

Tempête Xynthia : compte rendu de mission préliminaire

BRGM/RP-58261-FR
Mars 2010

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Recherche du BRGM 2010 RISCOTE

Rodrigo PEDREROS, Manuel GARCIN, Yann KRIEN, Daniel
MONFORT CLIMENT, Julie MUGICA, Benjamin FRANÇOIS

Vérificateur :

Nom : N. Lenôtre

Date : 19/03/2010

Signature :

Approbateur :

Nom : H. Modaressi

Date : 22/03/2010

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 9001:2000.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots clés : Tempête Xynthia, surcote, submersion marine, érosion, dommages, aléas, vulnérabilité, risques côtiers, modélisation numérique

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

Pedrerros R., Garcin M., Krien Y, Monfort Climent D., Mugica J., François B. (2010) - Tempête Xynthia : compte rendu de mission préliminaire. Rapport BRGM/RP-58261-FR, 45 p., 31 Figs., 1 Ann.

Synthèse

Dans le cadre de ses activités de recherche (projet RISCOTE – RISR18, Littoral Aléas Côtiers), le BRGM a effectué une mission de terrain du 8 au 12 mars suite au passage de la tempête Xynthia (28 Février 2010). A noter que cette intervention a été réalisée en collaboration avec l'ONF.

L'objectif de cette mission était de recueillir, avant que les traces ne soient effacées, des informations sur les évolutions morphologiques du littoral (érosion), les niveaux d'inondation maximum, les dégâts induits et les processus s'étant produits durant cette tempête. Ce compte rendu présente les premières constatations effectuées sur le terrain.

La zone observée correspond à un linéaire côtier de l'ordre de **240 km** compris entre l'estuaire de la Loire au Nord et celui de la Gironde au Sud. **300 observations** géo-localisées ont été réalisées. Elles mettent en évidence des dégâts au sud du département de la **Loire Atlantique** (2 communes affectées), la **Vendée** (15 communes affectées) et la partie nord de la **Charente maritime** (16 communes affectées).

Les premières constatations montrent :

- **l'érosion de l'ensemble du cordon dunaire.** Le recul est en moyenne de 3 à 5 m avec des valeurs atteignant 22 m pour les secteurs les plus exposés aux vagues comme les plages du moulin Brûlé (commune Couarde-sur-Mer, Île de Ré) et de Sauveterre (commune Olonne-sur-Mer). D'une façon générale la dune a bien joué son rôle de « protection » (pas de surverse ni de brèche) à l'exception du secteur de la Belle Henriette (à proximité de la Faute-sur-Mer).
- **une submersion marine très importante :** la cote absolue dépasse par exemple 4.5 m NGF à Moutiers-en-Retz, Charron, la Faute-sur-Mer, L'Aiguillon-sur-Mer alors que le niveau extrême (période de retour centennale) estimé par le SHOM-Cetmef est inférieur à 4 m NGF. Cela est à l'origine de hauteurs de submersion pouvant atteindre près de 2,70 m (la Faute-sur-Mer).
- **en ce qui concerne le bâti :**
 - o les constructions subissant l'action directe des vagues (exemple au sud de Châtelailon-Plage) et/ou l'érosion (affouillement des fondations, exemple la Tranche-sur-Mer) ont subi d'importants dégâts. En général, ce sont les constructions avec des fondations sommaires et en maçonnerie qui sont les plus touchées.
 - o les installations ostréicoles et conchylicoles ont été particulièrement touchées du fait de leur proximité au rivage et de leur mode de construction légère.
- **en ce qui concerne les infrastructures :**
 - o on constate un débordement sur tous les ports de la zone provoquant la destruction de pontons et de bateaux ainsi que l'inondation des zones urbaines basses situées en arrière.

