

## PROGETTO MAREGOT

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

**T2.1.1 Proposition méthodologique pour l'instrument opérationnel de prévision et gestion du risque côtier à court terme par référence à tempêtes marines et événements extrêmes. (Activité 2.1 de la composante T2 «Stratégie transfrontalière pour le Plan d'Intervention»)**

**Responsable activité 2.1: Consorzio LaMMA**



Les auteurs de ce rapport sont

Carlo Brandini

Massimo Perna

Valentina Vannucchi

Giovanni Vitale

avec la contribution de Valentina Grasso

# RÉSUMÉ

RÉSUMÉ .....	3
PRÉMIS .....	4
I. OBJECTIFS DES ÉTUDES RELATIVES À LA GESTION DU RISQUE .....	5
A. Risque, danger, vulnérabilité et exposition .....	5
B. Risques pour l'environnement naturel et pour l'environnement bâti .....	6
C. Risques pour la vie humaine .....	7
II. PROCÉDÉS, MODÈLES ET SYSTÈMES DE PRÉVISION DU RISQUE CÔTIER .....	8
A. Modèles de prévision météo marine et hydrodynamique de l'échelle du bassin à l'échelle côtière .....	8
B. Systèmes d'exploitation de prévision Meteomarine .....	9
C. Méthodes et modèles pour la prédiction de l'impact des vagues le long de la côte .....	11
D. Modèles hydrodynamiques à l'échelle locale pour la prévision des risques .....	12
E. Modèles hydrodynamiques à l'échelle locale pour la prévision des risques .....	12
F. INDICES D'ESTIMATION DU RISQUE CÔTIER .....	13
G. Projets d'évaluation des risques côtiers .....	15
III. CONTENU DU RAPPORT TECHNIQUE SUR LE RISQUE À COURT TERME .....	17
A. Caractéristiques géomorphologiques et sédimentologiques .....	17
B. Propriétés ondulées et hydrodynamiques .....	17
C. Exemple de site pilote entre Bocca di Magra et Marina di Massa .....	20
IV. CONTENU TECHNIQUE DES SYSTÈMES DE PRÉVISION ET D'ALERTE .....	23
A. Utilisation de données de prévision à grande échelle .....	23
B. Systèmes de prévision à l'échelle locale .....	26
C. Comparaison des observations / modèles et estimation de l'incertitude .....	29
V. RÉSUMÉ DE LA PROPOSITION MÉTHODOLOGIQUE .....	Errore. Il segnalibro non è definito.
BIBLIOGRAPHIE .....	31

## PRÉMIS

L'objectif de ce rapport n'est pas ce de fournir un traitement complet de tous les possibles risques susceptibles d'affecter les zones côtières, mais principalement de ceux découlant de l'état physique de la mer (mouvement de vagues, marée, etcetera) long de la côte. À cet égard sera menée une reconnaissance de principales méthodologies existantes aux fins de la prévision et gestion du risque à tempête, identification des bonnes pratiques et formulation d'une proposition méthodologique qui examinera tous les aspects nécessaires à la reconstruction de systèmes de prévision et gestion du risque.

### Prévoir et réduire le risque côtier.

Long la côte de l'arc marine transfrontalière et, plus en général, long tous les littorales, il y a nombreuses situations dangereuses pour l'environnement naturel, les agglomération urbaines ou pour la vie humaine qui doivent être identifiées correctement, et où possible, prévues aux fins de réduire le risque. L'environnement côtier est en effet caractérisé par un intense énergie qui naît par effet de la interaction entre atmosphère et mer, se propage pour très longues distances et se débarasse sur la côte pendant les marées. Certains situations dangereuses pour la vie humaine peuvent découler aussi de conditions de mer pas extrêmes, mais qui exigent un analyse approfondie sur les effets locaux.

La gestion du risque, en général, est abordé avec des instruments d'alarme qui sont prises par la Protection Civile, qui exige à la base une bonne capacité de prévision des effets produits par la mer, et surtout, par le mouvement de vagues, long la côte. En ce sens l'activité en question est complémentaire avec ce prévus dans l'activité T2.5 sur la gestion du risque côtier. Le cœur de cette activité est constitué par produits prévisionnels en temps réel.

Il faut souligner que le risque n'est pas limité aux effets du mouvement de vagues, mais aussi aux effets concomitantes, lesquels, par exemple, le plus grand risque d'inondations causés, le long de la côte, par l'augmentation du niveau moyen de la mer à la suite d'une marée qui peut déterminer un majeur risque de crue fluvial, ou phénomènes dangereuses pour la sécurité des hommes, tels que le *rip-currents*.

Enfin, Il faut souligner que, sur le plan de la réduction du risque, est nécessaire disposer aussi des données passées qui permettent d'évaluer l'impact de la mer sur la côte, en affinant les méthodes et les modèles en usage pour la prévision en temps réel. L'atténuation du risque passe aussi à travers des interventions structurelles qui exigent, à la base, tant la capacité d'analyser les effets produit par la mer sur la côte, que la nécessité de disposer des données les plus précises possible pour la conception des ouvrages de défense .

### Lesquels risques pour lesquels territoires

Les territoires de l'espace de coopération transfrontalière présentent caractéristiques d'exposition au risque très complexes et variés. Les facteurs de risque varient le long de la côte, selon le type de la côte (haute, basse), de l'exposition, des caractéristiques géomorphologiques et sédimentologiques, mais aussi de l'exploitation et de l'utilisation de la côte par l'homme.

Le 'risque d'houle' concerne le potentiel de destruction qui présente l'action combinée du mouvement de vagues et de l'augmentation de la surface libre de la mer le long de la côte. Cette action combinée peut provoquer destruction et démantèlement de portions de la côte e présenter un danger pour les agglomérations urbaines et les infrastructures. L'inondation des zones côtières provoqué par la mer fait partie de la directive «Alluvioni» (2007/60/CE) relative à l'évaluation et à la gestion du risque d'inondation, même si les effets du mouvement de vagues sont plus complexes et peuvent, pour exemple, concerner le potentiel de destruction de vagues vers les ports et les infrastructures aussi en absence d'inondation. Les mêmes inondations de fleuves, rivières, canaux à proximité de la côte peuvent avoir comme cause, pas toujours, la présence de niveaux des mers plus haute long la côte, causés par l'action combinées du vent, de l'houle, de la pression atmosphérique ou de la marée astronomique, qui ont besoin d'être soigneusement prévus à travers de modèles dédiées, mieux si intégrés avec observations in-situ.

# I. OBJECTIFS DES ÉTUDES RELATIVES À LA GESTION DU RISQUE

## A. Risque, danger, vulnérabilité et exposition

Les phénomènes liés à l'intensité du mouvement de vagues et des courants marins long de la côte représentent un risque élevé pour les zones densément peuplées du littoral, personnes et choses, et aussi pour l'environnement naturel. On peut exprimer le risque en terme de danger, comprise comme probabilité d'occurrence des événements possibles, et de détrimment pour les zones considérées, en fonction de la vulnérabilité et du valeur économique/environnemental des éléments significatifs.

Dans la littérature internationale on utilise les termes suivants :

*H* = danger (Hazard): c'est la probabilité que un phénomène pour intensité donnée se présente au cours du temps et dans un zone donnée;

*V* = Vulnérabilité: c'est la propension d'un élément – personnes, bâtiments, infrastructures, activités économiques – à subir des détériorations en conséquence de contraintes induites par un event d'une certaine importance;

*E* = Exposition ou valeur comptable courant: c'est le numéro d'unité, ou valeur, de chacun des éléments à risque, pour exemple vies humaines ou maisons, présentent dans une zone données.

L'estimation des pertes consécutives à l'événement en terms tant des vies humaines que d'économie, implique la quantification de la probabilité d'occurrence d'un certain événement météo-marine et du détérioration qui cela peut entraîner.

$$R = H \times V \times E$$

Le danger hydraulique est estimé par modélisation numérique et il est associé aux phénomènes physique qui caractérisent l'action de la mer sur la côte comme :

- Inondabilité à cause de la barre intense à la suite de l'action du mouvement de vagues (storm surge, set-up, run-up) dans le cas de tempête caractérisé par un élevé période de retour;
- Inondation côtière déterminé par l'action synergique de la tempête et des intenses précipitation, avec réduit capacité de écoulement des «tranchi vallivi»
- Phénomènes d'érosion induits par tempêtes intenses, étroitement liés à la distribution du transport cross-shore
- Progressif érosion consécutif à la tendance évolutive de la ligne de bord à long terme, étroitement liés à la distribution du transport long-shore (décrit dans le rapport méthodologique T2.1.2)

De l'analyse du danger et du dégât potentiel attendu il est possible déterminer les différents valeurs du risque grâce à l'application de classiques matrices (MATTM, 2013), comme la mentionnées ci-après

CLASSES DU RISQUE		DANGER					
		P3		P2		P1	
DÉGÂT	D4	R4		R4	R3	R2	
	D3	R4	R3	R3		R2	R1
	D2	R3	R2	R2		R1	
	D1	R1		R1		R1	

Tableau 1 - Classes de danger, d'avarie et de risque

P représente la probabilité de survenance, D le degré de dégât attendu, R le numéro attendu des victimes/personnes blessés ou dégât aux propriété, biens culturels et environnemental/destruction ou interruption des activités économique.

Les classes indiquées pour le risque sont trois: P1 représente une probabilité faible - événement rare (temps de retour de plus de 100 ans) ; P2 un risque moyen - événement peu fréquent (temps de retour égal à 100 ans) ; P3 un risque élevé - événement fréquent (temps de retour égal à 10 ans).

Les classes indiquées pour les dommages sont quatre: D1 représente un dommage potentiel modéré ou nul, car il comprend des zones exemptes d'établissements urbains ou productifs; D2 représente un dommage potentiel moyen, car il comprend des zones ayant des effets limités sur les personnes et sur le tissu socio-économique; D3 représente un dommage potentiel élevé, car il comprend des zones présentant des problèmes pour la sécurité des personnes et pour la fonctionnalité du système économique, des zones traversées par des lignes de communication et des services d'un intérêt considérable; D4 représente un très grand potentiel de dommages car il inclut les zones dans lesquelles les pertes en vies humaines peuvent se produire, les dommages importants aux biens économiques, naturels et historiques d'intérêt majeur, les graves désastres écologiques et écologiques.

En croisant les trois niveaux de danger et les quatre niveaux de dommages potentiels, quatre classes de risques sont identifiées: R1 représente un risque modéré ou nul pour lequel les dommages sociaux, économiques et

environnementaux sont négligeables ou nuls; R2 représente un risque moyen pour lequel des dommages mineurs sont possibles aux bâtiments, aux infrastructures et aux actifs environnementaux qui ne compromettent pas la sécurité des personnes, la viabilité des bâtiments et la fonctionnalité des activités économiques ; R3 est un risque élevé pour lequel des problèmes sont possibles pour la sécurité des personnes, des dommages fonctionnels aux bâtiments et aux infrastructures avec pour conséquence l'indisponibilité de ceux-ci, l'interruption de la fonctionnalité des activités socio-économiques et les dommages liés au patrimoine environnemental; R4 est un risque très élevé pour lequel sont possibles des pertes en vies humaines et des blessures graves aux personnes, de graves dommages aux bâtiments, aux infrastructures et au patrimoine environnemental y compris la destruction des activités socio-économiques.

Par conséquent, à partir des combinaisons de la matrice de risque, on observe que avec un événement avec une faible probabilité d'occurrence (P1), un risque nul (R1) ou moyen (R2) peut être obtenu sur la base du dommage potentiel attendu; en cas d'événement avec une probabilité d'occurrence peu fréquente (P2) on obtient un risque nul (R1) seulement dans le cas d'un dommage nul (D1), plutôt on obtient un risque élevé (R3) en cas de dommage potentiel élevé (D3) ou un risque très élevé (R4) en cas de dommage potentiel très élevé (D4); avec un événement fréquent (P3), un risque élevé (R3) peut déjà être obtenu en cas de dommage potentiel moyen (D2) et un risque très élevé (R4) en cas de dommage potentiel élevé (D3).

## **B. Risques pour l'environnement naturel et pour l'environnement bâti**

Le risque de tempête se limite souvent à des dommages à l'environnement naturel et bâti, et peut être dû soit à l'effet d'intenses tempêtes (mouvement des vagues et élévation du niveau de la mer le long de la côte avec inondations) et aux phénomènes d'inondation côtière.

Les tempêtes de mer peuvent causer des dommages importants aux structures économiques le long de la côte. Comme décrit ci-dessus, le risque augmente non seulement avec le danger (c'est-à-dire avec la probabilité d'occurrence), mais aussi avec la vulnérabilité de l'actif et la valeur exposée. À cet égard, des exemples peuvent être faits.

En mai 2013 (surtout entre le 24 et le 25 mai), la côte toscane a été frappée par des tempêtes intenses qui ont causé des dommages importants aux biens meubles et aux installations des établissements balnéaires des provinces de Massa-Carrara, Lucca et Pise et Livourne (hangars, équipements pour la plage) et des dommages environnementaux, tels que l'érosion des plages et le stockage des matériaux à éliminer (lavarone, grumes et autres). Suite à ces événements, la Région a déclaré l'état d'urgence. Le danger de cet événement est lié à l'intensité de la tempête, certainement anormale par rapport à la période où il s'est produit (fin du printemps / début de l'été) et pourtant correctement prédite par les modèles prévisionnels opérationnels, pour lesquels ils pourraient être pris, en temps utile, des mesures de précaution pour protéger les actifs.

Le risque d'événements similaires est évidemment également lié au fait que de nombreuses installations de baignade ont été mises en place (avec une augmentation de la valeur indiquée) sans tenir compte des effets potentiels d'une tempête de mer au cours de cette période. Il est donc important que le danger (dans ce cas, la probabilité de tempêtes particulièrement intenses) soit également estimé par rapport à la période de l'année, car la vulnérabilité et la valeur exposée peuvent varier avec la saison.

Dans de nombreuses zones de l'arc marin transfrontalier, et en particulier le long des côtes de la Ligurie et de la Toscane, les événements importants proviennent généralement d'un flux de courant du sud et du sud-ouest (Libeccio), souvent associé à un écoulement humide sur l'Europe occidentale du nord-ouest, d'origine atlantique. Ces événements sont accompagnés par les tempêtes les plus intenses. De fortes tempêtes sur les côtes occidentales de l'arc maritime transfrontalier peuvent donc être associées à des événements d'inondation, même très intenses. Ces tempêtes intenses peuvent à leur tour causer une augmentation significative du niveau de la mer près de la côte, ce qui peut nuire à l'écoulement normal de l'eau. La combinaison de ces deux facteurs est donc un facteur de risque pour les inondations côtières non seulement dues aux tempêtes, mais aussi à l'éventuelle inondation des rivières près des embouchures.

