

ROL – Etude complémentaire sur l'impact des tempêtes sur le littoral de la plaine Orientale de Corse – Cartographie de la submersion marine, de la sensibilité à l'érosion côtière et des enjeux exposés

Rapport final

BRGM/RP-59724-FR
Septembre 2011

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2010 PSP08CSC07

Y. Balouin, R. Bélon, E. Delvallée, M. Lamy et G. Bodéré

Vérificateur :

Nom : Déborah Idier



Approbateur :

Nom : Nicolas Frissant

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots clés : érosion côtière, submersion marine, plaine orientale, littoral de Corse, modélisation

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Balouin, Y., Belon, R., Delvallée, E., Lamy, M. et Bodéré, G., 2011. ROL : Etude complémentaire sur l'impact des tempêtes sur le littoral de la Plaine Orientale de Corse. Cartographie de la submersion marine, de la sensibilité à l'érosion côtière et de l'exposition des enjeux. RP-59724-FR, 39p + volume cartographique

Synthèse

Les tempêtes sont parmi les aléas météorologiques les plus dévastateurs, causes de pertes importantes en biens matériels et vies humaines. Leurs impacts sur les zones littorales participent à l'augmentation des risques liés à la mer. La Plaine Orientale de Corse est un cordon littoral sableux particulièrement exposé aux phénomènes de tempêtes. Une étude pluriannuelle à l'échelle globale de la Plaine Orientale de Corse a été engagée par le BRGM en partenariat avec l'Office de l'Environnement de la Corse avec la participation financière de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse pour estimer l'exposition de la plaine aux risques côtiers liés aux tempêtes.

Lors de la première année de l'étude, une analyse des événements historiques a été réalisée, ainsi qu'un levé topo-bathymétrique à haute résolution par technique Lidar (Stépanian *et al.*, 2010). Ce rapport présente les résultats de l'année 2 de la première phase de cette étude qui concerne l'évaluation et la cartographie de la submersion marine et de la sensibilité à l'érosion côtière lors des événements de tempêtes. Cette phase consistait dans un premier temps à simuler l'hydrodynamique des événements majeurs afin de reconstituer les éléments de forçages. La validation des résultats par comparaison avec les mesures *in situ* de niveaux d'eau est présentée et les caractéristiques hydrodynamiques des tempêtes sont restituées sous forme d'un atlas hydrodynamique (en volume 2 de ce rapport). Une approche semi-empirique a par la suite été utilisée pour estimer les niveaux d'eau statiques atteints lors des tempêtes et la hauteur d'eau sur le littoral. L'analyse est réalisée pour des événements historiques (1979 et 2008) d'ordre cinquantenal, et pour une tempête fictive ayant une période de retour des vagues de l'ordre centennal. Des cartographies au 1/25 000^{ème} sont présentée dans le volume 2 de ce rapport. Un indicateur de sensibilité du littoral à l'érosion côtière lors des tempêtes a été défini, prenant en compte le régime d'impact des tempêtes et la morphologie locale. Enfin, un croisement de ces cartographies avec la présence d'enjeux sur le littoral est présenté, à l'échelle régionale pour évaluer les zones où l'exposition des enjeux est forte lors des événements extrêmes.

Cette approche régionale a permis d'identifier les secteurs les plus impactés par les processus en jeu au cours des tempêtes. Deux secteurs sont majoritairement impactés par les tempêtes marines. Il s'agit du lido de la Marana et du littoral de Ghisonaccia. Toutefois, afin de bien définir l'extension des zones touchées à l'échelle locale, la méthodologie reste à affiner, notamment par l'utilisation de modèles numériques plus complexes, validés, qui permettront de mieux prendre en compte les effets locaux de la morphologie sur la dynamique côtière lors de ces événements extrêmes.

Sommaire

1. Introduction	9
1.1. CONTEXTE.....	9
1.2. OBJECTIFS DE L'ETUDE	9
2. Méthodologie.....	12
2.1. CHOIX DES SCENARIOS POUR LA MODELISATION.....	12
2.1.1. Tempête du 22 décembre 1979.....	12
2.1.2. Tempête du 27 et 28 novembre 2008.....	14
2.1.3. Evènement extrême théorique	15
2.2. SUBMERSION : SENSIBILITE ET CARTOGRAPHIE	16
2.2.1. Processus physiques	16
2.2.2. Modélisation des vagues et des niveaux d'eau.....	18
Modélisation des niveaux d'eau (marée et surcote).....	18
Modélisation des vagues	20
2.2.3. Les élévations locales liées au déferlement et au jet de rive : le set-up et le run-up.....	20
2.2.4. Cartographie de la submersion	22
2.3. EVALUATION DE LA SENSIBILITE A L'EROSION COTIERE LORS DES TEMPETES.....	23
2.4. EXPOSITION DES ENJEUX AUX EVENEMENTS DE REFERENCE	26
3. Résultats.....	27
3.1. SIMULATION DE L'HYDRODYNAMIQUE LORS DES EVENEMENTS DE REFERENCE	27
3.1.1. Surcote atmosphérique et marée : validation.....	27
3.1.2. Niveaux d'eau et des conditions de vagues lors des évènements de référence.....	29
Tempête du 22 décembre 1979.....	29
Tempête du 28 novembre 2008.....	31
Evènement extrême	32

3.2. NIVEAUX MAXIMAUX ATTEINTS LORS DES EVENEMENTS DE REFERENCE	35
3.2.1. Evènement cinquantennal (exemple de 1979).....	35
3.2.2. Evènement extrême (tempête fictive)	35
3.3. SENSIBILITE A L'EROSION COTIERE.....	36
3.3.1. Evènement cinquantennal (exemple de 1979).....	36
3.3.2. Evènement extrême (tempête fictive)	36
3.4. EXPOSITION DES ENJEUX AUX EVENEMENTS EXTREMES	37
3.4.1. Evènement cinquantennal	37
3.4.2. Evènement extrême	38
4. Conclusion.....	39
5. Bibliographie	42

Liste des illustrations

Illustration 1 : Implantation de la bouée virtuelle PO2 au large de la Plaine Orientale de Corse (fond GoogleEarth). Source : Stepanian et al (2011).	13
Illustration 2 - Evolution des conditions d'agitation au large lors de la tempête du 21 au 24 décembre 1979 (simulations au point PO2 au centre de la plaine orientale (cf. Illustration 1 ; Stépanian et al, 2010)). a) H_s : Hauteur significative de la houle (m) ; b) T_{m0} : Période moyenne de la houle (s) ; c) Dir : Direction de provenance de la houle (°).....	14
Illustration 3 - Evolution des conditions d'agitation au large du 27 au 30 novembre 2008 (simulations au point PO2). a) H_s : Hauteur significative de la houle (m) ; b) T_{m0} : Période moyenne de la houle (s) ; c) Dir : Direction de provenance de la houle (°).	15
Illustration 4 - Valeurs de hauteurs significatives (H_s) et intervalles de confiance (IC) associés pour différentes périodes de retour pour les houles du secteur S-SE.	16
Illustration 5 : Processus physiques en action lors d'une tempête : agitation et surélévation du plan d'eau.....	17
Illustration 6 – Chainage des modèles pour le calcul des caractéristiques des évènements de référence (vagues et niveau d'eau induit par les surcotes et marée).....	18
Illustration 7 – Emprise des deux rangs utilisés pour calculer les niveaux d'eau à l'aide du modèle MARS.....	19
Illustration 8 – Utilisation du levé Lidar pour le calcul des variables morphologiques : a) extrait du modèle numérique de terrain ; b) discrétisation du littoral tous les 50 m et ; c) variables morphologiques calculées.....	21
Illustration 9 – Méthodologie de cartographie de la submersion marine (zone inondée et hauteur d'eau).....	23
Illustration 10 – Régimes d'impacts des tempêtes définies par Sallenger, 2000.....	24

Illustration 11 - Comparaison entre les niveaux d'eau calculés et mesurés à Ajaccio du 25/11/2008 au 21/12/2008.	27
Illustration 12 – Comparaison entre les niveaux d'eau calculés et mesurés à Livorno du 25/11/2008 au 21/12/2008.	27
Illustration 13 – Comparaison entre les niveaux d'eau calculés et mesurés à Citavecchia du 25/11/2008 au 21/12/2008.	28
Illustration 14 - Comparaison entre les niveaux d'eau calculés et mesurés à Napoli du 25/11/2008 au 21/12/2008.	28
Illustration 15 - Comparaison entre les niveaux d'eau calculés et mesurés à Palermo du 25/11/2008 au 21/12/2008.	28
Illustration 16 - Comparaison des niveaux d'eau prédits par le modèle MARS en différents points de la plaine orientale lors de la tempête de 1979.	29
Illustration 17 – Caractéristiques de la houle au large de la Plaine Orientale.	29
Illustration 18 – Cartes des pressions et vitesse du vent au paroxysme de la tempête.	30
Illustration 19 – Niveaux d'eau en mètres NGF (extraction au point PO2) durant la tempête de décembre 1979.	31
Illustration 20 – Caractéristiques de la houle au large de la Plaine Orientale.	31
Illustration 21 – Cartes des pressions et vitesse du vent au paroxysme de la tempête.	32
Illustration 22 - Niveaux d'eau en mètres NGF durant la tempête de novembre 2008 (extraction au point PO2).	32
Illustration 23 – Surfaces inondées pour chaque catégorie d'enjeu lors d'une tempête cinquantennale.	37
Illustration 24 - Surfaces inondées pour chaque catégorie d'enjeu lors d'une tempête centennale.	38
Illustration 25 – Cartographie de la submersion marine (hauteur d'eau) et de la sensibilité à l'érosion pour un événement d'ordre centennal sur la plaine orientale de Corse.	40

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

Cette étude, est réalisée par le BRGM dans le cadre d'un partenariat avec l'Office de l'Environnement de la Corse et l'Agence de l'Eau Rhône, Méditerranée et Corse, vise à améliorer l'état des connaissances sur les aléas côtiers associés aux phénomènes de tempête : la submersion marine et l'érosion (recul du trait de côte).

La submersion marine est définie comme une inondation temporaire de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques et marégraphiques sévères (MEEDAT, 1997). Les submersions envahissent généralement les terrains situés en dessous du niveau des plus hautes mers mais atteignent aussi parfois des altitudes supérieures si des projections d'eaux marines franchissent des ouvrages de protection et/ou la crête des cordons littoraux. Elles peuvent se produire lorsqu'il y a :

- rupture d'un cordon sédimentaire (plage, dunes, cordon de galets) suite à une forte érosion ;
- débordement ou rupture de digues et d'ouvrages de protection ;
- franchissements exceptionnels de ces ouvrages par des « paquets de mer ».

Les franchissements des ouvrages par les paquets de mer peuvent s'accompagner sur les plages à galets de projections de volumes très importants de galets ayant un fort impact destructif.

Le recul du trait de côte est le déplacement vers l'intérieur des terres de la limite entre le domaine marin et le domaine continental (MEEDAT, 1997). C'est la conséquence d'une perte de matériaux sous l'effet de l'érosion marine, combinée parfois à des actions continentales (barrages, prélèvements de sédiments, ...). Elle englobe à la fois l'érosion naturelle induite par les forces marines et l'érosion générée ou accélérée par l'homme (surfréquentation des cordons dunaires, extraction de matériaux, ouvrages côtiers...).

Sur les littoraux sableux, lors de tempêtes, la surcote globale du niveau du plan d'eau entraîne la surélévation du niveau d'impact des vagues déferlantes. Leur action érosive est alors à l'origine de la création de falaises dans le cordon dunaire, voire de brèches sur des secteurs déjà fragilisés, et de sape des fondations d'ouvrages côtiers (digues longitudinales, enrochements, etc...).

1.2. OBJECTIFS DE L'ETUDE

La Plaine Orientale de Corse est un cordon littoral sableux particulièrement exposé aux phénomènes de tempêtes qui affectent l'ensemble de la côte est de la Corse. C'est une plaine alluviale basse parcourue par un réseau de fleuves côtiers et d'étangs lagunaires

et protégée du domaine marin par un complexe dunaire de faible amplitude. Son attrait touristique en a fait une zone où les constructions se développent fortement depuis une trentaine d'années à proximité de la mer. L'ensemble de ces éléments renforcent la vulnérabilité de ce secteur face aux phénomènes de tempêtes dont les conséquences, en termes d'érosion côtière et de submersion marine, sont à l'origine de nombreux et coûteux dommages.

Dans ce contexte, ce projet vise à mettre en place des méthodologies appropriées pour le suivi des événements météorologiques exceptionnels, permettant de caractériser l'impact en fonction des processus physiques mis en jeu, et de développer des outils d'estimation de la vulnérabilité du littoral corse à ces phénomènes.

