



SUBMERSION CÔTIÈRE

DES MOYENS INNOVANTS D'ATTÉNUATION DU RISQUE

L'ATTÉNUATION DU RISQUE

L'atténuation du risque est pluri-disciplinaire, et intègre différentes disciplines de l'ingénierie, de l'écologie et des sciences économiques et sociales. (Crédits image Danish Coastal Authority)



THESEUS INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR SAFER EUROPEAN COASTS IN A CHANGING CLIMATE

THESEUS est financé par la Commission Européenne dans le cadre du 7ème PCRD, thème 6

Environnement et changement climatique

Subvention n°. 244104

1er décembre 2009 - 30 novembre 2013

<http://www.theseusproject.eu>



Nos littoraux sont de plus en plus menacés par les inondations et l'érosion. Avec le changement climatique et l'augmentation du niveau de la mer, l'un des défis majeurs que nous avons à relever aujourd'hui est de trouver des mesures appropriées de protection de nos environnements côtiers pour assurer la sécurité de la population et des enjeux divers qui s'y trouvent.

La mitigation ou l'atténuation des risques est l'ensemble des procédés qui consistent à réduire les dommages aux personnes, aux biens et aux services dans les zones exposées à des risques, soit en diminuant l'intensité ou la fréquence des événements (par exemple grâce à des barrières, des fermes de convertisseurs d'énergie ou des projets de rechargement de plages), soit en réduisant l'exposition au danger (par exemple grâce à des systèmes d'alerte et des plans d'évacuation), soit encore en améliorant la résilience économique et sociale (au moyen de primes d'assurances incitatives, d'un aménagement raisonné des territoires et d'une bonne information du public sur le risque).

Traditionnellement, les ingénieurs ont plutôt opté pour des dispositifs de protection "durs", des ouvrages tels que les épis, les digues et les brise-lames. De nombreux doivent aujourd'hui être renforcés ou remplacés pour s'adapter aux niveaux de sécurité réduits. Ce n'est pas simple du tout. Souvent il sera aussi nécessaire d'imaginer des alternatives très innovantes.

L'atténuation du risque est pluridisciplinaire. Les scientifiques de THESEUS sont spécialisés dans différentes disciplines de l'ingénierie, de l'écologie et des sciences économiques et sociales. Ils se sont engagés à dépasser les frontières qui les séparent pour proposer ensemble des mesures de protection des côtes efficaces et validées scientifiquement. Cette brochure en présente quelques exemples représentatifs.

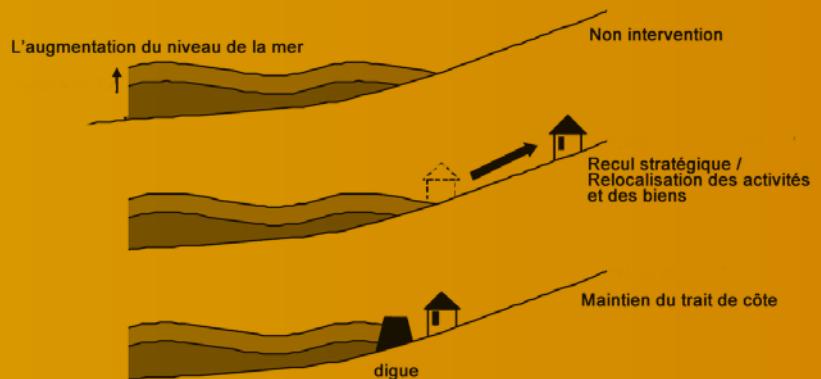
TENIR LE FRONT?

L'approche traditionnelle de l'atténuation des risques côtiers consiste à construire des ouvrages de défense afin de limiter la probabilité d'inondation. C'est l'approche typique du "**maintien du front**": construire des ouvrages plus hauts, plus longs, et plus nombreux comme des digues, des épis ou des brise-lames pour lutter contre l'augmentation du risque d'inondation due au changement climatique et à l'augmentation du niveau de la mer.