Cette phénoménologie se présente avec une fréquence non négligeable, par exemple en novembre 2014 la zone côtière Apuo-Versilia a été investie à la fois par des précipitations d'intensité extraordinaire (avec des pointes de plus de 300 mm de précipitations journalières cumulatives) et, au même temps, par des tempêtes très importantes (Figure 1). À cette occasion, les torrents Parmignola et Carrione ont été inondés de dégâts aussi sur la côte et près de l'embouchure.

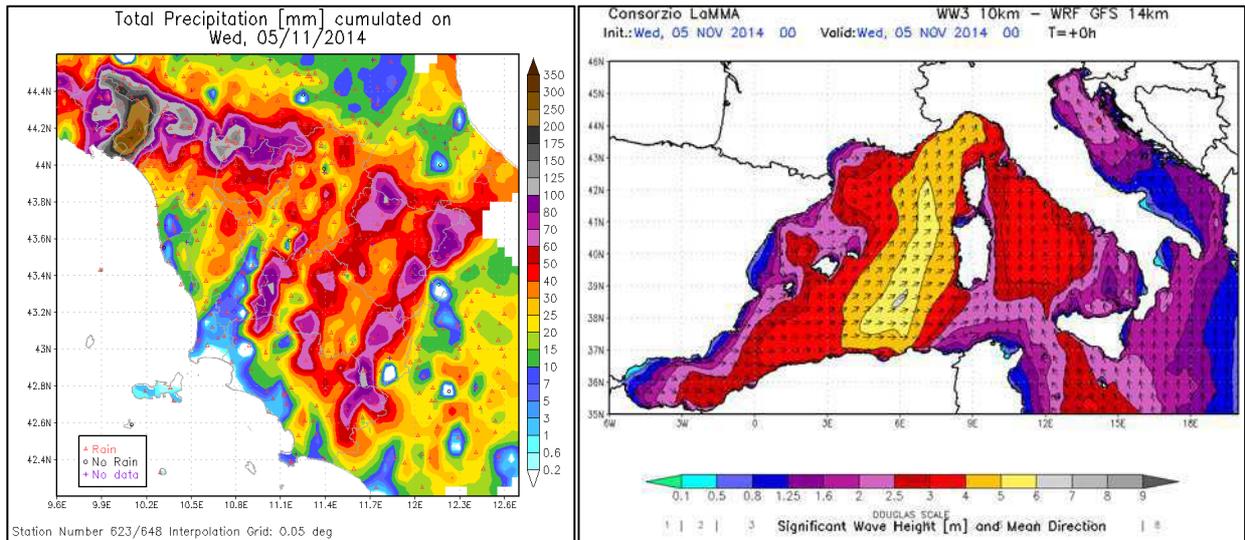


Figure 1 Carte cumulative des précipitations en Toscane et carte liée à l'état de la mer le 5 novembre 2014.

### C. Risques pour la vie humaine

Les risques pour la vie humaine proviennent des ondes de tempête intenses, de la présence d'ondes anormales et surtout de *rip-currents*. Des ondes de forte amplitude près de la côte peuvent se produire en raison des mécanismes de focalisation de l'énergie des vagues dans certaines régions, en raison des effets de réfraction induits par des conformations particulières du fond (banc) ou de la côte. Il est nécessaire d'évaluer l'effet de la réflexion des vagues sur la côte, qui dépend à la fois des caractéristiques des vagues (notamment la longueur des vagues), de la pente de la côte et du type de sol (rochers ou sables, présence de roches, etc.).

Plus de la moitié des noyades recensées ont eu lieu en mer. Parmi ces nombreux accidents sont dus à des situations de comportement personnel inappropriées (sous-estimation du danger, mer agitée et incapacité de nager). Certains accidents sont typiques de la zone des disjoncteurs et se produisent surtout avec la mer agitée, mais il y a des situations où la victime - qui sait nager et est en bonne santé - ne peut pas retourner à la rive parce qu'elle est entraînée par un courant ou un autre obstacle (le vent de la terre, les rochers, une structure artificielle).

La présence de cellules constituées d'ouvrages de défense rigides peut favoriser la création de courants de retour avec un écoulement hors des intervalles entre les structures caractérisées par une forte intensité, et une fois traîné vers l'extérieur, le baigneur a de sérieuses difficultés à revenir. Le même mécanisme peut être créé lorsqu'un courant côtier est dévié au large par la présence d'une structure orthogonale, telle qu'une brosse.

#### **Courant d'arrachement (Rip-currents)**

Les courants d'arrachement, courant de retour, flot de retour ou courant de déchirures sont des courants-jets qui proviennent de la bande de surf (zones de surf) et peuvent se produire dans différents types de plages pendant différentes conditions de vagues et de marées. Ces courants s'étendent généralement de la rive à la pleine mer, au-delà de la rive des brise-lames, et présentent deux régimes hydrodynamiques :

- 1) à l'intérieur de la zone de surf, où l'écoulement du courant est masqué par les vagues déferlantes. Cependant, dans cette bande, le courant d'arrachement peut être identifié comme une «zone d'ombre» associée à des vagues non cassantes au-dessus des creux profonds, caractérisés par une sorte d'ondulation mousseuse et une couleur d'eau différente (sur les tons bruns) transport de suspension de sédiments;
- 2) en dehors de la zone de surf, où le jet se propage à l'intérieur d'une zone de recirculation.

Les courants d'arrachement ont des vitesses intermittentes qui peuvent augmenter rapidement en raison de grands groupes d'ondes entrantes ou d'une instabilité dans la circulation près du rivage, jusqu'à quelques mètres par seconde. Différents types de courants d'arrachement peuvent se produire à divers types de côte, une excellente revue est fournie par un travail de revue par Dalrymple et al. (2011). La plupart des courants d'arrachement ont un contrôle morphologique (c'est-à-dire lié à la présence de conformations bathymétriques, de formes de fond, ainsi qu'aux structures côtières) et sont contrôlés par la réfraction des ondes sur une bathymétrie irrégulière. Le cas le plus commun est la présence de barres côtières, parallèles ou subparallèles à la ligne de rivage, dans lesquelles est gravé un passage plus profond (appelé canal de déchirure) dans lequel les courants de retour sont canalisés. Ils sont fréquemment générés lorsque la direction des vagues incidentes est proche de la perpendiculaire à la ligne de rivage et communément observée sur les plages à pente relativement douce où la zone de surf est plus large. Sur les plages escarpées, les courants de fuite sont moins intenses car la rupture se produit près du rivage et la zone de surf est très petite.

Cependant, on a également observé des situations de courants de déchirure dans les régimes transitoires, qui peuvent être provoquées par des phénomènes d'instabilité hydrodynamique (instabilités de cisaillement) des courants côtiers intenses, donc provoqués par des courants sensiblement inclinés par rapport à la ligne de rivage. D'autres mécanismes de génération de courants de déchirure comprennent les interactions ondes-ondes, les phénomènes d'interaction entre l'hydrodynamique et la morphodynamique et les interactions entre ondes, courants et structures.

Les *rip-currents* peuvent en effet être générés à la suite de l'interaction entre les courants et les structures. Cette affaire comprend:

- A. la présence de barrières émergées et submergées le long du rivage; en effet, les barrières émergées peuvent être surmontées par les vagues, avec pour conséquence une élévation du niveau de la mer derrière la barrière et la génération de courants de retour sur les côtés de celle-ci; les barrières submergées, aux portes, reproduisent la phénoménologie observée en présence de barres longitudinales interrompues par des portes ;
- B. la présence de épis qui interrompent le courant littoral, qui est ainsi détourné au large;
- C. la combinaison de structures parallèles et transversales, qui forment des cellules de circulation particulièrement dangereuses;
- D. dans la plage de poche, aux extrémités de la plage.

## II. PROCÉDÉS, MODÈLES ET SYSTÈMES DE PRÉVISION DU RISQUE CÔTIER.

Dans le développement d'un système de prévision météo marine visant la prévision et la gestion des risques côtiers, il est très important de faire des choix appropriés en ce qui concerne divers aspects, tels que:

- l'échelle de référence (échelle du bassin, échelle régionale, échelle côtière, échelle côtière) et comment représenter l'interaction entre différentes échelles;
- les aspects saillants des phénomènes à représenter également par rapport à l'échelle (par exemple, la génération et la propagation des vagues à l'échelle du bassin, l'étude de l'hydrodynamique à l'échelle côtière, etc.);
- les équations physiques de base, les paramétrisations relatives et les approximations adoptées;
- les schémas de solutions numériques;
- toutes modalités de couplage et d'interaction avec d'autres modèles (par exemple en ce qui concerne le forçage atmosphérique adopté);
- discrétisation spatiale et temporelle.

En ce qui concerne ce dernier aspect, il est important d'établir la résolution spatiale et temporelle à utiliser dans les modèles pour représenter les phénomènes physiques à l'échelle de référence aussi correctement que possible.

Nous utilisons souvent une technique d'imbrication (*nesting*) des modèles: nous calculons d'abord la solution des équations du modèle à grande échelle et à faible résolution, puis nous utilisons les données obtenues comme conditions aux limites pour les petites zones sur lesquelles le calcul est effectué résolution plus élevée.

De nombreux choix sont limités par les ressources de calcul disponibles, qui doivent également être dimensionnées par rapport aux objectifs.

### A. Modèles de prévision météo marine et hydrodynamique de l'échelle du bassin à l'échelle côtière

Les modèles de prévision de la météo marine à grande échelle simulent les processus de génération, de propagation et de transformation de l'onde en eau profonde et sont contraints par les modèles atmosphériques.

Les modèles de prévision météo marine à échelle locale ont une haute résolution ci-dessous et considèrent la propagation de l'onde des eaux profondes vers les eaux peu profondes, incluant les phénomènes de réfraction et de shoaling en toile de fond, sans inclure les effets de diffraction, réflexion et transmission due aux obstacles, sinon par un traitement approximatif de ces phénomènes.

Ceux-ci comprennent WAM (modèle WAve), WAVEWATCH III (WWIII), SWAN (Simulation Waves Nearshore), Delft3D-WAVE, TOMAWAC et MIKE21 - SW FM (Spectral Wave Flexible Mesh).

Ce sont des modèles spectraux ou de « troisième génération » qui résolvent les équations d'équilibre énergétique aux nœuds d'une grille (géographique ou cartésienne), en tenant compte de tous les processus qui influencent le développement du mouvement des vagues (transfert d'énergie éolienne, linéaire, dissipation par frangeage et friction).

MODÈLE	SITE WEB	ARTICLE DE RÉFÉRENCE	MAILLAGE
WAM	<a href="http://www.bodc.ac.uk/data/documents/nodb/254628/">www.bodc.ac.uk/data/documents/nodb/254628/</a>	WAMDI Group, 1988	Structurée
WWIII	<a href="http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/">http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/</a>	Tolman, 1991	structurée et non-structurée
SWAN	<a href="http://swanmodel.sourceforge.net">http://swanmodel.sourceforge.net</a>	Booij et al., 1999	Strutturata e non strutturata
Delft3D-WAVE	<a href="http://oss.deltares.nl/web/delft3d/delft3d-wave">http://oss.deltares.nl/web/delft3d/delft3d-wave</a>	Booij et al., 1999	Strutturata e non strutturata
TOMAWAC	<a href="http://www.opentelemac.org">www.opentelemac.org</a>	Benoit et al., 1996	Non strutturata
MIKE21-Spectral Wave Module FM	<a href="https://www.mikepoweredbvdhi.com/products/mike-21/waves/spectral-waves">https://www.mikepoweredbvdhi.com/products/mike-21/waves/spectral-waves</a>	SØRENSEN et al, 2004	Non strutturata

Tableau 2 - Modèles de référence pour la prédiction des vagues

Ces modèles ont de nombreuses caractéristiques communes et partagent souvent de nombreuses formulations et paramétrisations des différents processus physiques, tels que :

- l'entrée du vent
- blanc rechapage
- interaction vague-vague non-linéaire
- dissipation due à la toile de fond
- déferlante
- les effets d'interaction vague-courant

Les sorties du modèle incluent la hauteur significative des vagues, les informations concernant la période (moyenne, crête) et la direction associée, les informations spectrales concernant la distribution de l'énergie à différentes longueurs d'onde.

Les modèles qui ont un plus long historique d'implémentations opérationnelles sont WAM et WWIII.

Le WAM, développé par le WAMDI (Wave Model Development and Implementation Group), fonctionne depuis 1992 au Centre Européen de Lecture (CEPMMT) pour la prévision en temps réel du mouvement des vagues de l'échelle globale à l'échelle du bassin.

Le WWIII, mise au point à la Direction de la modélisation et de l'analyse du milieu marin (MMAB) de la NOAA / NCEP, fournit des prévisions d'vagues opérationnelles pour la NOAA.

En plus des modèles de prédiction des vagues, des informations supplémentaires à l'échelle du bassin et du littoral concernent certaines variables de caractérisation physique de l'état de la mer qui peuvent être déduites des modèles de simulation hydrodynamique utilisés dans le domaine de l'océanographie opérationnelle.

Cette information concerne les courants marins (également pour l'évaluation des effets de l'interaction entre les vagues et les courants), la température de l'eau, la turbidité et surtout le niveau de la mer.

Il y a beaucoup de modèles appropriés pour accomplir cette tâche, parmi lesquels on peut citer ROMS (Système Régional de Modélisation Océanique), NEMO, MITgcm, MARS 3D, HYCOM3D (Modèle Coordonné HYBRIDE Océan), MIKE 3D, POM (Princeton Ocean Model), SHYFEM.

Presque tous ces codes résolvent les équations primitives d'un milieu hydrostatique incompressible selon l'approximation de Boussinesq, à l'exception du code MITgcm non hydrostatique. Les coordonnées verticales peuvent être sigma, sigma généralisé, isopycne (couches de même densité), zêta ou mixtes (comme dans NEMO).

