

PROJET MAREGOT

Management des risques découlant de l'érosion côtière e des actions de Gouvernance transfrontalière

T2.1.2 Proposition méthodologique pour l'outil de prévision et de gestion des risques côtiers à long terme en référence aux processus d'érosion côtière, également en raison du changement climatique. (Activité 2.1 de la composante T2 « Stratégie transfrontalière pour le Plan d'Intervention »)

Gestionnaire d'activité 2.1: Consortium LaMMA



Les auteurs de ce rapport sont

Carlo Brandini

Massimo Perna

Valentina Vannucchi

Giovanni Vitale

I. OBJECTIFS DES ÉTUDES RELATIVES À L'ÉROSION CÔTIÈRE

A. L'érosion des côtes

La connaissance de la dynamique à long terme de l'action côtière liée à la mer est essentielle pour soutenir la planification et la gestion des zones côtières, en particulier lorsque les effets du changement climatique se manifestent. L'érosion des plages est un problème d'importance primordiale du point de vue économique, du paysage et surtout de la sécurité pour une bonne partie des territoires soumises à d'importantes pressions démographiques saisonnières. Au niveau italien, les récentes Lignes Directrices Nationales pour la défense de la côte contre l'érosion et les effets du changement climatique (TNEC 2017) montrent que plusieurs régions ont un pourcentage de plages en érosion proche ou supérieur à 50%. Une plage en érosion peut être une source de danger pour l'environnement, car sa «tâche» de dissipation de l'énergie des vagues, en particulier dans le cas d'événements particulièrement intenses, tend à disparaître. Les artefacts côtiers peuvent subir des dommages dans ces cas, tandis que les routes et le milieu environnant, naturel ou anthropique, sont menacés d'inondation. Le climat des vagues et des courants affectent la distribution des sédiments littoraux (*long-shore* et *cross-shore*), sur la base d'une dynamique non stationnaire mais en évolution. L'évaluation des effets produits par le changement climatique représente un défi important pour la gestion des zones côtières, où il est possible d'identifier les multiples risques liés au climat, comme par exemple l'élévation du niveau de la mer (*Sea Level Rise*), l'impact des phénomènes météorologiques extrêmes, l'augmentation de la température moyenne de la mer et les variations des paramètres liés à la qualité de l'eau. Dans tous les cas, il est de plus en plus nécessaire de combiner les bilans des transports des sédiments côtiers (traditionnellement évalués en considérant le régime de transport et les approvisionnements fluviaux), avec des évaluations quantitatives liées aux effets du changement climatique tels que les variations possibles du régime anémologique, des vagues et des courants le long de la côte, l'élévation du niveau de la mer ou les changements dans les précipitations auxquels peuvent être associées les variations des régimes fluviaux et du transport des sédiments des bassins hydrologique terrestres.

Ces effets se manifestent à long terme et sont difficiles à évaluer, aussi parce que les séries chronologiques de données observées actuellement disponibles, au moins le long de nos côtes, sont trop courtes pour extrapoler l'information à long terme.

Une estimation prévisionnelle de l'érosion côtière à long terme ne peut être séparée d'une analyse précise du climat marin. Il est nécessaire de produire des données fiables concernant le climat des vagues le long de la côte, sur la base des principaux paramètres physiques liés à l'état de la mer qui sont la cause de l'érosion côtière à long terme. Dans ce cas, l'échelle de temps de référence est de l'ordre de dizaines d'années, tandis que l'échelle spatiale s'étend au-delà de la limite de l'unité physiographique unique jusqu'à une portée régionale. À partir des données ci-dessus, et grâce à une modélisation adéquate du transport côtier des sédiments, il est possible d'évaluer les effets produits par le mouvement des vagues à long terme à l'aide de modèles d'évolution morphodynamique à long terme.

Les estimations du transport annuel moyen des sédiments le long de la côte et aussi les modèles actuels d'évolution morphodynamique ne tiennent généralement pas compte des changements du climat marin, par exemple, lorsque il y a des évidences, mises en évidence dans divers pays européens, liés aux changements du régime anémométrique concernant les 15 dernières années. Il est donc essentiel d'avoir des données météorologiques le long de la côte aussi fiables que possible et à jour.

B. Echelles de processus

L'action constante de la modélisation morphologique de la côte par le mouvement des vagues et des courants consiste en un ensemble de processus physiques à différentes échelles spatiales et temporelles.

Dans les zones côtières, les processus comprennent les vents, les vagues, les marées et les courants, qui fournissent l'énergie qui façonne et modifie une côte en transportant et déposant des sédiments. Bien que les vagues, les marées et les courants interagissent, un processus peut augmenter ou diminuer les effets d'un autre.

En général, les processus tels que la turbulence, le vent, l'érosion du fond et / ou de la plage et le changement du profil de la plage se produisent dans des temps "micro" (de secondes à minutes) couvrant une échelle spatiale allant du micro au centimètre. Les marées, les transports sédimentaires, les changements côtiers couvrent des échelles de temps plus longues allant de "macro" (de mois à années) à "méga" (de décennies à siècles), alors qu'en termes d'espace, elles représentent des formes de 1 à 10 km. Enfin, des variations à l'échelle sous-régionale et régionale (échelle méga-spatiale > 10 km) se produisent à l'échelle macroscopique (Gallop en 2015, Kraus et al 1991).

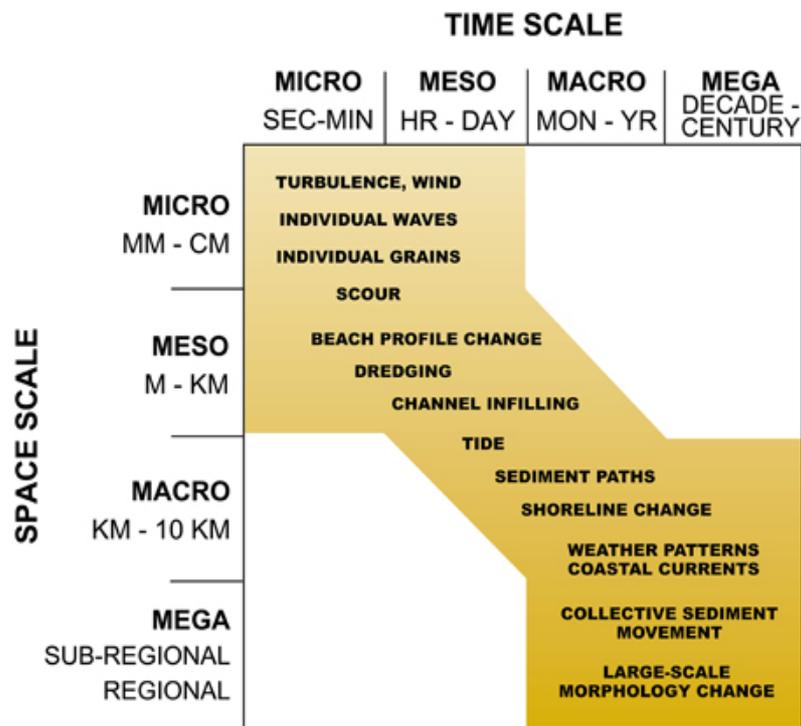


Figure 1: Échelles spatiales et temporelles liées aux processus de couplage hydrodynamique et morphodynamique côtiers (de Gallop à 2015, Kraus et al 1991)

Les vagues générées par le vent sont la source d'énergie la plus importante alimentée dans la zone côtière et, avec les courants générés par les vagues, sont responsables du transport des sédiments.

La petite échelle traite de la description des processus à partir de quelques périodes ou longueurs d'onde dans lesquelles il est possible d'utiliser des modèles théoriques pour décrire en détail le mouvement de la surface de l'eau, la vitesse des particules d'eau et la pression induite par l'onde. Cette approche est définie comme une résolution de phase, elle a une résolution entre une petite fraction de longueur d'onde ou de période mais n'est pas utilisée pour des simulations à long terme.

L'échelle moyenne traite de ce qui est entre cent à plusieurs centaines de périodes ou de longueurs d'onde. Cet intervalle est assez court pour que les conditions soient considérées comme homogènes ou stationnaires et assez longues pour fournir des statistiques fiables; par conséquent, les données enregistrées par une bouée sont généralement analysées en référence à ces intervalles. La grande échelle traite de phénomènes dont la

durée typique est de l'ordre de la longueur de la tempête (dizaines d'heures) et dont les distances sont de l'ordre de centaines à quelques milliers de kilomètres. Ceci permet d'examiner la variabilité spatiale ou temporelle du spectre des ondes et par exemple de tracer le passage des vagues de leur zone de génération sur de grandes distances jusqu'à atteindre la côte. L'approche adoptée, dans ce cas, est médiatisée sur la phase (phase-averaged). Enfin, en considérant les processus morpho-dynamique de la côte à l'échelle des unités géomorphologiques nous devons considérer les statistiques des vagues sur une période de plusieurs dizaines d'années, donc on doit étudier le climat des vagues de la zone d'intérêt.

