se concentrent généralement sur des espèces de plantes ou d'animaux importantes au niveau local qui sont définies selon les objectifs du projet. Par exemple, l'usage de la plage par les tortues de mer et des oiseaux nicheurs est observé après le rechargement tandis que les types de marais et les espèces de mangroves feront l'objet d'une surveillance plus pertinente pour les projets de restauration des zones humides.

Les études peuvent faire une recherche sur les différents types de plantes et le pourcentage de surface recouverte ainsi que le nombre et les espèces d'animaux vivant sur le site du projet. Dans le cas de l'agriculture flottante, les études peuvent se concentrer sur la réduction des herbes aquatiques comme la jacinthe d'eau. Si le projet a identifié parmi ses objectifs une espèce spécifique qui nécessite d'être soutenue, les études pourraient se concentrer sur cette espèce et ses besoins en habitat.

Intégrité structurelle

Un suivi régulier des structures est requis pour toutes les options de défense dures. Cela permet de s'assurer que les structures continuent de fournir le niveau de protection prévu au moment de leur conception. Le contrôle de la structure permet également la programmation de travaux de réparation et une évaluation du rendement des systèmes à long terme. La fréquence des contrôles est recommandée par le CIRIA comme suit (1996), et ils devraient être effectués à une fréquence au moins similaire dans les pays en voie de développement :

- Immédiatement après leur construction afin de fournir des mesures de référence
- Immédiatement après des événements météorologiques extrêmes
- Annuellement pour tous les différents éléments de la zone intertidale
- Tous les 5 ans pour les éléments immergés

Un suivi des structures devrait non seulement comprendre une inspection visuelle des systèmes lorsque le niveau des eaux est bas mais devrait aussi prêter attention aux joints de construction ainsi qu'aux points où la structure est susceptible d'être fragilisée par les impacts des vagues. Les structures doivent être inspectées dans les moindres détails (CIRIA, 1996).

Pour les digues, Il est particulièrement important de surveiller les faiblesses des structures sur leurs faces maritimes et terrestres. Les inspecteurs devraient, par exemple, faire particulièrement attention aux trous de rongeurs et autres discontinuités sur la partie externe de la structure. Si ces problèmes ne sont pas identifiés et réparés, l'action des vagues pourrait compromettre le fonctionnement du système. Les degrés d'inclinaison des deux faces, les détails liés à la base, les revêtements imbriqués, la perméabilité et la stabilité sont autant d'éléments essentiels à la stabilité des ouvrages de défense (de Quelerij & van Hijum, 1990). Une attention particulière devrait également être accordée à l'écoulement, la saturation de la digue en eau pouvant conduire à la défaillance de la pente terrestre de la structure.

Il est important de surveiller la hauteur de la structure car un tassement peut mener à une baisse de la hauteur de crête ce qui aura pour conséquence de diminuer le standard de protection offert par les structures.

Les structures qui ont des éléments mobiles, comme les barrières de protection contre les ondes de tempête, doivent être fermées régulièrement afin de vérifier la corrosion, le bon déplacement de la structure ainsi que sa base étanche.

Concernant les mesures de protection contre les crues, les propriétaires sont chargés d'effectuer un suivi des conditions et de la fonctionnalité des mesures de protection, par exemple concernant les barrières et les revêtements étanches, afin de s'assurer qu'elles demeurent opérationnelles.

L'affouillement et les changements morphologiques

Les barrières anti-tempête, les barrages de retenue, les projets de récupération territoriale et les plans de recul stratégique sont des projets de grande envergure qui peuvent causer des changements considérables et permanents sur les environnements dans lesquels ils sont employés. Par exemple, les projets de récupération de terres peuvent intercepter le transport de sédiments, causant ainsi l'érosion des parties du littoral adjacentes alors que les barrages sont eux susceptibles d'altérer de manière permanente les espaces situés en amont. Ces changements devraient être surveillés afin que les impacts potentiellement nuisibles puissent être rectifiés ou limités.

Certaines technologies d'adaptation pourraient également causer des modifications à l'emplacement et aux caractéristiques du débit des voies d'apport d'eau vers la mer. Par exemple, les barrières anti-tempête peuvent inclure des jetées ou des pans de murs massifs. Ces structures peuvent altérer le débit et la vitesse de l'eau provoquant ainsi des affouillements et des conséquences négatives sur l'environnement. Ainsi, il est essentiel de surveiller ces changements afin de rectifier ou de limiter les dommages.

La conformité avec la réglementation sur la protection contre les inondations

Une politique de gestion des risques d'inondation implique d'établir un contrôle sur la conformité avec les réglementations contre les inondations et leurs orientations. Ceci est particulièrement vrai lors de la construction mais doit aussi être évalué lorsque des améliorations sont effectuées sur les infrastructures.

Les processus d'accrétion et d'érodabilité en zone intertidale

La sédimentation et l'érosion sont des processus très importants pour une zone intertidale en ce qu'ils contrôlent le lit et ainsi la couverture végétale. Ces phénomènes pouvant influencer la présence de végétation, ils sont donc en mesure d'influer sur la forme globale d'un site de projet de restauration ou de réaligement. Ainsi, le suivi du processus d'accrétion et de l'érodabilité en zone intertidale est une condition importante pour de tels projets. Les variations de la vitesse de flots jouant également un rôle important dans la définition des taux de sédimentation et d'érosion, il peut se révéler profitable de surveiller également cet aspect.

L'accrétion, l'érodabilité et les vitesses de flots peuvent être surveillées à l'emplacement du projet et dans les zones avoisinantes. Une telle approche permet de quantifier les impacts du projet dans un environnement plus vaste.

Rendements des cultures

Le suivi du rendement des cultures est essentiel uniquement pour l'agriculture flottante. Cela est dû au fait que l'objectif majeur de ces systèmes est de fournir des moyens plus efficaces de production alimentaire que les moyens agricoles terrestres traditionnels.

L'application des technologies

Contrôler l'application des différentes options d'adaptation est essentiel pour les mesures de protection contre les inondations et pour l'agriculture flottante. Si les communautés locales ne parviennent pas à utiliser les différentes technologies disponibles comme celles présentées ici, elles ne pourront en tirer aucun avantage.

4.5.2 Les technologies requises en matière de suivi

Les outils de suivi et les techniques utilisées pour mettre en place chacune de ces modalités de surveillance sont décrits dans le tableau 4.15.

Tableau 4.15: Techniques et outils spécifiques utilisés pour le suivi des différentes plans d'adaptation

Description générale	Techniques et outils spécifiques
Relevé topographique	Méthodes au sol: - Méthodes de nivellement traditionnelles Tachéomètres ¹ GPS différentiel (dGPS)² Scanners laser terrestres Méthodes aériennes - LiDAR (détection et télémétrie par ondes lumineuses) - Photogrammétrie - Radars à synthèse d'ouverture (SAR)

Contd...

Description générale	Techniques et outils spécifiques
Relevé bathymétrique	Méthodes depuis un bateau - Echosondeur à simple faisceau - Echosondeur à multiples faisceaux - GPS différentiel (dGPS) Méthodes aériennes - LiDAR
Etude par point côté	- GPS cinématique mesurant à intervalles réguliers depuis la plage la surface de MLWS
Position du littoral	- Photographies à ratio d'aspect fixe - Photographies aériennes - Cartographie du littoral - Relevés topographiques et bathymétriques
Fréquence et intensité des inondations	- Tenue d'un registre des données des marées et des jauges des rivières - Cartographie de l'ampleur et de la durée d'événements météorologiques passés
Niveaux d'eau (Côtes et rivières)	- Marégraphes - Stations de jaugeage de rivière
Etude écologique	- Photographies aériennes - Etude des oiseaux et leur recensement - Etude des poissons et leur recensement - Le relevé des invertébrés et leur recensement - Photographie à ratio d'aspect fixe - La méthode des points quadrats alignés - Echantillonnage aléatoire
Intégrité structurelle	- Inspections régulières (particulièrement à marée basse): • Inspection du réseau de drainage • Recherche de trous, d'animaux fouisseurs etc. - Tests réguliers de fermeture des barrières amovibles
Affouillement et changements morphologiques	Affouillement - Relevés topographiques - Relevés bathymétriques Vitesse des courants - ADCP - Débitmètre - Débitmètre électromagnétique Changements morphologiques - Images aériennes (et autres photographies) - Exercices de cartographie

Contd...

Description générale	Techniques et outils spécifiques
Conformité aux réglementations	Inspection des structures
Processus d'accrétion et degré d'érosion en zone intertidale	Accrétion - Horizons marqueurs artificiels - Tableaux érosion-sédimentation (Boumans & Day, 1993) - Fosse à sédiments - Traceur de la sédimentation - Relevés topographiques - Horizons et dates Erodabilité - Mesurer la force d'érosion d'un site en utilisant un préleveur de sédiments en suspension, un appareil de rétrodiffusion et un anémomètre Surveillance du débit - Traceurs hydrologiques colorants - Ancre flottante - Débitmètre - Débitmètre électromagnétique - Courantomètres acoustiques à effet Doppler ou ADCP
Utilisation de la technologie	- Inspection des structures - Enquêtes communautaires

Notes

1. Un outil de sondage qui combine un théodolite électronique et un mesureur de distance électronique pour déterminer les distances et les angles depuis un certain point.
2. Un GPS amélioré qui utilise une station de base fixe à un point donné pour aider à identifier la location d'un récepteur mobile.

5. Hiérarchisation des technologies et des pratiques

Après que la vulnérabilité d'un site aux effets du changement climatique a été analysée et les potentielles technologies d'adaptation identifiées, celles-ci doivent être ensuite hiérarchisées. Cette étape survient durant les phases de planification et de conception des stratégies d'adaptation des côtes (cf. Section 3.1). La comparaison et la sélection entre les différentes options nécessitent un cadre décisionnel. Ce cadre est nécessaire pour évaluer tous les coûts, bénéfices et impacts physiques et environnementaux des diverses options d'adaptation sur l'ensemble du site et durant toute la durée du projet (Pearce & Turner, 1992; MAFF, 2001). En effet, peu de plans d'adaptation des côtes ont des impacts limités au niveau local et à court terme. Ainsi, ils ne peuvent pas être considérés de manière isolée.