Cependant, les coûts du renforcement ou du remplacement des ouvrages de défense peuvent vite devenir prohibitifs et dépasser de loin la valeur des enjeux qu'ils sont censés protéger. Une autre piste est la dissuasion voire l'interdiction d'implantation de nouveaux enjeux dans des zones à fort risque. D'autres idées de plus en plus populaires méritent aussi notre attention, comme celles de restaurer ou de favoriser le développement naturel de marais salés et de dunes, ou de créer des champs d'expansion des crues qui seraient ouverts en cas de tempêtes exceptionnelles, ou encore de casser l'énergie des vagues avant qu'elles n'atteignent les côtes.

Depuis quelques années, le "réalignement" (de la côte ou d'estuaire) s'est aussi installé dans les mentalités des gestionnaires côtiers et des ingénieurs. Il peut en particulier être mis en œuvre en créant des zones tampon naturelles entre la mer et les territoires à fort enjeu.

Il n'existe généralement pas de solution toute faite et le processus de décision doit se fonder sur une analyse coûts-bénéfices détaillée tenant compte à la fois des aspects physiques, écologiques, sociaux et économiques.



Adapté de 'A guide to coastal erosion management' selon Heurtefeux et al. 2004,
également disponible sur <http://www.thesesproject.eu/wiki/>

DES DIGUES PLUS HAUTES?

Une surcote est une augmentation temporaire du niveau de la mer au-dessus du niveau de la marée astronomique, causée par des vents forts et allant parfois jusqu'à plusieurs mètres. Pendant ces événements, l'eau s'accumule contre les ouvrages de protection. L'augmentation probable de l'intensité et de la fréquence des tempêtes sur certaines frontières maritimes combinée à l'élévation avérée générale du niveau de la mer, toutes deux dues au changement climatique, constitue une menace pour les territoires côtiers d'altitude faible.

Les inondations dans les zones côtières sont souvent causées par le franchissement des digues par les vagues, parfois par des brèches dans celles-ci. Les digues sont en effet endommagées par les vagues qui les franchissent et déferlent sur l'arrière de la structure, du côté des terres émergées, là où elles ne sont pas protégées par des enrochements. Ceci peut résulter en une rupture complète à cause de l'instabilité des sols. Les inondations de la Mer du Nord en 1953 qui ont causé la mort de plus de 1800 personnes aux Pays-Bas sont un exemple bien connu de ce phénomène de rupture de digues.

Il existe deux façons de résoudre ce problème :

1) Autoriser un franchissement limité en améliorant la **résistance des digues** à celui-ci. Ceci peut se faire en diminuant la pente de la digue du côté des terres et donc en élargissant celle-ci, ou en ajoutant une couche résistante à l'érosion sur la digue. Des mesures en grandeur nature (voir figure) ont été réalisées pour calibrer des modèles pour la conception des digues résistantes aux franchissements. La construction d'une seconde digue séparée à l'intérieur des terres peut encore améliorer la sécurité du dispositif.

2) Quand le franchissement n'est pas permis, la quantité d'eau qui déborde au-dessus de la digue peut-être limitée en diminuant la pente de la digue du côté de la mer, en augmentant sa rugosité, en ajoutant une berme en amont, ou encore en réhaussant sa crête.

Les **bassins de rétention** sont aussi une solution innovante. Ils sont constitués d'un mur ouvert du côté de la mer, d'un bassin, et d'un second mur du côté des terres. Dans le bassin, l'énergie des vagues incidentes est dissipée, si bien que le franchissement du mur intérieur n'est plus possible. Le mur ouvert du côté de la mer permet à l'eau de s'écouler à nouveau après le passage de la vague.

Un **bassin de drainage de crête** est une structure similaire et une autre option lorsqu'il faut à tout prix éviter le franchissement. Le bassin est construit au sommet de la digue pour capturer les vagues franchissantes. L'eau est ensuite drainée par des conduites vers la mer ou un réservoir sûr du côté des terres.

Combinées à une bonne réflexion architecturale, ces structures peuvent s'intégrer de façon esthétique dans le paysage côtier.