- les digues et les enrochements sont sous-dimensionnés par rapport à cet événement extrême, caractérisé par la conjonction d'un niveau d'eau élevé (marée à fort coefficient et surcote atmosphérique importante) avec de fortes houles (près de 7m de hauteur significative au large). Habituellement les vagues déferlent sur la partie basale large des digues et des ouvrages. Lors de cet événement, elles ont directement déferlé sur la partie haute et étroite entraînant leur « décapitation », des surverses et parfois leur bréchification (exemple île de Ré) ou la formation de renards hydrauliques (digue de l'Aiguillon)
- **en ce qui concerne les réseaux routiers** : ils ont subi d'importants dégâts en front de mer mais aussi à l'intérieur des terres dans les zones submergées

Quant à l'apport de la modélisation numérique, on constate que le système de prévision PREVIMER (www.previmer.org), piloté par l'IFREMER, prévoyait dès la soirée du 26 février les bons ordres de grandeur des niveaux extrêmes du plan d'eau atteints pendant la tempête : plus de 4m NGF en Vendée et en Charente-Maritime. Néanmoins, ce système souffre pour ces côtes d'une faible résolution spatiale (respectivement 5 et 3 km pour les niveaux d'eau et les vagues) rendant difficile la localisation des zones les plus exposées.

C'est pourquoi le BRGM a simulé l'événement Xynthia grâce à des modèles de plus haute résolution spatiale (200-300m) implantés sur le Pertuis Charentais dès 2006 dans le cadre de projets de recherche. Les premières simulations, réalisées en parallèle de la mission de terrain avec les codes MARS et SWAN, sont encourageantes car elles :

- sont cohérentes avec les mesures in-situ de niveaux d'eau (4.2 m et 4.5 m NGF calculés et observés respectivement à la Rochelle) et de vagues (4m et 3.6m de hauteur significative calculés et observés à l'houlgraphe de l'île d'Yeu),
- donnent accès à une vision bien plus détaillée des secteurs affectés.

Suite aux observations réalisées lors de cette mission les améliorations suivantes pourraient être réalisées :

- A l'échelle régionale : amélioration de la prévision de la submersion marine par une augmentation de la résolution spatiale des modèles et l'intégration de la surcote liée aux vagues (« *Wave setup* »),
- A l'échelle locale : modélisation réaliste de la submersion marine à terre en prenant en compte l'ensemble des processus et une topographie plus précise,
- Améliorer la connaissance sur le rôle et la résilience des protections naturelles à la submersion,

- Amélioration de l'évaluation de la vulnérabilité du bâti en considérant en plus de la hauteur d'eau, la vitesse d'écoulement et les processus d'affouillement.

Sommaire

1. Cadre d'intervention et objectifs de la mission	9
2. Présentation de l'événement Xynthia	10
3. Description mission de terrain et méthodologie	14
3.1. MOYENS HUMAINS, TECHNIQUES	14
3.2. ZONE COUVERTE	15
3.2.1. Description sommaire	15
3.2.2. Liste des communes	16
3.2.3. Enjeux	17
4. Observations effectuées	18
4.1. ALEAS	18
4.1.1. Mesure de niveaux extrêmes	18
4.1.2. Mesure de l'érosion	20
4.2. IMPACTS DE L'ALEA	21
4.2.1. Introduction	21
4.2.2. Dégâts sur terre agricoles : érosion, sables, eau de mer	22
4.2.3. Endommagements de digues	23
4.2.4. Endommagements d'ouvrages côtiers	24
4.2.5. Brèches dans les dunes	25
4.2.6. Dégâts sur les biens mobiliers	27
4.2.7. Endommagements de routes	28
4.2.8. Destruction du bâti	29
5. Apport possible de la modélisation pour la prévision de la submersion marine	34
6. Conclusions et perspectives	39
7. Références bibliographiques	43
8. Annexe	44