De même, la variabilité de l'échelle temporelle et spatiale se reflète également dans la diversité des formes de géomorphologie côtière. La ligne de rivage est un élément intrinsèquement variable, qui a peu de chances d'être dans la même position à quelques dizaines ou centaines de mètres du point que vous observez, et qui restera à peine au même endroit quelques jours plus tard.

Une côte peut être considérée en érosion si son évolution n'est analysée que pour une petite partie de son extension, mais il peut être en progrès, ou plus vraisemblablement en équilibre s'elle est observée à l'échelle de toute l'unité physiographique à laquelle elle appartient. En effet, les ondulations de la position du rivage tendent à se compenser en élargissant la zone d'étude, car une partie des sédiments érodés en un point par la dynamique de transport côtier est relâchée dans les zones adjacentes. De plus, l'intervention humaine peut agir sur la variabilité de ces phénomènes, à travers la construction de structures qui entravent l'écoulement côtier des sédiments.

L'évolution temporelle de la ligne de rivage dans un point donné est un concept qui est également très variable selon l'échelle à laquelle il se réfère. La succession d'événements météorologiques d'une certaine intensité a une cyclicité typiquement saisonnière, tandis que si l'on considère les variations du niveau moyen de la mer, l'échelle à considérer est même pluriannuelle.

II. MÉTHODES ET MODÈLES D'ÉTUDE ET DE PRÉVISION DE L'ÉROSION CÔTIÈRE

A. Méthodes et modèles pour l'estimation du transport solide côtier

L'évolution de la côte est étroitement liée au mouvement des sédiments sur la plage, à la fois submergée et émergée. Les courants constituent le principal moyen de transport des sédiments dans l'environnement côtier. Les mécanismes complexes d'interaction entre les vagues et le ressac des vagues côtières sont combinés en motifs horizontaux et verticaux et génèrent des courants côtiers qui produisent le transport des sédiments de la plage. Parfois, ce transport n'entraîne qu'une réorganisation locale du sable dans les bars ou une série d'incisions rythmiques sur la plage. D'autres fois, il y a de grands déplacements de sédiments le long de la côte, jusqu'à des centaines de milliers de mètres cubes de sable chaque année.

Comme on le sait, deux modes de transport solide se distinguent: par suspension (charge suspendue) dans laquelle le sédiment est repris par l'écoulement turbulent de l'eau, et par le fond (charge de fond), où les sédiments restent proches du fond et ils se déplacent en roulant, en sautant ou en glissant.

Le régime hydrodynamique est le facteur le plus pertinent pour le transport solide des sédiments. En général, si vous voulez décrire verticalement le régime d'écoulement, vous avez une couche mince et visqueuse très proche du fond caractérisée par un écoulement laminaire, surchauffé par une couche turbulente. En eau peu profonde, cette couche peut atteindre toute la colonne d'eau et avoir un profil de vitesse logarithmique.

Le mouvement ondulatoire joue également un rôle fondamental dans le transport solide des sédiments, non seulement parce qu'il déclenche les mécanismes de formation des courants côtiers, mais aussi parce qu'il contribue directement, par les oscillations de la vitesse horizontale de la couche limite, à la remontée et à la remise en suspension des sédiments.

Le transport le long de la côte (long-shore) est celui qui affecte le plus la modélisation des plages, déterminant les phases d'érosion ou de croissance. Il est généralement généré par un mouvement d'onde qui affecte le rivage selon un angle oblique et les paramètres qui le caractérisent incluent les caractéristiques du mouvement des vagues (H, T et angle d'incidence), l'indice de frangimento, les caractéristiques texturales des sédiments, la pente de la plage et la rugosité du fond.

Diverses méthodes sont connues dans la littérature pour la détermination du transport long-côtier, même si l'équation de référence est celle relative à la formule dite CERC (Shore Protection Manual, US Army Corps of Engineers, 1984). Il est basé sur le principe que la vitesse totale de transport sur le littoral (transport de fond plus celui en suspension) est proportionnelle à l'énergie de l'onde incidente par unité de longueur de la plage.

Récemment, de nombreux modèles ont été proposés pour modéliser les nombreux processus impliqués dans le transport des sédiments (frangture, tensions radiales, contraintes de coupure, traînage, suspension, interaction onde-courant, etc.), et tenter de les simuler en détail composant. Ces outils utilisent généralement un modèle de propagation d'onde pour calculer les paramètres d'onde le long du profil afin de prendre en compte les caractéristiques bathymétriques. En général, ces modèles sont plus difficiles à mettre en œuvre car ils nécessitent un grand nombre de paramètres d'entrée ainsi qu'un calibrage précis. Des exemples de tels modèles sont décrits dans Deigaard et al. (1986) et UNIBEST-LT (WL | Delft Hydraulics, 1992, Stive et Battjes, 1984).

En plus du transport long-shore, on observe un transport normal vers la côte (cross-shore). Ce transport, dominant en cas d'ondes de tempête, est le résultat du transport vers la côte provoqué par l'action du mouvement de l'onde incidente et celui vers la mer relié au backwash et fortement influencé par le spectre du mouvement de l'onde incidente. Récemment, de nombreuses études ont été réalisées sur le transport transfrontalier dans le but de parvenir à une prévision des variations du profil de la plage émergée et submergée suite à des événements côtiers intenses. Ce qui est certain, c'est que les gradients de transport

actifs lors de ces événements sont particulièrement élevés et que, par conséquent, les variations morphologiques induites peuvent être particulièrement significatives à la fois spatialement et temporellement. Dans ce cas également, différents modèles ont été développés (par exemple Kobayashi, 2005) ou commerciaux (par exemple MIKE code 21 - module ST), qui permettent de prendre en compte les principaux éléments à paramétrer (caractéristiques physiques des sédiments, caractéristiques morphologiques de la plage émergée et submergée, caractéristiques du mouvement des vagues, etc.).

Les résultats de la modélisation, associés aux données disponibles, sont fondamentaux pour une interprétation adéquate de la dynamique des sédiments et des phénomènes d'érosion; la complexité des interactions dynamiques non-linéaires entre sédiments, morphologie et forçage (mouvement des vagues, courants, ...) rendent l'interprétation de l'évolution d'un environnement complexe tel que le côtier et donc la prévision à long terme (sur des échelles de temps pertinents pour la société humaine) des risques liés à l'érosion côtière sont particulièrement complexes et nécessitent une activité continue de mise à jour des données et des modèles disponibles. Ceci afin de pouvoir activer une planification et une planification correctes des interventions le long de la côte pour se défendre contre l'érosion, en vue d'optimiser les ressources disponibles.

Les modèles de transport solide sont intégrés dans différents types de modèles 2D et 3D, discutés dans le rapport T2.1.1. Ils peuvent être utilisés pour des études de processus et pour l'étalonnage de modèles de transport solide (pour comparaison avec des données topo-bathymétriques), mais, compte tenu de l'effort de calcul considérable requis, ils ne permettent pas encore des simulations à long terme.

B. Reconstruction des ondes à l'échelle du bassin et régionalisation des vagues

L'étude du climat des vagues est l'acquisition d'une série statistiquement significative de données historiques représentatives des vagues incidentes offshore. L'analyse statistique permet de reconstruire le climat annuel moyen des vagues, normalement exprimé en termes de fréquence moyenne associée aux classes de directions et de longueurs d'onde, et les conditions extrêmes ondulées attendues pour certaines valeurs de la période de retour, en utilisant des fonctions de distribution appropriées probabilistes. Les données d'onde peuvent être obtenues en utilisant les méthodes suivantes:

1. Les méthodes indirectes, c'est-à-dire les méthodes empiriques et les modèles mathématiques développés à partir de la prévision (forecasting) ou des données historiques (hindcasting) pour la reconstruction de séries chronologiques d'ondelettes; Les données de grande échelle obtenues par des mesures directes ou indirectes (modèles) peuvent être propagées à l'autre au moyen de modèles numériques de propagation spectrale non linéaire (par exemple. SWAN, WaveWatch III ou WW3, WAM) qui permettent aux grilles emboîtement avec discrétisation de maille dans différentes étapes. Ces modèles prennent en compte, entre autres, les processus liés à la dissipation des ondes, tels que la modélisation de la dissipation liée au white-caps ou à la rupture en haute mer. WW3 et SWAN permettent une implémentation du modèle de maillage non structuré, ce qui permet de traiter l'échelle du bassin et l'échelle côtière détaillée au sein du même modèle. D'autres modèles utilisés dans le passé, comme la méthode SMB (mis au point par les océanographes grand Sverdrup, Munk et Bretschneider), aujourd'hui principalement d'une importance historique.