Mesure de la résistance des digues aux franchissements par les vagues. Les illustrations présentent les principes de fonctionnement leet le simulateur de vagues en action (Crédits Van der Meer Consulting b.v.; INFRAM b.v.).

Une présentation schématique d'un bassin de drainage de crête en fonctionnement. L'eau qui arrive est capturée dans le bassin et drainée soit vers les terres soit vers l'océan (Nørgaard, J. H., Andersen, T. L., Burcharth, H. F., Sergent, P., & Prevot, G. (2011). THESEUS Deliverable ID2.2: Part H - Upgrade of rubble mound structures)

QU'EN EST-IL DES BRISE-LAMES?

L'atténuation de l'énergie des vagues avant qu'elles n'atteignent les digues est un sujet important. Alors que les ingénieurs comptaient traditionnellement exclusivement sur les épis et les brise-lames pour ce faire, de nouvelles options émergent aujourd'hui pour la protection de nos côtes. C'est par exemple le cas des **barrières naturelles**, de l'**apport de sable** (nourrissement) sur les plages et les dunes, des **récifs artificiels** ou de nouveaux **brise-lames flottants**.

Les **récifs artificiels** sont constitués de substrats durs déposés sur le fond de la mer. Ils sont destinés à altérer l'hydrodynamique locale. Comme les brise-lames, ils peuvent être utilisés pour faire déferler et atténuer les vagues, et contribuent même à augmenter la biodiversité et ainsi réduire au maximum l'impact environnemental.

Les récifs artificiels pour la protection côtière peuvent être construits à partir d'une gamme variée de matériaux, comme les roches, les géotubes ou les géobags plus petits (les deux sont des sacs en géotextiles remplis de sable ou de granulats), ou encore des unités préfabriquées de récifs spécialement conçues pour fournir un abri aux poissons et servir d'habitat pour la pondaison et la frayère.

Les **brise-lames flottants** sont encore une alternative possible pour réduire l'intensité des vagues. Ceux de type boîte – le type le plus couramment utilisé – sont faits de boîtes en béton armé creuses ou avec un noyau de matériaux légers, ancrées au fond avec des câbles. Ils atténuent et réfléchissent une partie de l'énergie des vagues et peuvent diminuer le taux d'érosion et réduire le risque d'inondation en zone côtière.

Les brise-lames flottants présentent des avantages par rapport à leurs cousins traditionnels : ils conservent leur efficacité lorsque le niveau de la mer augmente ; leur position peut être réajustée et ils sont économiques et plus faciles à installer, à déplacer ou à retirer. Ils ne remplaceront cependant jamais complètement les brise-lames traditionnels. Pour amortir efficacement les vagues incidentes, la largeur du brise-lame flottant doit être égale à la moitié de la longueur d'onde de celles-ci. De telles largeurs ne sont souvent pas réalisables. Ainsi, contrairement aux brise-lames traditionnels, les brise-lames flottants ne sont pas adaptés pour protéger complètement les eaux côtières.

Quelques exemples d'unités de récifs préfabriquées (Mirko Castagnetti, Barbara Zanuttigh). Plus d'info sur http://www.thesusproject.eu/wiki/Artificial_reefs



Des bioblocs peuvent être incorporés aux ouvrages de protection traditionnels pour accroître la biodiversité. (Crédits David Thomas Université de Bangor)

Des brise-lames flottants constitués de tubes en plastique peuvent être utilisés pour protéger les côtes des vagues de batillage créées par les navires de plaisance (Crédits Kuznetsov).

L'ÉNERGIE BLEUE AU SECOURS DES CÔTES?

Un **convertisseur d'énergie des vagues** (CEV) est une machine capable de capturer l'énergie des vagues. Les vagues qui traversent une ferme de convertisseurs voient leur énergie se réduire, ce qui contribue aussi à améliorer la protection des côtes. Les CEV peuvent ainsi à la fois produire de l'énergie bleue et protéger les côtes des attaques des vagues.