Il apparaît en effet crucial d'acquérir de nouvelles connaissances, en particulier sur :

- la réponse morphologique des littoraux lors de ces événements exceptionnels ;
- la vulnérabilité du littoral corse et les effets des conditions locales (morphologie, géologie, sédimentologie, aménagements, ...) sur les processus physiques et les impacts ;
- les seuils hydrodynamiques à partir desquels les modifications du littoral deviennent irréversibles ;
- l'impact de la séquence temporelle des tempêtes sur l'évolution du littoral.

Dans ce but, le projet a pour objectifs principaux la cartographie de la sensibilité à l'érosion et de l'aléa submersion à l'échelle 1/25 000ème, et la cartographie de l'exposition des enjeux à ces aléas au 1/125 000ème. Pour atteindre ces objectifs, il sera :

- **d'évaluer l'aléa tempête** sur le littoral Est Corse et de définir des **indicateurs de suivis** de la réponse morpho-sédimentaire et de l'impact de ces phénomènes événementiels ;
- **d'appliquer des outils numériques de simulation des tempêtes et de leurs impacts** au littoral de la plaine orientale ;
- d'évaluer l'exposition des enjeux présents sur le littoral de la plaine orientale corse en établissant les cartographies de l'aléa tempêtes, des enjeux et de leurs expositions.

Lors de la première phase de l'étude (cf. Stépanian *et al.*, 2011), un état des connaissances sur les événements historiques et leurs impacts a été réalisé. Il a notamment permis de reconstituer, par simulation numérique, des chroniques des conditions météo-marines lors des 3 dernières décennies. Celles-ci ont permis d'évaluer l'ampleur des phénomènes qui touchent le littoral de la Plaine Orientale de Corse et d'estimer les périodes de retour de ces événements.

L'inventaire des événements historiques (Stépanian *et al.*, 2011) a permis de constater que les tempêtes ayant des conséquences importantes sur ce littoral et les infrastructures côtières sont relativement rares. En effet, 69 événements ont fait l'objet de publications de presse et ont été recensés depuis 1979. Parmi ceux-ci, les tempêtes

de décembre 1979 et de novembre 2008 sont considérées comme les événements les plus forts et les plus impactants et pour lesquels le plus d'information est disponible. La reconstitution par modélisation numérique des conditions hydrodynamiques sur les trois dernières décennies confirme l'importance de ces deux événements qui sont proches d'une période de retour de 50 ans.

La phase 1 a également consisté à acquérir des données topo-bathymétriques à haute résolution sur toute la frange littoral par un levé LIDAR aéroporté (cf. Stépanian *et al.*, 2010).

L'étude présentée dans ce rapport concerne l'analyse des impacts des tempêtes sur le littoral de la Plaine Orientale, en termes de submersion marine et d'érosion côtière. Elle vise à caractériser, à l'aide de simulations numériques et du levé topo-bathymétrique LIDAR à haute résolution, les phénomènes de submersion lors des événements extrêmes pouvant affecter le littoral de la plaine orientale de Corse, à déterminer la sensibilité du littoral à l'érosion côtière lors des tempêtes, et à évaluer l'exposition des enjeux présents sur cette plaine côtière. A la vue des incertitudes pesant sur l'estimation des périodes de retours centennales de la hauteur des vagues extrêmes, en raison de la durée de la série de données (30 ans), les événements de référence retenus pour cette étude sont ces deux tempêtes qui ont occasionné les plus gros dommages sur la côte Est de la Corse. Une tempête théorique considérée comme un événement d'occurrence centennale sera toutefois utilisée pour l'analyse des impacts des tempêtes les plus extrêmes.

Dans les chapitres suivants seront présentés successivement les méthodologies utilisées pour la simulation des événements dits de référence, l'évaluation de la submersion marine induite en termes d'extension de la zone inondée et de hauteur d'eau, les indicateurs d'érosion lors des événements, et l'exposition des enjeux. Les résultats cartographiques seront par la suite décrits, et présentés sous forme d'un atlas annexé à ce rapport.

2. Méthodologie

2.1. CHOIX DES SCENARIOS POUR LA MODELISATION

Cette phase 2 de l'étude intervient suite à une première étape qui a consisté à mettre en évidence les événements extrêmes survenus durant les 30 dernières années et qui ont eu un impact non négligeable sur le littoral de la plaine Orientale (Stepanian *et al.*, 2011).

IMPORTANT : Les périodes de retour des événements citées dans ce rapport correspondent aux périodes de retour des hauteurs de vagues.

Les résultats nous ont permis d'identifier 2 événements particulièrement impactant pour le linéaire côtier de cette partie de la côte Est de la Corse à savoir les tempêtes du 22 décembre 1979 ainsi que celle du 27 et 28 novembre 2008. Ces deux événements majeurs, d'occurrence estimée cinquantennale pour 1979 et légèrement inférieure à 50 ans pour 2008, sont utilisés ici comme événements de référence afin de valider qualitativement la méthodologie, qui sera par la suite appliquée à un événement théorique d'occurrence estimée centennale.

Les caractéristiques de ces trois événements de référence sont présentées ci-après. En raison des faibles impacts (en termes de submersion marine et d'érosion côtière) recensés pour des événements annuels et décennaux, ces périodes de retour ne sont pas traitées dans cette étude.

2.1.1. Tempête du 22 décembre 1979

La tempête de décembre 1979 a duré 3 jours, avec des conditions relativement énergétiques (hauteurs significatives modélisées supérieures à 2 m) pendant plus de 48 h. L'événement se caractérise par une phase de montant rapide de la hauteur significative de la houle qui atteint 7 m pour des périodes moyennes de 8 s (période de pic de 11 s) (cf. Illustration 1). La direction de provenance de la houle, de NE au début de l'événement passe rapidement à SE au pic de la tempête, et SSE sur le tombant de l'événement.

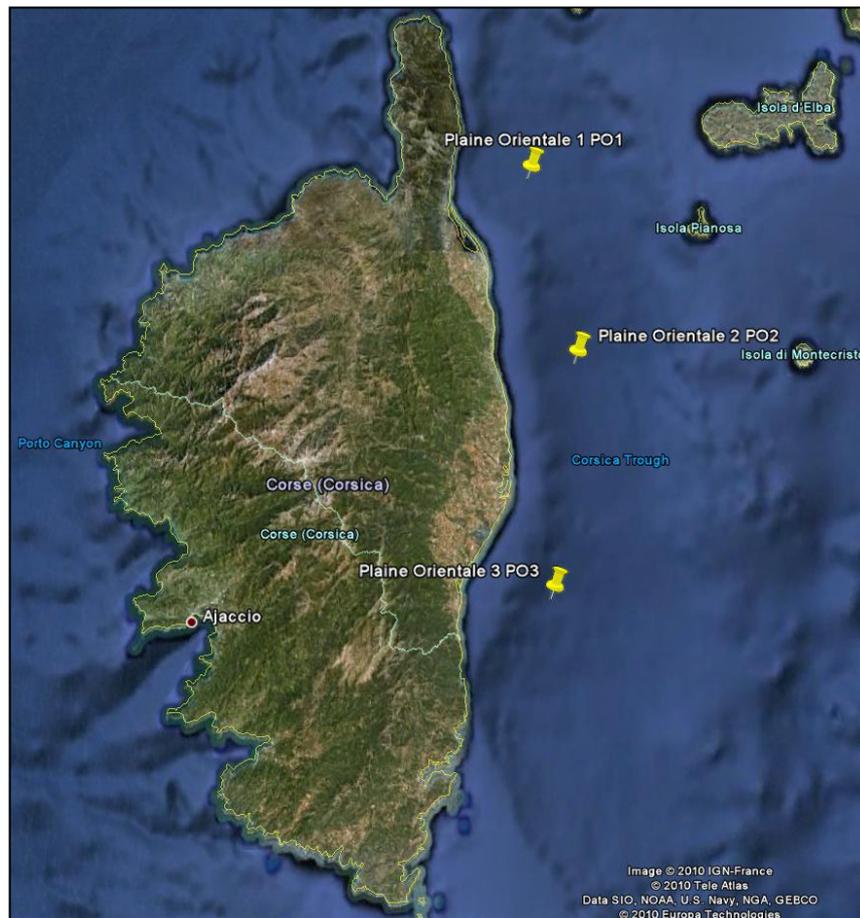


Illustration 1 : Implantation de la bouée virtuelle PO2 au large de la Plaine Orientale de Corse (fond GoogleEarth). Source : Stepanian et al (2011).

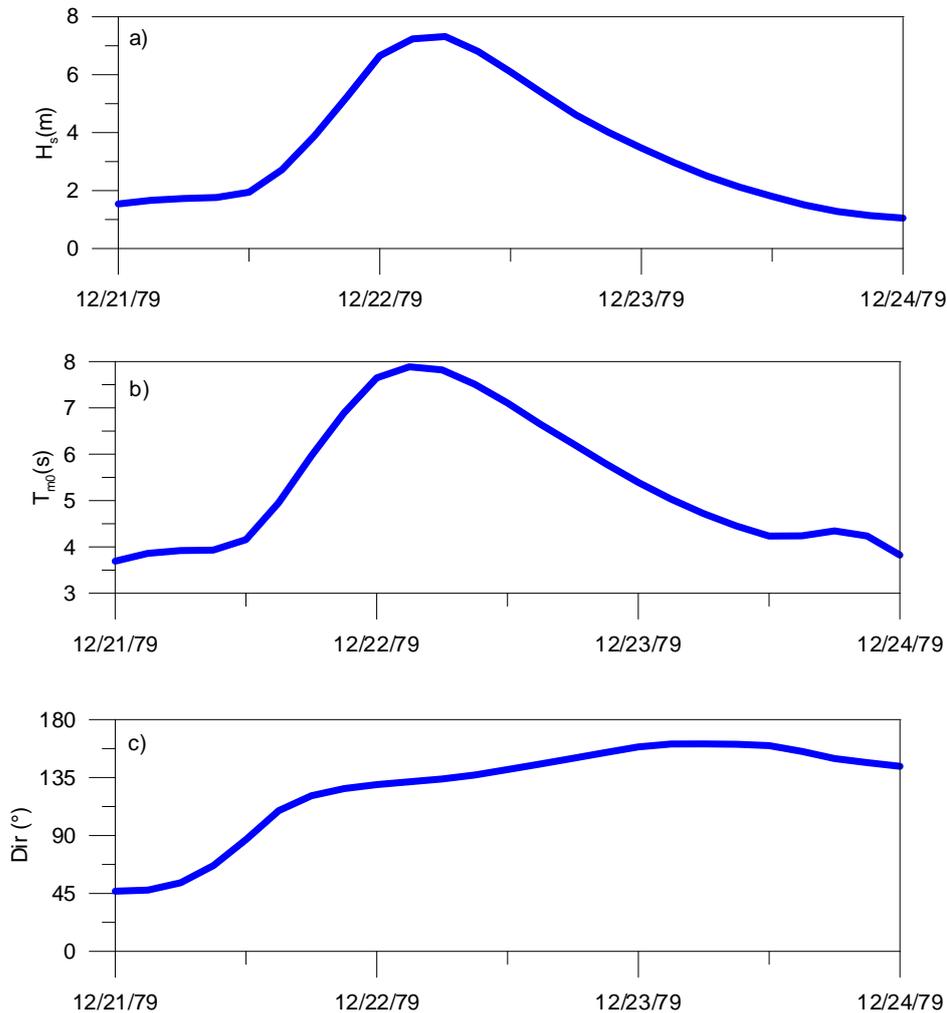


Illustration 2 - Evolution des conditions d'agitation au large lors de la tempête du 21 au 24 décembre 1979 (simulations au point PO2 au centre de la plaine orientale (cf. Illustration 1 ; Stéphanian et al, 2010)). a) H_s : Hauteur significative de la houle (m) ; b) T_{m0} : Période moyenne de la houle (s) ; c) Dir : Direction de provenance de la houle (°).

2.1.2. Tempête du 27 et 28 novembre 2008

La tempête de novembre 2008 a également duré 3 jours. Elle se caractérise par une première phase énergétique le 28 novembre, avec des hauteurs significatives simulées de vagues qui augmentent rapidement pour atteindre plus de 7 m dans la nuit du 27 au 28. Un deuxième pic de tempête est observé le 29 novembre, avec des hauteurs de vagues qui restent toutefois plus modérées (hauteurs significatives atteignant 4 m). Comme pour la tempête de 1979, les périodes moyennes de la houle restent modérées (7-8 s, période de pic à 11 s). La provenance des vagues sur le premier pic est d'ESE, et devient SE à SSE sur le second pic.