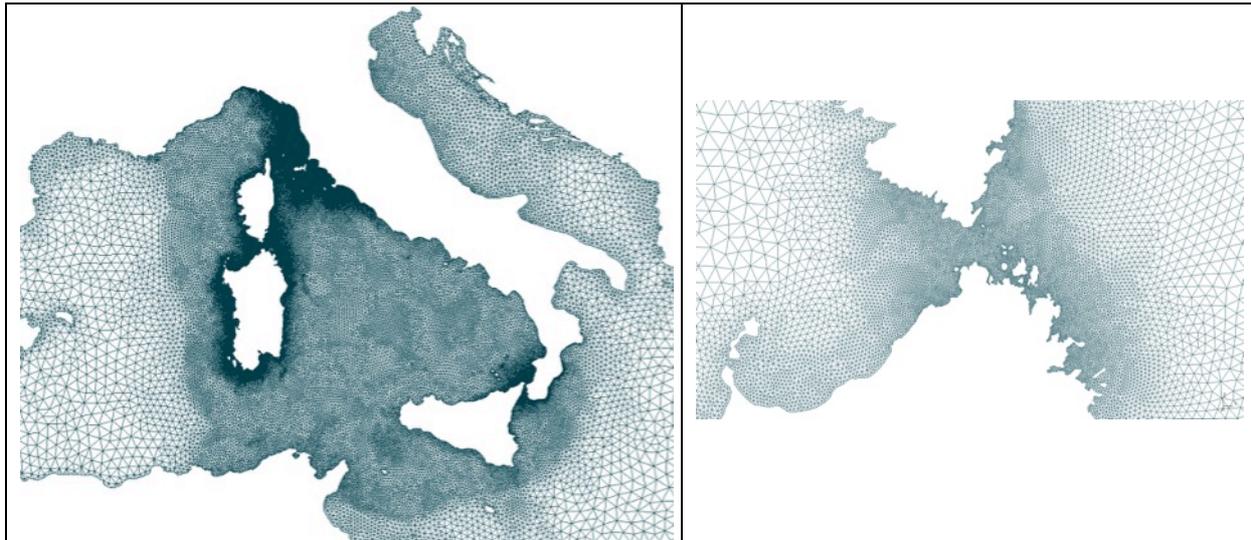


Figure 2 Exemple d'une grille de maillage non structurée pour la prédiction et la simulation des modèles de propagation d'onde pour le mouvement de prévision et de rétopolation. Source: LaMMA.

2. Les méthodes directes, c'est-à-dire la mesure sur site des paramètres de la houle dans les stations proches de la zone d'étude.

En général, les méthodes directes disponibles pour la mesure sur site des caractéristiques des vagues peuvent être classées en trois grandes catégories:

- A. mesures effectuées sous la surface de la mer, par exemple à l'aide de capteurs de pression ou de compteurs acoustiques Doppler;
- B. mesures effectuées à la surface de la mer, par exemple au moyen de plates-formes, de poteaux ou de bouées;
- C. les mesures effectuées au-dessus de la surface de la mer, par exemple au moyen des techniques du radar côtier, ou Lidar, ou en utilisant des observations par satellite. Ce type inclut également des observations par webcam qui vous permettent d'acquérir des séries historiques d'images à travers lesquelles vous pouvez analyser certains caractères des vagues ci-dessous.

C. Modèles morphodynamiques à court et à moyen terme

Les modèles morphodynamiques liés aux processus moyens (de quelques semaines à quelques mois) ou courts (de quelques heures à quelques jours) permettent de déterminer les variations de la bathymétrie côtière induites par ces processus. Ces modèles peuvent être classifiés génériquement selon l'approche par rapport au mode de transport du composant en suspension: on distingue notamment les modèles permettant de résoudre l'équation 3D du bilan massique (advection-diffusion). Ces modèles conviennent le mieux à la présence de sédiments plus fins qui, dans des conditions turbulentes, sont répartis sur une plus grande partie de la colonne d'eau. Un autre élément à prendre en compte est la présence ou l'absence de la simulation du transport cross-shore due au lavage à contre-courant, qui est couramment mis en œuvre pour les modèles Q3D ou 3D. Dans ces modèles, la détermination des champs d'onde et d'écoulement est basée sur une formulation de moyenne de phase, qui permet des étapes de temps plus longues que la modélisation à résolution de phase.

L'avantage de ces modèles est de pouvoir considérer des modèles de bathymétrie non réguliers et de mettre en œuvre la présence de structures côtières réfléchissant le mouvement des vagues ou les courants d'interruption.

Parmi les modèles existants nous rappelons le modèle X-Beach, un modèle numérique open-source

spécifiquement conçu pour simuler des processus hydrodynamiques et morphodynamiques sur des plages sablonneuses à une échelle de temps relative à un événement tempête, pour un domaine d'extension kilométrique.

Un exemple commercial est le module MIKE 21 ST (transport de sable) qui, une fois introduit les caractéristiques sédimentaires en termes de taille moyenne des particules (d50) et de variabilité de la masse fondue (calibrage des sédiments), permet de répartir la capacité de transport domaine de calcul en termes de transport combiné des composants longitudinaux (long-shore) et transversal (cross-shore). Le modèle commercial TELEMAC-MASCARET dispose également d'un module (SISYPHE), qui permet de modéliser des processus hydrodynamiques complexes dans différents environnements (côtes, rivières, estuaires, lacs).

D. Modèles morphodynamiques à long terme

La morphologie côtière est modélisée par l'interaction des processus de transport solides déclenchés par le mouvement des vagues et les courants long-shore et cross-shore. La modélisation à long terme de l'évolution morphologique du littoral doit donc être comprise comme une modélisation de ces processus. Tout d'abord, il est nécessaire d'avoir un modèle de transport à longue distance solide. Par conséquent, la modalité de couplage de ce modèle avec les variations de la morphologie de la ligne de rivage doit être identifiée. De plus, le modèle doit pouvoir prendre en compte, à terme, les situations locales (effet des structures côtières, nourishments, etc.).

MODÈLE	SITE WEB	RÉFÉRENCE	GRID	MOUVEMENT DE VAGUE	LONGSHORE TRANSPORT
LITPACK Littoral processes and coastline kinetics	https://www.mikepowere.com/products/litpack	DHI (2009a-d)	1D – grille linéaire par rapport à la position de la ligne de rivage	Modèle d'onde interne; interaction onde-courant	Calcul du transport avec forçage d'onde et de courant sur profil 2D (horizontal et vertical). Formulation pour gradient de sable non uniforme et plages en gravier
GENESIS GENERALized model for Simulating Shoreline change	http://www.veritechinc.com/products/cedas/cedas-details	Hanson (1987); Hanson and Kraus (1989); Gravens, Kraus and Hanson (1991); Hanson and Kraus (2004)	1D – grille linéaire par rapport à la position de la ligne de rivage	Modèle d'onde interne; modèle spectral couplé	Paramètres calculés à la rupture et inclus dans la formule CERC
UNIBEST Uniform Beach Sediment Transport	https://www.deltares.nl/en/software/unibest-cl/	Deltares (2011)	1D – grille linéaire par rapport à la position de la ligne de rivage. Il est possible de changer la taille de la cellule	Modèle d'onde interne; interaction onde-courant	Calcul similaire au LITPACK, mais il est également possible d'appliquer la formule CERC. Formulation pour gradient de sable non uniforme et plages en gravier
GenCade	https://www.aquaveo.com/software/sms-gencade	Frey et al. 2012	1D - grille curviligne	Modèle d'onde interne	Paramètres calculés à la rupture et inclus dans la formule CERC
COSMOS-COAST	Available on request by the authors	Vitousek et al., 2016	1D grille linéaire par rapport à la position de la ligne de rivage	Ondes générées à l'extérieur par d'autres modèles (par exemple, SWAN, WW3)	Paramètres calculés à la rupture et inclus dans la formule CERC. Data assimilation (Kalman filter)

Table 1 – Modèles morphodynamiques «une ligne».

L'approche la plus commune de cette modélisation est donnée par les modèles dits «one line». Dans ce cas, il est supposé que la forme du profil de la côte est constante et que la continuité est maintenue par un simple déplacement de l'ensemble du profil transversal vers la mer en cas d'accrétion ou vers la terre en cas d'érosion. Dans ce cas, le modèle de transport solide évalue le taux de transport à chaque point de la côte en fonction du climat des vagues à ce point et de l'orientation de la côte. Généralement, ce modèle ne prend pas en compte l'effet de mémoire des positions de mise à jour. Le modèle de transport solide peut être basé sur des équations

empiriques simples ou sur une modélisation plus complexe de processus physiques. Un exemple d'un modèle largement utilisé est le code GENESIS; outre les caractéristiques précitées de ce modèle, il n'y a pas de calcul direct de la composante transversale du transport solide côtier, qui peut toutefois être introduit a priori également pour simuler, par exemple, des écoulements solides, des pertes offshore et / ou des interventions alimentaires. Les modèles les plus utilisés, outre GENESIS, sont: le LITPACK de DHI, composé de plusieurs modules utilisés pour analyser les processus côtiers sur une côte régulière; et UNIBEST par Deltares.