Presque tous les codes utilisent aussi des maillages structurés ou au plus des maillages curvilignes, à l'exception de SHYFEM qui utilise une grille non structurée et est particulièrement adapté aux applications côtières. Par exemple, au sein du Consortium LaMMA, ROMS est utilisé, un système de modélisation océanique développé depuis 2001 qui résout les équations primitives du mouvement de surface libre à l'aide d'un système de coordonnées vertical sigma et inclut divers schémas de turbulence verticale et pour l'estimation des écoulements de surface turbulents.

Le modèle LaMMA est configuré sur une vaste zone de la Méditerranée occidentale qui comprend le bassin ligurien et le bassin tyrrhénien, à une résolution de  $1/72^\circ$  (environ 1,3 km). En plus des équations principales, le système de modélisation utilise également d'autres équations physiques pour une série de sous-modules visant à simuler la dynamique des écosystèmes et biogéochimiques, la dynamique des sédiments en suspension et la morphodynamique relative des fonds marins (à grande échelle). Le code comprend également des modules d'assimilation variationnelle (4DVAR).

## B. Systèmes d'exploitation de prévision Meteomarine

En modélisation météo marine, l'information liée au vent joue un rôle prédominant dans la détermination du mouvement des vagues et l'extrême sensibilité des variables de l'état de la mer aux variations du vent a une forte implication,

notamment en termes de prévision. Les données de vent prévues à partir des modèles atmosphériques sont utilisées comme forçage physique dans les modèles de vagues à grande, moyenne et petite échelle. À la sortie des modèles d'onde, les données de hauteur de vague, de période et de direction d'onde significatives sont obtenues. Ces variables sont obtenues en tant que post-traitement de données spectrales, car le spectre d'énergie contient les informations les plus complètes concernant l'état de la mer. La schématisation de la chaîne de prévision est montrée ci-dessous.

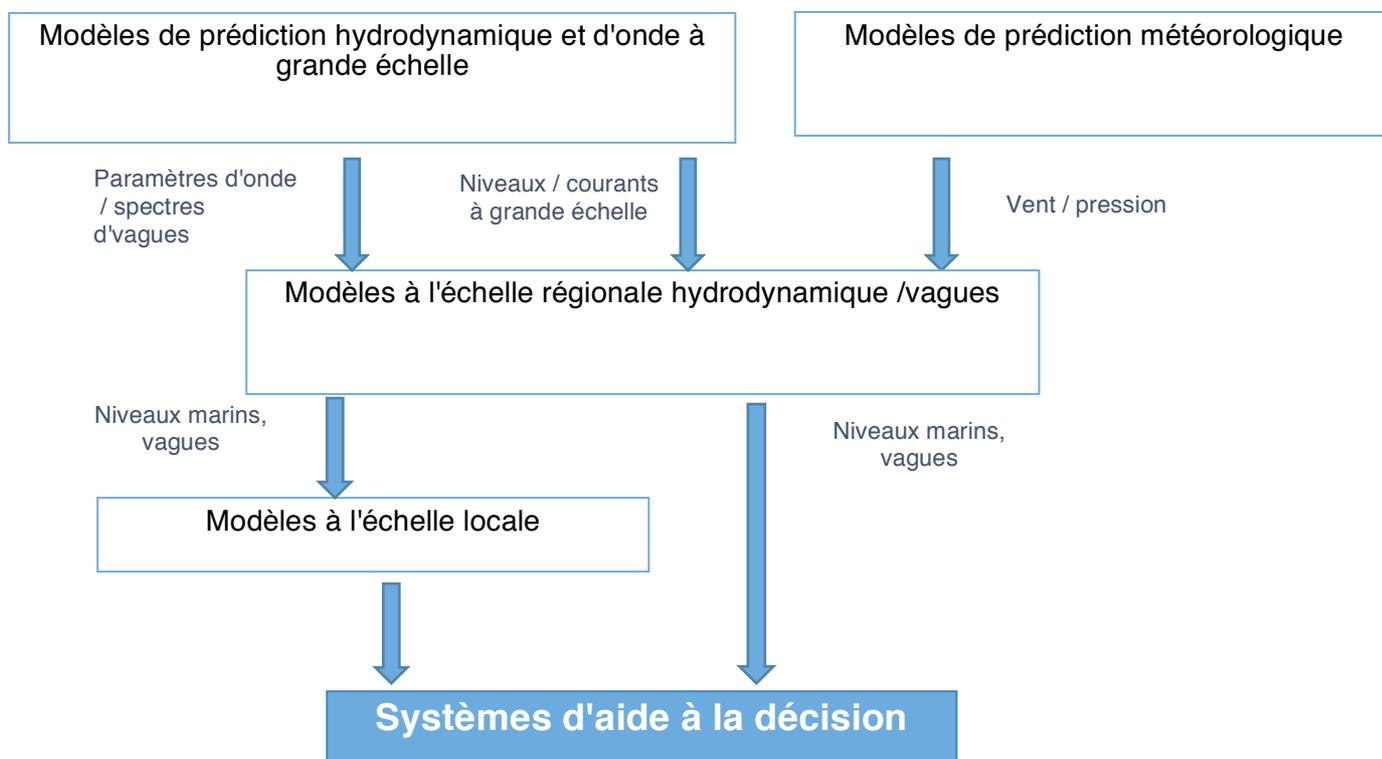


Figure 2 Schéma de la chaîne de prévision d'un système de prévision météorologique à l'échelle côtière.

Des systèmes de prévision météo marine ont été mis en place et fonctionnent dans de nombreuses organisations fournissant des données pour la zone marine transfrontalière, y compris le Consortium LaMMA, ARPAL et l'Université de Gênes, SHOM et Météo France, ISPRA, Service de Surveillance de l'Environnement Marin Copernicus (CMEMS), Centre national de météorologie et de climatologie aéronautique (CNMCA).

ENTITE	SITE WEB	CARACTERISTIQUES
LaMMA Consortium	<a href="http://www.lamma.rete.toscana.it/mare/modelli/w3-info-sul-modello">http://www.lamma.rete.toscana.it/mare/modelli/w3-info-sul-modello</a>	0.1° (environ 10km) sur la Méditerranée x 120 h; 0,02° (environ 2.5km) sur la mer Ligur x 60 h
ARPAL & Università di Genova	<a href="https://www.arpal.gov.it/homepage/meteo/modelli.html">https://www.arpal.gov.it/homepage/meteo/modelli.html</a> <a href="http://www.dicca.unige.it/meteocean/model.html">http://www.dicca.unige.it/meteocean/model.html</a>	10km sur la Méditerranée, 2km sur la mer Ligur x 120h
SHOM & Météo France	<a href="https://www.meretmarine.com/fr/content/un-nouveau-site-pour-les-previsions-de-vagues">https://www.meretmarine.com/fr/content/un-nouveau-site-pour-les-previsions-de-vagues</a> <a href="http://www.meteofrance.com/previsions-meteo-marine/marine/houle/mediterranean">http://www.meteofrance.com/previsions-meteo-marine/marine/houle/mediterranean</a>	Grille non-structurée, a résolution varie de 2km a 500m sur la côte x 60h
ISPRA	<a href="http://www.isprambiente.gov.it/pre_meteo/simm.html">http://www.isprambiente.gov.it/pre_meteo/simm.html</a>	10km sur la Méditerranée x 84h
CMEMS	<a href="http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&amp;view=details&amp;product_id=MEDSEA_ANALYSIS_FORECAST_WAV_06_017">http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&amp;view=details&amp;product_id=MEDSEA_ANALYSIS_FORECAST_WAV_06_017</a>	1/6° sur l'océan Atlantique Nord, 1/24° sur la Méditerranée x 120h
CNMCA	<a href="http://www.meteoam.it/modelli-di-previsione-numerica">http://www.meteoam.it/modelli-di-previsione-numerica</a>	3' sur la Méditerranée, 1' Italie x 72h

Tableau 3 - Systèmes de prévision de Meteomarine mis en place dans la zone maritime transfrontalière

Dans la plupart de ces systèmes, il est normalement présent :

- une composante de prévision météorologique (LAM) à zone limitée, normalement greffé sur un modèle de prévision global (par exemple GFS, ECMWF, etc.)
- une composante de la prédiction du mouvement des vagues à plusieurs échelles (de l'échelle du bassin et souvent à des échelles plus détaillées)
- une composante de la prédiction hydrodynamique
- des composants de prévision à l'échelle locale pouvant être utilisés pour fournir des informations aux systèmes d'aide à la décision.

### C. Méthodes et modèles pour la prédiction de l'impact des vagues le long de la côte

Pour la prédiction de l'impact des vagues le long de la côte sont utilisés des modèles qui estiment le point de départ, c'est-à-dire la hauteur ascendante des vagues incidente sur la plage émergée. Ces modèles sont souvent couplés à une composante morphodynamique capable de décrire l'évolution du fond marin pendant la tempête.

Le modèle le plus fréquemment utilisé à cet effet (plus au niveau de la recherche, mais avec possibilité de mise en œuvre opérationnelle) est XBeach, un modèle open source bidimensionnel développé par l'Université de technologie de Delft pour simuler les processus hydrodynamiques et morphodynamiques côtes sableuses au niveau de la mer. XBeach a été développé à l'origine comme un modèle pour la résolution des variations d'vagues courtes à l'échelle du groupe d'vagues et donc aussi pour les vagues longues qui leur sont associées (Roelvink et al., 2009).

Par la suite, un certain nombre d'options supplémentaires ont été implémentées dans le modèle, permettant aux utilisateurs de choisir les échelles de temps à résoudre: le modèle inclut les processus hydrodynamiques de la transformation des vagues courtes (réfraction, shoaling, rupture) (génération, propagation et dissipation), les processus d'établissement des vagues, le lavage excessif, l'inondation. Les processus morphodynamiques comprennent le transport des sédiments vers le fond et en suspension, la rupture des dunes et la mise à jour dynamique des fonds marins.

XBeach a trois types de simulation: a) le mode stationnaire, utilisé pour modéliser, par exemple, les changements morphologiques dans les conditions de vagues générées par le vent; b) mode non-stationnaire (mode surfbeat), utilisé sur les plages dissipatives; c) le mode non-hydrostatique (mode de résolution d'onde) où les équations d'eau peu profonde non linéaire (NLSW) sont également utilisées, principalement utilisées pour la simulation de run-ups sur des plages très abruptes et de débordement. XBeach permet donc une simulation hydrodynamique très avancée de la zone littorale qui inclut, par exemple, les courants d'arrachement (Benassai et al 2017, Winter et al., 2012).

Le modèle XBeach dans une version non hydrostatique a été initialement développé par TU Delft comme une version prototype du SWASH, un modèle de courant d'onde non hydrostatique utilisé pour étudier les formes d'onde du large à la côte, la dynamique typique de la zone de rupture zones et la zone de swash.

Certains modèles, tels que le modèle SBEACH (BEACH CHANGE, induit par les tempêtes) développé par CEDAS, simulent les processus hydrodynamiques et ondulatoires avec pour objectif principal d'estimer l'érosion de la plage, de la berme et des dunes après les tempêtes, et tombent donc dans le cadre des modèles de simulation morphodynamique.

Enfin, il existe des modèles de simulation d'onde à Boussinesq (modèles d'onde de type Boussinesq) qui résolvent les vagues en phase, en modes 1DH (monodirectionnel) et 2DH (bidirectionnel). Ces modèles comprennent: FUNWAVE (développé à l'Université du Delaware, maintenant aussi dans la version TVD), MIKE21-BW (développé par DHI) et Triton (développé par Deltares mais actuellement pas sur le marché).

Ces modèles sont traditionnellement utilisés pour le calcul des coefficients d'agitation des vagues incidente dans un port, et comprennent la représentation de la plupart des processus physiques d'intérêt tels que les hauts-fonds, réfraction, diffraction, réflexion et transmission, interaction non linéaire entre vagues. Les développements de ces modèles concernent: la fracture des vagues (par des méthodes de "choc-capture"), la remontée des vagues sur la plage, la transformation des vagues non-linéaires des eaux profvagues, la zone de rupture vers le rivage, le run-up et le ressac. Normalement, ces modèles ne considèrent aucun processus morphologique et peuvent donc sous-estimer l'impact des vagues sur la côte.

MODÈLE	SITE WEB	PROCESSUS MORPHODYNAMIQUE S
XBeach	<a href="https://oss.deltares.nl/web/xbeach/">https://oss.deltares.nl/web/xbeach/</a>	oui
SWASH	<a href="http://swash.sourceforge.net">swash.sourceforge.net</a>	oui
SBEACH	<a href="http://www.veritechinc.com/products/cedas/cedas-details">http://www.veritechinc.com/products/cedas/cedas-details</a>	oui
MIKE21-BW	<a href="https://www.theacademybydhi.com/the-academy-by-dhi/course-description/coast-and-marine/overview/mike-21-bw">https://www.theacademybydhi.com/the-academy-by-dhi/course-description/coast-and-marine/overview/mike-21-bw</a>	no
FUNWAVE-TVD	<a href="https://fengyanshi.github.io/build/html/index.html">https://fengyanshi.github.io/build/html/index.html</a>	oui

Tableau 4 - Modèles de prévision de l'impact des vagues sur la côte et les infrastructures

## D. Modèles hydrodynamiques à l'échelle locale pour la prévision des risques

Le système de courants côtiers qui se développe dans les eaux peu profondes en raison du mouvement des vagues est sans doute le plus important pour le transport côtier, de l'estimation de l'érosion / dépôt et donc de l'évolution de la ligne côtière. Ces processus doivent être étudiés avec des modèles locaux à haute résolution afin d'analyser correctement les risques. La circulation est divisée en courants longitudinaux et en courants transversaux localisés (*rip-currents*), dont la distribution dépend de la conformation de la bathymétrie. A ceux-ci, le courant *undertown* se superpose au fond dirigé du rivage vers au large, ce qui rend compte de la nature tridimensionnelle de l'écoulement.

Les modèles de simulation hydrodynamique à l'échelle côtière et dans des situations des eaux peu profondes (*shallow water*) résout normalement un ensemble d'équations hydrodynamiques 2D (dans l'approche classique), 3D ou quasi-3D. Ils sont généralement très lourds d'un point de vue informatique, et donc rarement utilisés à des fins opérationnelles. Cependant, dans le but de prévoir le risque à court terme (par tempête), ils peuvent être utilisés pour une meilleure compréhension et caractérisation des *rip-currents*, pour le calcul de la configuration d'onde en mettant également en évidence les zones pour les inondations potentielles. Simulation de courants à l'échelle côtière passe par l'estimation des composantes de forçage additionnelles due au mouvement des vagues dans la *surf-zone* (qui est habituellement donné le nom de *radiation stress*). Ces modèles doivent donc nécessairement être couplés à des modèles de simulation à l'échelle du littoral, capables de représenter au moins la réfraction / l'écartement des vagues à la *breaking-zone*.