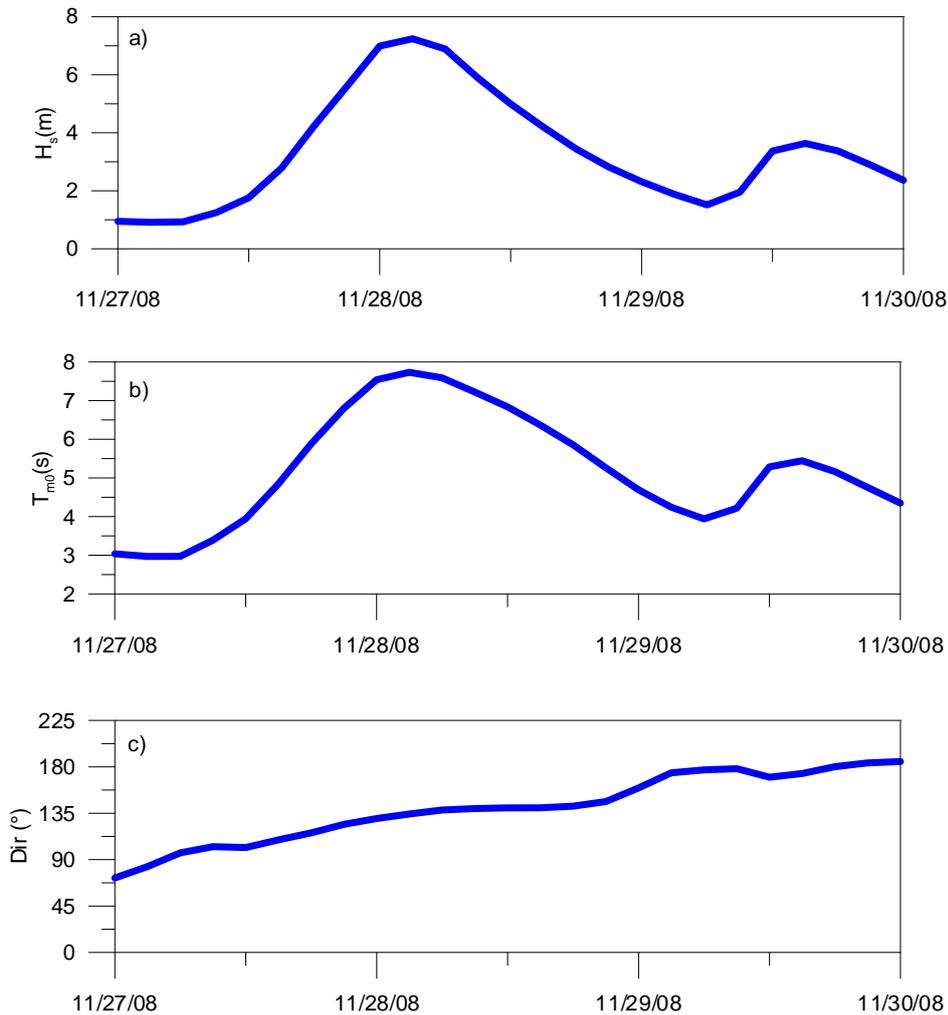


Illustration 3 - Evolution des conditions d'agitation au large du 27 au 30 novembre 2008 (simulations au point PO2). a) H_s : Hauteur significative de la houle (m) ; b) T_{mo} : Période moyenne de la houle (s) ; c) Dir : Direction de provenance de la houle (°).

2.1.3. Evènement extrême théorique

Afin d'évaluer les effets de tempêtes plus extrêmes, une analyse statistique a été faite sur les reconstitutions, par modélisation numérique (code SWAN, TU-Delft), des conditions hydrodynamiques des 3 dernières décennies (Stépanian *et al.*, 2011). Les événements les plus importants étant de secteur SE, c'est la période de retour centennale de ce secteur qui a été retenue. L'illustration 3 présente les périodes de retour obtenues pour le secteur SE.

En raison de la courte série temporelle utilisée pour les analyses statistiques, l'incertitude de ces résultats reste forte, en particulier pour la tempête centennale. Il a donc été choisi de majorer ces hauteurs de houle centennale en prenant en compte l'intervalle de confiance à 95 %, soit des hauteurs significatives de 10, 2 m.

Période de retour (ans)	Hs (m)	IC 68% (m)	IC 95% (m)
10	5,78	[5,38 ; 6,18]	[5,00 ; 6,57]
50	7,24	[6,37 ; 8,11]	[5,54 ; 8,94]
100	7,80	[6,59 ; 9,01]	[5,43 ; 10,17]

Illustration 4 - Valeurs de hauteurs significatives (Hs) et intervalles de confiance (IC) associés pour différentes périodes de retour pour les houles du secteur S-SE.

L'événement extrême théorique utilisé pour l'analyse de la submersion marine et de l'érosion est donc caractérisé par les conditions de houles de centennales de S-SE suivantes :

- Une hauteur significative de 10.2 m ;
- Une période de pic de 11 s ;
- Une direction au pic de 135° N soit SE.

2.2. SUBMERSION : SENSIBILITE ET CARTOGRAPHIE

2.2.1. Processus physiques

Les processus physiques mis en jeu lors des phénomènes de tempêtes sont liés principalement à l'action de la pression atmosphérique et du vent sur le plan d'eau (cf. Illustration 54) :

- la chute de la pression atmosphérique entraîne une surélévation du niveau du plan d'eau. C'est le phénomène de baromètre inverse. Une diminution de 1hPa équivaut approximativement à une élévation de 1 cm du plan d'eau ;
- le vent a un double effet sur le plan d'eau :
 - il est à l'origine de l'agitation du plan d'eau et de la formation des vagues dont les caractéristiques, hauteur, période, secteur de provenance, sont directement liées à celles du vent et au fetch¹ du bassin maritime ;
 - il exerce une contrainte à la surface de l'eau en générant une modification du niveau du plan d'eau statique (surcote ou décote) et des courants ;

¹ Fetch : distance en mer ou sur un plan d'eau au-dessus de laquelle souffle un vent donné sans rencontrer d'obstacle.

- les vagues, générées au large par le vent, se propagent vers la côte et déferlent. Elles transfèrent alors leur énergie sur la colonne d'eau, ce qui provoque une surélévation moyenne du niveau de la mer (le « *wave set-up* », ou *set-up*, ou surcote liée aux vagues) pouvant s'élever à plusieurs dizaines de centimètres ;
- la marée qui reste faible mais avec un marnage pouvant atteindre 0.4 m lors de grandes vives-eaux. En raison de ce faible marnage, l'influence directe de la marée reste limitée. Toutefois, en période de tempête, cette élévation se cumule à la surcote de tempête, favorisant la pénétration des eaux marines. Les courants de marée sont faibles, et considérés comme négligeables sur le littoral.

Le phénomène de « surcote atmosphérique » ou « surcote de tempête » est l'addition de l'effet baromètre inverse et de l'élévation du niveau du plan d'eau sous l'effet du vent. Ainsi, lors d'une tempête, le niveau moyen de la mer résulte de l'addition de la surcote atmosphérique et du *set-up*. Le niveau maximal atteint par la mer est défini en tenant compte du « jet-de-rive » (*swash*). On appelle *run-up*, l'altitude maximale atteinte par le jet-de-rive sur la côte.

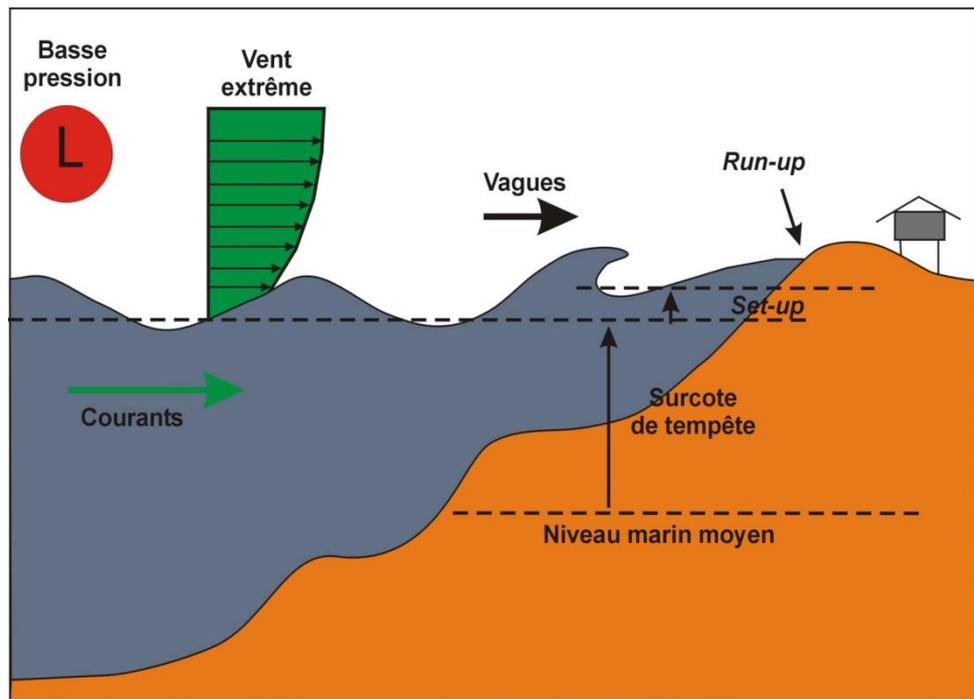


Illustration 5 : Processus physiques en action lors d'une tempête : agitation et surélévation du plan d'eau.

2.2.2. Modélisation des vagues et des niveaux d'eau

La connaissance des niveaux d'eau extrêmes atteints lors d'évènements de référence étant indispensable pour atteindre les objectifs de cette étude, ces différents processus doivent être modélisés pour ces événements de référence retenus. Pour cela, plusieurs modèles ou données issues des modèles sont utilisés (cf. Illustration 5) :

- les sorties du modèle atmosphérique qui donne les vents et champs de pression (ré-analyse CFSR de la NOAA) ;
- le modèle SWAN (Tu-Delft ; Booij *et al.*, 1999) qui génère et propage les vagues à partir des vents ;
- le modèle MARS (Ifremer ; Lazure et Dumas, 2007) qui permet de générer les variations spatio-temporelles du plan d'eau à partir des champs de vent et pression, ainsi que des conditions de marée.

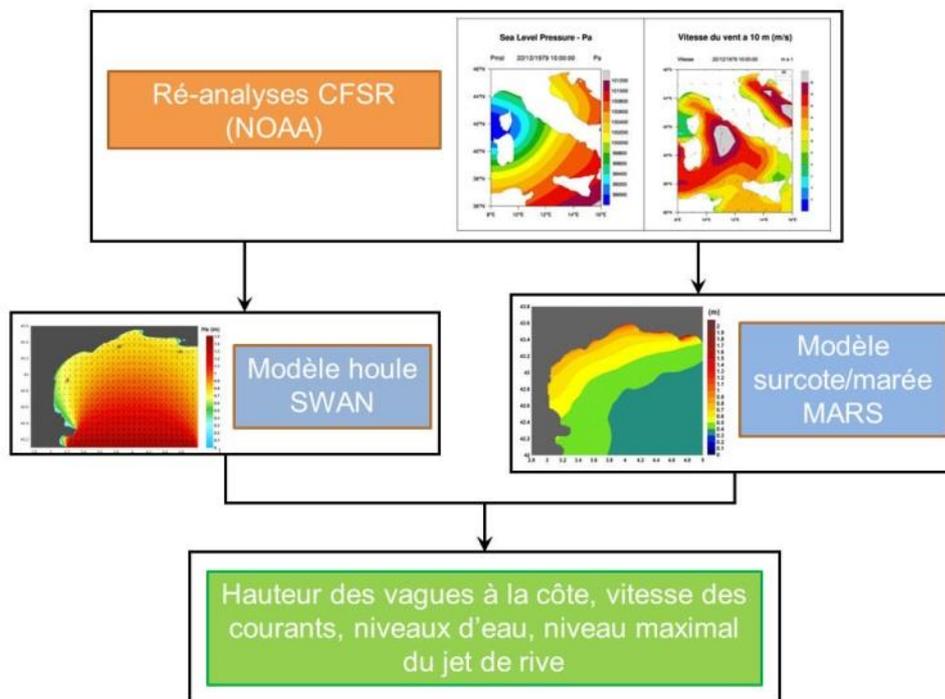


Illustration 6 – Chainage des modèles pour le calcul des caractéristiques des événements de référence (vagues et niveau d'eau induit par les surcotes et marée).

Modélisation des niveaux d'eau (marée et surcote)

Afin d'évaluer la surcote atmosphérique sur la Plaine Orientale Corse, le modèle hydrodynamique MARS, qui a été développé par l'Ifremer, est utilisé.

Les données bathymétriques utilisées proviennent de la bathymétrie LIMA (2004) pour le plateau continental et du lidar 2010 pour la zone plus côtière.