Trois cadres décisionnels sont majoritairement utilisés de nos jours. Ils ont tous trois été recommandés par les Programmes d'action nationaux d'adaptation (PANA) dans des circonstances appropriées (CCNUCC, 2002):

1. L'analyse coût-avantages (CBA): une analyse de tous les coûts et bénéfices des options alternatives (cf. par exemple, Penning-Rowsell et al., 2003; DCLG, 2009)
2. L'analyse coûts-efficacité (CEA): une évaluation des coûts des options alternatives qui ont les mêmes objectifs. Les coûts ne doivent pas seulement être limités aux coûts purement financiers (cf. par exemple, DCLG, 2009).
3. L'analyse multicritère (MCA): une évaluation comparative des options en tenant compte simultanément de différents critères. La MCA est principalement utilisée pour évaluer les impacts qui ne peuvent pas être aisément quantifiés sur le plan monétaire (cf. par exemple, NI Direct, 2007)

Les évaluations économiques CBA ou CEA tentent de convertir tous les coûts et les bénéfices sur le plan monétaire. Cela permet d'atteindre des objectifs tels que l'optimisation de l'argent public, la viabilité, la responsabilité et l'assurance de la qualité (MAFF, 1999). Cependant, certains des impacts ne peuvent pas être quantifiés facilement en termes économiques, tandis que d'autres ne sont pas mis en valeur de manière juste avec une analyse économique (MAFF, 1999). Par conséquent l'approche MCA a tendance à influencer de plus en plus les modèles CBA et CEA, bien que les critères économiques demeurent prédominants.

Pour le modèle CBA, les coûts du plan englobent probablement la conception, la construction, la maintenance ainsi que les coûts de suivi du projet. Les principaux bénéfices seront la diminution des dégâts causés par les inondations et l'érosion des côtes. Cependant, il est probable que la CBA ait des difficultés à inclure les quantités les moins tangibles comme les pertes humaines ou les dépenses de santé à long terme des personnes touchées par les inondations ou l'érosion (Sene, 2008). En matière de gestion du littoral, certains facteurs comme l'impact sur le budget sédimentaire en aval sont essentiels ; or, il est probable que des termes monétaires ne reflètent pas suffisamment leur importance. En pratique, il est même assez peu réaliste d'évaluer tous les coûts et les bénéfices des options en ces termes. Ainsi, la plupart des analyses de rentabilité devront intégrer des éléments supplémentaires qui sont soit impossibles à estimer, soit en termes non économiques (DCLG, 2009). Cette approche est la norme au Royaume-Uni et aux Etats-Unis.

La CEA peut être utilisée dans les cas où l'objectif général a été fixé mais que les moyens pour y parvenir sont encore incertains. Il est par exemple pertinent d'utiliser la CEA si une procédure juridique est nécessaire pour atteindre un résultat ou si une option a été justifiée par une procédure normale d'évaluation et qu'une intervention (comme un investissement dans un remplacement équivalent) est requise pour continuer à délivrer cette option (DEFRA, 2009). La CEA est essentiellement utilisée pour évaluer le moyen le moins coûteux de réaliser un objectif précis (DCLG, 2009). Cette approche est appliquée en Allemagne et en Hollande où les normes de défense sont fixées par la loi.

La MCA est un cadre décisionnel qui utilise un outil connu sous le terme de grille de mesure des résultats. Chaque ligne de cette grille décrit une option et chaque colonne les résultats par rapport à chacun des critères. L'évaluation des résultats individuels est souvent numérique mais ils peuvent aussi être exprimés avec des puces ou par un codage de couleur (DCLG, 2009). En utilisant cette approche, une large gamme d'avantages et d'inconvénients monétaires et non-monétaires peuvent être directement comparés et pondérés selon leurs importances.

La MCA ne prend pas en considération les arguments économiques de manière aussi détaillée que la CBA et la CEA. Elle est donc plus subjective par rapport à la façon dont les décisions sont arrêtées, bien que cette approche puisse aussi être combinée avec des analyses économiques (Sene, 2008). L'avantage de la MCA est qu'elle tient compte des impacts sociaux et environnementaux importants qui ne s'expriment pas aisément en termes monétaires, la mesure des indicateurs n'étant pas limitée à cet aspect.

La technique de la MCA peut être utilisée pour identifier une option à privilégier, classer les options, établir une liste de présélection pour une évaluation approfondie ou tout simplement distinguer quelles sont les options acceptables et celles qui sont irrecevables (DCLG, 2009). L'objectif est de déterminer les résultats d'un certain nombre d'options par rapport aux différents critères établis par une communauté afin de choisir la meilleure approche.

Certains des critères qui pourraient s'avérer importants dans la définition des options d'adaptation les plus efficaces pour faire face aux inondations et à l'érosion sont présentés dans le tableau 5.1. Le poids donné à ces différents critères varie selon leur application selon les choix faits par les acteurs concernés.

Le chapitre 4 a déjà souligné les connaissances et le degré d'expertise requis pour chaque stratégie d'adaptation. De plus, les avantages et inconvénients ont également été présentés. La MCA fournit un cadre conceptuel dans lequel ces facteurs très variés peuvent être évalués par rapport à un environnement et des besoins locaux. Une combinaison des trois cadres décisionnels présentés ici est probablement la meilleure solution pour identifier les moyens les plus efficaces pour faire face aux effets du changement climatique dans les zones côtières.

Des trois approches présentées, la CBA est à même d'assumer une priorisation et une optimisation des options. En utilisant cette méthode, il n'est même pas nécessaire d'évaluer les options potentielles l'une par rapport à l'autre. La limite de cette méthode réside dans le fait que coûts et bénéfices doivent être exprimés en terme monétaire et que son objectif final est l'efficacité économique. A l'inverse, la MCA permet seulement de classer les différentes alternatives. Cependant, ce modèle est davantage capable d'évaluer les mesures pour lesquels de nombreux critères sont jugés pertinents, et lorsque la quantification et l'estimation de la valeur ne sont pas possibles en termes monétaires. Enfin, la CEA est une méthode qui se situe entre les approches CBA et MCA. Elle permet principalement d'étudier le coût des options qui réalisent le même objectif. Comme la MCA, l'approche CEA peut aussi traiter les options ayant des objectifs ou des critères multiples (CCNUCC, 2002).

Pour plus d'informations, il est conseillé aux utilisateurs de se référer à la CCNUCC (2002) à l'annexe D, pour une étude de ces méthodes dans le contexte des PANA. Des exemples de projets concernant des zones côtières et entrepris dans le cadre des PANA sont fournis dans la CCNUCC (2008).

Tableau 5.1: Critères potentiellement importants pour déterminer l'efficacité de l'adaptation aux inondations et à l'érosion des côtes

Critères
Coût total du plan
Quels avantages présentent la diminution des inondations/érosion
Effet sur l'économie locale
Conséquences pour l'approvisionnement en sédiments en aval des structures de défense
Impacts sur les habitats intertidaux
Effets sur le tourisme
Efficacité fonctionnelle
Exigence de durabilité/maintenance
Viabilité sur le long terme
Facilité de construction
Flexibilité par rapport au changement climatique
Impacts sur la faune et la flore
Degré de connaissances et de matériel techniques requis
Accès au littoral
Acceptation du projet au niveau social
Espace requis
Equité
Connaissances et capacités requises

6. Conclusion

Ce livret a été réalisé dans le but d'aider les pays en développement à évaluer leurs besoins et préparer leurs plans d'action concernant le développement, la diffusion et le déploiement d'une série de technologies d'adaptation permettant de gérer le changement climatique dans les zones côtières.

Pour ce faire, les auteurs présentent 13 technologies dans le cadre du sous-groupe en charge de la gestion des zones côtières du GIEC (IPCC CZMS, 1990) selon trois axes stratégiques : protéger, faire des compromis et se replier. Il convient ici de souligner que les méthodes présentées dans ce livret ne représentent pas un catalogue exhaustif des options d'adaptation du littoral, mais plutôt une sélection des technologies les plus utilisées et discutées aujourd'hui. Il est possible de les mettre en œuvre individuellement ou conjointement avec d'autres technologies complémentaires pour développer une série de mesures. Ces 13 technologies peuvent donc donner lieu à un nombre bien plus large de combinaisons.

Il est recommandé d'opérer les décisions relatives à l'adaptation, et notamment le choix des technologies à mettre en œuvre, dans le cadre de la gestion intégrée de la zone côtière (ICZM, acronyme anglais), comme d'autres l'ont formulé par le passé (cf. Bijlsma et al., 1996; Cicin-Sain et Knecht, 1998; Klein et al., 2001; Kay et Alder, 2005). Une telle approche fournit une plateforme où sont prises en considération une série d'options d'adaptation disponibles et où un grand nombre de parties prenantes sont impliquées dans les prises de décision concernant le littoral. Celle-ci devrait être utile à la gestion des côtes concernant les problèmes climatiques ou autres, et promouvoir l'adaptation en tant que processus et non une finalité (voir chapitre 3).

Dans ce livret, chacune des 13 technologies sont définies et décrites, et leurs principaux avantages et inconvénients au niveau technologique discutés. Des informations sur les besoins de capacité institutionnelle et organisationnelle sont ensuite données, accompagnées des données sur les coûts si disponibles, et une présentation sur les obstacles et possibilités de mise en œuvre. Des études de cas où ces technologies/pratiques ont été employées accompagnent ces informations. Les exemples proviennent autant que possible de pays en développement, bien qu'il faille souligner que de tels cas pertinents ne sont pas toujours disponibles en raison du manque d'expérience et/ou de documentation de ces pays. Il est à espérer que ce livret entrainera la réalisation de projets d'adaptation plus nombreux dans les pays en développement et la disponibilité de plus de documentation à leur sujet.

Pour chaque technologie, les connaissances et capacités nécessaires à leur mise en œuvre ont été traitées. Certains besoins récurrents ont émergé, tels que la connaissance des scénarios d'élévation relative du niveau de la mer (RSLR, acronyme anglais), des niveaux d'eau extrêmes, du régime des vagues local, du régime des marées, de la bathymétrie à proximité du littoral ainsi que du niveau potentiel de crues dans la localité. La nécessité d'établir un suivi de ces projets a également été soulignée et, à nouveau, des informations récurrentes ont émergé. Celles-ci comprennent le besoin de relevés topographiques et bathymétriques et des enquêtes sur l'intégrité des structures.

Les auteurs ont ensuite présenter trois cadres pour la prise de décision: l'analyse coût-bénéfice (CBA, acronyme anglais), l'analyse coût-efficacité (CEA, acronyme anglais) et l'analyse multicritère (MCA, acronyme anglais). Ces méthodes sont utilisées pour comparer et sélectionner les options d'adaptation

qu'il est possible de mettre en œuvre. Il est reconnu que, bien que les évaluations économiques comme la CBA et la CEA soient de plus en plus influencées par l'approche de la MCA, les critères économiques prévalent aujourd'hui dans les prises de décision.

Si nombre des technologies peuvent être mises en œuvre au niveau local, les communautés souffrent souvent d'un manque de capacité technique qui leur permettrait de déterminer quelles sont les mesures adéquates et les normes de construction acceptables. Ceci est une problématique récurrente pour toutes les technologies. Ce manque de connaissances risque également de se traduire par des répercussions environnementales négatives au-delà du site de projet. Cela est dû au fait que les systèmes côtiers sont reliés par des échanges d'eau et de sédiments. Ainsi la mise en œuvre d'un projet d'adaptation à un endroit peut affecter le système côtier de manière plus globale dans des dimensions souvent sous-estimées et mal anticipées. C'est pourquoi, même si les méthodes d'adaptation sont techniquement possibles à mettre en place au niveau communautaire, l'accès à un soutien technique et une assistance de la part d'organisations ayant un niveau scientifique et une base technologique avancés est susceptible d'être fortement bénéfique pour les communautés. Développer une capacité d'assistance technique accessible au sein des pays en développement répondrait ainsi à ces recommandations.