Il existe de nombreux types de convertisseurs d'énergie des vagues. Certains sont constitués de flotteurs qui se déplacent verticalement avec les vagues en entraînant une turbine. Ils peuvent alors être déployés près de la côte ou plus au large.

Les CEV peuvent aussi être intégrés aux ouvrages de protection comme les brise-lames. Ils fonctionnent soit en récupérant l'énergie d'impact des vagues, soit en canalisant l'eau emportée par la vague dans des turbines hydrauliques.



Les convertisseur d'énergie des vagues (CEV) peuvent aussi être intégrés aux ouvrages de protection.
(Crédits Pelamis)

Pour qu'un CEV soit utilisable comme dispositif de protection, il doit être capable de réfléchir et/ou d'absorber une part significative de l'énergie de la vague incidente, même pendant des tempêtes importantes, justement lorsque la protection est le plus nécessaire. D'autre part, pour produire de l'énergie, il doit aussi fonctionner dans des conditions climatiques normales. La combinaison de ces deux modes de fonctionnement dans un seul dispositif reste un défi technique majeur.

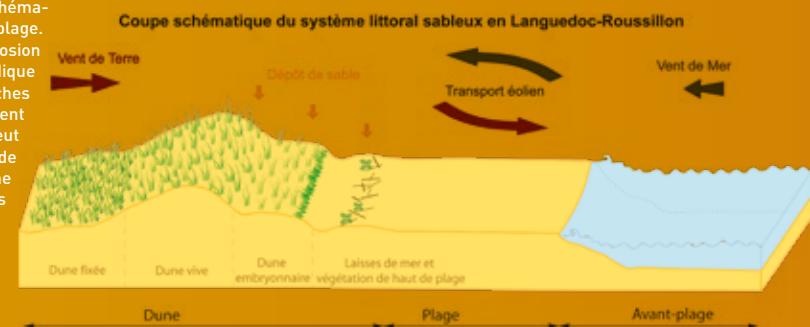
TRAVAILLER MAIN DANS LA MAIN AVEC LA NATURE

Les habitats naturels tels que les **dunes côtières**, les **marais salés**, la **végétation du fond** et les **récifs biogéniques** offrent une protection naturelle contre les risques côtiers. Il est très important de bien comprendre la dynamique naturelle de ces systèmes, la façon de les préserver et de les utiliser dans des dispositifs d'atténuation des risques côtiers.

Les **dunes côtières** sont largement répandues en Europe et couvrent plus de 13,000 kilomètres de côtes sur le continent. Elles se forment sur les plages. Les plantes piégent et stabilisent le sable qui sinon serait emporté par le vent. Les dunes sont des barrières naturelles contre les inondations pendant les tempêtes. Les dunes, les plages subtidales et intertidales forment un unique système. Pendant les tempêtes, les dunes servent de réservoir de sable pour les plages qui s'érodent. En conditions climatiques plus calmes, les dunes et les plages se régénèrent. Dans des côtes en érosion constante, un nourrissement régulier est une mesure de protection côtière sûre et peu onéreuse.

En zone côtière, un **marais salé** est un environnement d'eau salée ou saumâtre à l'interface entre la mer et la terre. Les marais salés se trouvent généralement dans des zones protégées, des estuaires ou des baies de faible profondeur. Le paysage est dominé par des étendues denses de plantes résistantes au sel (herbes, graminées et petits arbustes). Elles contribuent à protéger les côtes de plusieurs façons. Dans des régions exposées aux vagues, non seulement la végétation du marais amortit les vagues, mais les racines empêchent également l'érosion due à l'impact des vagues. Les marais ralentissent l'écoulement et stimulent la sédimentation en s'adaptant ainsi au rythme de l'élévation du niveau de la mer. En amont des estuaires, les marais stockent les eaux excédentaires pendant les marées de vives-eaux ou lorsque les débits fluviaux sont élevés et constituent ainsi un tampon important contre les inondations fluviales.