Un système d'emboîtement, permettant d'aller d'une échelle large (rang 0 avec une maille de 0.2°) vers une échelle plus fine (rang 1 avec une maille de 0.02°), a été mis en place autour de la Corse afin d'estimer les niveaux d'eau associés à chacun des évènements, et de prendre en compte les effets des vents locaux et pression sur les variations du plan d'eau (cf. Illustration 6). L'influence du bassin méditerranéen sur la dynamique des surcotes est considérée comme négligeable. On vérifiera que cette hypothèse est acceptable en comparant les résultats obtenus avec les niveaux mesurés en plusieurs points du bassin.

Les conditions météorologiques comprenant les champs de vent et de pression sont issues de la base de données CFSR qui est une ré-analyse du modèle de prévision NCEP par de l'assimilation de données satellitales. Ces données sont ainsi intégrées dans le modèle MARS et nous permettent d'estimer les valeurs de surcote atmosphérique.

Pour prendre en compte la marée, il convient d'imposer sur les frontières du domaine R0 des conditions de niveaux d'eau intégrant la marée. Ces niveaux de marée sont issus de la base de données FES2004 (Lyard *et al*, 2006), développée, implémentée et validée par le LEGOS (Laboratoire d'Etude en Géophysique et Océanographie Spatiale, Toulouse) et CLS (Collecte Localisation Satellites).

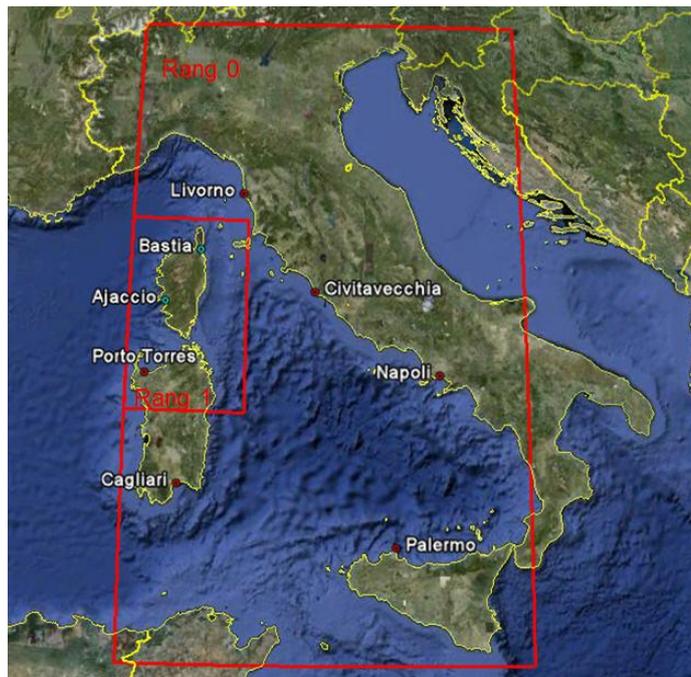


Illustration 7 – Emprise des deux rangs utilisés pour calculer les niveaux d'eau à l'aide du modèle MARS.

Modélisation des vagues

Le modèle SWAN permet de générer les champs de houle par simulation du frottement du vent sur la surface de l'eau. Les vagues sont propagées à la côte en simulant leur interaction avec la bathymétrie. On obtient alors, sur la frange littorale plusieurs paramètres hydrodynamiques qui caractérisent l'action des vagues sur le littoral :

- la hauteur significative ;
- la hauteur du set-up (élévation locale stationnaire du plan d'eau liée au déferlement) ;
- la force sur le fond induite par la vitesse orbitale de la houle ;
- la vitesse des courants induits par la houle (vitesses orbitales).

Ce modèle de vague a été mis en place dans la phase 1 du projet. Tout comme pour MARS, deux emboitements (R1 et R2) ont été mis en place (Stépanian *et al*, 2011). Les tailles de mailles sont respectivement de 8 km et 50 m.

Les résultats issus de ces modélisations sont présentés en Volume 2 sous forme d'un atlas hydrodynamique.

2.2.3. Les élévations locales liées au déferlement et au jet de rive : le set-up et le run-up

Le phénomène de set-up est une surélévation du niveau de la mer due au déferlement des vagues. Cette surélévation est localisée entre le point de déferlement et la côte et peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres. La surface concernée va alors s'étendre sur la partie maritime comprise entre la zone de déferlement et la ligne d'eau, la valeur maximale se situant proche de la ligne d'eau.

Le run-up est défini comme étant le niveau maximum atteint par les vagues lorsqu'elles déferlent sur la plage dans la zone du jet de rive et qui peut atteindre quelques mètres.

Les processus en jeu dans la zone de jet de rive sont particulièrement complexes, et la modélisation physique de ces phénomènes ne peut pas, à l'heure actuelle, être réalisée à des échelles régionales. Les études ayant abordé la physique de la zone de jet de rive s'appliquent sur des zones d'étude allant de quelques centaines de m à quelques km, avec des moyens et des temps de calculs considérables.

Plusieurs auteurs ont toutefois développé des méthodes semi-empiriques permettant de relier les hauteurs de run-up et de set-up aux conditions météo-marines au large. C'est le cas de Stockdon *et al*. (2006), qui ont pu obtenir de bons résultats en comparant leur prévision du run-up à l'aide de données au large avec des observations vidéo de ces niveaux sur la plage. Ils ont ainsi obtenus la relation suivante :

$$R_{max} = Setup + Runup = 1.1 \left(0.35\beta_f(H_0L_0)^{1/2} + \frac{[H_0L_0(0.563\beta_f^2 + 0.004)]^{1/2}}{2} \right)$$

Avec :

L_0 : la longueur d'onde de la houle au large définie comme étant une fonction de la période de la houle $L_0 = \frac{gT_0^2}{2\pi}$

T_0 : la période de la houle (constante quelle que soit la profondeur)

H_0 : la hauteur significative de la houle au large

β_f : paramètre de pente

Cette formule de Stockdon et al a été validée par des observations de terrain dans des environnements où la houle est plus ou moins normale à la côte et pour des valeurs de hauteur de vagues moyennes au large comprises entre 0.4 et 4 m (Stockdon et al, 2006).

Grâce à la haute résolution des données topo-bathymétriques LIDAR de 2010, on peut extraire les données morphologiques nécessaires à l'application du modèle de Stockdon et al. (2006) et calculer les niveaux d'eau atteints.



Illustration 8 – Utilisation du levé Lidar pour le calcul des variables morphologiques : a) extrait du modèle numérique de terrain ; b) discrétisation du littoral tous les 50 m et ; c) variables morphologiques calculées.

La discrétisation du littoral en profils espacés de 50 m est réalisé à l'aide du logiciel DSAS (Digital Shoreline Analysis System) développé par l'USGS (US Geological Survey), et qui fonctionne avec ArcGIS (© 2009 ESRI). Ce logiciel, conçu pour déterminer le recul du trait de côte entre deux ou plusieurs dates distinctes permet de concevoir les profils perpendiculaires au trait de côte et de calculer la distance comprise entre deux courbes de niveaux afin de déterminer une pente.

Les pentes utilisées pour le calcul des niveaux d'eau sont la pente de l'avant-côte et la pente de la plage active. A partir de l'analyse de plusieurs profils topo-bathymétriques le long de la Plaine Orientale, les courbes de niveaux choisies pour représenter le mieux les morphologies sont :

- de 0 à -7.5 m NGF pour l'avant-côte ;
- de 0 à + 1.3 m NGF pour la plage active (portion de la plage sur laquelle s'effectue le jet de rive d'après Stockdon et al, 2006).

Afin de prendre en compte les variabilités locales des effets des houles de tempêtes, les hauteurs de niveaux statiques (set-up) et temporaires (run-up) sont calculées tous les 50 m (cf. Illustration 7).

Les paramètres de houle nécessaires à l'application du modèle de Stockdon *et al.* (2006) sont issus des simulations avec le modèle SWAN.

2.2.4. Cartographie de la submersion

Les résultats issus des différents modèles permettent de caractériser les niveaux d'eau atteints pendant la tempête. On distingue :

- le niveau statique, c'est-à-dire atteint pendant tout le pic de tempête ;
- le niveau permanent maximal, qui est atteint suite au déferlement d'une vague, pendant quelques secondes.

Le niveau statique prend en compte l'élévation due à la marée, la surcote atmosphérique et l'élévation due au déferlement ou set-up (formule de Stockdon *et al.* 2006). Le niveau maximal prend en compte ces phénomènes, mais également la hauteur du jet de rive sur la plage, le run-up.

Ces deux niveaux, calculés tous les 50 m sont extrapolés afin d'obtenir des couches SIG de niveaux d'eau statique et maximal (Cf. Illustration 8). En croisant ces informations avec la topographie à très haute résolution du lidar, on obtient alors d'une part, les limites de la zone inondée (altimétrie inférieure au niveau d'eau atteint), et d'autre part, la hauteur d'eau présente dans cette zone (différence entre l'altimétrie et le niveau d'eau atteint).

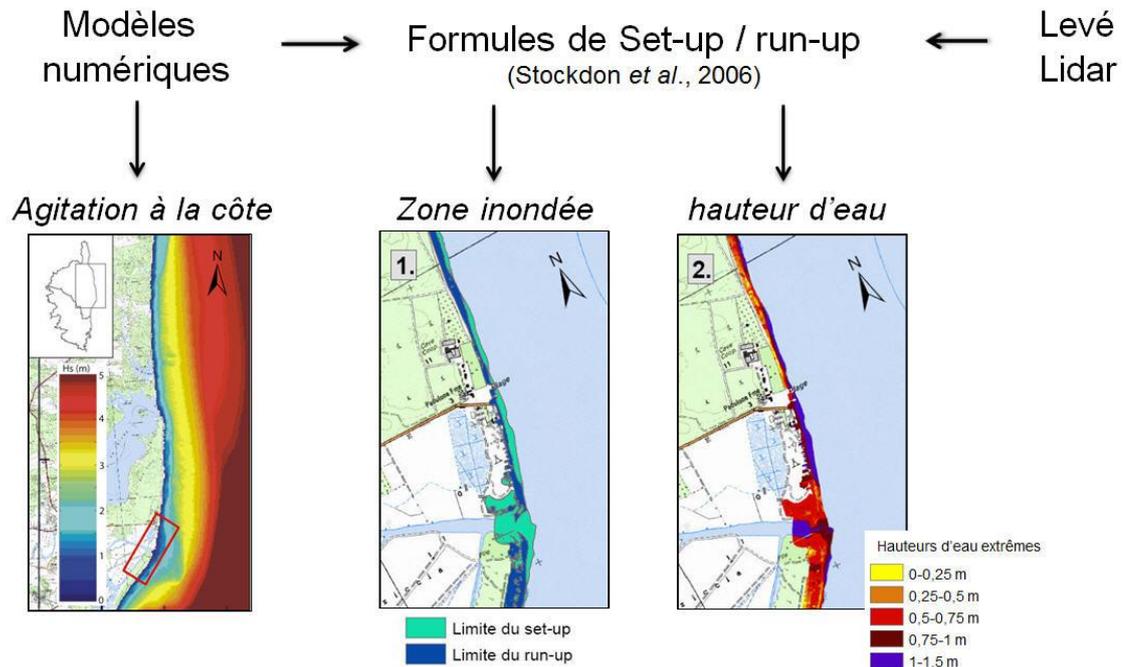


Illustration 9 – Méthodologie de cartographie de la submersion marine (zone inondée et hauteur d'eau).

La méthodologie de calcul présente des incertitudes. En effet, le jet de rive est calculé sur une pente constante qui ne prend ni en compte une modification possible de la pente du haut de plage, ni la présence d'obstacle (murets, trottoirs) qui pourraient faire obstacle à sa propagation et qui ne sont pas toujours bien caractérisés sur le modèle numérique de terrain (en raison de leur faible dimension). Une phase de vérification de la cartographie obtenue est donc nécessaire pour s'assurer que les limites atteintes par le jet de rive sont réalistes.

Pour se faire, La morphologie locale est examinée à l'aide de photographie aérienne, photographies de terrain, mesures de terrain, afin d'identifier tout obstacle en haut de plage susceptible de stopper la propagation de la vague.

Par ailleurs, le croisement du niveau d'eau statique avec le MNT peut induire des incertitudes dans les zones basses, en particulier autour des étangs. L'hypothèse est faite que la surélévation du niveau statique se propage dans les étangs par les graus, inondant leurs rives, ce qui est partiellement exact mais mériterait une simulation plus précise de la propagation dans les lagunes.

2.3. EVALUATION DE LA SENSIBILITE A L'EROSION COTIERE LORS DES TEMPETES

Le recul du trait de côte lors des événements de tempêtes peut être important et contribue fortement à l'ampleur des impacts et dommages observés.