Il a été observé que les contextes dans lesquels la stratégie d'adaptation est mise en application ont un poids important dans le succès des interventions. Historiquement, l'adaptation des côtes s'est faite de manière localisée, ce qui est encore souvent le cas aujourd'hui, notamment dans les pays en développement. Cependant, l'approche moderne des pays ayant une longue expérience d'ingénierie côtière implique une stratégie pluridisciplinaire et des mesures de planification sur le long terme concernant de larges étendues du littoral. En Angleterre et au Pays de Galles par exemple, les cellules et sous-cellules côtières ont été utilisées comme point de départ pour la planification nationale de gestion du littoral (Leafe et al., 1998 ; DEFRA, 2006), une stratégie qui a été largement préconisée (Klein et al., 2000 ; Eurosion, 2004). En essayant de développer et d'appliquer un cadre régional pertinent, il est à espérer que les pays en développement puissent éviter certaines erreurs coûteuses que les pays développés ont expérimenté avant eux dans la gestion des côtes.

Tandis qu'un certain nombre de technologies d'adaptation spécifiques ont été présentées dans ce livret, il est important de souligner qu'une stratégie efficace ne consiste pas uniquement à la mise en œuvre de l'une de ces méthodes. Une adaptation réussie implique un processus d'information et de sensibilisation, de planification et de conception, de mise en œuvre et d'évaluation. Cela permet de garantir que les technologies les plus adéquates sont appliquées, que leur conception est efficace et qu'elles sont évaluées et ajustées par rapport aux conditions du changement climatique (et aux besoins socioéconomiques), afin de continuer à fournir l'adaptation la plus pertinente possible dans un futur incertain.

7. Références

ABPMER (Associated British Ports Marine Environmental Research) (2010a) Abbots Hall (Stage 2). Southampton: ABPMER. Disponible sur le site Internet: <http://tiny.cc/59f7o> [Consulté en ligne le 05/08/10].

ABPMER (Associated British Ports Marine Environmental Research) (2010b) The Online Managed Realignment Guide: Details for Abbots Hall Stage 2. Southampton: ABPMER. Disponible sur le site Internet: www.abpmer.net/omreg/index.php?option=com_wrapper&Itemid=57 [Consulté en ligne le 05/08/10].

ADRC (Centre asiatique de prévention des catastrophes) (2005) Total Disaster Risk Management – Good Practices 2005. Kobe: ADRC. Disponible sur le site Internet: <http://tiny.cc/2cis5> [Consulté en ligne le 04/08/10].

AFPM (Adviescommissie Primaire Waterkeringen) (2006) Tussensprint naar 2015 – advies over de financiering van primaire waterkeringen voor de bescherming van Nederland tegen overstromingen (en néerlandais).

Allen, J.R.L. et Pye, K. (1992) Coastal saltmarshes: their nature and importance in Allen, J.R.L. et Pye, K. (éd.). Saltmarshes: Morphodynamics, Conservation and Engineering Significance. Cambridge: Cambridge University Press, 1-18.

Alongi, D.M. (2002) Present state and future of the world's mangrove forests. *Environmental Conservation*, 29 (3), 331-349.

Anderson, I. (1991) Land reclamation poisons coastal waters. *New Scientist*, 1797, p 11.

APEIS et RIPSO (2004) Floating Agriculture in the flood-prone or submerged areas in Bangladesh (Southern regions of Bangladesh). Bangladesh: APEIS et RIPSO. Disponible sur le site Internet: <http://enviroscope.iges.or.jp/contents/APEIS/RISPO/inventory/db/pdf/0146.pdf> [Consulté en ligne le 22/07/10].

Awosika, L., Dublin-Green, C.O. et Folorunsho, R. (2002) Bar Beach Victoria Island Erosion Problem: A Critical Assessment as at October 30th 2002 and Need for Urgent Mitigating Measures. Lagos: Nigerian Institute for Oceanography and Marine Research. Disponible sur le site Internet: www.oceandocs.org/bitstream/1834/540/1/AssWA_BB2002.pdf [Consulté en ligne le 01/09/10].

Bapulu, G.V. et Sinha, R. (2005) GIS in Flood Hazard Mapping: a case study of Kosi River Basin, India. Noida: GIS Development. Disponible sur le site Internet : http://home.iitk.ac.in/~rsinha/PDF's/2006_FloodGISdevelopment.pdf [Consulté en ligne le 21/07/10].

Barbier, E.B. (2008) In the wake of tsunamis: Lessons learned from the household decision to replant mangroves in Thailand. *Resource and Energy Economics*, 30, 229–249.

Barends, F.B.J. (2003) Groundwater mechanics in flood risk management in Kono, I., Nishigaki, M. et Komatsu, M. (éd.). *Groundwater Engineering: Recent Advances*. Rotterdam: A.A. Balkema, 53-66.

Bermingham, S., Ferretti, J., King, L., Kinniment, D., Ryan, C., Tidmarsh, C., Totterdell, R., Yates, G., Flintoff, I., Owen, A. et Digby, B. (2000) *Changing Environments*. Oxford: Heinemann Educational Publishers.

Bijlsma, L., Ehler, C.N., Klein, R.J.T., Kulshrestha, S.M., McLean, R.F., Mimura, N., Nicholls, R.J., Nurse, L.A., Péres Nieto, H., Stakhiv, E.Z., Turner, R.K. et Warrick, R.A. (1996) Coastal zones and small islands in Watson, R.T., Zinyowera, M.C. et Moss, R.H. (éd.). *Climate Change 1995 – Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.

Bindoff, N.L., J. Willebrand, V. Artale, A. Cazenave, J. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, C. Le Quéré, S. Levitus, Y. Nojiri, C.K. Shum, L.D. Talley et A. Unnikrishnan (2007) Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level in Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor et H.L. Miller (éd.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.

Bird, E. (2005) Appendix 5: Glossary of Coastal Geomorphology in Schwartz, M.L. (éd.). *Encyclopedia of Coastal Science*. Pays-Bas: Springer, 1155-1192.

Boumans, R.M.J. et Day, J.W. (1993) High precision measurements of sediment elevation in shaloo coastal areas using a sedimentation-erosion table. *Estuaries*, 16 (2), 375-380.

Brampton, A.H. (1992) Engineering significance of British saltmarshes in Allen, J.R.L. et Pye, K. (éd.). *Saltmarshes: Morphodynamics, conservation and engineering significance*. Cambridge: Cambridge University Press, 115-122.

Brampton, A. (2002) *ICE Design and Practice Guides: Coastal Defence*. Londres: Thomas Telford.

- Brøgger, C. et Jakobsen, P. (2008) Beach nourishment combined with SIC vertical drain in Malaysia in McKee Smith, J. (éd.). Coastal Engineering 2008, Hamburg, 31 août– 5 septembre 2008. Singapour: World Scientific Publishing, 4725-4737.
- Bruun, P. (1962) Sea level rise as a cause of shore erosion. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of Waterways and Harbors Division, 88, 117-130.
- Burgess, K. et Townend, I. (2004) The impact of climate change upon coastal defence structures. 39th DEFRA Flood and Coastal Management Conference, University of York, UK, 29 juin-1 juillet 2004.
- Burgess, K., Jay, H. et Nicholls, R.J. (2007) Drivers of coastal erosion in Thorne, C.R., Evans, E.P. et Penning-Rowell, E.C. (éd.). Future Flooding and Coastal Erosion Risks. Londres: Thomas Telford, 267-279.
- Bush, D.M., Neal, W.J., Longo, N.J., Lindeman, K.C., Pilkey, D.F., Esteves, L.S., Congleton, J.D. et Pilkey, O.H (2004) Living with Florida's Atlantic Beaches: Coastal Hazards from Amelia Island to Key West. USA: Duke University Press.
- Cambers, G. (1998) Planning for Coastline Change: Coastal Development Setback Guidelines in Antigua and Barbuda. Paris: UNESCO. Disponible sur le site Internet: <http://tiny.cc/j5va7> [Consulté en ligne le 19/08/10].
- Chadwick, A., Morfett, J. et Borthwick, M. (2004) Hydraulics in Civil and Environmental Engineering, 4th éd. Londres: Spon Press.
- Chagoury Group(2006) Bar Beach– Shore Protection. Lagos: The Chagoury Group. Disponible sur le site Internet: www.chagouryconstruction.com/barbeach.html [Consulté en ligne le 01/09/10].
- Cicin-Sain, B. et Knecht, R. (1998) Integrated Coastal and Ocean Management Concepts and Practices. Washington DC: Island Press.
- CIRIA (Construction Industry Research and Information Association) (1996) Beach Management Manual. CIRIA Report 153. Londres: Construction Industry Research and Information Association.
- Coastal Carolina University (2010) Oceans in Motion: Waves and Tides. Carolina: Kingfish. Disponible sur le site Internet: <http://kingfish.coastal.edu/biology/sgilman/770Oceansinmotion.htm> [Consulté en ligne le 07/07/10].
- Coastal Research (2010) Glossary. Utrecht: Utrecht University. Disponible sur le site Internet: www.coastalresearch.nl/glossary/5/view [Consulté en ligne le 19/08/10].
- ComCoast (2006) Innovative flood management solutions and spatial development - A wider approach in coastal management. Delft (Pays-Bas): Rijkswaterstaat.
- Cooper, N.J. et Harlow, D.A. (1998) Beach replenishment: implications for sources and longevity from results of the Bournemouth schemes in Hooke, J. (éd.). Coastal Defence and Earth Science Conservation. Londres: Société géologique de Londres, 162-177.
- CZMU (Unité de gestion des côtes de la Barbade) (2005) Guidelines for the assessment of planning applications. La Barbade: CZMU. Disponible sur le site Internet: http://www.coastal.gov.bb/UserFiles/File/GUIDELINES_for_the_ASSESSMENT_OF_PLANNING_APPLICATIONS.doc [Consulté en ligne le 29/09/10].
- CZMU (Unité de gestion des côtes de la Barbade) (2010) What are the Coastal Setbacks? La Barbade: CZMU. Disponible sur le site Internet: www.coastal.gov.bb/info.cfm?category=2&catinfo=9 [Consulté en ligne le 29/09/10].
- Daniel, E.B. et Abkowitz, M.D. (2005) Improving the Design and Implementation of Beach Setbacks in Caribbean Small Islands. URISA Journal, 17 (1), 53-65.
- Dawson R.J., Dickson, M., Nicholls, R. J., Hall, J., Walkden, M., Stansby, P.K., Mokrech, M., Richards, J., Zhou, J., Milligan, J., Jordan, A., Pearson, S., Rees, J., Bates, P.D., Koukoulas, S. et Watkinson, A. (2009) Integrated analysis of risks of coastal flooding and cliff erosion under scenarios of long term change. Climatic Change, 95, 249-288.
- DCLG (Département des communautés et des autorités locales) (2009) Multi-Criteria Analysis: A Manual. Londres: DCLG. Disponible sur le site Internet: www.communities.gov.uk/documents/corporate/pdf/1132618.pdf [Consulté en ligne le 26/08/10].
- de Lacerda, L.D. (2002) Mangrove Ecosystems: Function and Management. Berlin: Springer.
- de Quelerij, L. et van Hijum, E. (1990) Maintenance and monitoring of water retaining structures in Pilarczyk, K.W. (éd.). Coastal Protection. Rotterdam: A.A. Balkema, 369-401.
- Dean, R.G. (2002) Beach Nourishment Theory and Practice. Singapour: World Scientific Publishing.
- Dean, R.G. et Dalrymple, R.A. (2002) Coastal Processes with Engineering Applications. Cambridge: Cambridge University Press.
- DEFRA (Dept. for Environment, Food and Rural Affairs) (2006) Shoreline Management Plan Guidance. Volume 1: Aims and Requirements. Londres: DEFRA.
- DEFRA (Dept. for Environment, Food and Rural Affairs) (2009) Appraisal of flood and coastal erosion risk management. Londres: DEFRA. Disponible sur le site Internet: www.defra.gov.uk/environment/flooding/documents/policy/guidance/erosion-manage.pdf [Consulté en ligne le 26/08/10].