Parmi ces modèles hydrodynamiques figurent Delft3D-FLOW, MIKE 21 HD (Hydrodynamique), SHORECIRC, TELEMAC et FINEL 2D / 3D, ainsi que d'autres présentés dans le tableau.

Les modèles résolvent les équations de divers mouvements en deux (valeurs moyennes sur la verticale) ou en trois dimensions en considérant un système composé des équations de mouvement horizontales, de l'équation de continuité et des équations de transport, en réponse aux différents forçages considérés (vague, vent, marée, écoulements fluviaux). Habituellement, les équations à médiation de Navier-Stokes (équations de Reynolds Averaged Navier-Stokes - RANS) sont résolues dans l'hypothèse de Boussinesq et dans des conditions de pression hydrostatique.

Les éléments suivants sont résumés les modèles brièvement décrits ici :

MODELE	SITE WEB	RANS
Delft3D-FLOW	<a href="https://oss.deltares.nl/web/delft3d">https://oss.deltares.nl/web/delft3d</a>	oui
MIKE21-HD	<a href="https://www.mikepoweredbydhi.com/the-academy-by-dhi/course-description/coast-and-marine/overview/mike-21-flow-model-hd-fm">https://www.mikepoweredbydhi.com/the-academy-by-dhi/course-description/coast-and-marine/overview/mike-21-flow-model-hd-fm</a>	oui
SHORECIRC	<a href="http://www1.udel.edu/kirby/programs/nearcom/circulation_module_shorecirc.html">http://www1.udel.edu/kirby/programs/nearcom/circulation_module_shorecirc.html</a>	oui
TELEMAC	<a href="http://www.opentelemac.org/index.php/presentation?id=17">http://www.opentelemac.org/index.php/presentation?id=17</a>	oui
FINEL 2D/3D	<a href="http://www.finel.nl/index.html">http://www.finel.nl/index.html</a>	oui /no
LISFLOOD-FP	<a href="http://www.bristol.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood/">http://www.bristol.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood/</a>	
SELFIE	<a href="http://www.stccmop.org/knowledge_transfer/software/selfie">http://www.stccmop.org/knowledge_transfer/software/selfie</a>	oui

Tableau 5 - Modèles hydrodynamiques à l'échelle côtière et côtière

## E. Modèles hydrodynamiques à l'échelle locale pour la prévision des risques

La prévision du risque d'inondation nécessite l'utilisation d'une série de modèles numériques en cascade qui simulent certains scénarios de risque et donnent une idée du scénario d'urgence potentiel.

La partie de la modélisation météorologique-océanographique permet la propagation de l'onde de large à la côte et l'estimation des niveaux dus à divers facteurs tels que la pression atmosphérique, le vent, la marée et le mouvement des vagues. Des modèles à grande échelle peuvent être utilisés pour identifier les points chauds où le risque d'inondation est supérieur à ce qui sera analysé en détail avec des modèles à l'échelle locale.

Une stratégie de modélisation possible est celle qui implique l'utilisation de systèmes couplés dynamiquement, tels que le système COAWST (Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport Modeling System) dans lequel ils ont été dynamiquement couplés, en utilisant un outil d'échange dynamique de données bien connu comme le MCT (Model Coupling Toolkit), le modèle océanographique ROMS, le modèle de compteur WRF, le modèle de vague SWAN et les

outils de calcul de transport solides développés au sein de la communauté du Projet de modélisation du transport des sédiments.

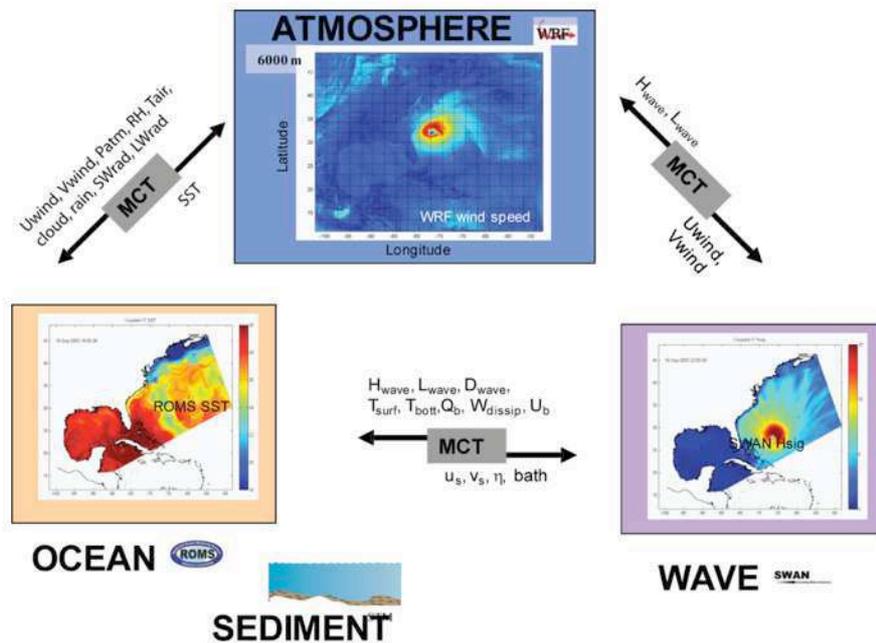


Figure 3 Le système COAWST.

Des modèles numériques de terrain (MNT) et des reliefs topo-bathymétriques de la plage émergée et immergée et des structures pour protéger la plage elle-même, en utilisant les modèles 1DH / 2DH mentionnés au paragraphe C, il est possible de calculer la configuration et la vague de vagues sur la plage et sur les structures de protection. Le calcul du run-up doit être effectué pour tous les profils dans lesquels la section côtière a été divisée et en question.

Un couplage plus poussé avec les modèles de prévision hydrologique et hydraulique (pour la propagation complète des ondes) permet de compléter la prévision des risques pour les zones côtières et d'atteindre l'objectif d'un système de prévision complet à des fins de la gestion des risques inondation pour les zones côtières. Il faut reconnaître que cet effort de modélisation est important et que, à ce jour, dans l'arc marin transfrontalier, nous sommes loin de la réalisation d'un système d'exploitation complet basé sur tous ces éléments.

## F. INDICES D'ESTIMATION DU RISQUE CÔTIER

En estimant les risques de tempête, il est possible de recourir à diverses méthodes. Une première possibilité est d'utiliser les données météorologiques le long de la côte telles qu'elles sont, en essayant de déduire les niveaux de risque par rapport à la connaissance du territoire. A l'extrême opposé, on peut émettre l'hypothèse de réaliser des systèmes d'alerte basés sur une configuration complexe de modèles en cascade et que, dans la partie finale, on utilise des modèles d'impact de vagues sur la côte, type XBeach.

Dans le but de construire une procédure d'alerte, une autre possibilité, beaucoup moins complexe à mettre en œuvre, concerne la mise en œuvre de méthodes / modèles plus simples, basés sur l'utilisation de quelques paramètres synthétiques (ex. vague, pente de la plage), combinées sous la forme d'indices faciles à mettre en œuvre. Certains de ces indices sont décrits ci-dessous.

### Indices de risque de tempête

Une estimation du risque de tempête de mer a été obtenue par Besio et al. (2015) en prenant en compte deux aspects des tempêtes: l'ampleur de la remontée possible de la vague sur la plage (run-up) et la persistance de la tempête de mer (E).

L'incidence de risque (HI) obtenue de cette manière est la suivante :

$$HI \propto (\sqrt{HL}, E)$$

La contribution liée au run-up (Hlw) est considérée comme proportionnelle à la racine carrée de la hauteur (H) et de la longueur d'onde (L), mise à l'échelle par rapport aux conditions de risque maximum (valeurs H<sub>max</sub> et L<sub>max</sub>) et redimensionnée entre les valeurs de 0 (risque minimum) à 10 (risque maximum). Donc Hlw est égal à

$$HI_w = \sqrt{HL} \frac{10}{\sqrt{H_{max}L_{max}}}$$

La contribution liée à la persistance de la tempête (HIE) est évaluée en estimant l'énergie contenue dans un certain intervalle de temps (3, 5 et 11 heures), mise à l'échelle par rapport à l'énergie  $E_{max}$  maximale et remise à l'échelle entre 0 (risque minimum) à 10 (risque maximum). HIE est donc égal à

$$HI_E = 10 \left( 1 - \frac{E_{max} - E}{E_{max}} \right)$$

Ces deux coefficients ont été linéairement couplés par un coefficient de couplage X et donc l'indice de risque HI est égal à

$$HI = HI_w X + (1 - X) HI_E$$

L'indice de risque côtier peut également être calculé en tenant compte à la fois de la vulnérabilité environnementale et sociale. Mavromatidi et al. 2018 estime l'indice de risque côtier en chevauchant deux indices empiriques : le Coastal Sensitivity Index (CSI) et le Social Vulnerability Index (SVI).

Le CSI est basé sur les paramètres physiques de la côte et dans l'étude de Mavromatidi et al. 2018 est calculé sur la base de 6 paramètres comme

$$CSI = \sqrt{\frac{a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e \cdot f}{6}}$$

où a est la géomorphologie (côte basse, côte haute, ...), b la pente (%), c l'élévation du niveau de la mer (mm / an), d le retard / avancement de la ligne de rivage (m / an), e l'intervalle moyen des niveaux de marée (m) et la hauteur moyenne des vagues (m). Ces variables sont classées avec des valeurs allant de 1 (très faible) à 5 (très élevé) sur la base du tableau ci-dessous

Variables	Sensitivity categories				
	Very low 1	Low 2	Moderate 3	High 4	Very high 5
a	Rocky, cliff coasts	Medium cliffs, indented coasts	Low cliffs, alluvial plains	Cobble beaches, lagoons	Barrier beaches, deltas, beaches
b (%)	> 12	12-9	9-6	6-3	< 3
c (mm/yr)	< 1.8	1.8-2.5	2.5-3.0	3.0-3.4	> 3.4
d (m/yr)	> 2.0	1.0-2.0	- 1.0-1.0	- 2.0 to - 1.0	≤ 2.0
e (m)	> 6.0	4.0-6.0	2.0-4.0	1.0-2.0	< 1.0
f (m)	< 0.55	0.55-0.85	0.85-1.05	1.05-1.25	> 1.25

L'indice SVI évalue la vulnérabilité sociale et dans l'étude de Mavromatidi et al. 2018 est obtenue sur la base de 9 paramètres: population de moins de 14 ans, population de plus de 75 ans, femmes, familles monoparentales, familles de plus de deux enfants, locataires, densité de la population moyenne (habitants / km<sup>2</sup>), chômeurs, population sans diplôme, étrangers.

Pour l'estimation de l'indice SVI, différentes méthodologies peuvent être utilisées. L'étude de Mavromatidi et al. 2018 calcule cet indice comme

$$SVI = \frac{A + B}{2}$$

où A est la moyenne des valeurs des variables normalisées, B est le nombre des variables déterminantes après leur normalisation. La normalisation est obtenue

$$Z = \frac{(x - \mu)}{sd}$$

où x sont les valeurs initiales de la variable,  $\mu$  la moyenne, sd l'écart-type.

Les variables déterminantes sont considérées comme donnant plus de poids aux zones qui comptent un plus grand nombre de groupes de population vulnérables et dans l'étude de Mavromatidi et al. 2018 sont les variables (parmi les 9 analysées) qui ont une valeur d'écart-type supérieure ou égale à 0,5.

Les résultats finaux des deux indices et leur catégorisation dans les cinq catégories de sensibilité / vulnérabilité sont basés sur l'écart type par rapport à la valeur moyenne : du plus faible ( $\leq 1$  écart-type) au plus élevé ( $> 1$  écart-type).

Les indices de risque sont donnés par la combinaison de la sensibilité côtière, c'est-à-dire de la prédisposition de la côte à être inondée suite à un scénario de risque, et de la vulnérabilité côtière, évalué sur la base de la valeur économique de la partie naturelle et anthropique (site d'intérêt communautaire, site archéologique, site avec des contraintes environnementales, habitat côtier, littoral anthropisé ...).

À la base de l'estimation de l'indice de risque, il faut calculer le temps de retour du scénario de risque analysé au moyen d'une analyse des événements extrêmes, par exemple la distribution de Gumbell, Weibull ou autre (par exemple, répartition généralisation de Pareto).

Les indices de risque doivent être standardisés selon une procédure standardisée pour rendre la comparaison entre les différentes zones côtières compréhensible.

## G. Projets d'évaluation des risques côtiers

En analysant le risque côtier, il est nécessaire de prendre en compte de nombreux facteurs (sociaux, économiques, environnementaux, ...) sur de vastes zones et à des moments différents. Les outils basés sur les SIG constituent un moyen efficace de rassembler toutes ces informations sur une seule plate-forme et de fournir une aide à la décision dans la gestion des risques (Système d'aide à la décision DSS).

De nombreux projets dans la littérature (listés ci-dessous) ont développé des outils DSS afin d'identifier et d'analyser la vulnérabilité, les impacts et les risques de certaines zones et de fournir un support décisionnel pour la gestion des risques (Zanuttigh et al., 2014).

L'un des derniers projets mis au point a été le RISC-KIT (Stratégies d'accroissement de la résilience pour les zones côtières). La méthodologie CRAF (Coastal Risk Assessment Framework) a été développée au sein du projet, qui prévoit une première phase d'évaluation, à l'échelle régionale (de l'ordre de 100 km), du risque et des impacts associés, afin d'identifier les hotspots (définis comme les endroits les plus à risque) qui sont ensuite analysés en détail dans la seconde phase selon la technique MCA (Multi-Criteria Analysis).

En ce qui concerne le risque associé aux courants de déchirure, le service météorologique national de la NOAA prévoit pour la région de Philadelphie / Mt Holly (<https://www.weather.gov/phi/surfRip4#>) une prévision des courants qui alertent les surfeurs et les nageurs sur le risque. Les cartes de la zone en question sont produites en divisant le risque en faible, moyen et élevé et en soulignant que même avec un faible risque, des courants de fuite peuvent toujours être générés en présence d'ouvrages.