La connaissance sur le recul associé à un événement reste, à ce jour, incomplète. Si les levés de terrain et la connaissance d'un site permettent d'estimer les reculs possibles en fonction de l'intensité d'une tempête, les modèles numériques sont quant à eux encore insatisfaisants. Certains d'entre eux permettent de simuler correctement le recul du trait de côte, l'érosion d'un front dunaire, un franchissement (Roelvink *et al.*, 2009), mais ils peinent aujourd'hui à reproduire la reconstruction partielle de la plage qui est observée en fin de tempête ou dans les jours qui suivent. Par ailleurs, l'impact d'un événement, quel que soit son ampleur, sur l'évolution à moyen ou long terme du littoral reste méconnue. Certains événements laissent des cicatrices profondes qui vont rester visibles plusieurs années, plusieurs décennies, alors que dans d'autres cas, la période estivale suivante suffit à lisser les impacts en reconstruisant un profil de plage estival en engraissement.

Des méthodologies existent toutefois pour évaluer la sensibilité d'un littoral face aux événements extrêmes. Certains modèles, notamment celui de Sallenger (2000), modifié par Stockdon *et al.* (2007), permettent de définir des régimes d'impacts différents en fonction de la hauteur maximale atteinte par le niveau d'eau lors de la tempête (Cf. Illustration 9).

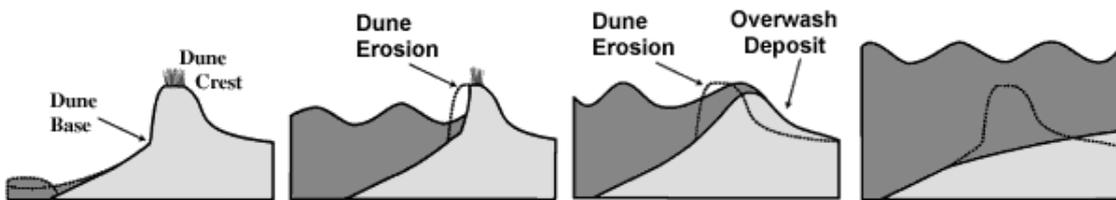


Illustration 10 – Régimes d'impacts des tempêtes définies par Sallenger, 2000.

Grâce à ce modèle, quatre degrés d'impacts, nommés S, peuvent être déterminés :

- Le régime de Swash : Ce régime est caractéristique de faibles tempêtes. En effet, dans ce cas, le niveau d'eau induit par la tempête reste inférieur à la hauteur du pied de dune. De ce fait, on peut alors observer une faible érosion de la plage. Toutefois, pendant les mois suivants la tempête, la faible quantité de sables érodés retournera de façon naturelle vers la plage ;
- Le régime de Collision : Dans ce cas, le niveau d'eau induit par la tempête dépasse le pied de dune mais reste inférieur à son sommet. Les vagues entrent donc en collision avec les dunes et provoquent leur érosion ainsi qu'un éventuel recul du trait de côte;
- Les régimes de submersion : Les cordons dunaires peuvent être submergés de façon plus ou moins permanente lors de certains épisodes de tempête lorsque le niveau d'eau induit est important. On distingue alors deux types de submersion.
 - Le régime d'Overwash (submersion temporaire): Dans cette situation, la hauteur d'eau atteinte est supérieure au sommet de la dune et l'ensemble du cordon dunaire est submergé momentanément. Cette submersion provoque ainsi un

déplacement de sable depuis le large vers l'intérieur des terres. Ce phénomène, appelé « *roll-over* » contribue à la migration globale de la dune vers l'intérieur des terres, en particulier lorsqu'il est précédé d'une phase d'érosion intense du cordon dunaire par les vagues.

- Le régime d'Inondation (submersion permanente): Ce phénomène se produit lorsque le niveau statique de la mer (*Set-up* des vagues compris) dépasse la crête de dune. Dans cette hypothèse, l'ensemble du cordon littoral ainsi que les terrains arrière littoraux sont submergés et inondés pendant l'intégralité de la tempête entraînant un transport de sable vers l'intérieur des terres.

Ce modèle permet donc de définir des degrés variables d'érosion en fonction du niveau d'eau obtenu qui peuvent être calculés pour l'ensemble des profils extraits tous les 50 m. Une note de 1 à 4 est ainsi affectée à l'indicateur S sur le profil : 1 traduisant le régime de jet de rive (peu d'impacts érosifs) ; 4 traduisant le régime d'inondation avec une forte érosion de la plage, de la dune et un recul important du trait de côte. Toutefois, cette méthodologie, basée en grande partie sur les niveaux d'eau atteint ne prend pas en considération la vulnérabilité préexistante de la plage. En effet, à tempête équivalente, sur un littoral fortement en érosion, le régime de swash sera inexistant, alors que sur une plage large et engraisée, l'atténuation de la houle sur la plage émergée va diminuer la propagation du jet de rive, et diminuer la probabilité et franchissement, voire d'attaque du front dunaire.

Pour prendre en compte cette vulnérabilité préexistante d'un site, un indicateur L, basé sur la largeur de la plage a été défini :

- pour les plages très larges (> 40 m) possédant des bermes bien formées, l'atténuation de la houle va diminuer les impacts érosifs, L est égal à 1 ;
- pour les plages relativement larges (20-40), on affecte à L la valeur 2 ;
- pour les plages étroites (10-20 m), on affecte à L la valeur 3 ;
- pour des plages très étroites (<10 m), la probabilité d'attaque du front dunaire est forte, et on affecte à L la valeur 4.

L'indicateur de sensibilité à l'érosion lors des tempêtes est ensuite défini par :

$$SE = S + L$$

Où SE est l'indicateur de sensibilité à l'érosion lors des tempêtes, S est l'indicateur traduisant les régimes d'impacts de Sallenger (2000) ; L est l'indicateur basé sur la largeur de plage qui traduit la vulnérabilité préexistante du site. L'indicateur de sensibilité à l'érosion traduit le caractère réversible ou irréversible de l'impact généré par l'évènement de tempête. Plus la valeur de SE est grande, plus on a de chances d'observer des modifications irréversibles du littoral (destruction partielle ou totale de la dune).

2.4. EXPOSITION DES ENJEUX AUX EVENEMENTS DE REFERENCE

Cette étude à échelle régionale a pour objectif de déterminer les secteurs les plus exposés aux événements de tempêtes. Pour ce faire, les principaux enjeux présents sur le littoral de la Plaine Orientale ont été croisés, dans un système d'information géographique, avec les résultats obtenus pour les événements considérés comme cinquantennaux et centennaux.

Les enjeux utilisés proviennent de la base Corine Land Cover (SOES Service de l'Observation et des Statistiques du commissariat général au développement durable, 2006), et les différentes classes ont été agrégées pour représenter :

- les zones urbaines : tissu urbain discontinu, zones industrielles et commerciales, aéroports ;
- les zones de loisirs : équipements sportifs et de loisirs ;
- les terres agricoles : terres arables hors périmètre irrigation, vignobles, vergers et petits fruits, systèmes culturaux et parcellaires complexes, surfaces essentielles agricoles interrompues ;
- les milieux semi-naturels : forêt de feuillus, forêt de conifères, végétation sclérophyle, forêt et végétation arbustive.

Le croisement de ces enjeux avec les zones impactées lors des événements de références est représenté sous forme de cartographies régionales, et sous forme de synthèse statistique des surfaces impactées.

3. Résultats

3.1. SIMULATION DE L'HYDRODYNAMIQUE LORS DES EVENEMENTS DE REFERENCE

3.1.1. Surcote atmosphérique et marée : validation

Afin d'évaluer la fiabilité des résultats des modèles, des comparaisons ont été faites avec les données existantes. En ce qui concerne les niveaux d'eau (marée + surcote atmosphérique), les données disponibles proviennent de 5 marégraphes : le marégraphe d'Ajaccio (SHOM), ceux de Livorno CitaVecchia, Napoli et Palermo en Italie. Ces données sont disponibles sur les sites de l'UNESCO (<http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/station.php?code=ajac>) et sur le site des réseaux de mesures italiens (<http://www.mareografico.it>).

La validation (cf. Illustrations 10 à 14) est réalisée sur une période allant du 25 novembre au 23 décembre 2008, ce qui permet d'observer le comportement du modèle au cours de la tempête de novembre mais aussi durant la période de calme qui a suivi. Pour la comparaison à Ajaccio, les résultats du modèle au rang 1 (plus précis) sont utilisés, et pour la comparaison avec les marégraphes italiens, les résultats en rang 0 (plus grande emprise) sont utilisés.

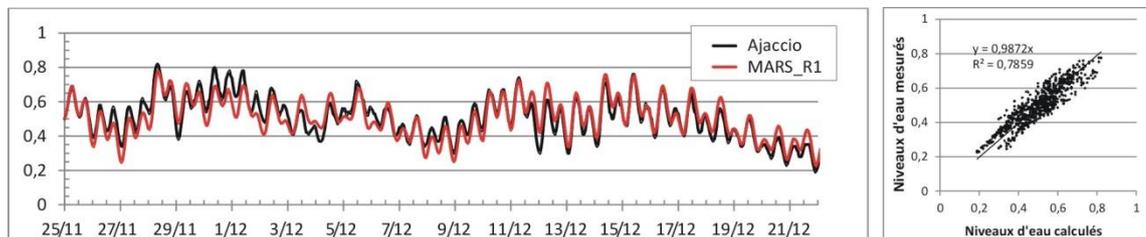


Illustration 11 - Comparaison entre les niveaux d'eau calculés et mesurés à Ajaccio du 25/11/2008 au 21/12/2008.

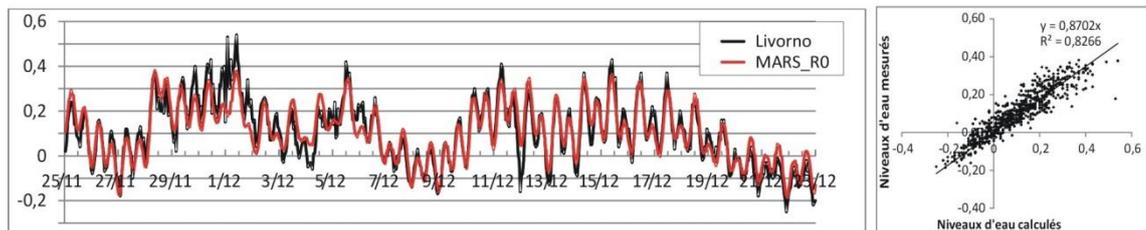


Illustration 12 – Comparaison entre les niveaux d'eau calculés et mesurés à Livorno du 25/11/2008 au 21/12/2008.

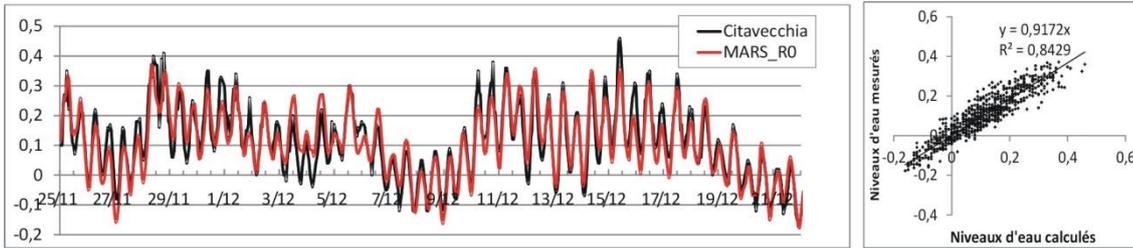


Illustration 13 – Comparaison entre les niveaux d'eau calculés et mesurés à Citavecchia du 25/11/2008 au 21/12/2008.

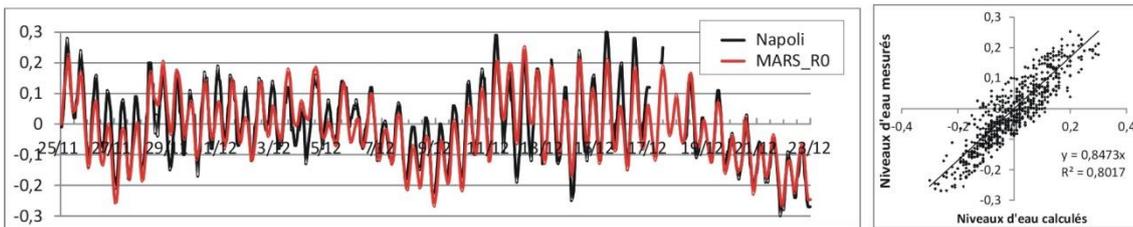


Illustration 14 - Comparaison entre les niveaux d'eau calculés et mesurés à Napoli du 25/11/2008 au 21/12/2008.