- DFID (Department for International Development) (2004) Disaster Risk Reduction: A Development Concern. Norwich: University of East Anglia. Disponible sur le site Internet: www.sheltercentre.org/sites/default/files/DFID_DisasterRiskReductionADevelopmentConcern.pdf [Consulté en ligne le 21/09/10].
- DHV Haskoning (2007) Study and review of methods and materials for closing of tidal channels in Bangladesh. Pays-Bas: DHV Haskoning. Disponible sur le site Internet: <http://edpbwdb.org/rep/tc03.pdf> [Consulté en ligne le 27/09/10].
- Doody, J.P. (2008) Saltmarsh conservation, management and restoration. Düsseldorf: Springer.
- Edge, B., Ewing, L., Erickson, K.M. et Magoon, O. (2003) Application of coastal engineering in coastal zone management in Mohan, R.K., Magoon, O. et Pirrello, M (éd.). Advances in Coastal Structure Design. Virginie: ASCE.
- Eisma, D. (2006) Dredging in Coastal Waters. Leiden: Taylor & Francis.
- Elfrink, B., Accetta, D. et Mangor, K. (2008) Shoreline Protection Scheme at Conceicao da Barra, Brasil in McKee Smith, J. (éd.). Coastal Engineering 2008, Hamburg, 31 août– 5 septembre 2008. Singapour: World Scientific Publishing, 2458-2470.
- Elgershuizen, J.H.B.W. (1981) Some environmental impacts of a storm surge barrier. Marine Pollution Bulletin, 12 (8), 265-271.
- EMA (Emergency Management Australia) (1999) Flood Warning: An Australian Guide. Canberra: Emergency Management Australia. Disponible sur le site Internet: www.ses.nsw.gov.au/multiversions/2770/FileName/Flood_warning_An_Australian_Guide.pdf [Consulté en ligne le 12/07/10].
- Environment Agency (2003) Sustainable Flood Defences – Monitoring of the Managed Realignment Scheme at Abbots Hall, Essex. Rapport non publié.
- Environment Agency (2007) Flood Risk Management Estimating Guide. Unit Cost Database 2007. Environment Agency: Bristol.
- Environment Agency (2010) Flood Map - your questions answered. Rotherham: Environment Agency. Disponible sur le site Internet: www.environment-agency.gov.uk/homeandleisure/31662.aspx [Consulté en ligne le 21/07/10].
- Ericson, J. P., Vorosmarty, C. J., Dingman, S. L., Ward, L. G., et Meybeck, M. (2006) Effective sea-level rise and deltas: causes of change and human dimension implications. Global and Planetary Change, 50, 63-82.
- Essex Wildlife Trust (2003) Abbots Hall Farm Fact Sheet 4: Consents for coastal realignment. Great Wigborough: Essex Wildlife Trust. Disponible sur le site Internet: <http://tiny.cc/w8msn> [Consulté en ligne le 05/08/10].
- Essex Wildlife Trust (2010) Abbots Hall Farm. Great Wigborough: Essex Wildlife Trust. Disponible sur le site Internet: www.essexwt.org.uk/visitor_centres/nature_reserves/abbotts_hall_farm/ [Consulté en ligne le 05/08/10].
- European Commission (1999) Towards a European Integrated Coastal Zone Management (ICZM) Strategy: General Principles and Policy Options. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. Disponible sur le site Internet: <http://ec.europa.eu/environment/iczm/pdf/vol1.pdf> [Consulté en ligne le 27/08/10].
- EuroSION (2004) Living with Coastal Erosion in Europe: Sediment and Space for Sustainability. Disponible sur le site Internet: http://www.euroSION.org/shoreline/Shoreline_management_guide_FINAL.zip [Consulté en ligne le 01/09/10].
- Evans, E., Ashley, R., Hall, J., Penning-Rowsell, E., Sayers, P., Thorne, C. et Watkinson, A. (2004) Foresight. Future Flooding. Scientific Summary: Volume II. Managing future risks. Londres: Office of Science and Technology.
- FEMA (Federal Emergency Management Agency) (1992) Repairing your flooded home. Washington DC: US Dept. of Homeland Security. Disponible sur le site Internet: <http://tiny.cc/mrzv8> [Consulté en ligne le 21/07/10].
- FEMA (Federal Emergency Management Agency) (1998) Managing Floodplain Development Through the National Flood Insurance Programme. Washington DC: US Dept. of Homeland Security. Disponible sur le site Internet: www.fema.gov/pdf/floodplain/is_9_complete.pdf#nameddest=wet-flood [Consulté en ligne le 27/07/10].
- FEMA (Federal Emergency Management Agency) (2001) Engineering Principles and Practices for Retrofitting Flood Prone Residential Structures. Washington DC: Dept. of Homeland Security.
- FEMA (Federal Emergency Management Agency) (2007) Selecting Appropriate Mitigation Measures for Floodprone Structures. Washington DC: US Dept. of Homeland Security. Disponible sur le site Internet: www.fema.gov/library/viewRecord.do?id=2737 [Consulté en ligne le 21/07/10].
- FEMA (Federal Emergency Management Agency) (2008) Floodplain Management Bulletin: Historic Structures. Washington DC: US Dept. of Homeland Security.
- FEMA (Federal Emergency Management Agency) (2009) Homeowner's Guide to Retrofitting. Washington DC: Dept. of Homeland Security. Disponible sur le site Internet: <http://tiny.cc/kfnxq> <http://www.fema.gov/hazard/map/firm.shtm> - 1 [Consulté en ligne le 10/08/10].
- FEMA (Federal Emergency Management Agency) (2010) Wet Floodproofing. Washington DC: US Dept. of Homeland Security. Disponible sur le site Internet: www.fema.gov/plan/prevent/floodplain/nfipkeywords/wet_floodproofing.shtm [Consulté en ligne le 21/07/10].
- Fenster, M.S. (2005) Setbacks in Schwartz, M.L. (éd.). Encyclopedia of Coastal Science. Pays-Bas: Springer, 863-866.

- Finkl, C.W. (2004) Coastal classification: systematic approaches to consider in the development of a comprehensive scheme. *Journal of Coastal Research*, 20 (1), 166-213.
- French, P.W. (1997) *Coastal and Estuarine Management*. Londres: Routledge.
- French, P.W. (2001) *Coastal defences: Processes, Problems and Solutions*. Londres: Routledge.
- French, P.W. (2005) Coastal Zone Management in Schwartz, M.L. (éd.). *Encyclopedia of Coastal Science*. Pays-Bas: Springer, 313-319.
- Friedrichs, C.T., Lynch, D.R. et Aubrey, D.G. (1992) Velocity asymmetries in frictionally-dominated tidal embayments: longitudinal and lateral variability in Prandle, D. (éd.). *Dynamics and Exchanges in Estuaries and the Coastal Zone*. Washington DC: American Geophysical Union, 277-312.
- Gardiner, S., Hanson, S., Nicholls, R., Zhang, Z., Jude, S., Jones, A., Richards, J., Williams, A., Spencer, T., Cope, S., Górczynska, M., Bradbury, A., McInnes, R., Ingleby, A. et Dalton, H. (2007) *The Habitats Directive, coastal habitats and climate change - case studies from the south coast of the U.K.* Norwich: The Tyndall Centre for Climate Change Research. Disponible sur le site Internet : www.tyndall.uea.ac.uk/sites/default/files/wp108.pdf [Consulté en ligne le 13/10/10].
- Glaser, R. et Walsh, R.P.D. (1991) Land reclamation in Singapore, Hong Kong and Macau. *GeoJournal*, 24 (4), 365-373.
- Goda, Y. (2000) *Random Seas and Design of Maritime Structures*. Singapour: World Scientific Publishing.
- Hallermeier, R.J. (1981) A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. *Coastal Engineering*, 4, 253-277.
- Hanson, H., Brampton, A., Capobianco, M., Dette, H.H., Hamm, L., Laustrup, C., Lechuga, A. et Spanhoff, R. (2002) Beach nourishment projects, practices, and objectives – a European overview. *Coastal Engineering*, 47, 81-112.
- Haq, A.H.M.R., Ghosal, T.K. et Ghosh, P. (2004) Cultivating wetlands in Bangladesh. Inde: LEISA. Disponible sur le site Internet: <http://bit.ly/c3Ah0o> [Consulté en ligne le 05/08/10].
- Haq, A.H.M.R., Ghosh, P. et Islam, M.A. (2005) Wise use of wetland for sustainable livelihood through participatory approach: A case study of adapting to climate change. Bhubaneswar: Asian Wetland Symposium. Disponible sur le site Internet: <http://bit.ly/95hEqV> [Consulté en ligne le 05/08/10].
- Haque, C.E. (1995) Climatic hazards warning process in Bangladesh: Experience of, and lessons from, the 1991 April cyclone. *Environmental Management*, 19 (5), 719-734.
- Harlow, D.A. et Cooper, N.J. (1996) Bournemouth beach monitoring: the first twenty years in Fleming, C.A. (éd.). *Coastal Management: Putting Policy into Practice*. Londres: Thomas Telford, 248-259.
- Hay, J.E. (2009) *Institutional and Policy Analysis of Disaster Risk Reduction and Climate Change Adaptation in Pacific Island Countries*. United Nations International System for Disaster Reduction (UNISDR) and the United Nations Development Programme (UNDP), Suva, Fiji.
- Healy, T.R. et Dean, R.G. (2000) Methodology for delineation of coastal hazard zones and development setback for open duned coasts in Herbich, J.B. (éd.). *Handbook of Coastal Engineering*. New York: McGraw-Hill, Chapitre 19.
- Heywood, I., Cornelius, S. et Carver, S. (2006) *An Introduction to Geographic Information Systems*, 3ème éd. Harlow: Pearson Education.
- Hillen, M.M. (2008) *Safety Standards Project, Risk Analysis for New Sea Dike Design Guidelines in Vietnam*. Technical Report Delft University of Technology / Hanoi Water Resources University; Sea Dike Project.
- Hillen, M.M., Jonkman, S.N., Kanning, W., Kok, M., Geldenhuys, M., Vrijling, J.K. et Stive, M.J.F. (2010) *Coastal Defence Cost Estimates. Case Study of the Netherlands, New Orleans and Vietnam*. Pays-Bas: TU Delft. Disponible sur le site Internet: <http://tiny.cc/lwkh> [Consulté en ligne le 07/07/10].
- HiTech (2006) *Shoreline Protection*. Lagos: HiTech. Disponible sur le site Internet: www.hitech-company.com/BarBeachShorelineProtection.html [Consulté en ligne le 01/09/10].
- Hodder, J.P. (1986) *Coastal Sediment Processes in Poole Bay*, avec des références spécifiques au remplissage de la plage de Bournemouth datant 1974/75. Thèse (Master en philosophie) Université de Southampton.
- HR Wallingford (2006) *Assessing the benefits of flood warning: A scoping study*. Edimbourg: SNIFFER. Disponible sur le site Internet: <http://tiny.cc/i88jm> [Consulté en ligne le 21/07/10].
- IOC (2009) *Hazard Awareness and Risk Mitigation in Integrated Coastal Area Management (ICAM)*. Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) Manual and Guides No. 50, ICAM Dossier No. 5. Paris: UNESCO.
- IPCC CZMS (1990) *Strategies for Adaptation to Sea Level Rise*. Report of the Coastal Zone Management Subgroup, Response Strategies Working Group of the Intergovernmental Panel on Climate Change. La Haye: Ministry of Transport, Public Works and Water Management.
- IPCC CZMS (1992) *A common methodology for assessing vulnerability to sea-level rise—second revision in Global Climate Change and the Rising Challenge of the Sea*. Report of the Coastal Zone Management Subgroup, Response Strategies Working Group of the Intergovernmental Panel on Climate Change. La Haye: Ministry of Transport, Public Works and Water Management.