NOM	ANNEE	REFERENCE	PROCESSUS	CARACTERISTIQUES
 <b>Coastal-Simulator</b>	2000-	Mokrech et al., 2009 Dawson et al., 2009	Ondes de tempête Elévation 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).
 <b>CVAT</b>	1999-	Flax et al., 2002	Multi-risques Ondes de tempête Événements extrêmes (tornades, tremblements de terre, ..)	Le CVAT (Community Vulnerability Assessment Tool) est une méthodologie développée par la NOAA pour l'évaluation du risque et de la vulnérabilité d'une zone côtière et pour soutenir les administrations dans la réduction / atténuation des risques. Les différents types de risques sont analysés pour les étapes ultérieures: structures actuelles, facteurs économiques, impacts environnementaux.
 <b>DESYCO</b>	2005-2010	Torresan et al., 2010	Elévation du niveau de la mer Ondes de tempête Inondation Érosion côtière Qualité de l'eau	DESYCO (DEcision support SYstem for Coastal climate change impact assessment) propose une méthodologie intégrant les résultats de modèles météorologiques à grande échelle, hydrodynamiques, morphodynamiques et biogéochimiques à haute résolution, pour évaluer les impacts environnementaux et socio-économiques multiples sur les systèmes côtiers (par exemple plages, deltas, estuaires et lagunes, zones humides, zones agricoles et urbaines)
<b>DIVA</b>	1999-	Hinkel e Klein,	Elévation du niveau	Le modèle DIVA (Dynamic Interactive Vulnerability

	2009		de la mer Ondes de tempête Inondation Érosion côtière Changement de zones humides Intrusion saline	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.
<b>KRIM</b> 	2001-2004	Schirmer et al, 2003	Elévation du niveau de la mer Ondes de tempête Érosion côtière	KRIM (Climate Change and Preventive Risk and Coastal Protection Management) analyse les conséquences d'une augmentation du niveau de la mer et des scénarios climatiques liés à l'année 2050 et les impacts et évolutions possibles des environnements naturels et artificiels.
<b>MICORE</b> 	2008-2011	<a href="http://www.micore.eu/index.php">http://www.micore.eu/index.php</a>	Ondes de tempête Base de données historiques sur les ondes de tempête Morphologie Impact socio-économique	Développement d'une cartographie probabiliste de l'impact morphologique des tempêtes et production de systèmes d'alarme et d'information. 9 neuf études de cas. Actuellement seulement pour la plage de Lido di Dante (IT) sont fournis les résultats du modèle X-Beach, cartes des risques, prévision de la hauteur des vagues (modèle SWAN), prévisions du niveau de la mer (AdriaROMS), niveau de la mer en temps réel.
<b>RISC-KIT</b> 	2013-2017	<a href="http://www.riscki.t.eu/np4/home.html">http://www.riscki.t.eu/np4/home.html</a> Viavattene et al. 2018 De Angeli et al, 2017 Armaroli et al, 2017 Ferreira et al, 2016 Bogaard et al, 2016	Elévation du niveau de la mer Inondation Base de données historiques sur les ondes de tempête Érosion côtière Facteurs économiques, population, bâtiments et propriété privée, infrastructures, sites archéologiques et culturels	Le projet RISC-KIT fournit une information sur les inondations dans les sites d'études de cas, le forçage environnemental, les observations et données rétrospectives, les scénarios climatiques, les impacts observés et les données socio-économiques et culturelles, et les aspects environnementaux quantitatifs et qualitatifs. Il analyse les impacts sur l'économie, sur la population, sur les bâtiments et la propriété privée, sur l'environnement, sur les infrastructures, les sites archéologiques et culturels. Le projet a développé un système d'alerte précoce et d'aide à la décision (EMS / DSS) pour les 11 sites d'étude européens (et en principe pour toute autre zone côtière). Le système est constitué d'un système de prévision de l'intensité du danger obtenu par couplage de modèles météorologiques, hydrodynamiques et morphodynamiques et d'un système d'aide à la décision (DSS) qui intègre les risques et les impacts environnementaux et socio-économiques. Delft-FEWS est une plate-forme de gestion de données très flexible et configurable pour importer et afficher des données (hydrodynamiques / météorologiques), effectuer des simulations de modèles, valider des données en temps réel, etc.
<b>SimCLIM</b>	2005-	Warrick (2009)	Elévation 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 et la santé humaine.
<b>THESEUS</b> 	2010-2013	<a href="http://www.theseusproject.eu">http://www.theseusproject.eu</a> Zanuttigh et al, 2014	Elévation du niveau de la mer Inondation Érosion côtière Scénarios socio-économiques	THESEUS (Innovative technologies for safer European coasts in a changing climate) fournit une méthodologie intégrée pour la planification de stratégies de défense durables pour l'érosion côtière et la gestion des inondations, en analysant les aspects techniques, sociaux, économiques et environnementaux. Le projet a également examiné l'application de technologies innovantes dans le but de rendre la côte sûre (ou à faible risque) pour les humains et l'écosystème.
<b>TIDES &amp; CURRENTS</b> 	-	<a href="https://tidesandcurrents.noaa.gov/water_level_info.html">https://tidesandcurrents.noaa.gov/water_level_info.html</a>	Elévation du niveau de la mer Base de données historiques sur les ondes de tempête Événements extrêmes Inondation	NOAA à travers plus de 200 stations permanentes aux Etats-Unis, fournit un service de prévision des marées aux Etats-Unis. En outre, le NOS (National Ocean Service) a développé un tableau de bord d'inondation qui fournit des informations sur les niveaux d'eau en temps réel et sur les inondations dans certaines stations.

### III. CONTENU DU RAPPORT TECHNIQUE SUR LE RISQUE À COURT TERME

Le rapport technique sur le risque à court terme doit contenir les informations pertinentes propres au site, adaptées à la caractérisation de l'impact de la mer sur la côte, afin de mettre en œuvre des systèmes de prévision et d'alerte tels que ceux décrits dans le chapitre suivant.

Le rapport représente donc un niveau préliminaire d'analyse, pour caractériser les risques potentiels et contient des informations sur les caractéristiques naturelles de la côte (géomorphologie, sédimentologie, mouvement des vagues, hydrodynamique), les caractéristiques anthropiques (utilisation de la côte) et la méthodologie utilisée pour l'estimation de l'impact des contraintes hydrodynamiques et du mouvement des vagues sur la côte (tels que les montées, les caractéristiques des vagues, les inondations, les *rip-currents*).

#### A. Caractéristiques géomorphologiques et sédimentologiques

Dans l'analyse du risque de tempête, il est nécessaire de connaître les caractéristiques géomorphologiques (formes de fond et de rugosité) et sédimentologiques (granulométrie moyenne et variance sédimentaire jusqu'à la profondeur de fermeture) de la zone côtière concernée, importante pour une étude hydrodynamique / morphologique détaillée.

Le risque de tempête dépend du type de côte (haute ou basse), du type de plage (sable ou gravier), de la pente du fond marin, de la présence ou de l'absence d'un appareil dunaire (présent uniquement sur la côte basse), de la présence des travaux transversaux et longitudinaux pouvant induire d'importants phénomènes de réflexion, de la tendance évolutive du court et moyen terme (si tendue en érosion ou accumulation), de la largeur de la plage émergée, de la présence d'éléments anthropiques.

Sur une côte basse, il est fondamental d'estimer la montée et le run-up pour identifier les zones inondables. Une plage très large permet de dissiper davantage le mouvement des vagues sans phénomènes de réflexion. De plus, la présence de dunes côtières semble être un élément de stabilisation ainsi que de défense naturelle des tempêtes pour les eaux dormantes. Les dunes fournissent naturellement du matériel à la plage dans les moments de crise érosive: une plage en érosion, avec des engins de dunes en arrière, peut résulter pendant un certain temps de phénomènes rétrogrades moins importants que ne le serait une dune. Les travaux transversaux ou longitudinaux peuvent générer des phénomènes de réflexion et de formation de courants de déchirure. Les courants de crête sont aussi couramment observés sur les plages en pente douce où la zone active (zones de surf) est plus large, alors qu'elles sont moins intenses sur les plages en pente en raison de la rupture très proche de la côte.

Sur la haute côte, il est important d'étudier l'instabilité des pentes côtières en tenant compte des facteurs géologiques, hydrodynamiques et climatiques, en comparant les caractéristiques de la côte concernée avec les mécanismes susceptibles de déclencher des phénomènes d'instabilité (unité UNICA - composante T2.3.4 - Méthodologie Coste Alte). Parmi les caractéristiques intrinsèques de la côte, nous considérons les caractéristiques géologiques-géomorphologiques, climatiques, hydrogéologiques et géotechniques. Parmi les mécanismes responsables de l'instabilité, nous considérons le mouvement des vagues, la configuration géomécanique, la variation des niveaux de la mer et des marées, les événements météorologiques (y compris le vent), les eaux souterraines, les précipitations et l'altération de la pulvérisation marine. Sur la haute côte, il est également important d'étudier la forme des surfaces submergées et les caractéristiques géologiques des zones proches des falaises côtières, car elles jouent un rôle fondamental dans la définition des processus d'instabilité. En cas de phénomène de piétinement, la présence d'infrastructures telles que les routes, les voies ferrées, etc., près de la falaise est un autre élément de risque.

#### B. Propriétés ondulées et hydrodynamiques

Comprendre le mouvement des vagues dans un tronçon de côte donné est fondamental et nécessite nécessairement une analyse combinée des données in situ et des données du modèle. Dans le cadre des connaissances de base, il est conseillé d'effectuer une régionalisation des ondes hydrodynamiques et des données à partir de modèles de prévision à grande échelle convenablement calibrés et validés avec des observations de bouées d'ondemètres, de courantomètres et de marées.

Le rapport contient donc le cadre de toutes les données disponibles pour décrire une zone dans le but de caractériser le risque à court terme, y compris dans le but de construire des données d'entrée pour les modèles d'impact des vagues et l'hydrodynamique côtière. Le rapport indique également la présence de lacunes dans les connaissances susceptibles d'indiquer des améliorations dans les systèmes intégrés d'observation et de prévision.

Les tableaux qui suivent résument brièvement les informations précédemment mentionnées, divisées entre la côte basse et la côte haute, et un exemple pratique pour sa compilation.

<b>BASSE COTE</b>	
<b>Photo</b>	
<i>Description générale du site</i>	
<b>Tendance évolutionnaire</b>	Taux moyen d'avancement ou recul en m / an.
<b>Hauteur maximale de la plage</b>	
<b>Largeur moyenne de la plage</b>	
<b>Structures de défense</b>	Indiquer si les structures de défense sont présentes et les décrire
<b>Anthropisation</b>	Description de la plage, si naturel, site d'intérêt communautaire, pression anthropique
<b>Distance des éléments de la ligne de rivage</b>	Entrez la distance de la ligne de rivage des éléments principaux qui peuvent être endommagés par l'inondation.
<b>Cours d'eau</b>	Indiquer la présence d'embouchures et de cours d'eau mineurs
<b>Exposition du site et secteur transversal</b>	
<i>Brève description des facteurs de risque à court terme</i>	
<b>Risque de tempête de mer</b>	Décrivez les types de tempête auxquels la zone est exposée
<b>Risque d'inondation côtière</b>	Décrivez si la zone est sujette à des phénomènes d'inondation côtière, également en raison de la combinaison des pluies et des tempêtes intenses.
<b>Risque de courants de déchirure</b>	Décrivez si ce type de risque est présent dans la zone, quelles sont les caractéristiques présentes et les conditions de déclenchement sont connues.
<b>Risque de tremblement sous-marin</b>	Décrivez s'il existe des risques connus de tsunami dans la région (historiquement ou scientifiquement).
<b>Phénomènes historiques et récents</b>	Fournir une image récente (en utilisant également des reportages) liée aux risques de tempête mis en évidence dans la région ces derniers temps.
<i>Caractéristiques géomorphologiques et sédimentologiques</i>	
<b>DTM</b>	Informations de données utilisées pour la partie émergée et submergée
<b>Rugosité de la partie émergée</b>	Informations sur la rugosité de la partie émergée et submergée avec indication des facteurs de rugosité associés
<b>Bathymétrie</b>	Type de données utilisées, année de référence
<b>Formes de fond</b>	Lorsque la bathymétrie varie
<b>Pente du fond marin</b>	
<b>Duna</b>	Présent ou non, indiquez s'il s'érode
<b>Type de plage et caractéristiques granulométriques</b>	Sable / gravier / mixte D50 [mm] selon la bathymétrie
<b>Profondeur de fermeture</b>	[m]
<i>Mouvement de vague et anémométrie</i>	
<b>Dataset</b>	Indiquez quelles données ont été utilisées et en fonction de la méthodologie (observations, modèles) utilisée pour la base de données côtières sur les vagues et les vagues, le nombre d'années de l'ensemble de données
<b>Climat météorologique</b>	Principales caractéristiques (roses des vagues, roses des vents, ...) aussi pour la saison
<b>Statistiques des extrêmes</b>	Indiquer quelle méthodologie a été utilisée pour estimer les scénarios de risque
<b>Run-up</b>	Indiquer comment l'estimation de la remontée des vagues a été faite
<i>Caractéristiques hydrodynamiques (courants marins et niveau de la mer)</i>	
<b>Dataset</b>	Indiquer quelles données ont été utilisées et en fonction de la méthodologie (observations, modèles) que la base de données côtière a été construite par rapport aux courants et aux niveaux, le nombre d'années de l'ensemble de données
<b>Courants</b>	Description des courants côtiers en fonction des différentes conditions de vent et de vagues
<b>Rip-currents</b>	Identifier et décrire où seulement localisés, s'il y a des preuves et des rapports sur leur présence, des observations via webcam ou d'autres instruments, et si les conditions de déclenchement ont été étudiées

<b>Niveau de la mer</b>	<p>Identifier sur la base de quelles observations et modèles les excursions à court terme au niveau de la mer sont étudiées dans la zone, et comment les effets de:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Set-up de la vague</li> <li>• Set-up du vent</li> <li>• Marée astronomique</li> <li>• Marée barométrique</li> </ul>
<i>Analyse d'écart</i>	
<b>Ecart du cadre cognitif</b>	Indiquer si les connaissances de base de la zone à faible coût sont suffisantes ou complètes par rapport à l'analyse de risque à court terme
<b>Ecart du système d'observation</b>	Indiquer si le système d'observation est suffisamment représentatif des caractéristiques météorologiques et hydrodynamiques de la zone par rapport à l'analyse des risques à court terme
<b>Ecart du système de prévision</b>	Indiquer si le système de prévision est suffisamment représentatif de la météorologie et des caractéristiques hydrodynamiques de la zone par rapport à l'analyse des risques à court terme