Une section transversale schématique d'un système dune-plage. La flèche rouge indique l'érosion du sable, la flèche jaune indique le dépôt de sable. Les flèches bleues et grises représentent le transport sableux qui peut provoquer des dépôts ou de l'érosion. Souvent ce système d'échanges n'est pas stable et l'apport de sable supplémentaire est alors nécessaire (Crédits EID)



La **flore benthique**, comme les **herbiers marins** et les **macro-algues**, amortit l'intensité des vagues. Cet effet est d'autant plus marqué que la végétation est dense et la canopée élevée. La végétation peut ainsi contribuer à la défense des côtes en réduisant l'amplitude des vagues et ainsi la probabilité de franchissement et d'inondation. De la même façon que les marais salés, la flore benthique protège le littoral de l'érosion en réduisant la vitesse du courant et en retenant les sédiments en suspension, tout en augmentant la sédimentation et en empêchant la remise en suspension par l'effet stabilisant de ses racines.

Un récif est une structure de l'environnement marin qui s'élève au-dessus du fond de la mer et couvre une surface importante. Dans les eaux côtières européennes, plusieurs organismes peuvent former des **récifs biogéniques**. Il s'agit de structures énormes formées par des **coraux** d'eaux froides, des **bancs de moules** et **d'huîtres**, ou d'agrégations plus petites de **vers polychètes** qui creusent des tubes.

Bien qu'il ne fasse pas l'ombre d'un doute que les récifs biogéniques contribuent à la protection côtière en réduisant l'intensité des vagues et en piégeant les sédiments, la contribution possible de la plupart des espèces des coraux tempérés des mers européennes reste largement méconnue. Il a été démontré que la structure irrégulière des grands **bancs de moules** (où les moules sont partiellement incorporées dans le sédiment et partiellement dans la colonne d'eau) entraîne un ralentissement de l'eau et améliore la sédimentation. Les bancs de moules atténuent ou peuvent même faire déferler les vagues et ainsi réduire le risque d'érosion et de franchissement sur les ouvrages côtiers pendant les tempêtes (et donc le risque d'inondation).

Un récif biogénique de *Sabellaria alveolata* à Dubmill Point, Ecosse
(Crédits Louise Firth)



QUELLES SONT LES MESURES SOCIO-ÉCONOMIQUES ENVISAGEABLES ?

Le risque d'inondation provient à la fois de la probabilité de l'événement et du dommage potentiel qu'il peut infliger. La dimension socio-économique et la réduction des dommages potentiels sont ainsi des autres pistes à explorer pour l'atténuation du risque.

Pendant les événements extrêmes, la **priorité** va à la protection des vies. Dans de tels cas, l'évacuation des populations peut être la seule option. Un **système fiable d'alerte aux inondations** et la réalisation de plans de **gestion de crise et d'évacuation** sont indispensables, mais pour que la population coopère, elle doit être **informée** du danger et consciente du fait que le risque zéro n'existe pas.

L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE - ÉTUDE DE CAS

Parmi les principales mesures que l'on peut proposer pour réduire la vulnérabilité des **enjeux économiques** (principalement les habitations et les activités économiques) se trouvent la création de polices d'assurance incitatives et la mise en place de fonds d'aide gouvernementaux. Le marché de l'assurance joue un rôle critique dans la gestion du risque inondation : transfert du risque, amélioration de la prise de conscience, promotion de la résilience après le désastre, réduction de la vulnérabilité et de la sensibilité en jouant sur le "risque perçu", et support à la relance du système socio-économique en cas de désastre. Un exemple simple d'action envisageable est la réduction des primes d'assurance pour les propriétaires qui investissent pour leur protection personnelle contre les inondations, ou la subordination des prestations à la mise en œuvre de mesures pour rendre la propriété plus résistante aux inondations.