Liste des illustrations

Figure 1 - Vitesses de vent instantanées maximales durant Xynthia (Météo France)	11
Figure 2 – Champs de vent (données GFS issues de la NOAA, les données des modèles Météo-France n'étant pas disponibles) à 4h heure locale	12
Figure 3 – Période de retour en fonction de la hauteur d'eau au marégraphe de la Rochelle, d'après le SHOM. En pointillés : observations ; en traits pleins : loi déterminée empiriquement (Simon 2008).	13
Figure 4 – Schéma illustrant les principaux mécanismes à l'origine de l'élévation du niveau marin dans le cas d'une tempête telle que Xynthia	14
Figure 5: Localisation des 300 points d'observation réalisés lors de la mission post Xynthia	16
Figure 6 – Mesure d'un niveau d'eau extrême dans les environs de la Couarde-sur-mer (île de Ré).	18
Figure 7 : Mesure d'un niveau d'eau extrême à Charron	19
Figure 8 : Exemple de cartographie de la submersion à Moutiers-en-Retz (Loire-Atlantique) faite à partir des observations des niveaux extrêmes.	19
Figure 9 : Recul important de la dune avec falaisage (ancien tuyau d'AEP pour l'île d'Yeu, recul de l'ordre de 8 m, Saint-Jean-de-Monts)	20
Figure 10 : Ancien chemin d'accès à la plage suspendu de 4m (Saint-Jean-de-Monts)	21
Figure 11 : Dépôt de sable sur les terres agricoles consécutifs à la submersion à la Faute-sur-Mer	22
Figure 12 : Inondation des zones agricoles	22
Figure 13 : Endommagement (formation de renards hydrauliques) de la digue de l'Aiguillon-sur-Mer	23
Figure 14 : Endommagement de la jetée et de l'écluse de la Gachère (au sud de Brétignolles-sur-Mer) dû à l'action des vagues	23
Figure 15 : Dommage sur ouvrage de front de mer.	24
Figure 16 : Dommages sur un embarcadère	24
Figure 17: Dommages sur des structures portuaires (île de Ré, port de La Flotte).	25
Figure 18 : Brèche de la Belle Henriette (La Faute-sur-Mer)	25
Figure 19 : Photographie aérienne de la Brèche de la Belle Henriette à la Faute-sur-Mer (28/02/2010, Photo J.P. Bichon)	26
Figure 20 : Brèche dans la dune par élargissement durant Xynthia d'un sentier d'accès à la plage (La Faute-sur-Mer)	26
Figure 21 : Dégradations du mobilier dans les maisons submergées à Charron	27
Figure 22 : Endommagement de routes	28
Figure 23 : Destruction de route	29
Figure 24 : Effondrement partiel d'une maison	30
Figure 25 : Impact de l'érosion et de l'affouillement sur le bâti	31
Figure 26 : Effet de l'attaque des vagues	32
Figure 27: Exemple de dégâts sur des exploitations ostréicoles (Boucholeurs au sud de Châtelailon-Plage)	33
Figure 28 : Position de la surface de la mer par rapport au niveau moyen donné par PREVIMER le 28/02/2010 à 4H heure légale aux environs du pic de la tempête, (résolution spatiale de 5km).	34
Figure 29 : Hauteur significative des vagues aux environs du pic de la tempête (résolution spatiale du modèle de 3 km environ) donnée par PREVIMER.	35
Figure 30 : Niveau d'eau (marée+surcote atmosphérique) le 28/02/2010 à 04h30 heure légale calculé à l'aide du code MARS forcé par les champs de vent GFS.	36
Figure 31 : Hauteurs significatives de vagues le 28/02/2010 à 5h (heure locale)	37

1. Cadre d'intervention et objectifs de la mission

L'activité littorale du BRGM est axée sur les **risques côtiers liés à l'érosion, à la submersion marine et à l'élévation du niveau des océans** due au changement climatique. Ces risques sont traités aussi bien aux échelles locales que régionales et pour des périodes de temps allant du court terme (échelle événementielle : tempêtes, tsunamis) au long terme (quelques décennies).