Des modèles N-line ou multicouches existent également en tant qu'extension du modèle à une ligne. Dans ce cas, le profil côtier est schématisé par une série de lignes (ou couches), dont le but est de mettre en œuvre le transport transfrontalier dans des modèles simples à une ligne. Ceux-ci sont couplés à travers un modèle de transport côtier qui les oblige à une configuration d'équilibre. Le transport long-shore est ensuite modélisé pour chaque ligne en fonction de sa tendance 2D.

Les principales caractéristiques communes à ce type de modèles sont:

- type de grille,
- le mouvement des vagues, principal moteur du transport côtier solide;
- le transport côtier solide, qui est principalement responsable des changements dans la ligne de rivage, dans un modèle à une ligne.

Normalement, ces modèles nécessitent de longs cycles d'étalonnage pour calibrer les paramètres du modèle.

Une approche différente est donnée par le modèle COSMOS-COAST, développé par l'USGS, dans lequel une méthode originale de réduction de l'incertitude a été mise en œuvre sur la base d'une méthode d'assimilation avec laquelle les paramètres du modèle sont calculés de manière rigoureuse. observations précédentes (en particulier la position de la ligne de rivage) dans un algorithme basé sur un filtre de Kalman.

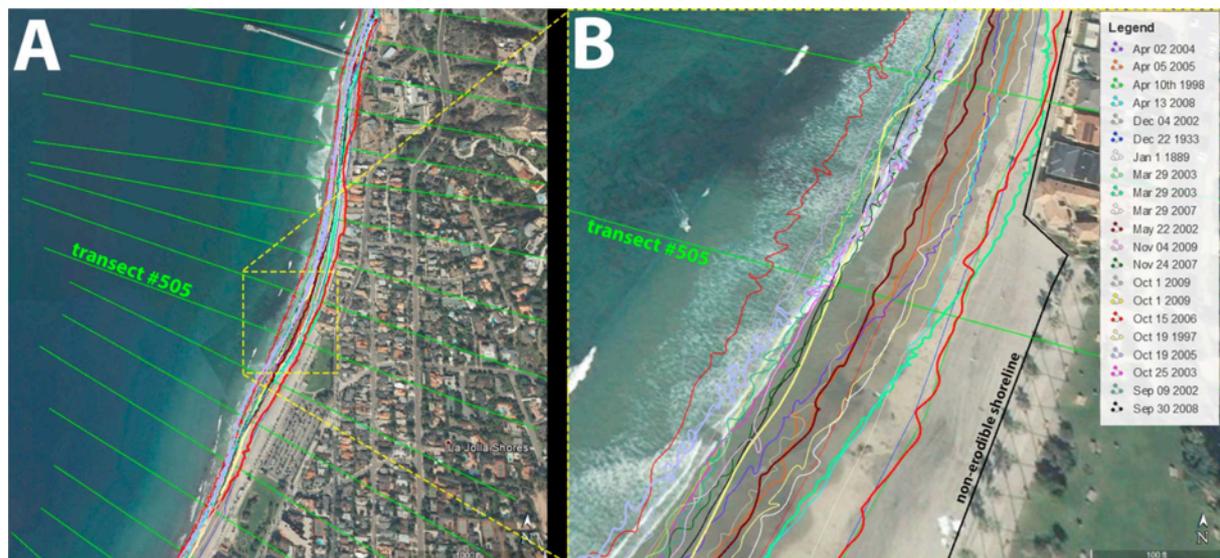


Figure 3 Exemple d'application du modèle COSMoS-COAST à une section de la côte californienne (Vitousek et al., 2017).



Figure 4 Exemple d'application du modèle COSMoS-COAST au tronçon de la côte nord du port de Carrara (source: LaMMA).

E. Estimation de l'augmentation du niveau moyen de la mer

L'élévation du niveau moyen de la mer (SLR) est un phénomène largement traité par la communauté scientifique ces dernières années. L'élévation du niveau de la mer est généralement attribuée au changement climatique mondial par l'expansion thermique de l'eau dans les océans et la fonte des calottes glaciaires et des glaciers terrestres (principalement l'Antarctique et le Groenland). Les impacts liés à la SLR sont évidemment particulièrement significatifs pour les zones dites LECZ (Low Elevation Coastal Zones) qui entourent l'ensemble de la Méditerranée..

Il faut souligner que le niveau de la mer a toujours subi des variations, par exemple 9-10 mille ans le niveau était inférieur à au moins 30 m et il y a des preuves importantes, même dans les temps historiques que le niveau de la mer était inférieur à Période romaine (voir par exemple des piscines que les Romains utilisaient pour l'aquaculture le long de la côte, maintenant submergée).

Les projections futures sont réalisées sur la base de scénarios calculés avec des modèles assez complexes. Les projections à l'échelle mondiale du GIEC sont couramment utilisées pour estimer l'augmentation du niveau moyen de la mer (par exemple, Church et al, 2013), mais de nouvelles projections sont attendues pour 2018.

En fait, l'élévation du niveau de la mer dans des endroits spécifiques peut être plus ou moins la moyenne mondiale, et plusieurs facteurs locaux doivent être pris en compte. Pour déterminer l'augmentation relative du niveau de la mer dans la zone d'intérêt, les effets liés au comportement attendu des taux de variation liés à la fonte de la glace, à la thermo-isostasie, à la glacio-isostasie, aux sédiments doivent être pris en compte. isostasie, variations de la tectonique, eustatique-stérique, variations de la force de gravité, de la subsidence naturelle, et non des moindres, liées à l'activité anthropique (p.ex. déterminée par l'extraction d'eau ou de gaz naturel du sous-sol), mais aussi marées, les courants, les tempêtes, etc.

La Méditerranée a quelques particularités par rapport à la situation mondiale:

1. C'est un bassin d'évaporation (c'est-à-dire qu'il évapore plus d'eau que le remplacement de l'eau douce de la pluie et des rivières), relié à l'océan global par l'ouverture du Gibraltar étroit (~14 km). Les échanges d'eau entre la Méditerranée et l'Atlantique ont un contrôle hydraulique près du détroit où les marées et les différentes densités entre l'Atlantique et la Méditerranée jouent un rôle important (ce dernier est beaucoup plus salé). En pratique, le niveau de l'Atlantique est supérieur de plusieurs centimètres à celui de la Méditerranée. Il est également important de noter que les modèles globaux, utilisés pour des scénarios à long terme, ne simulent pas la Méditerranée de manière acceptable, car ils ne résolvent pas le détroit de Gibraltar.
2. Précisément parce qu'en Méditerranée il est très important aussi la salinité, et pas seulement la température, il y a un effet important ou effet alostérique, lié à l'équation de l'eau de mer, donc la variation de salinité tend à équilibrer la variation des températures (Marcos et Tsmplis, 2008).

3. Le niveau de la mer dépend aussi localement de la circulation et, par conséquent, les projections doivent prendre en compte tous les processus physiques (par exemple, il existe une différence de niveau importante entre la mer Tyrrhénienne méridionale et la mer Ligure).

Un exemple de sources de données possibles:

Expansion thermique (globale)	CMIP5
Changement de hauteur dynamique (local)	CMIP5
Perte de masse - calotte glaciaire	World Glacier Monitoring Service (WGMS), analyse probabiliste, littérature
Perte de masse - glaciers et hottes de glacier	World Glacier Inventory (WGI), GLIMS Glacier Database
Composante gravitaire et isostatique	littérature
Mouvements verticaux (GIA, glacial isostatic adjustment)	ICE-5G
Land water storage	IPCC 2013

Table 2 – Sources de données sur l'estimation des zones côtières submergées en raison du changement climatique.

Des études sur la variation du niveau moyen mondial de la mer sont également réalisées à partir de données issues de l'altimétrie satellitaire (TOPEX / Poséidon, Jason, etc.), avec lesquelles il est possible d'avoir une série temporelle homogène à partir du début des années 90.

Il est important de prendre en compte les sources de données les plus fiables pour la Méditerranée.