Réduire la
vulnérabilité des
enjeux écono-
miques. Vias,
France 2003
(Credits EID)



L'estuaire de la Gironde, le plus grand d'Europe avec sa surface de 450 km², est régulièrement soumis à des inondations dues autant aux surcotes maritimes qu'à la variabilité des débits des deux fleuves en amont, la Garonne et la Dordogne. Le risque inondation est une préoccupation importante des autorités locales. Ce risque est particulièrement bien connu et des documents historiques en attestent dès le XIII^e siècle. Dès 1770, à la suite d'une inondation exceptionnelle qui recouvre 24.000 ha de terres en bord d'estuaire, des mesures furent prises pour limiter les impacts des inondations. Ces mesures et de plus récentes n'empêchent cependant pas de nouvelles submersions du littoral dans les dernières années, comme en 1981, 1999 et plus récemment lors de la tempête Xynthia de 2010.

Les mesures de protection couvrent aujourd'hui à la fois l'aménagement des territoires avec la réalisation de plans d'urbanisme tenant compte de l'exposition au risque (plans de prévention des risques inondation) et la réalisation de dispositifs structurels destinés à protéger les enjeux locaux. Un effort particulier est porté sur la réhabilitation et l'homogénéisation du dispositif existant à travers le plan national de prévention des submersions marines adopté en 2011.

Plus localement, les autorités nationales et les collectivités sont associées dans des groupes de réflexion pour proposer une stratégie cohérente à l'échelle de l'estuaire. Il s'agit du plan d'actions pour la prévention des inondations, dont une première phase est lancée en 2012.



Illustration de la protection des
enjeux existants recensés: marais
de Blanquefort

Déversoir équipé de hausses fusibles à la fin des travaux
en novembre 2007, rivière Allan (Hydro Plus)

Les réflexions engagées ont permis de définir la protection adaptée en fonction des enjeux recensés (protection des centres urbains denses, des bourgs, des sites industriels) pour l'événement de référence tempête 1999 plus vingt centimètres au Verdon, avec des moyens adaptés au contexte hydraulique.

L'impact hydraulique constaté est compensé au mieux par mobilisation accrue des zones de stockage ne présentant pas ou peu d'enjeux humains. Ce travail est engagé en ayant comme principes:

- pas d'aggravation du risque par rapport à la situation actuelle pour les enjeux non protégés,
- pas de modification de la fréquence de débordement
- contrôle de la zone sur-inondée en la limitant aux secteurs sans enjeux humains

Principes de mise en œuvre de digues fusibles pour alimenter les marais constituant des zones d'expansion des crues.

Des digues à déversement contrôlé sont envisagées pour alimenter les marais et les zones de rétention temporaire des eaux, avec des aménagements connexes. La Jalle de L'Olive doit être recalibrée, à une largeur de 25 m et une cote du fond d'un mètre, et un ouvrage régulé est mis en oeuvre en amont de 5 m de haut et 10 m de large. Deux ouvrages de franchissement de la route départementale 809 de 50 m de large doivent être réalisés. De plus, une digue fusible doit être créée en bordure de lit mineur de la Garonne sur 685 m et sur la partie nord de la Jalle de la Bécassine. Le principe des digues fusibles n'est pas arrêté, différents concepts existent, cordons fusibles, hausses fusibles.

Protection de zones industrielles par élévation du niveau des digues en bordure de lit mineur

La zone industrielle de Bassens est mise hors d'eau par la création de digues latérales de protection le long de l'estey (digue en terre) et une protection locale est ajoutée par l'aménagement d'un merlon de terre. En bordure des quais, des batardeaux mobiles et des murets en béton assurent la protection des enjeux.



Linéaire de digue pouvant être aménagé avec une digue
fusible (CETE SO - DLB)

Protection Zone industrielle Bassens / Lormont (Artelia)

PLUS D'INFORMATIONS

Project Theseus

<http://www.theseusproject.eu>

Directive européenne

http://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/index.htm

Permanent Service for Mean Sea Level

<http://www.psmsl.org/>

Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux de l'estuaire
de la Gironde et des milieux associés

<http://www.sage-estuaire-gironde.org/site/index.php>

Direction Départementale des Territoires

et de la Mer de la Gironde

<http://www.gironde.developpement-durable.gouv.fr/>