- Irfanullah, H. M., Adrika, A., Ghani, A. et Khan, Z.A. (2007) Introduction of Floating Gardening in the North-eastern Wetlands of Bangladesh for Nutritional Security and Sustainable Livelihood. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 23(2), 89–96.
- Islam, T. et Atkins, P. (2007) Indigenous Floating Cultivation: A Sustainable Agricultural Practice in the Wetlands of Bangladesh. *Development in Practice*, 4(1), 130–136.
- JNCC (Joint Nature Conservation Committee) (2010) *Habitat Account – Marine, Coastal and Halophytic Habitats*. Peterborough: JNCC. Disponible sur le site Internet: www.jncc.gov.uk/protectedsites/sacselection/habitat.asp?featureintcode=h1150 [Consulté en ligne le 19/08/10].
- Kamphuis, J.W. (2000) *Introduction to Coastal Engineering and Management*. Singapour: World Scientific Publishing.
- Kana, T.W. (1995) A mesoscale sediment budget for Long Island, New York. *Marine Geology*, 126, 87–110.
- Kathiresan, K., et Rajendran, N. (2005) Coastal mangrove forests mitigated tsunami. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 65, 601–606.
- Kay, R. (1990) Development controls on eroding coastlines: Reducing the future impact of greenhouse-induced sea level rise. *Land Use Policy*, 7 (4), 169–172.
- Kay, R. et Alder, J. (2005) *Coastal Planning and Management*, 2nd éd. Oxon: Taylor and Francis.
- Kim, K.H.K., Widayati, A.Y.W. et Yoon, S.J. (2008) Comprehensive approach for beach erosion mitigation in Korea in McKee Smith, J. (éd.). *Coastal Engineering 2008*, Hamburg, 31 août – 5 septembre 2008. Singapour: World Scientific Publishing, 4687–4698.
- Klein, R.J.T. et Nicholls, R.J. (1998) Coastal Zones in Feenstra, J.F. et al. (éd.). *Handbook on Methods for Climate Change Impact Assessment and Adaptation Strategies*. Kenya: UNEP, Chapitre 7.
- Klein, R.J.T., Aston, J., Buckley, E.N., Capobianco, M., Mizutani, N., Nicholls, R.J., Nunn, P.D., Ragoonaden, S., Bartlett, D.J., Boyd, J.G., Lecomte, E., Loizidou, X.I., Volonté, C.R. et Niang-Diop, I. (2000) *Coastal Adaptation Technologies in Metz*, B., Davidson, O., Martens, J., Van Rooijen, S. et Van Wie McGroory, L. (éd.). *Methodological and Technological Issues in Technology Transfer*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Klein, R.J.T., Mozaharul, A., Burton, I., Dougherty, W.W., Ebi, K.L., Fernandes, M., Huber-Lee, A., Rahman, A.A et Wartz, C. (2006) Application of environmentally sound technologies for adaptation to climate change. Bonn: UNFCCC. Disponible sur le site Internet: <http://unfccc.int/resource/docs/2006/tp/tp02.pdf> [Consulté le 01/07/10].
- Klein, R.J.T., Nicholls, R.J. et Mimura, N. (1999) Coastal adaptation to climate change: can the IPCC technical guidelines be applied? *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 4, 239–252.
- Klein, R.J.T., Nicholls, R.J., Ragoonaden, S., Capobianco, M., Aston, J. et Buckley, E.N. (2001) Technological options for adaptation to climate change in coastal zones. *Journal of Coastal Research*, 17 (3), 531–543.
- Kraus, N.C. (2005) Shore Protection Structures in Schwartz, M.L. (éd.). *Encyclopedia of Coastal Science*. Pays-Bas: Springer, 875–877.
- Laessing, D.E. (2005) Depth of Closure at Bournemouth. Mémoire (Master), Université de Southampton.
- Leafe, R., Pethick, J. et Townend, I. (1998) Realising the benefits of shoreline management. *Geographical Journal*, 164, 282–290.
- Leggett, D.J., Cooper, N. et Harvey, R. (2004) *Coastal and Estuarine Managed Realignment – Design Issues*. Londres: CIRIA.
- LEISA (2009) Soil-less agriculture gains ground. India: LEISA. Disponible sur le site Internet: <http://tiny.cc/a3g0y> [Consulté en ligne le 05/08/10].
- Lelliott, R.E.L. (1989) Evolution of the Bournemouth defences in Coastal Management. Londres: Thomas Telford, 263–277.
- Li, C.X., Fan, D.D., Deng, B. et Korotaev, V. (2004) The coasts of China and issues of sea level rise. *Journal of Coastal Research*, 43, 36–47.
- Linhm, M. (2008) Depth of Closure at Bournemouth, Poole Bay, UK: Evaluating the Effectiveness of the Hallermeier (1981) Equation. Mémoire (Licence), Université de Southampton.
- Linhm, M.M., Green, C.H. et Nicholls, R.J. (2010) AVOID Report on the Costs of adaptation to the effects of climate change in the world's large port cities. AV/WS2/D1/R14, www.avoid.uk.net.
- MAFF (Ministry of Agriculture, Fisheries and Food) (1999) Flood and Coastal Defence Project Appraisal Guidance: Economic Appraisal. Londres: MAFF. Disponible sur le site Internet: <http://bit.ly/bRnFQB> http://www.safecoast.org/editor/databank/File/002_fcdpag1.pdf [Consulté en ligne le 26/08/10].
- MAFF (Ministry of Agriculture, Fisheries and Food) (2001) Flood and Coastal Defence Project Appraisal Guidance. Londres: MAFF. Disponible sur le site Internet: www.safecoast.org/editor/databank/File/002_fcdpag1.pdf [Consulté en ligne le 26/08/10].
- Mai, C.T. (2008) The Application of a Tandem Dike System in Vietnam. Mémoire (Master), UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft, Pays-Bas.