La contribution du TIM, Fondre de Glace Terrestre, calculée pour deux scénarios différents RCP (Representation Concentration Pathways), ou RCP4.5 et RCP8.5 (Slangen et al., 2014), pour la Méditerranée est respectivement de 35 cm et 43 cm d'ici 2100 (Sannino et al., 2018). Le scénario RCP8.5 en particulier est celui considéré comme le pire dans le calcul du SLR au niveau global. Dans la même étude, les taux de mouvements tectoniques verticaux à long terme pour la Méditerranée sont également indiqués. En particulier, sur de nombreux points de la côte ligure et de la haute mer Tyrrhénienne, les mouvements sont de l'ordre de +/- 0,15 mm / an. L'augmentation du niveau de la mer induite par les mouvements verticaux isostatiques (GIA, Glaciaire Isostatic Adjustment) calculée par le code SELEN devrait être comprise entre 2 et 6 cm, donc beaucoup plus faible que la contribution TIM, même si elle est de variabilité régionale.

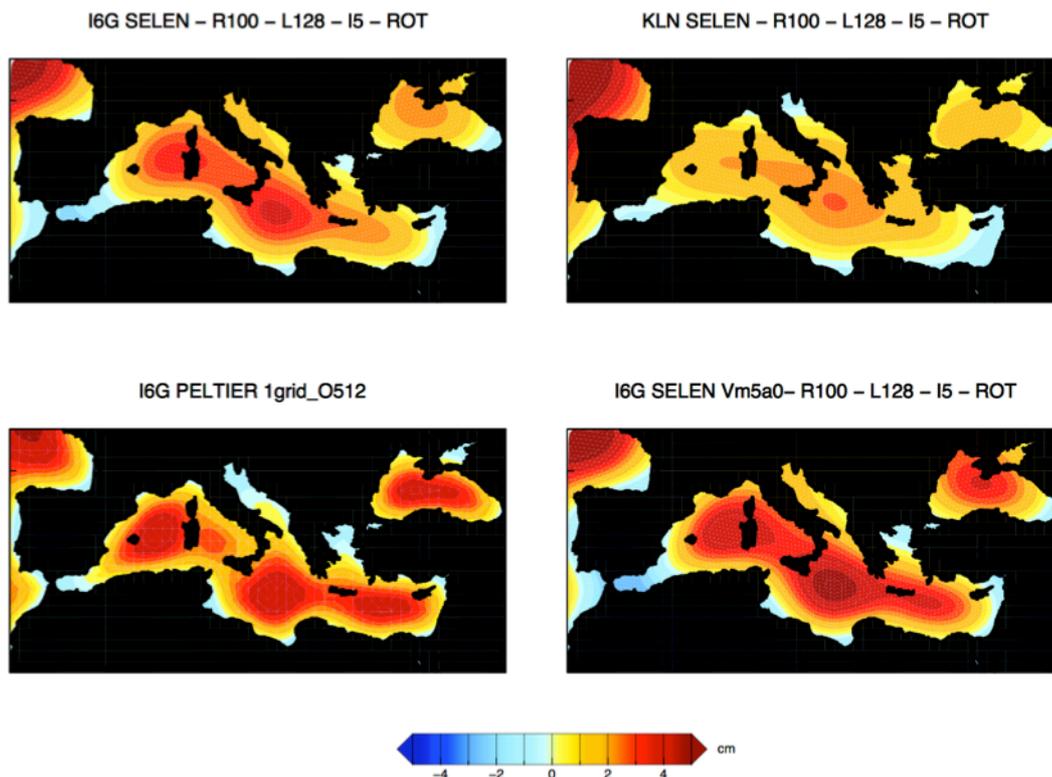


Figure 4 Augmentation relative du niveau de la mer induite par la régulation isostatique glaciaire (GIA) en réponse à la fonte des calottes glaciaires du Pléistocène supérieur. Les résultats sont obtenus grâce au code SELEN (Spada e Stocchi, 2007) prenant en compte les effets de déformation, de gravitation et de rotation et supposant l'incompressibilité (avec l'aimable autorisation de Gianmaria Sannino, ENEA).

F. Indices de vulnérabilité de la côte

Plusieurs éléments déterminent l'exposition d'une partie de la côte au risque d'érosion et, dans la littérature, plusieurs indices synthétiques prennent en compte les différents facteurs. Récemment, Nguyen et al. (2016) ont publié une revue des approches méthodologiques et des indices de vulnérabilité élaborés sur le sujet.

Parmi les premiers exemples d'indices basés sur le forçage géomorphologique et climatologique, on peut citer l'indice CVI Coastal Vulnerability Index (Gornitz, 1991), qui prend en compte 7 variables attribuant à chacune d'entre elles les classes de risque de 1 à 5 variable elle-même. L'indice est ensuite calculé comme la racine carrée du produit des différents facteurs, divisé par le nombre de variables présentes.

Les variables en question sont représentées par l'élévation du terrain, la lithologie, le type de côte (plage, falaise, etc.), les variations du niveau de la mer, l'évolution de la ligne littorale, l'excursion de marée, la hauteur des vagues. Certains modèles, comme dans McLaughlin et Cooper (2010), ont ajouté aux caractéristiques de la côte et au forçage qui en découle, l'aspect socio-économique en tant que sous-indice à considérer avec les autres, calculé séparément, pour évaluer la quantité et la qualité des infrastructures potentiellement dangereuses. Parmi ces variables figurent la population, l'utilisation des terres et la présence d'infrastructures telles que les routes et les chemins de fer. CVI final est le résultat de la moyenne des trois sous-indices nommés Caractérisation côtière, Forçage côtier et Socio-économique.

Dans certains cas, la formulation originale a été adaptée aux caractéristiques du cas spécifique, comme pour les plages australiennes pour lesquelles Abuodha et Woodroffe (2006) ont ajouté les paramètres liés à la hauteur de la dune côtière, le type de barrière de sable et le type de plage (dissipatif, réfléchissant etc.) les remplaçant par ceux liés à la géomorphologie et à la pente de la plage.

Le type d'agrégation des sous-indices est l'un des discriminants entre les différentes méthodes: dans certains, tels que, dans l'Indicateur de la vulnérabilité aux inondations causées par les ondes de tempête (Harvey et al.,

2009), aucun type d'agrégation d'indicateurs de nature différente n'est suggéré, tandis que Torresan et al. (2008), deux ensembles d'indices de vulnérabilité sont identifiés, l'un pour l'analyse à l'échelle régionale sur la base d'ensembles de données spécifiques au site, l'autre pour les études mondiales. De plus, dans l'environnement GIS, le littoral est divisé en différents secteurs (un nombre important pour les études au niveau régional, très limité si l'étude est plutôt à plus grande échelle) comparé pour identifier les zones homogènes du point de vue de la vulnérabilité côtière.

L'approche qui considère les différentes variables comme des indicateurs distincts a été initialement utilisée par le projet EuroSION, qui, sur la base de l'approche DPSIR (Drivers, Pressures, State, Impact, Response) (EEA, 1995) avait identifié 13 indicateurs, dont 9 dans la catégorie "sensibilité" et 4 dans la catégorie "impact":

- 1 Hausse relative du niveau de la mer
- 2 Tendence évolutionnaire de la ligne de rivage
- 3 Changements dans la ligne de rivage de la stabilité à l'érosion ou la progression
- 4 HWL, *Highest Water Level*
- 5 Urbanisation côtière à moins de 10 km de la côte
- 6 Réduction de la contribution du solide fluvial
- 7 Lithologie de la côte
- 8 Altitude
- 9 *Engineered frontage* (y compris les travaux de défense)
- 10 Population résidente dans la gamme d'action d'érosion ou d'inondation (RICE)
- 11 Urbanisation côtière à moins de 10 km de la côte
- 12 Zones urbaines et industrielles au sein du RICE
- 13 Zones de valeur écologique au sein du RICE