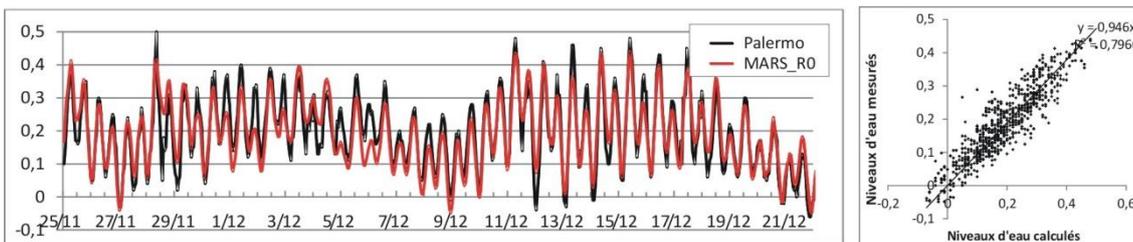


Illustration 15 - Comparaison entre les niveaux d'eau calculés et mesurés à Palermo du 25/11/2008 au 21/12/2008.

On observe une très bonne corrélation entre les niveaux prédits et les niveaux mesurés par les différents marégraphes (localisation : voir illustration 6), avec des coefficients de détermination compris entre 0.79 et 0.84. Ces résultats permettent donc d'avoir une bonne confiance dans les prévisions de niveaux d'eau par les modèles.

Le modèle ainsi validé est utilisé pour reconstruire les séries de niveaux d'eaux en trois points de la plaine : Bastia, en face du port de Taverna et en face de Solenzara (cf. Illustration 15). Les résultats obtenus montrent une grande similitude entre les niveaux d'eau calculés en différents points du littoral de la plaine lors de la tempête de 1979. Le niveau d'eau au pic de la tempête peut en conséquence être considéré comme homogène tout le long du littoral.

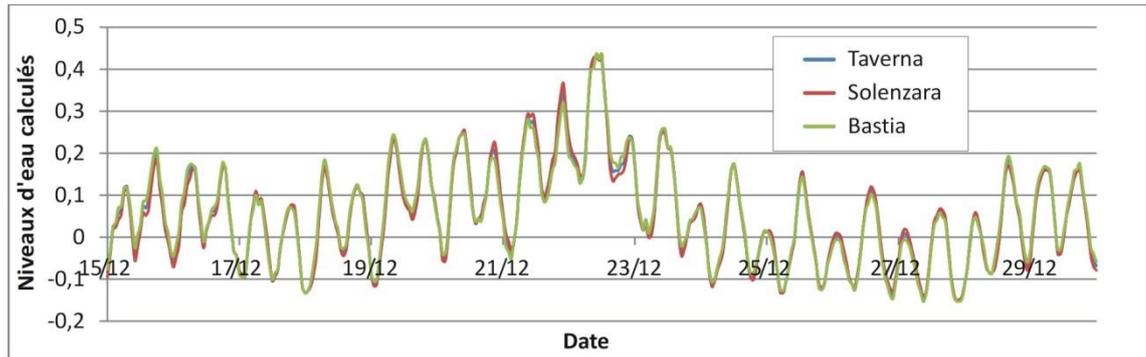


Illustration 16 - Comparaison des niveaux d'eau prédits par le modèle MARS en différents points de la plaine orientale lors de la tempête de 1979.

3.1.2. Niveaux d'eau et des conditions de vagues lors des évènements de référence

Afin de calculer le niveau d'eau maximal permanent et temporaire, les modèles sont utilisés pour calculer le set-up et le run-up qui seront additionnés au niveau de surcote atmosphérique et à la marée. Les parties suivantes présentent les résultats obtenus pour les évènements de référence.

Tempête du 22 décembre 1979

- **Caractéristiques de la houle au large**

Les séries temporelles reconstituées sur la période allant de 1979 à 2009, donnent pour les trois points de la Plaine Orientale, les conditions au large suivantes:

	Pic de la tempête (UTC)	Hauteur significative Hs (m)	Période de pic Tp (s)	Direction au pic Dp (deg)
Plaine Orientale 1 - Bastia	22/12/1979 06 :00 :00	6.64	11.25	135
Plaine Orientale 2 - Taverna	22/12/1979 06 :00 :00	7.32	11.25	145
Plaine Orientale 3 - Solenzara	22/12/1979 03 :00 :00	7.43	11.25	125

Illustration 17 – Caractéristiques de la houle au large de la Plaine Orientale.

Compte tenu de ces caractéristiques et de l'analyse statistique qui a été menée lors de la première phase de l'étude (Stépanian *et al*, 2011), nous pouvons considérer que la

période de retour des vagues d'un tel événement est de l'ordre de 50 ans (voir illustration 3).

- **Marée et surcote atmosphérique**

La situation météorologique au moment du pic de la tempête (cf. illustration 17) est caractérisée par un système dépressionnaire centré au Sud-Ouest de la Corse fortement creusé (~ 988 hPa). Sur la Plaine Orientale, la pression atmosphérique est légèrement plus forte, de l'ordre de 991 hPa, ce qui va entraîner une surélévation d'environ 20 cm. Le régime de vent est de SSE, atteignant le long de la côte ouest de l'Italie des vitesses moyennes de l'ordre de 20 m/s, soit 72 km/h. Ces vitesses sont à même d'entraîner une surélévation supplémentaire du plan d'eau.

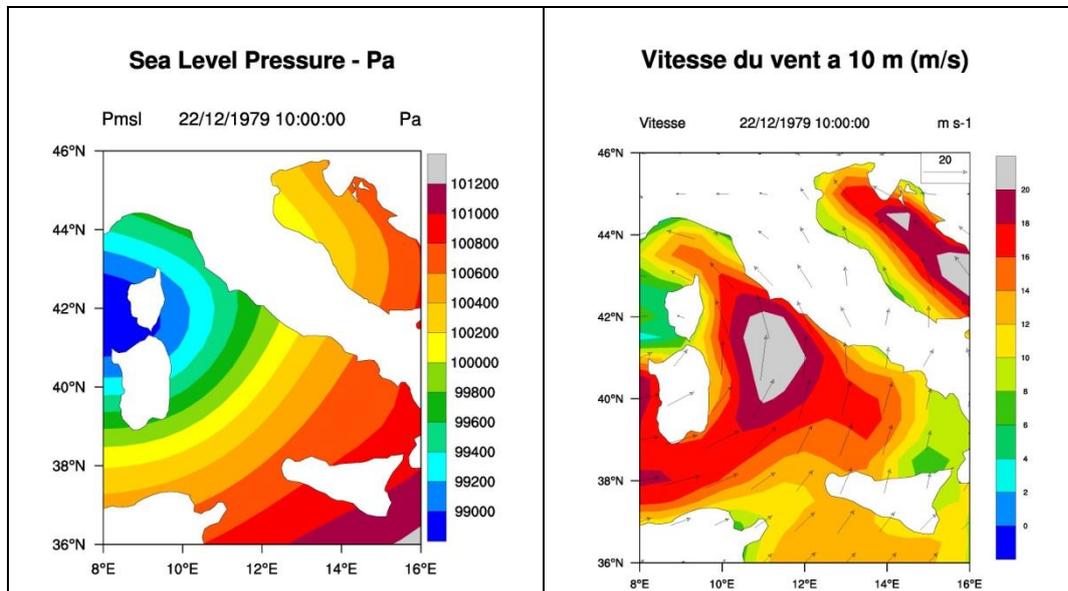


Illustration 18 – Cartes des pressions et vitesse du vent au paroxysme de la tempête.

Les simulations des niveaux d'eau (surcote et marée) obtenus lors de cet événement sont présentées sur l'illustration 19. L'élévation maximale du plan d'eau survient le 22 décembre 1979 à 10 h et atteint 0.44 m NGF, avec un niveau d'eau qui reste supérieur à 0.3 m NGF pendant plus de 6h.

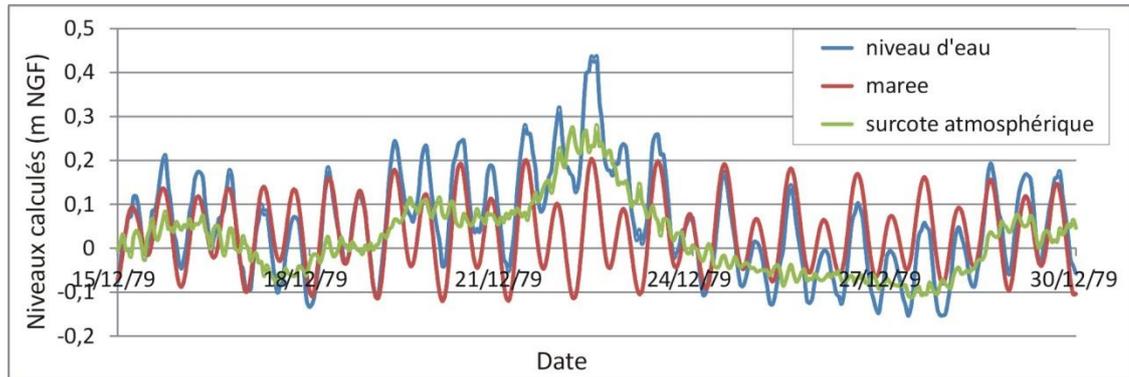


Illustration 19 – Niveaux d'eau en mètres NGF (extraction au point PO2) durant la tempête de décembre 1979.

Tempête du 28 novembre 2008

• Caractéristiques de la houle au large

Les caractéristiques de la houle au large de la plaine sont résumées sur l'illustration 19.

	Pic de la tempête (UTC)	Hauteur significative Hs (m)	Période de pic Tp (s)	Direction au pic Dp (deg)
Plaine Orientale 1 – Bastia	28/11/2008 09 :00 :00	6.46	11.25	145
Plaine Orientale 2 – Taverna	28/11/2008 09 :00 :00	7.24	11.25	155
Plaine Orientale 3 - Solenzara	28/11/2008 09 :00 :00	7.37	11.25	145

Illustration 20 – Caractéristiques de la houle au large de la Plaine Orientale.

Compte tenu de ces caractéristiques et de l'analyse statistique qui a été menée lors de la première phase de l'étude, la période de retour des vagues de cet événement est légèrement inférieure à 50 ans (illustration 3).

• Marée et surcote atmosphérique

La situation météorologique au moment du pic de la tempête est caractérisée par un système dépressionnaire centré au Sud-Ouest de la Corse moins creusée que pour celle de décembre 1979 (~ 995 hPa). Ce qui engendre une pression atmosphérique de l'ordre de 997 hPa sur la Plaine Orientale. Le régime de vent est semblable à celui de décembre 1979 avec des vitesses moyennes proches de 20 m/s, soit 72 km/h.

Les simulations (cf. illustration 21) donnent une valeur du niveau d'eau maximal (marée et surcote atmosphérique) de 0.33 m NGF, le 28 novembre à 9 h. Ce niveau, bien que modulé par la marée reste élevé pendant plusieurs jours.

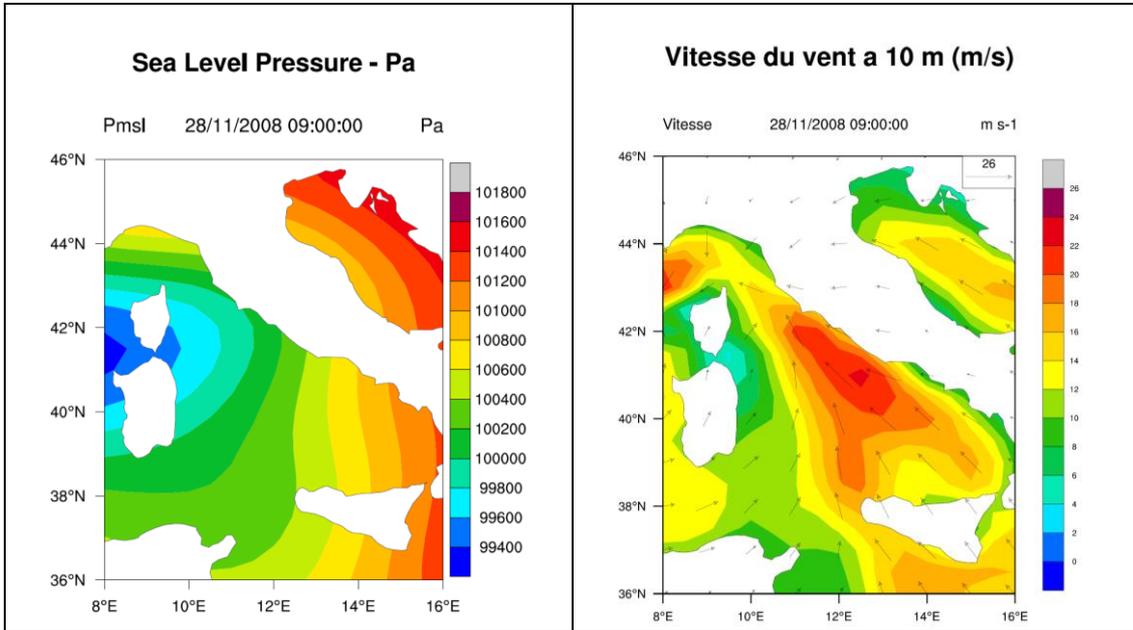


Illustration 21 – Cartes des pressions et vitesse du vent au paroxysme de la tempête.