- Mai, C.V., van Gelder, P.H.A.J.M., Vrijling, J.K. et Mai, T.C. (2008) Risk Analysis of Coastal Flood Defences - A Vietnam Case in Simonovic, S.P., Bourget, P.G. et Blanchard, S.F. (éd.). The 4th international symposium on flood defence; managing flood risk, reliability & vulnerability. Toronto, 6-8 Mai 2008. Toronto: Institute for catastrophic loss reduction.
- Mai, V.C. (2004) Safety Assessment of Sea Dikes in Vietnam: A Case Study in NamDinh Province. Mémoire (Master), UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft, Pays-Bas.
- Mathis, M.L. et Nicholson, S. (2006) An Evaluation of Compliance with the National Flood Insurance Program Part B: Are Minimum Building Requirements Being Met? Washington DC: American Institutes for research. Disponible sur le site Internet: www.fema.gov/library/viewRecord.do?id=2590 [Consulté en ligne le 28/08/10].
- McDougal, W.G., Sturvtant, M.A. et Komar, P.D. (1987) Laboratory and field investigations of the impact of shoreline stabilisation structures on adjacent properties in Kraus, N.C. (éd.). Coastal Sediments '87, Louisiane. New York: ASCE, 961-973.
- McLean, R.F., Tsyban, A., Burkett, V., Codignotto, J.O., Forbes, D.L., Mimura, N., Beamish, R.J. et Ittekkot, V. (2001) Coastal zones and marine ecosystems in Bijlsma, L. and Sanchez-Arevalo, I. (éd.). Climate Change 2001 – Impacts Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- Meadowcroft, I.C., Hall, J.W., Lee, E.M. et Milheiro-Oliveira, P. (1999) Coastal Cliff Recession: Development and Application of Prediction Methods. HR Wallingford Report SR549.
- Merlin, M.D. (2005) Pacific Ocean islands: coastal geomorphology in Schwartz, M.L. (éd.). Encyclopedia of Coastal Science. Pays-Bas: Springer, 746-753.
- Met Office (2010) Nowcasting. Exeter: Met Office. Disponible sur le site Internet: www.metoffice.gov.uk/science/creating/hoursahead/nowcasting.html [Consulté en ligne le 22/07/10].
- Mimura, N. et Nunn, P.D. (1998) Trends of beach erosion and shoreline protection in rural Fiji. Journal of Coastal Research, 14 (1), 37-46.
- Mirza, M.M.Q., Patwardhan, A., Attz, M., Marchand, M., Ghimire, M., Hanson, R. (2005) Flood and Storm Control in Chopra, K.R. (éd.) Ecosystems and Human Wellbeing Volume III Policy Responses. Washington DC: Island Press, p337-352.
- Mishra, D.K. et Prakash, H.R. (1982) An evaluation of the Andhra Pradesh cyclone shelters programme: guidelines for the Orissa programme. Disasters, 6, 250-255.
- Moh, W.H. et Su, P.L. (2009) Marina Barrage – A Unique 3-in-1 Project in Singapore. Structural Engineering International, 19 (1), 17-21.
- Mokrech, M., Hanson, S., Nicholls, R.J., Wolf, J., Walkden, M.J.A., Fontaine, C., Nicholson-Cole, S., Jude, S.R., Leake, J., Stansby, P.K., Watkinson, A.R., Rounsevell, M.D.A., Lowe, J.A. et Hall, J.W. (2009) The Tyndall coastal simulator. Journal of Coastal Conservation: Planning and Management. DOI: 10.1007/s11852-009-0083-6
- Morton, R.A. (2004) Physical Agents of Land Loss: Sediment Budget. Reston, VA: USGS. Disponible sur le site Internet: <http://pubs.usgs.gov/of/2003/of03-337/budget.html> [Consulté en ligne le 06/01/10].
- Moser, S.C. (2000) Community responses to coastal erosion: implications of potential policy changes to the National Flood Insurance Programme. Appendix F. In Evaluation of Erosion Hazards. A project of the H. John Heinz II Centre for Science, Economics and the Environment. Prepared for the Federal Emergency Management Agency, Washington DC. Disponible sur le site Internet: <http://tiny.cc/af9kx> [Consulté en ligne le 17/08/10].
- Mycoo, M. (2006) Sustainable Tourism Using Regulations, Market Mechanisms and Green Certification: A Case Study of Barbados. Journal of Sustainable Tourism, 14 (5), 489-511.
- Nairn, R.B., MacIntosh, K.J., Hayes, M.O., Nai, G., Anthonio, S.L. et Valley, W.S. (1998) Coastal erosion at Keta Lagoon, Ghana – large scale solution to a large scale problem in Edge, B.L. (éd.). Coastal Engineering 1998, Copenhagen, 22- 26 juin 1998. Reston, Virginie: ASCE, 3192-3205.
- NALMS (North American Lake Management Society) (2008) Water Words Glossary. Madison: NALMS. Disponible sur le site Internet: www.nalms.org/nalmsnew/glossary.aspx?Al=B [Consulté en ligne le 10/08/10].
- NI Direct (Northern Ireland Direct) (2007) Glossary. Londres: NI Direct. Disponible sur le site Internet: www.dfpni.gov.uk/eag-glossary [Consulté en ligne le 26/08/10].
- Nicholls, R.J. (2006) Storm surges in coastal areas in Arnold, M. et al. (éd.). Natural Disaster Hotspots. Case Studies. Washington DC: The World Bank, 79-108.
- Nicholls, R.J. (2010) Impacts of and Responses to Sea-Level Rise. In: Church, J.A., Woodworth, P.L., Aarup, T. et Wilson, W.S. (éd.). Understanding Sea-Level Rise and Variability. Chichester: Wiley-Blackwell, 17-51.
- Nicholls, R.J. et Cazenave, A. (2010) Sea Level Rise and its Impact on Coastal Zones. Science, 328, 1517-1520.
- Nicholls, R.J. et Klein, R.J.T. (2005) Climate change and coastal management on Europe's coast in Vermaat, J.E. et al. (éd.). Managing European Coasts: Past, Present and future. Berlin: Springer-Verlag, 199-225.

- Nicholls, R.J. et Leatherman, S.P. (1995) Global sea level rise in Strzepek, K.M. et Smith, J.B. (éd.). *As Climate Changes: International Impacts and Implications*. Cambridge: Cambridge University Press, 92-123.
- Nicholls, R.J., Birkemeier, W.A. et Lee, G. (1998) Evaluation of depth of closure using data from Duck, NC, USA. *Marine Geology*, 148, 179-201.
- Nicholls, R.J., Wong, P.P., Burkett, V.R., Codignotto, J.O., Hay, J.E., McLean, R.F., Ragoonaden, S. et Woodroffe, C.D. (2007a) Coastal systems and low-lying areas. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden et C.E. Hanson, Éd., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 315-356.
- Nicholls, R.J., Cooper, N. et Townend, I.H. (2007b) The management of coastal flooding and erosion in Thorne, C.R. et al. (Éd.). *Future Flood and Coastal Erosion Risks*. Londres: Thomas Telford, 392-413.
- Nicholls, R.J., Hanson, S., Herweijer, C., Patmore, N., Hallegatte, S., Corfee-Morlot, J., Château, J. et Muir-Wood, R. (2008) Ranking Port Cities with High Exposure and Vulnerability to Climate Extremes. *OECD Environment Working Papers*, No 1. Disponible sur le site Internet: [www.ois.oecd.org/olis/2007doc.nsf/linkto/env-wkp\(2007\)1](http://www.ois.oecd.org/olis/2007doc.nsf/linkto/env-wkp(2007)1) [Consulté en ligne le 29/03/10].
- NOAA (National Ocean and Atmospheric Administration) (2010) *Construction Setbacks*. Charleston, SC: NOAA. Disponible sur le site Internet: <http://tiny.cc/ibrme> [Consulté en ligne le 22/07/10].
- Nordstrom, K.F. et Arens, S.M. (1998) The role of human actions in evolution and management of foredunes in The Netherlands and New Jersey, USA. *Journal of Coastal Conservation*, 4, 169-180.
- Nordstrom, K.F., Jackson, N.L., Bruno, M.S. et de Butts, H.A. (2002) Municipal initiatives for managing dunes in coastal residential areas: a case study of Avalon, New Jersey, USA. *Geomorphology*, 47 (2-4), 137-152.
- Nordstrom, K.F., Lampe, R. et Vandemark, L.M. (2000) Re-establishing naturally functioning dunes on developed coasts. *Environmental Management*, 25 (1), 37-51.
- Nottage, A. et Robertson, P. (2005) *The saltmarsh creation handbook: a project manager's guide to the creation of saltmarsh and intertidal mudflat*. RSPB: Sandy.
- NRC (National Research Council) (1992) *Restoration of Aquatic Ecosystems*. Washington DC: National Academy Press.
- NRC (National Research Council) (1994) *Restoring and Protecting Marine Habitat: The Role of Engineering and Technology*. Washington DC: National Academy Press.
- Omar, M. (2007) *Punggol Reclamation*. Singapour: National Library Singapore. Disponible sur le site Internet: http://infopedia.nl.sg/articles/SIP_1011_2008-10-28.html [Consulté en ligne le 26/07/10].
- Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J. et Hanson, C.E. (éd.) (2007) *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Paul, B.K. (2009) Why relatively fewer people died? The case of Bangladesh's Cyclone Sidr. *Natural Hazards*, 50, 289-304.
- Paul, B.K. et Dutt, S. (2010) Hazard warnings and responses to evacuation orders: The case of Bangladesh's Cyclone Sidr. *Geographical Review*, 100 (3), 336-355.
- Pearce, D.W. et Turner, R.K. (1992) *Benefits, estimates and environmental decision making*. Paris: Organisation for Economic Cooperation and Development.
- Penning-Rowsell, E.C., Johnson, C., Tunstall, S., Tapsell, S., Morris, J., Chatterton, J., Coker, A. et Green, C. (2003) *The Benefits of Flood and Coastal Defence*. Flood Hazard Research Centre, Middlesex University.
- Pilarczyk, K. et Nuoi, N.S. (2010) Experience and Practices on Flood Control in Vietnam. *Water International*, 30 (1), 114-122.
- Pilarczyk, K.W. (1990a) Design of seawalls and dikes – Including overview of revetments in Pilarczyk, K.W. (éd.). *Coastal Protection*. Rotterdam: A.A. Balkema, 197-288.
- Pilarczyk, K.W. (1990b) Introduction to coastal protection in Pilarczyk, K.W. (éd.). *Coastal Protection*. Rotterdam: A.A. Balkema, 1-14.
- Pilarczyk, K.W. (1998a) Design philosophy and methodology in Pilarczyk, K.W. (éd.). *Dikes and Revetments: Design, Maintenance and Safety Assessment*. Rotterdam: A.A. Balkema, 11-40.
- Pilarczyk, K.W. (1998b) Other design considerations in Pilarczyk, K.W. (éd.). *Dikes and Revetments: Design, Maintenance and Safety Assessment*. Rotterdam: A.A. Balkema, 407-428.
- Pilarczyk, K.W. (2000) Design of dikes and revetments – Dutch practice in Herbich, J.B. (éd.). *Handbook of Coastal Engineering*. New York: McGraw-Hill, Chapter 3.
- Platong, J. (1998) Status of mangrove forests in southern Thailand. *Wetlands International – Thaïlande Programme*. Hat Yai, Thaïlande, Publication 5.
- Powell, M. et Ringler, R. (2009) Yorklin, DE, and other cities adopt plans to protect buildings in floodplains from water in Kemp, R.L. (éd.). *Cities and Water: A Handbook for Planning*. Jefferson: McFarland and Company, 180-184.