G. AUTRES PROJETS SUR LE RISQUE CÔTIER À LONG TERME

NOM	ANNÉE	RÉFÉRENCE	PROCESSUS	CARACTÉRISTIQUES
EUROSION	2004	https://rcahmw.gov.uk/the-royal-commission-leads-on-new-4m-eu-funded-project/	Érosion côtière, résilience côtière, gestion des sédiments	<p>EUROSION part du principe que l'érosion côtière est un phénomène qui ne peut jamais être totalement maîtrisé mais qui peut être géré de manière économiquement et écologiquement durable.</p> <p>La vision holistique privilégiée par le consortium intègre: les causes de l'érosion naturelle et induite par l'homme (tempêtes, mouvements sismiques, réduction de l'apport de sédiments des rivières à cause des barrages, défenses côtières, etc.); les différentes utilisations de la côte - y compris ses parties terrestres et marines - allant de la conservation de la biodiversité et du paysage au tourisme, à l'industrie et au transport; différents niveaux de gestion - des mers locales aux mers européennes et régionales; considérations sur le bassin fluvial; préoccupations actuelles et perspectives à long terme (changement climatique)</p>
Coastal-Simulator	2000-	Mokrech et al., 2009 Dawson et al., 2009	Les ondes de tempête Élévation du niveau de la mer Inondation Érosion côtière	Pour la planification et la gestion du littoral, le projet développe une simulation à long terme (Tyndall Coastal Simulator) des processus côtiers, en supposant différents scénarios d'impacts potentiels et d'incertitude relative. Le simulateur est basé sur une série de modèles climatiques connectés (CM) dans un cadre imbriqué qui reconnaît trois échelles spatiales: (i) l'échelle globale (GCM); (ii) l'échelle régionale et (iii) le domaine du simulateur (une unité physiographique, comme une sous-cellule côtière).
DIVA	1999-	Hinkel e Klein, 2009	Élévation du niveau de la mer Les ondes de tempête inondation Érosion côtière Changement de zones humides Intrusion saline	Le modèle DIVA (Dynamic Interactive Vulnerability Assessment) comprend quatre composantes principales: une base de données mondiale détaillée des données côtières biophysiques et socio-économiques; scénarios à long terme (jusqu'à 2100) d'élévation du niveau de la mer et d'analyse socio-économique; modèle intégré qui évalue les impacts biophysiques et socio-économiques et les effets potentiels et les coûts connexes; interface graphique pour la sélection de données et de scénarios.
SimCLIM	2005-	Warrick (2009)	Élévation du niveau de la mer Inondation Érosion côtière	Le système SimCLIM dispose d'un système intégré verticalement qui relie les données et les modèles mondiaux, avec des modèles locaux et sectoriels pour l'analyse des impacts par exemple sur les côtes, l'agriculture, la santé humaine.
CONSCIENCE	2010	http://www.conscience-eu.net/	Érosion côtière, résilience côtière, gestion des sédiments	CONCEPTS ET SCIENCES pour la gestion de l'érosion côtière est conçu pour agir en tant que structure opérationnelle pour la gestion durable de l'érosion côtière. Il s'agit d'un projet de recherche dans le cadre du sixième programme-cadre de recherche de l'UE (FP6). L'objectif stratégique du projet CONSCIENCE est de développer et de tester des concepts, des lignes directrices et des outils pour la gestion durable de l'érosion le long des côtes européennes, sur la base des meilleures connaissances scientifiques disponibles et de l'expérience pratique existante.

III. CONTENU DU RAPPORT TECHNIQUE SUR LES VAGUES POUR L'ETUDE ET LA PREVISION DE L'EROSION CÔTIÈRE

A. Description des données relatives à la zone en question: plage émergée et submergée

L'analyse du transport des sédiments côtiers et des tendances évolutives d'une plage est réalisée en tenant compte à la fois des caractéristiques météorologiques et morphologiques (par exemple, pente de la plage, formes de fond, etc.) et sédimentologiques. Ces deux derniers aspects ne sont pas indépendants du climat marin, en effet les ondes et l'hydrodynamique à l'échelle côtière sont influencées par la morphologie du fond et aussi par le type de plage. La morphologie influence les caractéristiques des vagues près de la ligne de rivage (profondeur de la rupture ou la réflexion des vagues), mais aussi l'hydrodynamique dépend fortement de la morphologie côtière et des caractéristiques du fond (rugosité de fond).

L'équilibre d'une plage nécessite l'évaluation des aspects liés à la morphologie tels que l'orientation de la plage, les caractéristiques de son profil et les formes dans la partie émergée et submergée.

Des levés directs à l'aide d'instruments GPS, couplés à un échosondeur et montés sur un bateau pour l'analyse de la section submergée, permettent de cartographier des coupes transversales de la plage à partir desquelles diverses informations sont obtenues; cette information est encore plus détaillée si les données relatives à plusieurs profils adjacents sont interpolées pour obtenir un DTM, un objectif qui peut être atteint pour la plage immergée en utilisant la technologie singlebeam et multibeam (plus détaillée).

Dans les rapports techniques et les études météorologiques, il est souvent fait référence à la profondeur de fermeture qui représente conceptuellement la limite vers la plage submergée au-delà de laquelle les changements dans la morphologie du fond marin sont considérés comme négligeables pour un temps de retour donné. Cela se produit lorsque l'énergie des vagues n'est plus en mesure de déterminer un déplacement significatif des sédiments.

Du pied de la dune à la profondeur de fermeture, le profil de la plage fournit d'abord des informations sur la pente de chaque tronçon; il est possible de noter la présence ou l'absence de différentes morphologies, et leurs dimensions. Certains d'entre eux sont typiques des saisons associées à des climats des vagues plus persistants, ou simplement des moments après les tempêtes, tels que les barres submergées qui peuvent être trouvées dans les premiers mètres de profondeur, ou les bermes d'orage dans le tractus émergé. D'autres morphologies, telles que les bermes ordinaires ou pas, sont généralement présentes même en l'absence d'événements particulièrement intenses.

La comparaison entre les sections transversales prises au même moment à différents moments peut mettre en évidence le mouvement cross-shore de sédiment, telle que l'avancement / rétraction de la rive ou de la barre immergée. Le caractère tridimensionnel fourni par la création d'un DTM de l'étude permet l'analyse de la forme et des dimensions des morphologies telles que des barres ou des creux, et l'identification des éléments typiques des plages telles que les cuspidés.

À partir des caractéristiques granulométriques des sédiments peuvent être inférées non seulement la taille moyenne du même, mais par la combinaison de certains paramètres (asymétrie, taille moyenne) est possible d'envisager quels sont les flux de transport dans la zone d'enquête. Par exemple, si dans une partie du fond marin on trouve des sédiments mieux classés et plus fines que d'autres situés plus ou moins à la même profondeur, on peut supposer que la direction de transport à la fois vers le même point, parce que généralement la taille des sédiments au cours du transport a tendance à rétrécir et à devenir plus homogène.

B. Description et traitement de l'information

1) Climat météorologique

L'analyse du climat météorologique d'une zone côtière peut être abordée au moins à deux niveaux d'analyse:

- analyse du climat marin à l'échelle régionale (offshore)
- analyse du climat météorologique à l'échelle côtière

L'objectif de cette analyse est de définir le régime anémologique, ondamétrique et hydrodynamique (y compris les changements dans le niveau de la mer), en tant que principal responsable des processus morphodynamiques côtiers. Les données de vague sont obtenues grâce à une combinaison appropriée de données in situ et de données de modèle, en particulier:

- le climat des grandes vagues se caractérise principalement par l'utilisation de données provenant de bouées directionnelles; les paramètres à prendre en compte sont la hauteur significative de la vague, la direction (D_m et D_p) de l'onde, la période (T_m et T_p), et éventuellement les spectres de mouvement des vagues. La série de référence historique devrait avoir une durée d'au moins dix ans;
- en l'absence d'informations suffisamment représentatives sur le régime ondamétrique offshore, il est possible d'utiliser des estimations fournies par des modèles numériques rétrospectifs dans lesquels la capacité du modèle à reconstruire correctement les données collectées indépendamment aux points de mesure disponible ou dans les pays voisins;
- le régime côtier se caractérise principalement par l'utilisation de modèles de reconstruction côtière le long de la côte, dûment validés par une comparaison spéciale entre les données observées disponibles le long de la côte et les données correspondantes fournies du modèle au même endroit. Ces modèles peuvent être basés sur le calcul de la propagation des ondes à partir de données offshore, ou on peut recourir à des modèles spéciaux à maillage non structuré dans lesquels les vagues sont calculées en même temps que celles près de la côte, assurant une plus grande cohérence des résultats pour la régionalisation du climat météorologique.

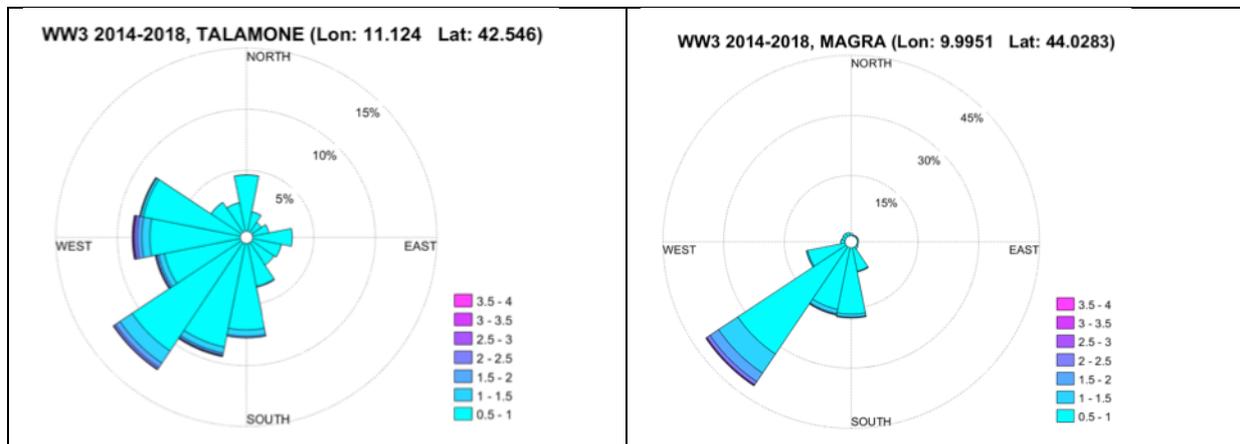


Figure 5 Exemple de l'élaboration de roses de vague sur deux sites de la côte toscane.