<b>HAUTE COTE</b>	
<b>Photo</b>	
<i>Description générale du site</i>	
<b>Tendance évolutive du rocher</b>	Tendance évolutive du rocher
<b>Processus actifs</b>	Description des éléments instables si présents et du type de mouvement
<b>Infrastructure</b>	Description et localisation des infrastructures présentes
<b>Distance de la ligne de rivage</b>	Entrer la distance à partir de la ligne de rivage des éléments principaux qui peuvent être endommagés à la suite du glissement de terrain de certaines parties de la falaise
<b>Exposition du site et secteur transversal</b>	
<i>Brève description des facteurs de risque à court terme</i>	
<b>Risque de tempête de mer</b>	Décrivez les types de tempête auxquels la zone est exposée
<b>Risque de glissement de terrain</b>	Décrire la présence des risques de l'effondrement de la falaise avec une référence particulière suite à l'action des vagues et des disjoncteurs, et si les conditions de déclenchement sont connues.
<b>Risque du tremblement sous-marin</b>	Décrivez s'il existe des risques connus de tsunami dans la région (historiquement ou scientifiquement).
<b>Phénomènes historiques et récents</b>	Fournir une image récente (en utilisant également des reportages) liée aux risques de tempête mis en évidence dans la région ces derniers temps.
<i>Caractéristiques géomorphologiques et lithologiques</i>	
<b>DTM</b>	Informations de données utilisées pour la partie émergée et submergée
<b>Bathymétrie</b>	Type de données utilisées, année de référence
<b>Pente du fond marin</b>	
<b>Exposition et orientation</b>	
<b>Lithologie</b>	Lithotype, stratification, laïc ...
<b>Géomorphologie</b>	Processus et morphologie de l'érosion, altération et dissolution, processus d'effondrement, ...
<b>Structures</b>	Défauts, dépôts, ...
<b>Géomécanique</b>	Fracturation, cohésion, résistance à la compression, angle de frottement, altération, taille des particules ...
<b>Bassin hydrographique et hydrogéologique</b>	Identification, description de la géométrie de la strate, perméabilité, infiltration, ...
<b>Précipitation</b>	
<i>Mouvement des vagues, anémométrie et caractéristiques hydrodynamiques</i>	
<b>Dataset</b>	Indiquer quelles données ont été utilisées et en fonction de la méthodologie (observations, modèles) de la base de données côtière sur le vent, les vagues, les courants et les niveaux, et le nombre d'années de l'ensemble de données
<b>Climat météorologique</b>	Principales caractéristiques (roses des vagues, roses des vents, ...) aussi pour la saison
<b>Statistiques des extrêmes</b>	Indiquer quelle méthodologie a été utilisée pour estimer les scénarios de risque
<b>Niveau de la mer</b>	<p>Identifier sur la base de quelles observations et modèles les excursions à court terme au niveau de la mer sont étudiées dans la zone, et comment les effets de :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Set-up de la vague</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Set-up du vent</li> <li>• Marée astronomique</li> <li>• Marée barométrique</li> </ul>
<i>Analyse d'écart</i>	
<b>Ecart du cadre cognitif</b>	Indiquer si les connaissances de base de la zone de haute mer sont suffisantes ou complètes par rapport à l'analyse de risque à court terme
<b>Ecart du système d'observation</b>	Indiquer si le système d'observation est suffisamment représentatif des caractéristiques météorologiques et hydrodynamiques de la zone par rapport à l'analyse des risques à court terme
<b>Prévision de l'écart du système</b>	Indiquer si le système de prévision est suffisamment représentatif de la météorologie et des caractéristiques hydrodynamiques de la zone par rapport à l'analyse des risques à court terme

### C. Exemple de site pilote entre Bocca di Magra et Marina di Massa

Le tronçon entre la rivière Magra à Marina di Massa, choisie comme l'un des sites pilotes du projet pour tester les méthodologies proposées dans ce rapport, est un tronçon de littoral d'environ 12 km de long, principalement exposé aux événements de Libeccio (Sud-Sud Ouest).

Les caractéristiques du site sont décrites dans la monographie relative (T2.6).

La zone analysée est très étendue et présente des caractéristiques diversifiées, il est donc approprié de la diviser en trois parties:

- section 1 : de l'embouchure de la rivière Magra jusqu'à l'embouchure de la Torrente Parmignola (tronçon ligure) ;
- section 2: de l'embouchure de la Torrente Parmignola au port de Carrara (tronçon toscano) ;
- section 3: du port de Carrara à Marina di Massa (tronçon toscano).





*Description générale du site*

<b>Tendance évolutive</b>	Avancement, taux moyen +0,6 m / an
<b>Hauteur maximale de la plage</b>	3 m slm
<b>Largeur moyenne de la plage</b>	60 m
<b>Structures de défense côtière</b>	10 épi émergées (longueur totale 694 m) / 4 épi à extension submergée (721 m) / 1 falaise parallèle émergée (154 m) / 4 récifs parallèles submergés (393 m) / 3 plates-formes insulaires (50 m) / 5 épi émergées (534 m)
<b>Anthropisation</b>	Plage avec plusieurs établissements balnéaires et caractérisée par la route côtière derrière. Présence de deux petites villes (Fiumaretta di Ameglia et Marinella di Sarzana).
<b>Distance des éléments de la ligne de rivage</b>	Les établissements balnéaires situés sur la plage, à quelques mètres du rivage. Certaines maisons et installations touristiques sont situées entre la limite de la plage, en moyenne 60 m de large et la route côtière.
<b>Cours d'eau</b>	L'embouchure de la rivière Magra à l'extrémité ouest et le torrent Parmignola à l'extrémité est (frontière régionale Ligurie-Toscane)
<b>Exposition du site et secteur de traversia</b>	Site principalement exposé aux événements du Sud-Ouest (Libeccio)
<i>Site principalement exposé aux événements du Sud-Ouest (Libeccio)</i>	
<b>Risque de tempête de mer</b>	La zone est principalement exposée à des événements de S-SW (libeccio) qui a deux principales phénoménologies: courte libeccio et longue libeccio.
<b>Risque d'inondation côtière</b>	Le type de temps associé au libeccio est le même que celui associé aux précipitations les plus intenses le long de l'arc ligurien. Il existe donc une probabilité non négligeable que l'écoulement de l'eau puisse être entravé par le niveau de la mer près de l'embouchure par l'action combinée de la configuration des vagues, de la configuration du vent et de la basse pression atmosphérique, éventuellement en phase avec la marée astronomique.
<b>Risque de rip-currents</b>	Dans la zone, le risque de courant d'arrachement apparaît principalement dû à l'effet produit par les épi et les cellules de protection le long de la côte, qui peuvent entraîner les courants de retour.
<b>Risque de tsunami</b>	Inconnu
<b>Phénomènes historiques et récents</b>	A des fins de connaissance, il est prévu de faire une recherche historique de tous les principaux événements qui impliquaient des risques à court terme, allant même jusqu'à analyser des études anciennes ou des informations journalistiques. Des inondations récentes dans la région ont eu lieu en octobre 2011 et en novembre 2014.
<i>Caractéristiques géomorphologiques et sédimentologiques</i>	
<b>DTM</b>	Relevé de la plage émergée datant de mai 2016 (projet CAMP)
<b>Partie de rugosité émergée</b>	Ils seront partiellement déduits à partir des formules de la littérature à partir des informations granulométriques et morphologiques disponibles, partiellement obtenues pour l'étalonnage des modèles hydrodynamiques.
<b>Bathymétrie</b>	Relevé de la plage immergée datant de mai 2016 (projet CAMP)
<b>Formes de fond</b>	Isobates irréguliers avec des barres et des creux festonnés dans les cellules entre les ouvrages de défense.

<b>Pente du fond marin</b>	0,8%
<b>Duna</b>	Pas présent
<b>Type de plage et caractéristiques granulométriques</b>	Sable moyen et fin sur la plage émergée. Du gravier au sable fin sur la plage submergée, avec des dimensions décroissantes moyennes de 0,6 mm par mètre de profondeur
<b>Profondeur de fermeture</b>	-9 m
<i>Mouvement de vague et anémométrie</i>	
<b>Dataset</b>	Il est prévu d'utiliser les données du modèle de vague WWIII du Consortium LaMMA (à la fois les données stockées par le modèle opérationnel et la réanalyse en cours), les données de vent du Consortium LaMMA, les données sur la bouée de longueur d'onde de La Spezia ), la bouée de Gorgona et le compteur de courant / ohmmètre de Gombo.
<b>Climat météo marine</b>	La zone se caractérise avant tout par la présence du SW (libeccio), qui domine la plupart des événements extrêmes. Les principales caractéristiques (roses des vagues, roses des vents, ...) seront également élaborées par saison sur la base de l'analyse des ensembles de données mentionnés précédemment.
<b>Statistiques des extrêmes</b>	Une analyse des extrêmes sera effectuée en utilisant la distribution aux valeurs extrêmes (Gumbell, Weibull ou généralisée par Pareto) en calculant les valeurs obtenues avec la variation du temps de retour égale à 1, 2, 5, 10, 25, 50, 100 ans
<b>Run-up</b>	Estimation du runup d'onde obtenu en combinant: - formules empiriques - l'analyse des données grâce à une implémentation du modèle XBeach (1D et 2D) en mode non stationnaire à partir de la profondeur de fermeture. Une fois que les valeurs de démarrage sont connues, les distances maximales et les cartes des risques d'inondation seront obtenues comme indiqué dans la méthodologie générale. - Analyse des données de la webcam côtière lorsqu'elles sont disponibles
<i>Caractéristiques hydrodynamiques (courants marins et niveau de la mer)</i>	
<b>Dataset</b>	Il est prévu d'utiliser les données actuelles à l'échelle régionale du modèle ROMS du Consortium LaMMA, les données mesurées par le compteur actuel de Gombo, les données des marées de La Spezia et de Livourne.
<b>Courants</b>	L'analyse des courants côtiers en fonction des différentes situations de vent, d'onde et de marée sera réalisée à l'aide du modèle hydrodynamique couplé Delft 3D - FLOW et WAVE
<b>Rip-currents</b>	Grâce à une approche combinée entre modèles et observations (webcam), si possible, les conditions de déclenchement potentielles seront identifiées (en fonction du vent, du mouvement des vagues à grande échelle) et une série de situations récurrentes seront construites.
<b>Niveau de la mer</b>	En calculant les niveaux, les quatre contributions dues aux vagues, au vent, à la pression et à la marée seront analysées séparément. L'augmentation du vent et de la pression sera calculée à partir des marées de La Spezia et de Livourne en combinaison avec les estimations fournies par les modèles numériques de circulation.
<i>Caractéristiques hydrodynamiques (courants marins et niveau de la mer)</i>	
<b>Ecart du cadre cognitif</b>	On pense que les conditions dangereuses associées au risque de courants de déchirure dans la région et les situations d'inondation potentielles devraient être étudiées en détail. Ces conditions ne sont pas connues.
<b>Gap du système d'observation</b>	Dans la région, il n'y a pas de système d'observation, en particulier pour l'évaluation de l'impact des vagues et de l'hydrodynamique sur la côte. Il est jugé nécessaire d'installer des webcams spéciales pour calibrer et valider les modèles de risque à court terme.
<b>Gap du système de prévision</b>	Le système de prévision sera complété par la mise en œuvre de modèles d'impact des vagues et l'estimation des courants (également des courants de déchirure) sur une échelle côtière telle que Delft-3D FM et XBeach.

## IV. CONTENU TECHNIQUE DES SYSTÈMES DE PRÉVISION ET D'ALERTE

Les systèmes d'alerte sont essentiels pour signaler à l'avance la possibilité de se produire des événements potentiellement dangereux pour l'environnement naturel, l'environnement bâti, l'homme, et donc mettre en œuvre les mesures préventives nécessaires. Ces systèmes reposent sur l'utilisation de modèles numériques prédictifs qui nécessitent toutefois, en amont, une mesure de la fiabilité des prévisions fournies. Cela ne peut être évalué que par comparaison avec les données d'observation.

A partir de modèles météorologiques et de modèles de météorologie à grande échelle, on obtient les paramètres de forçage du vent et de la pression (hauteur de vagues, période de pointe, spectre des vagues, etc.) qui seront utiliser comme entrée dans les modèles hydrodynamiques à haute résolution. Les modèles d'onde et hydrodynamiques haute résolution fournissent respectivement les caractéristiques de mouvement des vagues (d'un orage ou d'un événement extrême avec un certain temps de retour) et des niveaux de la mer (avec le temps de retour choisi) à utiliser comme modèles à l'échelle locale pour l'estimation du démarrage et donc l'identification des zones potentiellement inondables. De plus ces modèles permettent d'analyser la dynamique des courants de déchirure possibles (très dangereux pour la vie humaine).

### A. Utilisation de données de prévision à grande échelle

Comme mentionné précédemment, les données météo-océaniques le long de la côte, aux fins de l'alerte démographique, peuvent également être utilisées telles quelles, en essayant de déduire les niveaux de risque par rapport à la connaissance du territoire. Cela implique la nécessité d'avoir des prévisionnistes experts capables d'évaluer, sur la base des connaissances acquises précédemment, les retombées potentielles d'un événement sur la côte.