- Pugh, D.T. (1987) *Tides, surges and mean sea level: a handbook for engineers and scientists*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Pullen, T., Allsop, N.W.H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schüttrumpf, H. et van der Meer, J.W. (2007) *EurOtop. Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*. Hamburg: Archive for research and technology on the North Sea and Baltic coast. Disponible sur le site Internet: www.overtopping-manual.com [Consulté en ligne le 20/08/10].
- Rao, S., Radheshyam, B., Subrahmanya, K., Chandramohan, V.R., Raju, D.H., Shetty, U. et Jayappa, K.S. (2009) Failure analysis of seawalls along Karnataka coast and recent trends in coastal protection in Jayappa, K.S. et Narayana, A.C. (éd.). *Coastal Environments: Problems and Perspectives*. New Delhi: I.K. International Publishing House, 226-235.
- Reeve, D., Chadwick, A. et Fleming, C. (2004) *Coastal Engineering: Processes, Theory and Design Practice*. Abingdon: Spon Press.
- Rupp, S. et Nicholls, R.J. (2002) *Managed Realignment of Coastal Flood Defences: A Comparison between England and Germany*. Middlesex: Flood Hazard Research Centre. Disponible sur le site Internet: www.safecoast.org/editor/databank/File/managed%20realignment.pdf [Consulté en ligne le 27/07/10].
- Rupp-Armstrong, S. et Nicholls, R. (à paraître) Managed realignment and regulated tidal exchange – implications for coastal habitat adaptation in the European Union. *Journal of Coastal Research*, in review.
- Saenger, P. et Siddiqi, N.A. (1993) Land from the sea: The mangrove Afforestation program of Bangladesh. *Ocean and Coastal Management*, 20, 23-39.
- Saha, S.K. (2010) *Soilless Cultivation for Landless People: An Alternative Livelihood Practice through Indigenous Hydroponic Agriculture in Flood-prone Bangladesh*. Beppu: Ritsumeikan Asia Pacific University. Disponible sur le site Internet: <http://tiny.cc/8ncx1> [Consulté en ligne le 22/07/10].
- Sanò, M., Marchand, M. et Medina, R. (2010) Coastal setbacks for the Mediterranean: a challenge for ICZM. *Journal of Coastal Conservation*, 14, 33-39.
- Sanyal, J. et Lu, X.X. (2003) Application of GIS in flood hazard mapping: a case study of Gangetic West Bengal, India. Map Asia 2003, Poster Session. Disponible sur le site Internet: <http://tiny.cc/r7zci> [Consulté en ligne le 21/07/10].
- Schwartz, M.L. (2005) *Encyclopedia of Coastal Science*. Pays-Bas: Springer.
- Sene, K. (2008) *Flood Warning, Forecasting and Emergency Response*. Springer.
- Sharpe, J., Hirons, G., Kew, J., Pilcher, R., Brooks, W. et Lamberth, C. (2002) Regulated Tidal Exchange: intertidal habitat without the tears. *Proceedings of 37th DEFRA Conference of River and Coastal Engineers*, Keele.
- Sheppard, C.R.C. (2005) Coral reef coasts in Schwartz, M.L. (éd.). *Encyclopedia of Coastal Science*. Pays-Bas: Springer, 339-342.
- Shows, E.W. (1978) Florida's coastal setback line – an effort to regulate beachfront development. *Coastal Management*, 4 (1), 151-164.
- Smith Warner International (1999) *Storm Surge Mapping for Montego Bay, Jamaica*. Kingston: Smith Warner International. Disponible sur le site Internet: www.oas.org.cdmp/documents/kma/mobay/mobay.htm [Consulté en ligne le 26/09/10].
- Sterr, H. (2008) Assessment of Vulnerability and Adaptation to Sea-Level Rise for the Coastal Zone of Germany. *Journal of Coastal Research*, 24 (2), 380-393.
- Stive, M.J.F., Cowell, P. et Nicholls, R. J. (2009) Beaches, cliffs and deltas in Slaymaker, O., Spencer, T. et Embleton-Hamann, C. (éd.). *Geomorphology and Global Environmental Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 158-179.
- Sunday, O.A. et John, T.O. (2006) Lagos shoreline change pattern: 1986-2002. *American-Eurasian Journal of Scientific Research*, 1 (1), 25-30.
- Syvitski, J.P.M., Kettner, A.J., Overeem, I., Hutton, E.W.H., Hannon, M.T., Brakenridge, G.R., Day, J., Vörösmarty, C., Saito, Y., Giosan, L. et Nicholls, R. J. (2009) Sinking Deltas. *Nature Geoscience*, 2, 681-689.
- Thorne, C., Evans, E. et Penning-Rowsell, E., (éd.) (2007) *Future flooding and coastal erosion risks*. Londres: Thomas Telford.
- Tol, R.S.J., Klein, R.J.T. et Nicholls, R.J. (2008) Towards successful adaptation to sea level rise along Europe's coasts. *Journal of Coastal Research*, 24 (2), 432-442.
- Tompkins, E.L., Nicholson-Cole, S.A., Hurlston, L.A., Boyd, E., Hodge, G.B., Clarke, J., Gray, G., Trotz, N. et Verlack, L. (2005) *Surviving Climate Change in Small Islands: A Guidebook*. Norwich: Tyndall Centre for Climate Change Research.
- Townend, I. et Burgess, K. (2004) Methodology for assessing the impact of climate change upon coastal defence structures in McKee Smith, J. *International Coastal Engineering Conference 2004*, Lisbonne, 19-24 septembre 2004. Londres: World Scientific.
- Tri, N.H., Adger, W.N. et Kelly, P.M. (1998) Natural resource management in mitigating climate impacts: the example of mangrove restoration in Vietnam. *Global Environmental Change*, 8 (1), 49-61.
- Turner, N. (1994) Recycling of capital dredging arisings – the Bournemouth Experience. In *Papers and Proceedings, SCOPAC Conference. Inshore Dredging for Beach Replenishment?* Lymington, Hampshire, Octobre 1994.

UK POST (Parliamentary Office of Science and Technology) (2005) Postnote: Early Warnings for Natural Disasters. Londres: Parliamentary Office of Science and Technology. Disponible sur le site Internet: www.parliament.uk/documents/post/postpn239.pdf [Consulté en ligne le 24/08/10].

UK POST (Parliamentary Office of Science and Technology) (2009) Postnote: Coastal Management. Londres: Parliamentary Office of Science and Technology. Disponible sur le site Internet: www.parliament.uk/documents/post/postpn342.pdf [Consulté en ligne le 02/07/10].

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) (1999) Coastal Adaptation Technologies. Bonn: UNFCCC. Disponible sur le site Internet: <http://unfccc.int/resource/docs/tp/tp0199.pdf> [Consulté en ligne le 01/07/10].

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) (2002) Annotated Guidelines for the Preparation of National Adaptation Plans of Action. Bonn: UNFCCC. Disponible sur le site Internet: http://unfccc.int/files/cooperation_and_support/ldc/application/pdf/annguide.pdf [Consulté en ligne le 02/10/10].

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) (2008) National Adaptation Programmes of Action: Summary of Projects on Coastal Zones and Marine Ecosystems Identified in Submitted NAPA as of September 2008. Bonn: UNFCCC. Disponible sur le site Internet: http://unfccc.int/files/adaptation/application/pdf/coastal_marine_e.pdf [Consulté en ligne le 08/10/10].

USACE (United States Army Corps of Engineers) (1989) Environmental Engineering for Coastal Shore Protection. Washington DC: USACE. Disponible sur le site Internet: <http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/em1110-2-1100/PartI/PartI.htm> [Consulté en ligne le 29/08/10].

USACE (United States Army Corps of Engineers) (2002) Coastal Engineering Manual – Part I. Washington DC: USACE. Disponible sur le site Internet: <http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/em1110-2-1100/PartI/PartI.htm> [Consulté en ligne le 27/08/10].

USACE (United States Army Corps of Engineers) (2003) Coastal Engineering Manual – Part V. Washington DC: USACE. Disponible sur le site Internet: <http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/em1110-2-1100/PartI/PartI.htm> [Consulté en ligne le 27/08/10].

USAID (2009) Adapting to Coastal Climate Change: A Guidebook for Development Planners. Rhode Island: USAID. Disponible sur le site Internet: www.crc.uri.edu/download/CoastalAdaptationGuide.pdf [Consulté en ligne le 07/10/10].

van der Meer, J. (1998) Geometrical design of coastal structures in Pilarczyk, K.W. (éd.). Dikes and Revetments: Design, Maintenance and Safety Assessment. Rotterdam: A.A. Balkema, 161-176.

van Houweninge, G. et de Graauw, A. (1982) The closure of tidal basins. Coastal Engineering, 6, 331-360.

VanKoningsveld, M., Mulder, J.P.M., Stive, M.J.F., VanDerValk, L. et VanDerWeck, A.W. (2008) Living with sea level rise and climate change: A case study of the Netherlands. Journal of Coastal Research, 24 (2), 367-379.

Vellinga, P. (1983) Predictive Computational Model for Beach and Dune Erosion during Storm Surges. Delft Hydraulics Laboratory, Publication No. 294.

Vera-Cruz, D. (1972) Artificial Nourishment at Copacabana Beach. Proceedings 13th Coastal Engineering Conference. New York: ASCE, 141-163.

Walkden, M. et Dickson, M. (2008) Equilibrium erosion of soft rock shores with a shallow or absent beach under increased sea level rise. Marine Geology, 251 (1-2), 75-84.

Walkden, M.J.A. et Hall, J.W. (2005) A predictive Mesoscale model of the erosion and profile development of soft rock shores. Coastal Engineering, 52 (6), 535-563.

Water Science and Technology Board (2009) Mapping the Zone: Improving Flood Map Accuracy. Washington DC: National Academies Press.

Watson, C.C. et Johnson, M.E. (1999) Design, Implementation and Operation of a Modular Integrated Tropical Cyclone Hazard Model. 23ème Conference de l'AMS sur les Ouragans et la Météorologie Tropicale, Dallas, 10-15 janvier 1999.

White, P.C.L., Godbold, J.A., Solan, M., Wiegand, J. et Holt, A.R. (2010) Ecosystem services and policy: A review of coastal wetland ecosystem services and an efficiency based framework for implementing the ecosystem approach in Harrison, R.M. and Hester, R.E. (éd.). Ecosystem Services. Cambridge: the Royal Society of Chemistry.

Williams, A. et Micallef, A. (2009) Beach Management: Principles and Practice. Londres: Earthscan.

Wong, P.P. et Pask, R. (2008) Atlas: Singapore and the World, 2nd éd. South Asia: Pearson Education.

Woodroffe, C. (2004) Mangrove swamp in Goudie, A.S. (éd.). Encyclopedia of Geomorphology. Volume 2. Londres: Routledge, 639-641.

Yim, W.W.S. (1995). Implications of Sea Level Rise for Victoria Harbour, Hong Kong. Journal of Coastal Research, Special Issue 14, 167-189.

Annexe I: Glossaire

Adaptation	Ajustement des systèmes naturels ou humains en réaction à des stimuli climatiques réels ou attendus, ou à leurs impacts, afin d'en atténuer les effets néfastes ou d'exploiter des opportunités bénéfiques (Parry et al., 2007)
Atténuation	Intervention humaine visant soit à réduire les impacts d'une activité soit à soutenir la capacité à y faire face
Bathymétrie	Mesure de la profondeur de la mer
Blanchiment des coraux	Disparition des algues colorées vivant parmi les coraux provoquée par le stress. Cela est problématique car les coraux dépendent de ces algues pour leur nutrition et leur énergie, et donc pour leur croissance et leur survie.
Budget sédimentaire	Comptabilisation des apports et des pertes en sédiments dans un espace délimité pendant une période donnée (Kana, 1995)
Cartographie bathymétrique	Méthode de mesure des profondeurs et du relief de l'océan
Cellule côtière	Portion du littoral au sein de laquelle est confiné le mouvement des sédiments. Ceux-ci ne sont ni transportés ni partagés avec les cellules adjacentes.
Compression côtière	Déclin des habitats intertidaux en quantité et en qualité qui a lieu lorsque ces derniers se retrouvent piégés entre une barrière terrestre fixe, comme une digue, et la hausse du niveau de la mer
Delta	Relief formé par le dépôt de sédiments à l'embouchure d'une rivière, là où elle se jette dans la mer.
Dérive littorale	Mouvement des sédiments sur une trajectoire parallèle au trait de côte. Celui-ci est causé par les vagues approchant du rivage de manière oblique
Détecteurs de sédiments	Méthode d'arpentage qui identifie et mesure les couches de sédiments existant sous le fond marin supérieur
Ecotourisme	Tourisme axé sur l'appréciation de la nature plutôt que sur des environnements construits
Effet de remous	Hausse du niveau d'eau provoqué par une obstruction du débit en aval (NALMS, 2008)
Elévation du niveau relatif de la mer (RSLR)	Hausse du niveau de la mer mesurée par rapport au niveau du sol. Ainsi, les ajustements concernant le niveau absolu de la mer et les mouvements du littoral peuvent affecter le niveau relatif de la mer. La RSLR se mesure à l'aide de marégraphes (qui mesurent également les baisses de niveau lorsque cela arrive) Le profil décrit la forme de la coupe transversale des plages comprenant les zones se situant au-dessus de la ligne d'eau ainsi que les parties immergées.