Les données de mesure in situ sont obtenues principalement au moyen de bouées de longueur d'onde ou de compteurs acoustiques Doppler (mesures directes); bien que des mesures indirectes soient également disponibles (à partir des radars côtiers, des webcams ou des satellites), on pense qu'elles ne peuvent être utilisées que si elles ont été étalonnées par des mesures directes.

Les modèles numériques de référence pour la reconstruction des ondes et leur propagation d'un océan à l'autre sont les modèles de propagation spectrale non linéaire qui représentent l'ensemble des phénomènes de

génération, de propagation, d'interaction non-linéaire entre les ondes et dissipation (white-capping et breaking). Ces modèles, discutés dans le précédent rapport T2.1.1, sont contraints par les vents obtenus par la simulation rétrospective (hindcast) des modèles météorologiques. À partir des résultats de ces modèles, il est possible de traiter directement les données en reconstruisant des roses des vagues (généralement des tables à double entrée dans lesquelles la fréquence des événements est fournie dont la direction et la hauteur significative des vagues se situent dans un intervalle donné). Les roses des vagues fournissent des indications sur les événements dominants dans la zone d'étude, mais elles sont aussi des informations très incomplètes. Une vision nettement plus profonde est celle qui fournit une analyse du climat spectral, dans laquelle les spectres des vagues sont élaborés avec des techniques de classification appropriées et les régimes d'ondes sont identifiés selon les caractéristiques des spectres des vagues. Cette dernière analyse est considérée comme particulièrement significative tant pour les études morphodynamiques à long terme que pour les projets d'ingénierie côtière, car de nombreuses situations d'intérêt sont constituées par des états marins complexes (par exemple, des spectres à plusieurs pics représentant états de mer croisés) qui ne sont pas décrits par des approximations basées uniquement sur la hauteur et la période des vagues. Enfin, si les données disponibles couvrent au moins 40-50 ans, il est également possible de déduire des informations sur la tendance de l'évolution à long terme. Cet aspect est particulièrement important pour l'évaluation des effets du changement climatique en cours. En fait, les changements observés sur de nombreux sites mondiaux ont été associés à des changements dans les régimes vents/vagues dans les deux hémisphères (Short et al., 2000, Thomas et al., 2010). Il a également été découvert que ces changements entraînent des effets importants tels que l'érosion ou la rotation de la plage par rapport à l'orientation d'origine. Ces effets sont connus dans de nombreux sites, y compris en Méditerranée, où de nombreuses zones côtières sont sérieusement affectées par la combinaison de facteurs naturels et anthropiques. Dans le nord de la Méditerranée, par exemple, de nombreuses données et activités de surveillance suggèrent une augmentation relative de la fréquence des vents et des mers du sud-est (SW ou sirocco) et une diminution relative du flux nord-ouest (mistral), avec des conséquences possibles sur l'équilibre morphodynamique de plusieurs sites côtiers.

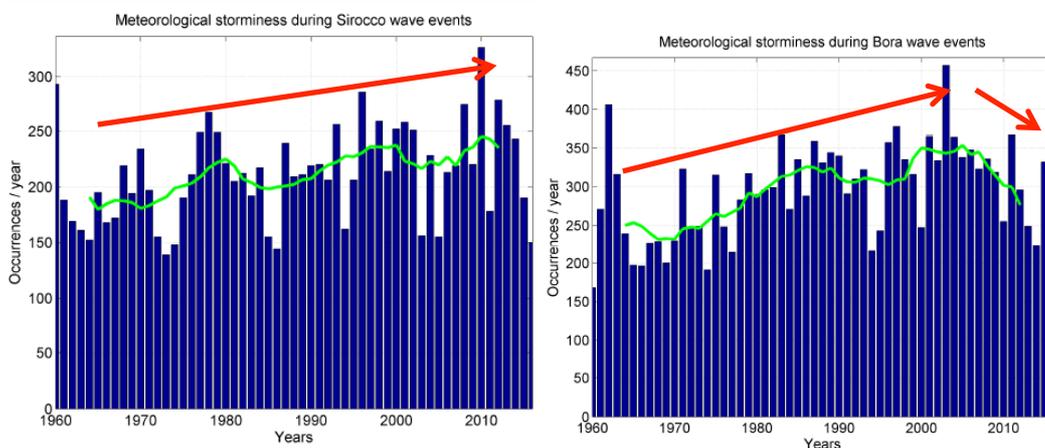


Figure 6 estimation de la tempête dans un site de la côte adriatique, où l'augmentation relative des événements de Sirocco (SE) et le décrétement relatif des événements de Bora (NE) sont mis en évidence. Courtoisie d'Andrea Valentini (ARPA ER).

2) Niveau de la mer

Comme décrit au paragraphe II.E de ce rapport, pour réaliser une étude morphodynamique à long terme, il est possible d'obtenir une projection du niveau moyen de la mer sur une zone donnée, en prenant en compte:

- a) les projections de hausse du niveau de la mer jugées les plus fiables pour les côtes méditerranéennes (et en particulier pour la Méditerranée du Nord-Ouest);
- b) du mouvement tectonique vertical à long terme d'une certaine zone.

Les variations du niveau moyen de la mer le long de la côte sont mesurées principalement par des mesures in-situ (marégraphes, hydromètres). Les modèles de circulation numérique à long terme peuvent être utilisés en appliquant la physique complète des interactions atmosphère-mer, soit la marée astronomique, l'effet de la pression atmosphérique, les effets du vent et le mouvement des vagues le long de la côte (wave set-up et wave set-down).

3) Caractérisation hydrodynamique / morphodynamique du site pour l'équilibre sédimentaire

Afin de prévoir comment un tronçon de côte réagit aux tempêtes avec certaines caractéristiques d'origine, par exemple la hauteur et la période des vagues, ou mieux si une classification spectrale des états de la mer a été effectuée, il est jugé approprié de réaliser des modèles de simulation couplés (ondes-hydrodynamiques-sédiment) et la surveillance topo-bathymétrique qui révèlent la cartographie du fond marin et de la plage émergée et submergée, en planifiant les mesures pour pouvoir évaluer les variations entre la situation pré-tempête et la situation post-tempête.

Ce n'est pas toujours possible, aussi en raison des coûts, mais la disponibilité croissante des méthodes de mesure de la plage submergée (également à travers lidar ou autres systèmes montés sur drones aériens, véhicules marins de surface ou encore données satellitaires) permettra, à l'avenir avoir une meilleure disponibilité des données de surveillance. Une analyse des effets obtenus en combinant, si possible, des observations et des modèles permet d'évaluer:

- Transport des sédiments longshore (également pour l'interaction avec les infrastructures de défense et côtières);
- Transport solide cross-shore (également dû aux cellules de circulation nearshore avec des composants orthogonaux à terre).

4) Identification de modèles hydrodynamiques et morphodynamiques pour l'érosion côtière

Pour la prévision de la morphodynamique à long terme, nous pouvons utiliser:

- certains des modèles décrits au paragraphe II.C, pour la simulation de la position et de l'orientation futures de la ligne de rivage;
- hindcast de modèles plus complexes, décrits également dans le rapport précédent T2.1.1, pour simuler à l'échelle locale le système des courants côtiers qui se développent dans les eaux peu profondes en raison du mouvement des vagues.

Ces derniers requièrent un effort de calcul considérable qui est certainement excessif également par rapport aux nombreuses incertitudes associées à la simulation morphodynamique à long terme, dans laquelle de nombreuses données ne sont pas suffisamment détaillées.

En ce qui concerne l'application possible de modèles physiques simplifiés (tels que les modèles à une ligne), les données de départ à vérifier sont:

- i. la construction de données pour la simulation dynamique des futurs tempête, cohérents avec le climat marin observé, prenant également en compte les tendances liées au changement climatique;
- ii. l'utilisation de formules de transport des sédiments longshore suffisamment validées et vérifiées pour la zone côtière en question, en utilisant également l'approche combinée des observations-modèles discutée dans le paragraphe précédent;
- iii. l'utilisation d'estimations du transport cross-shore suffisamment validées et vérifiées pour la zone côtière en question;
- iv. l'utilisation de projections fiables pour la simulation du SLR pour la zone côtière du nord de la

Méditerranée.