A titre d'exemple, le cas discuté au paragraphe I.B (événement du 23-25 mai 2013) est rapporté. Les cartes de prévision relatives à l'événement ont été fournies, le long de la côte toscane, déjà à partir de quelques jours avant l'événement, une situation caractérisée par une grande dépression qui a touché la majeure partie de l'Europe; entre l'après-midi du 23 et le matin du 24, le transit d'un front froid sur les régions du nord de l'Italie a conduit à l'approfondissement rapide d'une dépression minimale du Golfe de Ligurie (998 hPa) destiné à persister jusqu'à 25, mais en augmentant progressivement

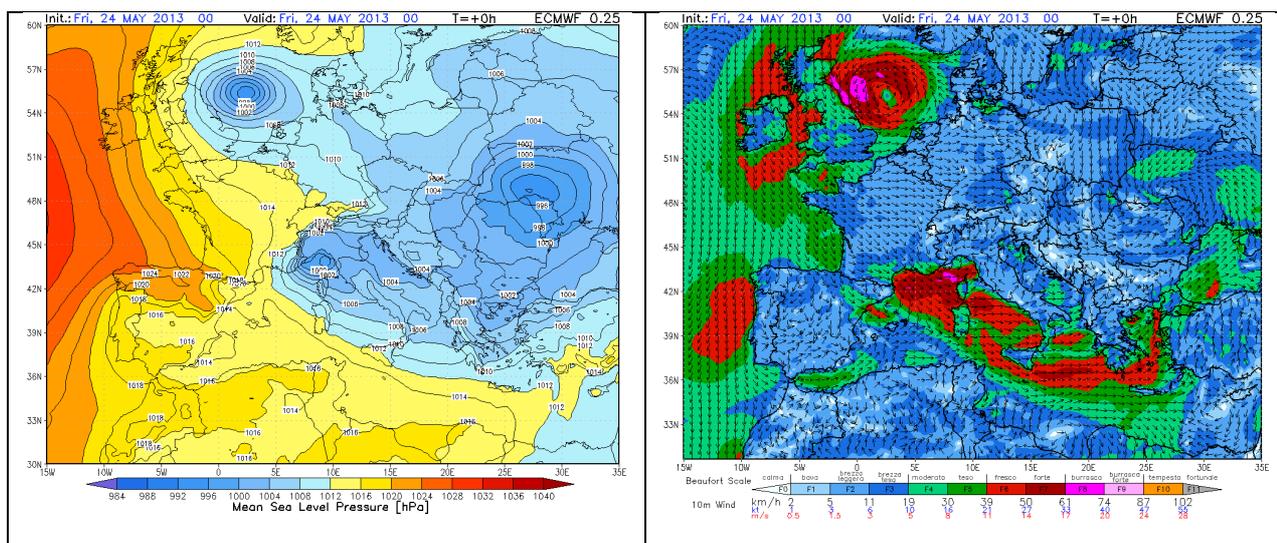


Figure 1 Situation synoptique du 24 mai 2013 et carte du vent connexe du ECMWF

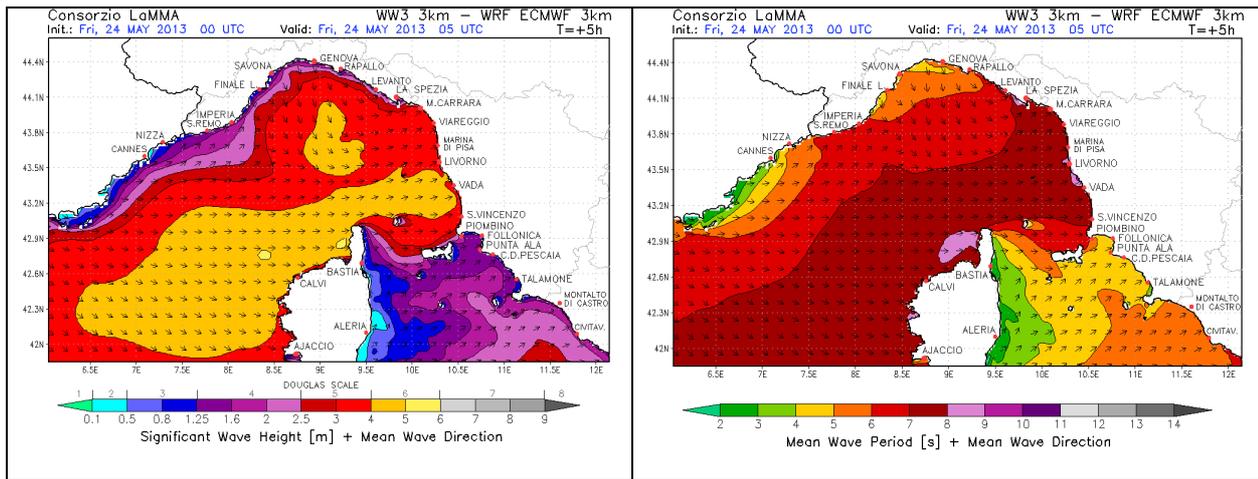


Figure 2 Prévision des vagues de LaMMA-WW3 à 3km pour les zones de Ligurie et du Nord Tyrrhénien, valable le 24 mai 2013 à 5 UTC. Sur la gauche, une carte de hauteur de vague significative, à droite, une carte de la période moyenne des vagues.

Certains systèmes d'alerte présents dans l'espace de coopération sont énumérés au paragraphe II.B. Aux fins de la mise en œuvre d'un système de prévision météorologique, les caractéristiques pertinentes concernent:

- l'extension de la zone marine en question doit être de nature à recueillir tous les flux d'énergie qui contribuent à l'agitation des vagues le long de la côte. Aux côtes méditerranéennes occidentales et côtières de la zone maritime transfrontalière, le modèle de prévision des vagues devrait être étendu à toute la Méditerranée occidentale jusqu'à au moins Gibraltar et, à l'est, inclure une bonne partie du bassin ionien oriental du chenal de Sicile;
- la résolution spatiale du modèle doit tenir compte de la conformation du littoral et de la présence des îles; à grande échelle, l'objectif minimal est de simuler les vagues d'au moins 1/10 °; aux échelles détaillées (à simuler par des modèles greffés ou à travers des zones à résolution plus élevée dans des maillages non structurés), on pense que la cible devrait être celle d'une résolution côtière d'au moins 1 km ou moins;
- la résolution spectrale du modèle ne doit pas dépasser 10 ° (résolution angulaire) et ne pas inclure moins de 25-30 fréquences;
- le forçage du vent devrait de préférence provenir d'un modèle météorologique à zone limitée, avec une résolution ne dépassant pas 1/10 ° à grande échelle et de préférence pas plus de 3 km dans les domaines les plus détaillés. La fréquence de transmission des données du modèle de prévision météorologique au modèle de prévision d'ondes ne doit pas dépasser 1h.

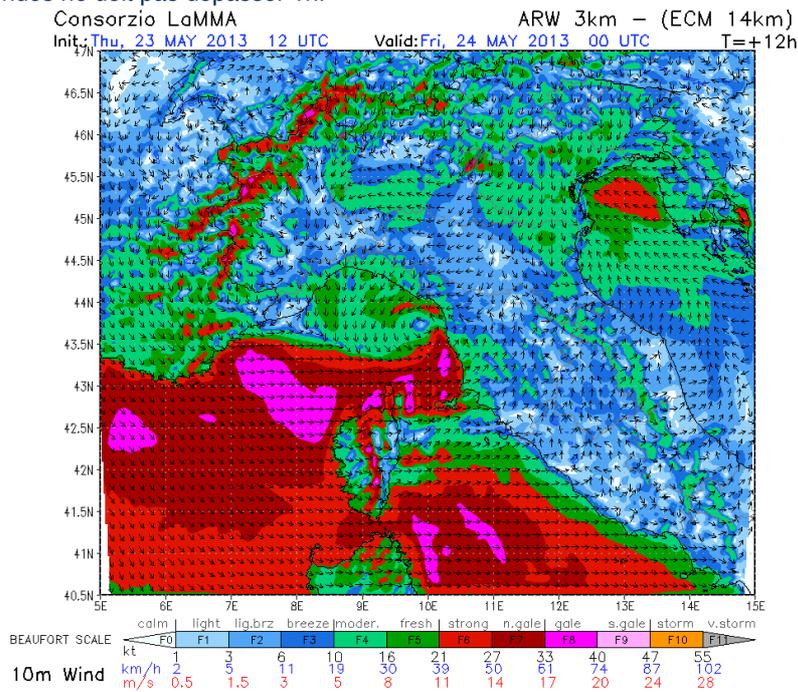


Figure 3 Modèle de prévision du vent LaMMA-WRF à 3km pour les zones de la Ligurie et de la Tyrrhénienne du Nord, valable pour 00 UTC le 24 mai 2013.

Dans l'étude de cas citée, le Centre Fonctionnel Hydrologique-Hydraulique de la Région Toscane a émis un avertissement critique régional avec alerte modérée / orange sur la côte, pour la prévision de la mer agitée au nord de l'île d'Elbe avec des orages le long des côtes exposées. Il convient de souligner que l'impact des événements, dans les procédures actuelles, n'est pas évalué sur la base de la saisonnalité des phénomènes, mais sur la base de seuils définis a priori. En l'espèce, le caractère exceptionnel de l'événement aurait dû être reconnu sur la base de la période de l'année au cours de laquelle il s'est produit.

### AVVISO DI CRITICITÀ REGIONALE

Emesso **Giovedì, 23 Maggio 2013, ore 12.20**

Valido dalle ore **00.00 di Venerdì, 24 Maggio 2013** alle ore **22.00 di Sabato, 25 Maggio 2013**



Livello	Terminologia	Altezza Significativa Moto Ondoso (m)
0	fino a mosso	<1,25
1	molto mosso	1,25 - 2,5
2	agitato	2,5 - 4,0
3	molto agitato	4,0 - 6,0
4	grosso	> 6,0

CODICE COLORE MOTO ONDOSO

CODICE COLORE MOTO ONDOSO					
	<1,25	1,25 - 2,5	2,5 - 4,0	4,0 - 6,0	>6,0
Livello fenomeno	0	1	2	3	4

Figure 4 Niveaux d'alerte de tempête de mer adoptés par la Région Toscane et un exemple d'avertissement de criticité régional émis pour le 24 mai 2013.

#### Qualité du modèle

Les modèles de référence utilisés à des fins de prévision devraient avoir été étalonnés et validés pendant une période de temps suffisamment longue. En particulier, aux fins de leur utilisation en tant qu'outil d'alerte, il convient que le modèle soit capable de représenter avec une bonne approximation les pics liés aux tempêtes qui se produisent fréquemment au cours de l'année, ainsi que le comportement saisonnier des tempêtes. Cette activité peut également être réalisée par analyse / réanalyse des périodes passées (rétroprojection).

Les paramètres statistiques à évaluer, dans la comparaison entre données observées et modèles, sont au moins: corrélation, écart-type, erreur quadratique moyenne. La comparaison visuelle entre données simulées et données mesurées est également utile pour comprendre toute surestimation / sous-estimation dans l'évaluation de certains événements spécifiques et en comprendre les causes.

### ***Fiabilité des prévisions***

Il est également nécessaire de fournir une estimation de la fiabilité des prévisions sur plusieurs jours, c'est-à-dire dans les jours et heures précédant un événement donné (par ex. 24 h, 48 h, 72 h, 96 h, 120 h). En règle générale, plus une prévision météorologique est longue, plus elle est précise. La fiabilité des prévisions dans des modèles de zone limitée dépend de divers facteurs, certains intrinsèques, d'autres liés à la qualité des données initiales et aux limites utilisées dans les modèles de prévision atmosphérique.

## **B. Systèmes de prévision à l'échelle locale**

A l'échelle locale, c'est-à-dire dans la prévision de l'impact des événements maritimes le long de la côte, il est nécessaire de disposer de méthodes efficaces d'évaluation opérationnelle des effets des vagues sur la côte et plus généralement des conditions de la mer (y compris les niveaux et les courants côtiers) sur la côte.

### ***Risque de tempête de mer***

L'évaluation des effets à l'échelle locale des tempêtes peut être déterminée par une approche basée sur des étapes successives :

- 1) l'analyse des données météorologiques provenant d'un modèle de prévision côtière à haute résolution (<1 km);
- 2) l'utilisation des données précédentes en association avec une évaluation des risques à l'échelle locale dérivée de l'estimation des temps de retour des événements individuels. Les temps de retour ne doivent pas se limiter à considérer la hauteur significative de la houle comme seul paramètre, mais également d'autres (longueur d'onde, période), visant notamment à l'estimation du runup et de l'installation sur la plage. L'association d'un temps de retour à toute donnée de prévision nécessite donc une bonne climatologie de base, particulièrement précise quant à l'évaluation statistique de la probabilité d'occurrence de phénomènes extrêmes; il faut également que l'étude soit menée sur la base de méthodes d'analyse multivariées;
- 3) l'utilisation de modèles 2D et 3D complexes, tels que ceux décrits au paragraphe II.C (c'est-à-dire XBeach); les conditions aux limites offshore de ces modèles doivent être obtenues à partir des résultats des modèles numériques de propagation d'ondes à grande échelle et il est donc possible d'utiliser des modèles de détail 1DH / 2DH pour estimer l'élévation des vagues dans un tronçon de plage et pour scénario de risque analysé; les modèles hydrodynamiques bidimensionnels à haute résolution peuvent être utilisés pour estimer le périmètre de la zone inondée;
- 4) l'utilisation de méthodes / modèles plus simples, basés sur l'utilisation de quelques paramètres intégrés (hauteur des vagues, longueur d'onde, énergie des vagues, pente de la plage, etc.), comme certains des indices décrits dans le paragraphe II.F

Chacune de ces approches nécessite une validation minutieuse, basée sur les données observées dans les sites pilotes. Pour la validation de ce qui est prévu à l'étape 1, les données de validation à l'échelle régionale et côtière sont principalement constituées de bouées et de marqueurs. A l'échelle locale, les données de webcams côtières adaptées peuvent être très importantes, à partir desquelles il est possible d'obtenir des données de runup le long de la côte, afin de valider les étapes 2-4.

Dans certains sites pilotes où une étude approfondie des conditions dangereuses est nécessaire, une approche mixte peut également être appropriée, basée sur la prise en compte temporaire de toutes les étapes 1 à 4 et sur la mise en place d'un système d'observation approprié prévoyant l'utilisation des comme étape 3, peut-être seulement dans l'évaluation de situations particulièrement critiques, ou pour la validation de méthodologies simplifiées.

### ***Risque d'inondation côtière***

Le risque d'inondation côtière dû à l'effet combiné d'une tempête de mer, d'un niveau de la mer significativement plus élevé et des flux d'eau terrestres complets ne peut être déterminé que par une approche très complexe permettant

d'évaluer les réponses de toutes les composantes du système, tel qu'un modèle couplé atmosphère-ondes-océan en synergie avec les modèles hydrologiques et hydrauliques des bassins terrestres.

Une autre difficulté est donnée par la grande incertitude avec laquelle il est possible d'estimer les champs de précipitation, surtout si le temps est nettement instable.

Une aide à la définition de ces scénarios de risque peut être fournie par la modélisation météorologique-océanographique afin de mieux estimer le niveau de la mer le long de la côte.