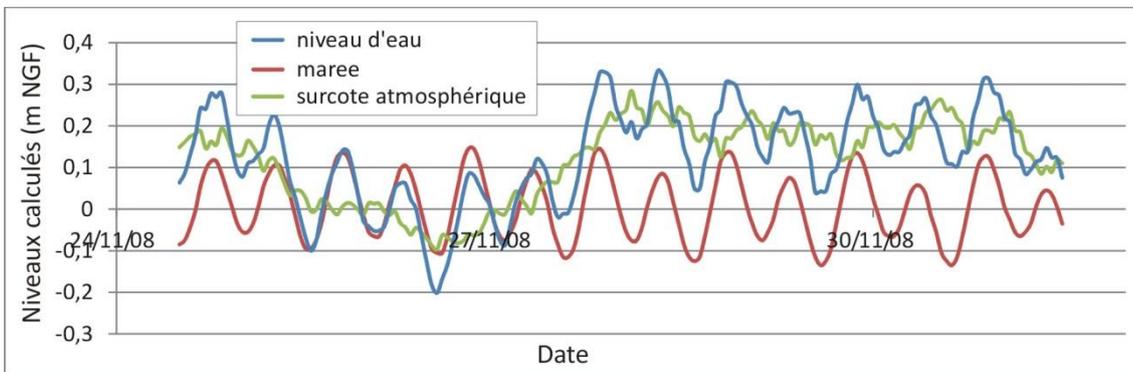


Illustration 22 - Niveaux d'eau en mètres NGF durant la tempête de novembre 2008 (extraction au point PO2).

Evènement extrême

Suite à l'analyse statistique réalisée en phase 1 de l'étude, le scénario retenu pour l'évènement est le suivant :

- Une hauteur significative de la houle au pic de la tempête de 10.2 m, avec une période de pic T_p de 12s, correspondant aux vagues de S-SE (majorée avec l'indice de confiance, voir illustration 3) de période de retour 100 ans ;
- Un niveau d'eau (marée + surcote atmosphérique) NM de 0.9 m NGF, soit un niveau dont la période de retour est également estimée centennale (Catalogue sédimentologique des côtes françaises ; BRGM & SOGREAH, 1987).

Afin de bien représenter la variabilité des événements pouvant affecter le littoral de la plaine orientale, deux directions de provenance ont été simulées : une tempête de SE et une tempête de NE. Les résultats cartographiques sont présentés dans l'atlas joint à ce rapport (planches n°1 à 8). Pour chaque cellule sédimentaire de la plaine sont présentés :

- les hauteurs significatives de la houle au pic de la tempête ;
- le niveau de set-up au pic de la tempête ;
- la force exercée sur le fond ;
- la vitesse orbitale de la houle maximale sur le fond.

• Evènement extrême de Sud-Est

Les conditions hydrodynamiques obtenues pour l'évènement extrême de Sud-Est sont présentées sur les planches n°1, 3, 5, 7.

La houle formée a une provenance de SE et sa direction se réoriente à l'approche de la côte par interaction avec la bathymétrie pour atteindre la plage avec une légère incidence (angle entre la direction de propagation de la houle et la perpendiculaire à la côte). En raison de l'orientation du trait de côte, le littoral de Solenzara au Tavignano reçoit une houle frontale, alors que sur le centre de la plaine, une légère incidence est observée, qui devient plus importante de l'embouchure du Golo à Bastia, où la houle est encore très oblique à son arrivée sur la plage. La hauteur significative proche de la côte est globalement homogène. Toutefois, en raison de la bathymétrie plus abrupte de l'avant-côte, quelques secteurs présentent des hauteurs légèrement plus importantes proches de la côte. Il s'agit des secteurs d'Anghione, Bravone, Moriani et le secteur au nord de Solenzara.

Les niveaux de set-up calculés par le modèle sont compris entre 0.25 m et 0.7 m. Les secteurs sur lesquels le niveau de set-up est le plus important sont la zone du delta du Golo qui possède une pente de l'avant-côte plus forte et les secteurs d'Alistro et Bravone qui sont touchés frontalement par la houle.

La force exercée sur le fond et la vitesse sur le fond traduisent le potentiel érosif de ce type de tempête. Les forces sur le fond sont particulièrement importantes sur les barres d'avant-côte et on observe une variabilité longitudinale qui reflète bien l'amplitude de ces morphologies. Lorsqu'elles sont bien développées (secteur de la Marana), les vitesses orbitales et les contraintes dues à la vitesse orbitale sont plus élevées, et la dissipation de l'énergie sur l'avant-côte est plus forte, ce qui se traduit par des niveaux de set-up légèrement plus faibles. Les secteurs d'Alistro et de Bravone présentent également des forces et vitesses orbitales sur le fond importantes.

La bathymétrie joue également un rôle sur l'extension de la zone de courants induits par la houle sur le fond et on constate que pour ces conditions extrêmes, les vitesses orbitales maximales de la houle sont fortes jusqu'à l'isobathe 30 m.

- **Evènement extrême Nord-Est**

Les conditions hydrodynamiques obtenues pour la tempête centennale de Nord-Est sont présentées sur les planches n°2, 4, 6, 8.

A l'inverse des conditions de Sud-Est, c'est la partie Nord de la plaine qui subit les houles les plus frontales et par conséquent les plus énergétiques. La valeur de la houle à la côte est fortement conditionnée par ces processus de réfraction. De manière générale, la hauteur de houle proche du rivage est de l'ordre de 2,5 m. Toutefois, quelques secteurs présentent des valeurs plus élevées certainement liées à l'absence ou à la plus faible amplitude des barres d'avant-côte. Il s'agit des secteurs d'Anghione/ Marina di Sorbo au sud du delta du Golo, du secteur de Moriani et du secteur situé entre le port de Solaro et la base aérienne de Solenzara.

Le niveau de set-up est également conditionné par l'orientation de la côte. Au nord, de Bastia au Golo, la houle frontale induit des niveaux de set-up plus élevés. Dans les secteurs de forte réfraction comme au sud du Golo ou sur la cellule Tavignano-Solenzara, les valeurs de set-up sont plus faibles. La largeur de la zone de set-up est conditionnée par la bathymétrie. Ainsi sur les secteurs plus superficiels comme les deltas, la zone surélevée est plus importante.

Comme pour la tempête extrême de sud-Est, la bathymétrie joue également un rôle sur l'extension de la zone de courants induits par la houle sur le fond et on constate que pour ces conditions extrêmes, les vitesses orbitales maximales de la houle sont fortes jusqu'à l'isobathe -30 m. Ces vitesses, ainsi que la force exercée sur le fond sont relativement homogènes. Toutefois, on observe des secteurs où l'intensité est plus importante, traduisant un pouvoir érosif plus élevé. Il s'agit des secteurs de la Marana, de la zone située au sud de Moriani et du secteur du Champ de tir au sud de Bravone.

On constate que pour des évènements extrêmes de nord-est ou de sud-est, les secteurs où les conditions sont les plus énergétiques sont relativement similaires. Sur les extrêmes Nord et Sud, c'est évidemment les houles frontales qui vont être les plus impactantes, mais sur la partie centrale de la plaine, les secteurs les plus exposés sont globalement d'Anghione, Bravone et Moriani.

3.2. NIVEAUX MAXIMAUX ATTEINTS LORS DES EVENEMENTS DE REFERENCE

Les résultats obtenus pour les trois tempêtes de références sont présentés sur les planches n°9 à 44. Sur chacune des planches au 1/25000^{ème} sont représentés les limites de l'inondation permanente (surcote + marée + set-up) et de l'inondation temporaire (inondation permanente + run-up), ainsi que la hauteur d'eau dans la zone inondée, présentée en trois classes : de 0 à 0.5 m, de 0.5 m à 1 m, de 1 m à 1.5 m.

3.2.1. Evènement cinquantennal (exemple de 1979)

Les résultats obtenus pour l'évènement cinquantennal sont présentés sur les planches n° 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39 et 42.

A l'échelle régionale, quelques secteurs apparaissent plus affectés par l'élévation du niveau d'eau. Il s'agit principalement du lido de la Marana, du secteur d'Anghione, de la zone allant de l'embouchure du Tavignano jusqu'au pénitencier de Casabianda, et du littoral de Ghisonaccia.

Les niveaux d'eau atteints sont compris entre 0 et 0.5 m, avec des niveaux supérieurs très localisés et toujours inférieurs à 1 m. Ces hauts niveaux d'eau sont principalement observés à proximité des étangs ou dans les zones d'embouchures particulièrement basses.

Dans les zones à lido, on observe fréquemment une inondation des terres côté lagune qui s'explique par l'augmentation du niveau de ces étangs en communication avec la mer.

Les zones inondées pendant la tempête sont généralement localisées sur la frange côtière. Toutefois, dans les zones d'embouchure comme le Golo, on note des surfaces très importantes avec pénétration de l'eau de plusieurs centaines de mètres dans les terres. Dans le secteur de Ghisonaccia, l'arrière-cordon est particulièrement bas et la zone se retrouve donc sous le niveau statique. Dans ce secteur, l'extension de la zone submergée est probablement minimisée, du fait de la limite terrestre des données Lidar, qui empêche le calcul de niveau plus dans les terres.

La zone de battement des vagues (run-up) reste localisée dans une frange très côtière. Toutefois, on observe quelques franchissements ou pénétrations lorsque les reliefs sont moins développés. On observe également des hauteurs de run-up importants lorsque les pentes sont particulièrement fortes comme par exemple au sud du grau de Diane, indiquant une attaque importante du front dunaire dans ce secteur.

3.2.2. Evènement extrême (tempête fictive)

Les résultats obtenus pour la tempête centennale sont présentés sur les planches n° 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 31, 34, 37, 40 et 43.

Comme pour l'évènement cinquantennal, les deux secteurs qui apparaissent comme les plus affectés sont le lido de la Marana et le littoral de Ghisonaccia. Les zones submergées sont toutefois beaucoup plus importantes.

Au Nord, les secteurs touchés comprennent le lido de la Marana, le delta du Golo mais également le secteur d'Anghione plus au Sud. La zone de l'embouchure du Tavignano est également assez largement touchée, ainsi que tout le secteur compris entre la tour de Vignole sur le littoral de Ghisonaccia jusqu'à Solenzara.

Les hauteurs d'eau dans les zones submergées sont généralement comprises entre 0 et 0.5 m, à l'exception du littoral de Ghisonaccia où l'on observe des hauteurs d'eau plus souvent comprises entre 0.5 et 1 m.

Les zones inondées pendant la tempête sont généralement localisées sur la frange côtière. Toutefois, Les deux secteurs les plus affectés (La Marana et Ghisonaccia) présente des zones inondées très importantes. La quasi-totalité du Lido de La Marana est ainsi touchée par cette tempête d'ordre centennal.

Sur la majeure partie du littoral, la plage est complètement recouverte par le niveau statique lors de ce type d'évènements, et le battement du jet de rive se fait donc sur le front dunaire, voire sur la crête de dune lorsque celle-ci présente une faible altitude.

3.3. SENSIBILITE A L'EROSION COTIERE

L'indicateur de sensibilité à l'érosion côtière développé (voir partie 2.3) s'appuie à la fois sur le régime d'impact de la tempête et sur la morphologie de la plage (en particulier sa largeur). La cartographie de cette sensibilité est présentée sur les planches n° 45 à 56 et à une échelle plus globale sur les planches 61 à 64.

3.3.1. Evènement cinquantennal (exemple de 1979)

Dans les conditions d'un évènement cinquantennal, la quasi-totalité du littoral de la plaine orientale présente une sensibilité moyenne à forte.

Les secteurs les plus sensibles sont les secteurs localisés en aval-transit d'ouvrages ou d'embouchure, qui présentent des érosions chronique et où la largeur de la plage est réduite. Il s'agit principalement de la zone située au Nord de l'embouchure du Golo, la zone située au nord du Port de Taverna, la marina d'Aleria et le nord de Solenzara. Les secteurs à priori moins sensibles à l'érosion lors des tempêtes sont le sud d'Anghione, le sud du port de Taverna et le littoral de Ghisonaccia.

3.3.2. Evènement extrême (tempête fictive)

Dans les conditions d'un évènement extrême, la quasi-totalité du littoral de la plaine présente une sensibilité forte.

Les secteurs à sensibilité très forte sont les mêmes que pour une tempête cinquantennale. En revanche, de nombreux secteurs qui présentaient une sensibilité moyenne pour la tempête cinquantennale deviennent plus vulnérables. C'est notamment le cas d'Anghione, de la zone située au sud du port de Taverna jusqu'à la marina de Bravona ou encore de la zone située au sud du Tavignano.

3.4. EXPOSITION DES ENJEUX AUX EVENEMENTS EXTREMES

L'exposition des enjeux à la submersion marine lors des événements cinquantennaux et extrêmes sont présentées sur les planches 57 à 60.