Indépendamment du type de modèle utilisé, il est évidemment important d'avoir des données historiques concernant la position de la ligne de rivage au cours des 40-50 dernières années pour la calibration du modèle numérique (ou pour l'utilisation de techniques d'ingestion de données). La dynamique transversale au rivage peut être mieux décrite s'il y a un nombre suffisant de transepts sensiblement orthogonaux à la ligne de rivage.

Thème de surveillance	Source de données	Traitement	
Climat météorologique	Bouées du mouvement des vagues Modèles Meteomarine (<i>hindcast</i>)	Rose des vagues	Modèles hydrodynamiques et morphodynamiques pour la prédiction de l'évolution de la ligne de rivage et de la plage émergée et submergée
		Rose des vents	
		Temps de retour pour les événements dominants	
Niveau de la mer	Marégraphes Modèles hydrodynamiques Scénarios pour élever le niveau moyen de la mer (SLR)	Oscillations dues aux marées et à la pression atmosphérique (à associer aux tempêtes de mer)	
		Projection future de l'élévation du niveau de la mer	
Transport solide	Modèles morphodynamiques Sondage bathymétrique Analyse granulométrique des sédiments	La cartographie de la plages émergée et submergée Caractéristiques sédimentologiques du site	

Table 3 – Cadre d'information nécessaire pour effectuer des études morphodynamiques à long terme.

IV. RÉSUMÉ DE LA MÉTHODOLOGIE

Les études morphodynamiques à long terme visant à prédire la tendance évolutive des plages, visent à évaluer le transport solide côtier, qui, à son tour, dépend strictement du climat de vagues. L'analyse du climat météo-marine nécessite de disposer de séries de données historiques assez longues, pas moins de 10 ans pour une caractérisation de base, et pas moins de 30-50 ans si on veut évaluer les tendances d'évolution du régime anémologique ou ondamétrique, liée à l'évolution du climat. Les méthodes traditionnelles d'évaluation du climat météo-marine nécessitent le calcul de la fréquence des événements caractérisés par une certaine intensité et direction, mais il peut être approprié l'adoption des techniques plus complexes permettant l'analyse des états de la mer par la classification des spectres des vagues (climatologie spectral). Ce deuxième niveau d'analyse est sans doute plus complet car il permet d'évaluer les effets produits par le mouvement des vagues, qui est en général un processus physique multi-directionnel et multifréquences. En ce qui concerne les données disponibles pour l'analyse du climat météo-marine, notamment dans l'évaluation des vagues offshore, les données mesurées par les bouées sont fondamentales, parce qu'ils permettent de valider la sortie des modèles numériques de prévision. En ce qui concerne l'évaluation du climat météo-marine à l'échelle côtière, à moins qu'un réseau dense de données *in-situ* ne soit disponible, il faudrait créer des hindcast spécifiques de modèles de simulation numérique à calibrer à l'aide de données *in-situ* disponible.

Les modèles morphodynamiques prévisionnels à long terme utilisent les données climatiques comme paramètres d'entrée, mais ils nécessitent également un étalonnage préalable des modèles de transport des sédiments adoptés, ce qui peut être réalisé en évaluant le transport des sédiments (longshore et offshore) obtenu par comparaison entre modèles d'évolution morphodynamique à court et moyen terme avec des données topo-bathymétriques liées à des situations pré- et post- tempete.

Bien que les modèles morphodynamiques à long terme (par exemple les modèles à une ligne) soient affectés par une grande incertitude, ils constituent l'un des principaux outils pour l'évaluation de l'évolution d'une longue côte, et il est donc approprié de les adopter en essayant d'insérer données (input) et paramètres de modélisation corrects. L'une des principales sources d'incertitude est l'élévation du niveau moyen de la mer, qui sera l'un des effets les plus dramatiques du changement climatique au cours des prochaines décennies. Cet effet doit être estimé à partir de données de scénarios représentatives de la mer Méditerranée, qui a sa propre spécificité, et dont les données sur l'élévation du niveau de la mer, pour le moment, montrent une tendance évolutive moins marquée par rapport à l'océan global, mais toujours important.

V. RÉFÉRENCES

Abuodha P., Woodroffe C.D. (2006) - International Assessments of the Vulnerability of the Coastal Zone to Climate Change, Including an Australian Perspective. Australian Greenhouse Office, Department of the Environment and Heritage, p. 75. September 2006.

Delft Hydraulics Institute (DHI). 2009a. LITPACK: An Integrated Modeling System for Littoral Processes and Coastline Kinetics (Short Introduction and Tutorial). Published by MIKE by DHI.

———. 2009b. LITLINE: Coastline Evolution (LITLINE User Guide). Published by MIKE by DHI. Jan 2009.

———. 2009c. LITDRIFT: Longshore Current and Littoral Drift (LITDRIFT User Guide). Published by MIKE by DHI. Jan 2009.

———. 2009d. LITSTP: Noncohesive Sediment Transport in Currents and Waves (LITSTP User Guide). Published by MIKE by DHI. Jan 2009.

Deltares. 2011. UNIBEST-CL+ Manual: Manual for Version 7.1 of the Shoreline Model UNIBEST-CL+. 13 January 2011

EEA, 1995. Europe's environment. The Dobris assessment. EEA, Copenhagen, Denmark, 712 pages.
Available at: <http://reports.eea.eu.int/92-826-5409-5/en> (last access: 10.08.2011).

Frey, A., K. Connell, H. Hanson, M. Larson, R. Thomas, S. Munger, and A. Zundel. 2012. Gencade Version 1 model theory and user's guide. ERDC/CHL TR-12-25. Vicksburg, MS: US Army Engineer Research and Development Center.

Gornitz, V.M., 1991. Global coastal hazards from future sea level rise. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 89, 379 e 398

Hanson, H. 1987. GENESIS - A generalized shoreline change numerical model for engineering use. Report No.1007. Lund, Sweden: University of Lund, Department of Water Resources Engineering. ERDC/CHL CHETN-II-55, December 2013

Hanson, H., and N. C. Kraus. 1989. GENESIS: Generalized model for simulating shoreline change, report 1, technical reference. CERC-89-19. Vicksburg, MS: US Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center.

Hanson, H., and N. C. Kraus. 2004. Advancements in One-Line Modeling of T-Head Groins: GENESIS-T. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 33:315-323.

Harvey, A., Hinkel, J., Horrocks, L., et al., 2009a. Preliminary Assessment and Roadmap for the Elaboration of Climate Change Vulnerability Indicators at Regional Level. DG ENV. Reference: ENV.G.1/ETU/2008/0092r. Final Report to the European Commission (Restricted Commercial, ED45669, Issue Number: 3). AEA, London.

Mclaughlin, S., Cooper, J.A.G., 2010. A multi-scale coastal vulnerability index: a tool for coastal managers? *Environ. Hazards* 9, 233 e 248

Nguyen T., Bonetti J., Rogers K., Woodroffe K. (2016) - Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: A

review of concepts, methodological approaches and vulnerability indices. *Ocean & Coastal Management* 123 (2016) 18-43.

Slangen A.B.A., Carson M., Katsman C.A. et al. - *Climatic Change* (2014) 124: 317. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1080-9>

Sannino G., Antonioli F., Carillo A., Galassi G., Malanotte-Rizzoli P., Pisacane G., Spada G., Struglia M.V. (2018) - Future relative sea level for the Mediterranean Sea. Ensemble projections combining terrestrial ice melt, high resolution steric effects, tectonics, and glacial isostatic adjustment. EGU General Assembly 2018, Vienna, 8-13 Aprile 2018.

Spada, G., Stocchi, P., (2007). SELEN: a Fortran 90 program for solving the "Sea Level Equation". *Comput. Geosci.* 33 (4), 538-562.

Robert C. Thomas and Ashley E. Frey (2013). *Shoreline Change Modeling Using One-Line Models: General Model Comparison and Literature Review*. US Army Engineer Research and Development Center.

Torresan, S., Critto, A., Dalla Valle, M., Harvey, N., Marcomini, A., 2008. Assessing coastal vulnerability to climate change: comparing segmentation at global and regional scales. *Sustain. Sci.* 3, 45 e 65..

Spada G., Stocchi P. (2007) - SELEN: a Fortran 90 program for solving the "Sea Level Equation". *Comput. Geosci.* 33 (4), 538-562.

Vitousek S., Barnard P., Limber P., Erikson L., Cole B. "CoSMoS-COAST: a model to predict long-term shoreline change applied to Southern California. USGS Accessed online in 6 May 2016.

Vitousek, S., P. L. Barnard, P. Limber, L. Erikson, and B. Cole (2017), A model integrating longshore and cross-shore processes for predicting long-term shoreline response to climate change, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 122, 782–806, doi:10.1002/2016JF004065.