Enrochement	Larges pierres de carrière généralement utilisées comme couche de protection contre l'érosion (Coastal Research, 2010)
Equilibre du profil de plage	Forme idéale de la coupe transversale que prendrait la plage si les conditions externes, comme le régime des vagues, restaient constantes suffisamment longtemps
Flux régulé de marée	Utilisation de tuyaux, de caniveaux ou de vannes permettant la régulation du renouvellement de l'eau dans les terres situées derrière une structure de défense. Cette méthode facilite la création d'habitats en milieux saumâtres et marins situés derrière des digues entretenues (Sharpe et al., 2002)
GPS différentiel (dGPS)	Système mondial de géolocalisation (GPS) doté d'une précision accrue de localisation grâce à un contrôle fixe
Hauteur de houle significative	(Hs) La hauteur moyenne de houle pour le tiers des vagues les plus élevées
La (re)création de zones humides	Contrairement à la restauration des zones humides qui désigne la réhabilitation des fonctions des zones humides préexistantes, la création de zones humides peut s'effectuer à deux types d'endroits: (1) là où elles ont existé par le passé mais ont disparu; ou (2) là où ces zones n'ont jamais existé, mais où les conditions sont réunies pour leur création.
Matériau d'origine de la plage	Type de sédiment présent sur la plage avant le rechargement
Occupation de la surface au sol	Espace occupé par une infrastructure côtière telle qu'une digue
Période de retour	Estimation de l'intervalle de temps moyen entre des événements tels qu'une inondation. Plus les périodes de retour sont longues, plus les événements sont de grande ampleur
Position en amont	Endroit de la côte situé plus haut dans le courant par rapport au transport de sédiments provoqué par la dérive littorale
Position en aval	Endroit de la côte situé plus bas dans le courant par rapport au transport de sédiments provoqué par la dérive littorale
Pression hydrostatique	Pression résultant du poids de l'eau; des eaux plus profondes entraînent une pression hydrostatique plus forte
Profil de plage	Lignes de section perpendiculaires au trait de côte (CIRIA, 1996).
Profondeur de fermeture	Limite maritime d'un changement de profondeur significatif le long d'un profil de plage, bien que cela ne représente pas la limite absolue de transport par les courants traversaux (Nicholls et al., 1996)
Propagule	Structure telle qu'une bouture, un semis ou une spore qui permet de propager une plante
Relevé bathymétrique	Etude du fond marin se trouvant à proximité des côtes
Relevé typographique	Etude qui mesure l'élévation de certains points dans une zone terrestre
Rétrospective	Analyse rétrospective utilisant des données indirectes
Risque résiduel	Risque demeurant après que le processus d'adaptation a été mis en œuvre. Les risques ne peuvent être réduits à zéro que dans le cas d'un repli total vers l'intérieur des terres. Cela peut, par exemple, désigner le risque d'une tempête trop forte par rapport

	au niveau de protection offert par les moyens de défense ou le risque lié à la défaillance des structures.
Site d'emprunt	Source de sédiments compatibles avec les plages dans laquelle sont prélevés des matériaux afin d'entreprendre le rechargement de plages.
Sonar latéral	Méthode d'arpentage qui crée des images 3D du plancher océanique
Stratégie d'adaptation	Poursuite d'une stratégie d'aménagement des côtes selon trois axes : protéger, s'adapter ou se replier
Suivi écologique	Evaluation axée sur les processus et les indicateurs concernant la dynamique et les structures de l'écosystème – l'objectif est de développer une meilleure connaissance de la manière dont les écosystèmes fonctionnent
Tachéomètre	Aussi appelé une station totale, cet instrument de mesure combine un théodolite électronique avec un mesureur de distance afin de déterminer les distances et les angles par rapport à un point donné
Techniques de prévision immédiate	Une technique de prévision météorologique à très court terme qui analyse la météo en cours et utilise ensuite une estimation de sa vitesse et de son mouvement pour prévoir le temps un peu plus tard (Met Office, 2010)
Technologies d'adaptation	Les différentes mesures d'adaptation qui peuvent être appliquées seules ou combinées dans le cadre d'une stratégie d'adaptation
Télédétection	Science de l'observation à distance. Le terme est souvent utilisé pour désigner l'observation de la Terre par des plateformes satellites utilisant des capteurs électromagnétiques (Heywood et al., 2006)
Transport le long du littoral	Voir dérive littorale
Vulnérabilité	Degré auquel un système est exposé aux effets néfastes du changement climatique et est inapte à y faire face, comme par exemple la variabilité et les conditions climatiques extrêmes (Parry et al., 2007)
Zone intertidale ou estran	Partie du littoral située entre les limites extrêmes des marées les plus hautes et les plus basses. Ces zones sont exposées à marée basse et submergées à marée haute.

Annexe II: Sources d'informations supplémentaires conseillées

ABPMER (2010) OMReG: The Online Managed Realignment Guide. Southampton: ABPMER. Disponible sur le site Internet: www.abpmer.net/omreg/ [Consulté en ligne le 28/09/10].

Beca International Consultants (2010) Shore Protection Guidelines Prepared for the Government of Kiribati. Wellington: Beca International Consultants.

CIRIA (Construction Industry Research and Information Association) (1996) Beach Management Manual. CIRIA Report 153. Londres: Construction Industry Research and Information Association.

CIRIA (Construction Industry Research and Information Association) (2010) Beach Management Manual (2nd éd.). Londres: Construction Industry Research and Information Association.

Dean, R.G. (2002) Beach Nourishment Theory and Practice. Singapour : World Scientific Publishing.

FEMA (Federal Emergency Management Agency) (2003) Guidelines and specifications for flood hazard mapping partners. Washington DC: US Dept. of Homeland Security. Disponible sur le site Internet: www.fema.gov/library/viewRecord.do?id=2206 [Consulté en ligne le 28/09/10].

French, P.W. (2001) Coastal defences: Processes, Problems and Solutions. Londres: Routledge.

Kamphuis, J.W. (2000) Introduction to Coastal Engineering and Management. Singapour: World Scientific Publishing.

Leggett, D.J., Cooper, N. et Harvey, R. (2004) Coastal and Estuarine Managed Realignment – Design Issues. Londres: CIRIA.

Maharaj, R.J. (1999) Coastal Adaptation Technologies. Response to Sea Level Change. Londres: Commonwealth Fund for Technical Co-operation. Disponible sur le site Internet: www.sopac.org/data/virlib/NR/NR0079.pdf [Consulté en ligne le 05/07/10].

Maharaaj, R.J. (2000) Guidelines for Monitoring and Evaluating Beach Erosion and Shoreline Dynamics. Report of a Training Workshop in Tarawa, Kiribati, 14-16 Mars 2000. Fiji: SOPAC.

Parry, M.L. Canziani, O.F. Palutikof, J.P. van der Linden P.J. et Hanson, C.E. (éd.) (2007) Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.

Pilarczyk, K.W. (1990) Coastal Protection. Rotterdam: A.A. Balkema.

Tompkins, E.L., Nicholson-Cole, S.A, Hurlston, L.A., Boyd, E., Hodge, G.B., Clarke, J., Gray, G., Trotz, N. et Verlack, L. (2005) Surviving Climate Change in Small Islands: A Guidebook. Norwich: Tyndall Centre for Climate Change Research.

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) (2002) Annotated Guidelines for the Preparation of National Adaptation Plans of Action. Bonn: UNFCCC. Disponible sur le site Internet: http://unfccc.int/files/cooperation_and_support/ldc/application/pdf/annguide.pdf [Consulté en ligne le 02/10/10].

USACE (United States Army Corps of Engineers) (1989) Environmental Engineering for Coastal Shore Protection. Washington DC: USACE. Disponible sur le site Internet: <http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/em1110-2-1100/PartI/PartI.htm> [Consulté en ligne le 29/08/10].

USACE (United States Army Corps of Engineers) (2008) Coastal Engineering Manual (Parties I à V). Washington DC: USACE. Disponible sur le site Internet: <http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/> [Consulté en ligne le 28/08/10].

USAID (2009) Adapting to Coastal Climate Change: A Guidebook for Development Planners. Rhode Island: USAID. Disponible sur le site Internet: www.crc.uri.edu/download/CoastalAdaptationGuide.pdf [Consulté en ligne le 07/10/10].



L'élévation du niveau de la mer, les ondes de tempêtes plus fortes ainsi que d'autres effets du changement climatique présentent une sérieuse menace pour les nombreuses personnes dans le monde qui habitent le long des côtes. Ce livret traite de treize technologies d'adaptation aux phénomènes d'érosion et d'inondation côtières causés par le changement climatique. Les auteurs décrivent chacune des technologies et en présentent les avantages et les inconvénients, les coûts et les bénéfices, les capacités institutionnelles et organisationnelles requises, et fournissent des exemples détaillés sur leur mise en application.

Ce livret, ou guide, a été conjointement rédigé par Matthew M. Linham et Robert J. Nicholls de l'Université de Southampton, au Royaume-Uni. Le Professeur Nicholls est l'un des plus grands experts internationaux sur les impacts du changement climatique sur les côtes et le principe d'adaptation, et tout particulièrement sur l'élévation du niveau de la mer. Ce livret vise à être un outil pertinent pour les décideurs politiques et les chefs de projets relatifs aux zones côtières.

Cette publication est l'un des livrets portant sur les technologies d'adaptation et d'atténuation au changement climatique qui ont été réalisés dans le cadre du projet sur l'évaluation des besoins technologiques (EBT). Le PNUE et le CPR mènent à bien le projet EBT dans 36 pays en voie de développement. Le financement de ce projet est assuré par le Fonds pour l'environnement mondial (FEM).



Centre PNUE de Risoe

DTU Laboratoire National pour l'Energie Durable de DTU Risoe

<http://www.uneprisoe.org/>

<http://tech-action.org/>