C'est donc **une démarche globale qui est utilisée et qui intègre l'étude de l'aléa, des enjeux et de leur vulnérabilité**. Les moyens mis en œuvre au sein du BRGM font appel :

- au développement, à la validation et l'application d'outils de modélisation numérique des vagues, courants, niveaux d'eau, évolution morpho-sédimentaire des littoraux sableux (dont érosion), submersion marine de la franche côtière (en présence ou pas d'ouvrages de défense et du bâti).
- aux développements méthodologiques et instrumentaux, à l'acquisition et au traitement des données du milieu littoral lors de campagnes de mesures ponctuelles ou bien lors de suivis pluriannuels (dans le cadre d'observatoires/réseaux d'observations littoraux en métropole et en Outre-mer). Cela permet d'assurer une meilleure compréhension du milieu et de valider les outils numériques développés.
- à la réalisation de courbes et d'indicateurs de vulnérabilité pertinents selon les milieux considérés (plages sableuses, côtes rocheuses, ...) pour répondre aux objectifs de gestion intégrée et durable des zones côtières.
- à la réalisation de fonctions d'endommagement structurelles (bâti et infrastructures) à la submersion marine.

Ces activités sont menées aussi bien en France métropolitaine que les DROM et des pays comme le Sri Lanka, le Mozambique, Koweït, etc. (annexe 1), dans le cadre de :

- **projets de recherche** nationaux, européens et internationaux dont le BRGM est partenaire ou bien assure la coordination,
- **projets de service public** en appui aux administrations et aux politiques publiques (études, avis et expertises).

La tempête Xynthia qui a touché la façade maritime ouest et en particulier la Vendée et la Charente Maritime, le 28 février dernier, constitue un **cas d'étude riche d'enseignements**. La collecte du maximum d'observations sur le terrain (aléas et dommages) est indispensable pour constituer des jeux de données :

- permettant d'améliorer les connaissances en termes de vulnérabilité des zones côtières,

- et de contribuer à l'amélioration des modèles estimant les surcotes et limites d'inondation.

Ces actions s'inscrivent pleinement dans nos activités de recherche (projet RISCOTE – RISR18, Littoral Aléas Côtiers). C'est dans ce cadre que le BRGM a réalisé une mission de terrain du 8 au 12 mars 2010 sur les littoraux impactés par Xynthia. **Cette intervention a bénéficié, en outre, de la collaboration de l'ONF** qui assure une présence à l'année sur les littoraux en vue de la gestion des dunes. Les agents de cet organisme, rencontrés sur le terrain, ont pu nous fournir des informations riches et précises sur l'érosion des plages et des dunes.

Les objectifs de la mission étaient d'acquérir des données sur les points suivants :

1- Aléas :

- érosion (évolutions morphodynamiques des dunes : entailles, brèches, apparition de falaises dunaires),
- submersion marine (limites et hauteurs d'inondation, zones de franchissement, estimation des courants dans les zones inondées).

2- Dommages :

- sur les bâtiments (résidentiel ou tertiaire, agricoles...),
- infrastructures (voierie, digues...).

2. Présentation de l'événement Xynthia

La France a été frappée les 27 et 28 février par une violente tempête –baptisée Xynthia— qui a balayé une large bande de territoire allant de la Charente-Maritime aux Ardennes (voir Figure 1 et Figure 2), provoquant de nombreux décès (53 morts recensés en France) et d'importants dégâts matériels. Cette tempête est due, selon Météo France, à une dépression à basses latitudes au dessus de l'Atlantique qui s'est intensifiée progressivement lors de son passage au niveau de l'île de Madère puis des côtes portugaises. Elle a atteint les côtes françaises dans la nuit du 27 au 28 février avant de poursuivre sa route en direction du Nord-Est. D'autres pays comme le Portugal, l'Espagne, le Luxembourg, la Belgique ou encore l'Allemagne ont eux aussi été touchés.