3.4.1. Evènement cinquantennal

Pour une tempête d'ordre cinquantennal, la surface totale inondée est de l'ordre de 510 Ha (cf. illustration 22). 86% de ces surfaces sont des zones agricoles ou des milieux naturels, et environ 5% sont des surfaces urbanisées.

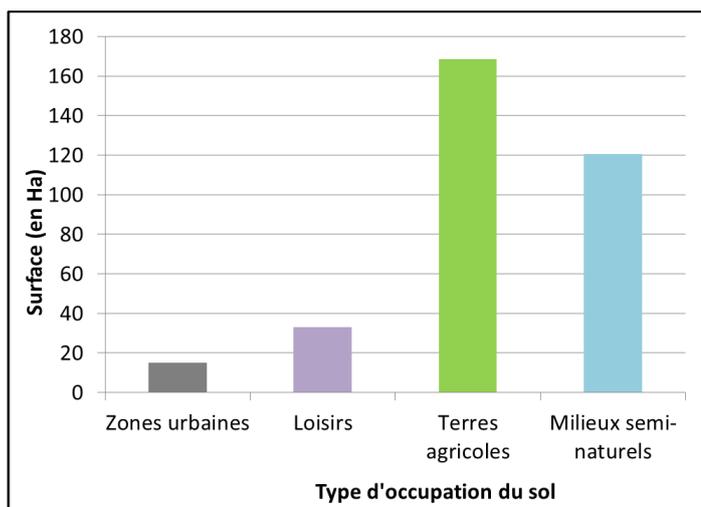


Illustration 23 – Surfaces inondées pour chaque catégorie d'enjeu lors d'une tempête cinquantennale.

Les surfaces urbanisées touchées sont localisées essentiellement dans le secteur de la Marana, et de manière plus localisée à Moriani. De manière générale, les zones urbaines inondées sont restreintes à une frange très côtière (quelques centaines de mètres au maximum). Les zones dites de loisirs les plus exposées sont sur le littoral de la Marana, mais également à la Marina d'Aléria et sur le littoral de Ghisonaccia.

Les zones agricoles les plus exposées sont situées dans le delta du Golo et au sud de Ghisonaccia.

3.4.2. Evènement extrême

Pour une tempête d'ordre centennale, la surface totale inondée est de l'ordre de 1200 Ha. 75% de ces surfaces sont des surfaces agricoles et des milieux naturels et environ 10% sont des zones urbaines.

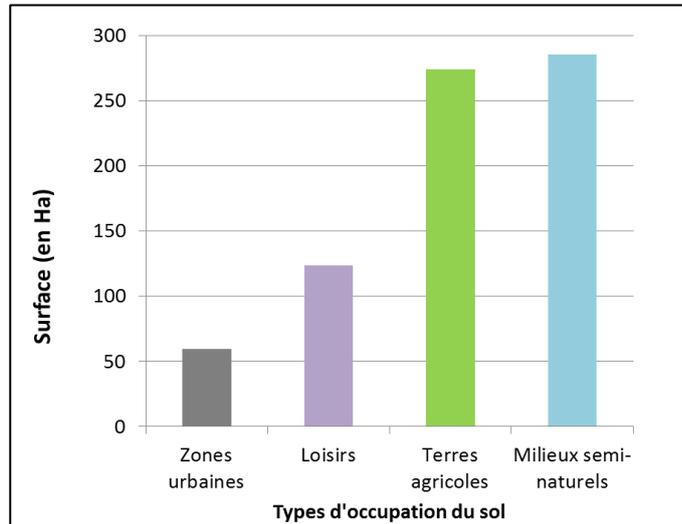


Illustration 24 - Surfaces inondées pour chaque catégorie d'enjeu lors d'une tempête centennale.

Les zones urbaines touchées sont situées majoritairement dans le nord de la plaine. Il s'agit des secteurs de la Marana, et de manière un peu plus limitée des secteurs d'Anghione, de Moriani, et la marine de Bravone. Les zones touristiques les plus touchées sont également situées sur le lido de la Marana et dans le delta du Golo, ainsi que sur le littoral de Ghisonaccia. Les secteurs d'Alistro et la marina d'Aleria sont également touchés, mais de manière plus localisée.

4. Conclusion

L'étude présentée dans ce rapport concerne l'analyse des impacts des tempêtes sur le littoral de la Plaine Orientale, en termes de submersion marine et d'érosion côtière. Elle vise à caractériser, à l'aide de simulations numériques et du levé topo-bathymétrique LIDAR à haute résolution, les phénomènes de submersion lors des événements extrêmes pouvant affecter le littoral de la Plaine Orientale de Corse, à déterminer la sensibilité du littoral à l'érosion côtière lors des tempêtes, et à évaluer l'exposition des enjeux présent sur cette plaine côtière.

L'approche méthodologique présentée vise à évaluer l'impact des tempêtes en termes d'érosion et de submersion marine à une échelle régionale.

Cette méthodologie a permis de mettre en évidence les enjeux ainsi que les sites exposés à la submersion marine, après une validation qualitative par la reconstitution d'évènements passés, notamment les tempêtes de décembre 1979 et novembre 2008. Sur la base d'une analyse statistique des tempêtes passées, cette méthodologie a été appliquée dans le cadre d'un évènement extrême.

L'évaluation de la sensibilité à l'érosion lors des tempêtes est effectuée par l'utilisation d'un indicateur utilisant à la fois le régime de la tempête (classification de Sallenger, 2000) et la morphologie locale.

Cette évaluation à l'échelle de la Plaine Orientale met en évidence les secteurs les plus sensibles face aux événements de tempête extrêmes (Cf. illustration 24). Le lido de la Marana est le secteur le plus sensible de tout le littoral de la Plaine Orientale. Les niveaux d'eaux potentiellement atteints lors des tempêtes sont relativement élevés (de l'ordre de 1 m NGF pour le niveau statique d'une tempête d'ordre cinquantennale et de l'ordre de 1.5 m NGF pour l'évènement fictif) et les zones submergées très importantes (plus de 700 Ha pour l'évènement extrême). C'est également un secteur sensible en termes d'érosion, principalement en raison de la présence de plages étroites et de cordon dunaires peu développés. C'est enfin l'un des secteurs sur lesquels les enjeux notamment urbains sont importants. Un peu plus au sud, le secteur d'Anghione présente également une forte sensibilité, y compris dans des secteurs urbains ou de loisirs. Enfin, un autre secteur particulièrement vulnérable est le littoral de Ghisonaccia qui est principalement affecté par le phénomène de submersion marine, la morphologie locale limitant les impacts en termes d'érosion. Sur ce secteur, des enjeux dits de loisirs (tourisme principalement) sont présents.

D'autres secteurs, plus localisés, présentent également des sensibilités importantes. C'est notamment le cas de la Marina d'Aleria.

Cette approche régionale a donc permis d'identifier les secteurs les plus impactés par les processus en jeu au cours des tempêtes. Toutefois, afin de bien définir l'extension des zones touchées à l'échelle locale, la méthodologie reste à affiner, notamment par l'utilisation de modèles numériques plus complexes, validés, qui permettront de mieux prendre en compte les effets locaux de la morphologie sur la dynamique côtière lors de ces évènements extrêmes.

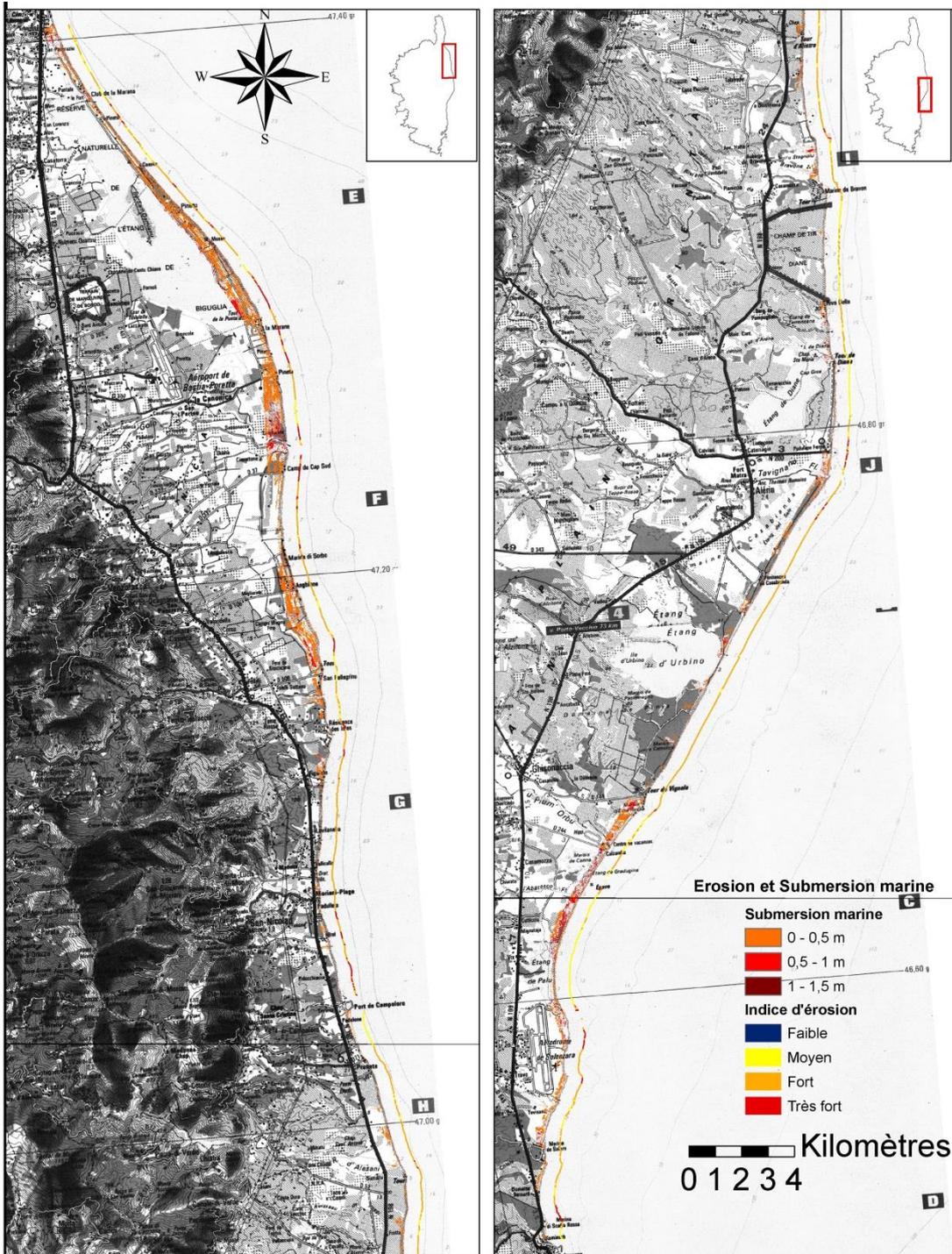


Illustration 25 – Cartographie de la submersion marine (hauteur d'eau) et de la sensibilité à l'érosion pour un événement d'ordre centennal sur la plaine orientale de Corse.

5. Bibliographie

Booj. N., Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H., 1999. A third generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *J. Geophys. Res.*, 104, C4: 7649-7666.

Lazure, P. and Dumas, F., 2007. An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances in Water Resources* 31: 233-250.

Lyard, F. Lefevre, F. Letellier, T. and Francis, O., 2006. Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics*, 56:394–415.

Roelvink, D., Reniers, A., Van Dongeren, A. and Van Thiels de Vries, J., 2009. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barriers islands. *Coastal Engineering* 56 : 1133-1152.

Sallenger, A.H., Jr., 2000, Storm impact scale for barrier islands: *Journal of Coastal Research*, v. 16, no. 3, p. 890-895.

Stépanian, A., Balouin, Y., Belon, R. et Bodéré, G., 2011. ROL – Etude complémentaire sur le littoral de la Plaine Orientale de Corse – Etat des connaissances sur les impacts des tempêtes sur le littoral. Rapport final. Rapport BRGM RP-59058-FR, 137 p., 64 ill., 4 ann..

Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A., and Sallenger Jr., A.H., 2006, Empirical parameterization of set-up, swash, and run-up: *Coastal Engineering*, v. 53, no. 7, p. 573-588.

Stockdon, H.F., Sallenger, A.H., Jr., Holman, R.A., and Howd, P.A., 2007, A simple model for the spatially-variable coastal response to hurricanes: *Marine Geology*, v. 238, no. 1-4, p. 1-20.

Remerciements

Le BRGM remercie l'Ifremer pour son autorisation d'utilisation du logiciel MARS (Lazure and Dumas, 2007), dans la cadre de la convention n°04/2 210 794/V.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional de Corse

Immeuble Agostini

ZI de Furiani

20600I – Bastia - France

Tél. : 04 95 58 04 33