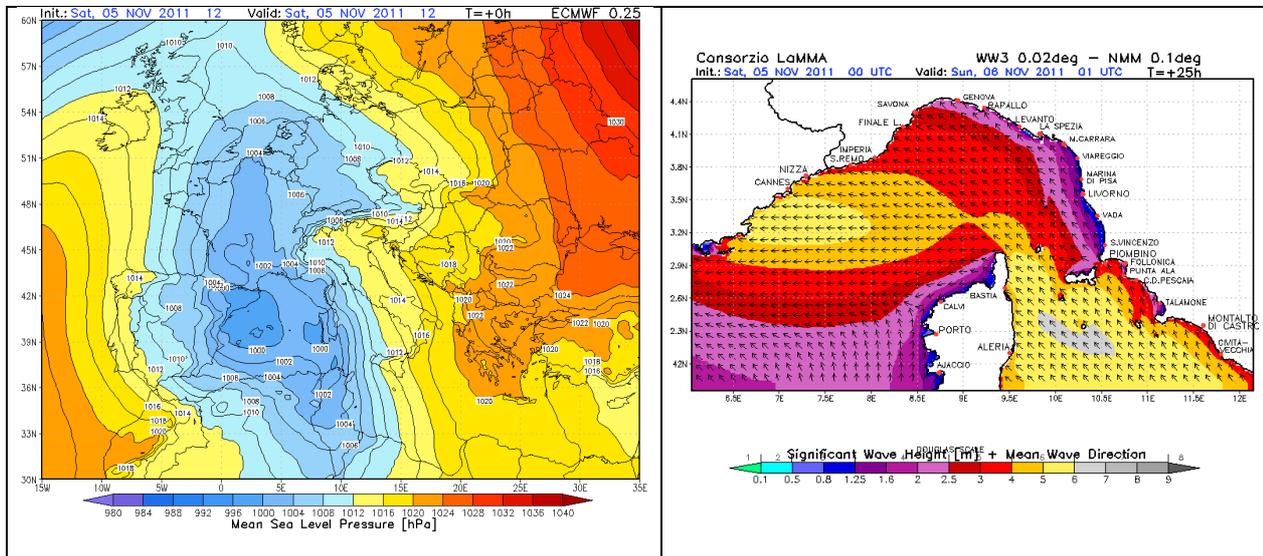


Figure 5 Situation synoptique du 5 novembre 2011 et prévision des vagues pour 01 UTC le 6 novembre 2011.

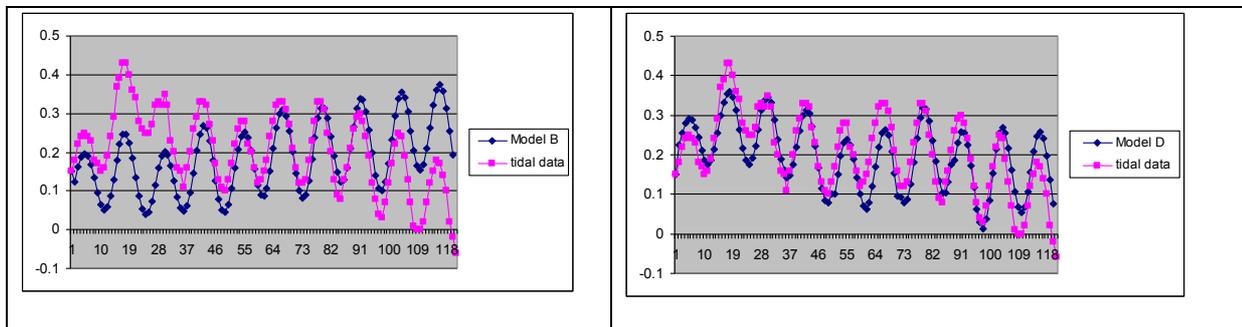


Figure 6 Exemple de comparaison entre les données de niveau mesurées in situ et les données de modèle de prévision. Sur la gauche, le modèle ne prend en compte que la marée astronomique et la pression atmosphérique, sur le côté droit aussi le vent et le mouvement des vagues.

À titre d'exemple, dans l'inondation qui a eu lieu à Marina di Campo les 5 et 6 novembre 2011, l'effet concomitant de fortes précipitations à l'échelle locale et d'un flux sirocco intense qui a investi, avec d'impressionnantes tempêtes de mer, est devenu évident côte sud de l'île d'Elbe. L'enregistrement du marin a marqué des niveaux importants (plus de 40 cm au-dessus du msl) qui ne sont reproductibles par les modèles qu'en considérant toutes les contributions pertinentes (configuration du vent, configuration des vagues, effet barométrique inverse et marée)

### Risque de rip-currents

Ce risque est difficile à évaluer sur la base de modèles d'exploitation locaux.

Le site Web du National Weather Service des États-Unis (<https://www.weather.gov/>) fournit une prévision opérationnelle de ce phénomène.



- 3) L'utilisation de méthodes / modèles plus simples, basés sur l'utilisation de quelques paramètres intégrés (par exemple, le mouvement des vagues, le vent, la pente de la plage, etc.), pour définir des indices de risque appropriés.

On pense qu'une étude à échelle locale pourrait être menée sur un nombre limité de zones pilotes pour s'étendre ensuite à la plupart des zones côtières d'intérêt.

### **C. Comparaison des observations / modèles et estimation de l'incertitude**

La comparaison entre les données de modélisation et les données observées aux points où des outils de détection existent (bouées, courantomètres / ondemètres, webcams côtières, radar, etc.) est fondamentale.

Puisque la prédiction des phénomènes côtiers est affectée par l'incertitude, l'étalonnage et la validation des modèles numériques sont nécessaires pour rendre les prédictions plus fiables.

Pendant la phase d'étalonnage, certains paramètres des modèles sont sélectionnés (paramètres numériques, résolution du modèle, pas de temps ...) et sont amenés à varier dans une plage possible. Les résultats (données simulées) sont ensuite comparés à ceux effectivement mesurés par un instrument (bouée, courantomètre, ...) en utilisant des paramètres statistiques appropriés. A la fin de la phase d'étalonnage, un ensemble optimal de paramètres est ensuite choisi pour permettre aux résultats des simulations d'approcher au mieux les données réelles. Une fois l'étalonnage est terminé, le modèle est validé en vérifiant dans quelle mesure les données simulées sont compensées par les données effectivement mesurées in situ, en utilisant à nouveau des paramètres statistiques.

## V. RÉSUMÉ DE LA PROPOSITION MÉTHODOLOGIQUE

La définition de méthodes et de modèles pour la prévision et la gestion du risque à brève terme implique la réalisation d'études spécifiques au site dans les zones d'intérêt pilotes, visant à décrire le cadre cognitif par rapport à des phénomènes spécifiques, l'état des systèmes d'observation et la prévision régionale et côtière et l'analyse des lacunes. Cette étude peut être résumée et guidée, sous les aspects saillants, à travers des fiches proposées au chapitre III.

Dans tous les cas, avant de construire des systèmes efficaces d'aide à la décision, il est nécessaire de mener des investigations approfondies pour mettre en évidence toutes les situations météorologiques présentant des risques potentiels pour l'environnement naturel et pour l'homme, telles que :

- l'analyse des niveaux de run-up pendant les tempêtes ;
- l'analyse combinée des phénomènes d'inondation côtière et terrestre ;
- l'analyse des conditions de déclenchement potentiel des rip-currents ;
- l'analyse des conditions de déclenchement des glissements de terrain (dans le cas d'une côte haute).

Dans ces cas, les informations nécessaires à la mise en œuvre de systèmes de prévision et d'alerte spécifiques seront collectées.

Ces systèmes sont construits en suivant certaines des indications données au chapitre IV et en se référant aux modèles et méthodes décrits au chapitre II.

En particulier

- 1) il est nécessaire d'avoir un système d'observation et de prévision intégré à l'échelle régionale, pour la prédiction des vagues, des courants et du niveau de la mer ;
- 2) il est nécessaire d'avoir des systèmes intégrés d'observation et de prévision à l'échelle locale pour prévoir l'impact des vagues sur la côte, le niveau de la mer le long de la côte et les situations potentielles de danger hydrodynamique (rip-currents).

Les méthodes proposées peuvent être préalablement vérifiées dans des zones pilotes.

L'intégration entre les observations et les prévisions est fondamentale pour la réalisation de systèmes de prévision et d'alerte fiables, avec une incertitude réduite.

---

## BIBLIOGRAPHIE

- Regione Emilia Romagna. "La cartografia di pericolosità e rischio dell'ambito costiero". Servizio geologico sismico e dei suoli, 2014
- Armaroli C., Duo E., Validation of the Coastal storm Risk Assessment Framework along the Emilia-Romagna coast, *Coast. Eng.* (2017).
- Benassai, G., Aucelli, P., Budillon, G., De Stefano, M., Di Luccio, D., Di Paola, G., Montella, R., Mucerino, L., Sica, M., and Pennetta, M.: Rip current evidence by hydrodynamic simulations, bathymetric surveys and UAV observation, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17, 1493–1503, 2017.
- Benassai G.. "Introduction to Coastal Dynamics and Shoreline Protection". WIT PRESS, 2006
- Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio Direzione Generale per la Difesa del Suolo. "Difesa delle coste e salvaguardia dei litorali. Analisi delle caratteristiche meteo-marine al largo e a riva e valutazione dei processi evolutivi costieri". Progetto Operativo Difesa Suolo, 2005
- Besio, G., Donini, L., Gallino, S. & Onorato, L (2015). A prompt index for sea storm hazards. 7th SCACR – Short Course and Conference on Applied Coastal Research, Florence, 28 September-01 October, 2015, 12 pp
- Booij, N., R. C. Ris and L. H. Holthuijsen, (1999), A third-generation wave model for coastal regions. 1. Model description and validation. *J. Geophys. Res.*, 104, 7649-7666
- R.A. Dalrymple, J.H. MacMahan, Ad J.H.M. Reniers, V. Nelko, "Rip Currents," *Annual Reviews in Fluids Mechanics*, v.43 (2011), pp.551-581 <http://hdl.handle.net/10945/55138>
- Tom Bogaard, Simone De Kleermaeker, Wiebke S. Jaeger, Ap van Dongeren (2016). Development of Generic Tools for Coastal Early Warning and Decision Support. *E3S Web Conf.*, 7 18017
- Dawson, R.J., Dickson, M., Nicholls, R.J., Hall, J., Walkden, M.J.A., Stansby, P.K., Mokrech, M., Richards, J., Zhou, J., Milligan, J., Jordan, A., Pearson, S., Rees, J., Bates, P.D., Koukoulas, S., Watkinson, A., (2009). Integrated analysis of risks of coastal flooding and cliff erosion under scenarios of long term change. *Clim. Chang.* 95 (1–2), 249–288.
- De Angeli S., D'Andrea M., Cazzola G., Rebori N., Coastal Risk Assessment Framework: comparison of fluvial and marine inundation impacts in Bocca di Magra, Italy, *Coast. Eng.* (2017).
- DHI Italia. "Modelli numerici per l'ingegneria costiera". DHI TECHNICAL PAPER n°3
- Ferreira, O., Viavattene, C., Jimenez, J., Bole, A., Plomaritis, T., Costas, S., Smets, S., 2016. CRAF Phase 1, a framework to identify coastal hotspots to storm impacts. *E3S Web Conf.* 7, 11008.
- Flax, L.K., Jackson, R.W., Stein, D.N., (2002). Community vulnerability assessment tool methodology. *Nat. Hazards Rev.* 3, 163–176.
- Hills, Jack G. and Mader, Charles L. (1997). Tsunami Produced by the Impact of Small Asteroids; *Annals of the New York. Academy of Sciences.*
- MATTM, 2013. "Indirizzi operativi per l'attuazione della direttiva 2007/60/ce relativa alla valutazione ed alla gestione dei rischi da alluvioni con riferimento alla predisposizione delle mappe della pericolosità e del rischio di alluvioni". [http://www.minambiente.it/sites/default/files/archivio/allegati/vari/documento\\_definitivo\\_indirizzi\\_operativi\\_diretti\\_va\\_alluvioni\\_gen\\_13.pdf](http://www.minambiente.it/sites/default/files/archivio/allegati/vari/documento_definitivo_indirizzi_operativi_diretti_va_alluvioni_gen_13.pdf)
- Mokrech, Mustafa, Hanson, Susan, Nicholls, Robert J., Wolf, Judith, Walkden, Mike, Fontaine, Corentin, Nicholson-Cole, Sophie, Jude, Simon R., Leake, James, Stansby, Peter, Watkinson, Andrew R., Rounsevell, Mark D.A., Lowe, Jason A., Hall, Jim W. (2009). The Tyndall coastal simulator. *J. Coast. Conserv. Plan. Manag.*
- Roelvink JA, Reniers AJHM, van Dongeren AR, van Thiel de Vries JSM, McCall RT, Lescinski J. 2009. Modeling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coast. Eng.* 56:1133–52
- Schirmer, M., Schuchardt, B., Hahn, B., Bakkenist, S., Kraft, D., (2003). KRIM: Climate change risk construct and coastal defence. DEKLM German climate research programme. *Proceedings*, pp. 269–273.
- SØRENSEN, OLE R., et al. A third-generation spectral wave model using an unstructured finite volume technique. In: *Coastal Engineering 2004: (In 4 Volumes)*. 2005. p. 894-906.
- Torresan, S., Zabeo, A., Rizzi, J., Critto, A., Pizzol, L., Giove, S., Marcomini, A., (2010). Risks assessment and decision support tools for the integrated evaluation of climate change impacts on coastal zones. *International Congress on Environmental Modelling and Software Modelling for Environmental Sake, Fifth Biennial Meeting, Ottawa, Canada.*
- Viavattene, C., Jiménez, J. A., Ferreira, O., Priest, S., Owen, D., & McCall, R. (2017). Selecting coastal hotspots to storm impacts at the regional scale: a Coastal Risk Assessment Framework. *Coastal Engineering*.
- Warrick, R.A., (2009). Using SimCLIM for modelling the impacts of climate extremes in a changing climate: a preliminary case study of household water harvesting in Southeast Queensland. 18th World IMACS/MODSIM Congress, Cairns, Australia 13–17, July 2009.
- Zanuttigh, B., Simcic, D., Bagli, S., Bozzeda, F., Pietrantoni, L., Zagonari, F., ... & Nicholls, R. J. (2014). THESEUS decision support system for coastal risk management. *Coastal Engineering*, 87, 218-239.