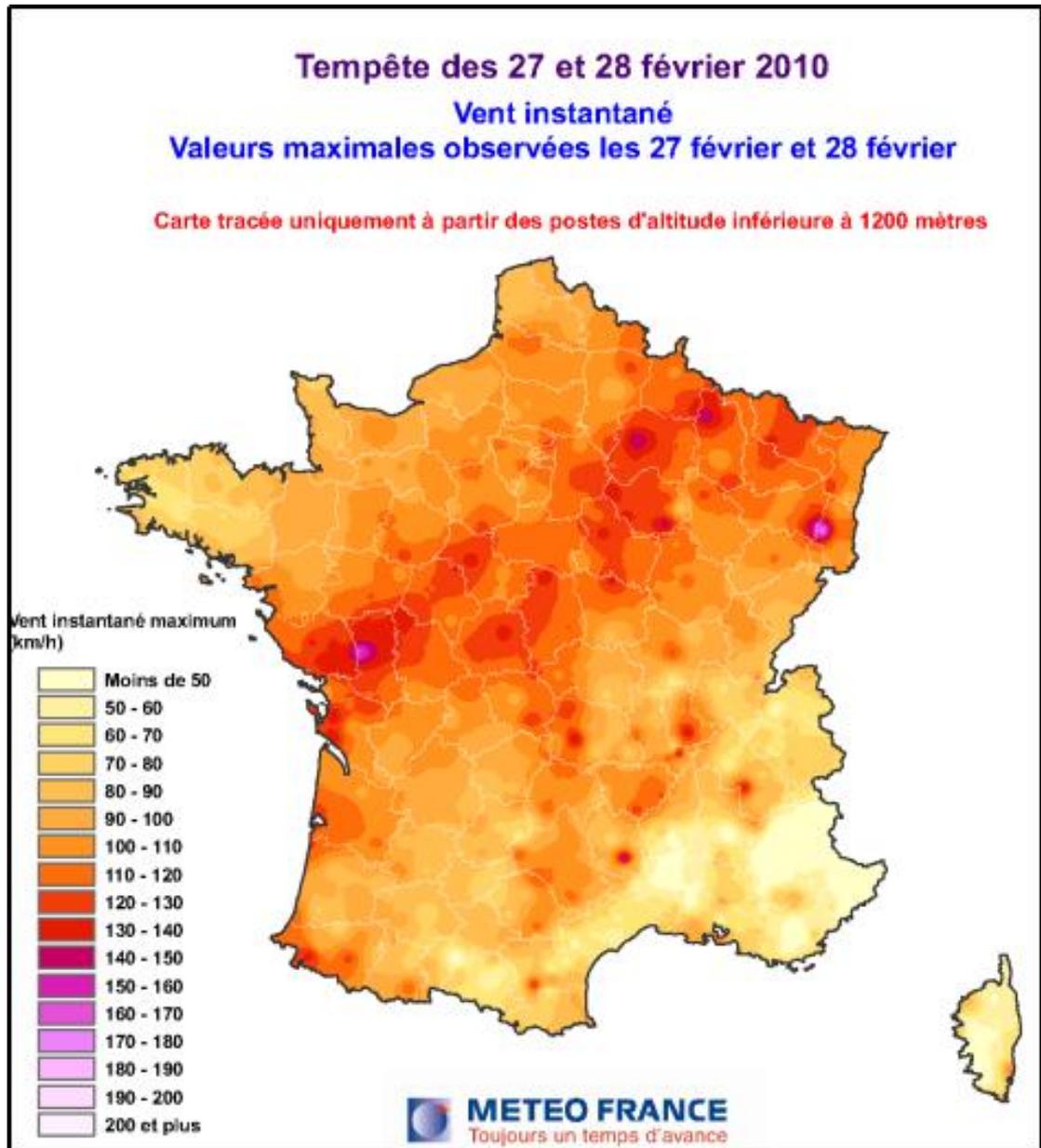


Figure 1 - Vitesses de vent instantanées maximales durant Xynthia (Météo France)

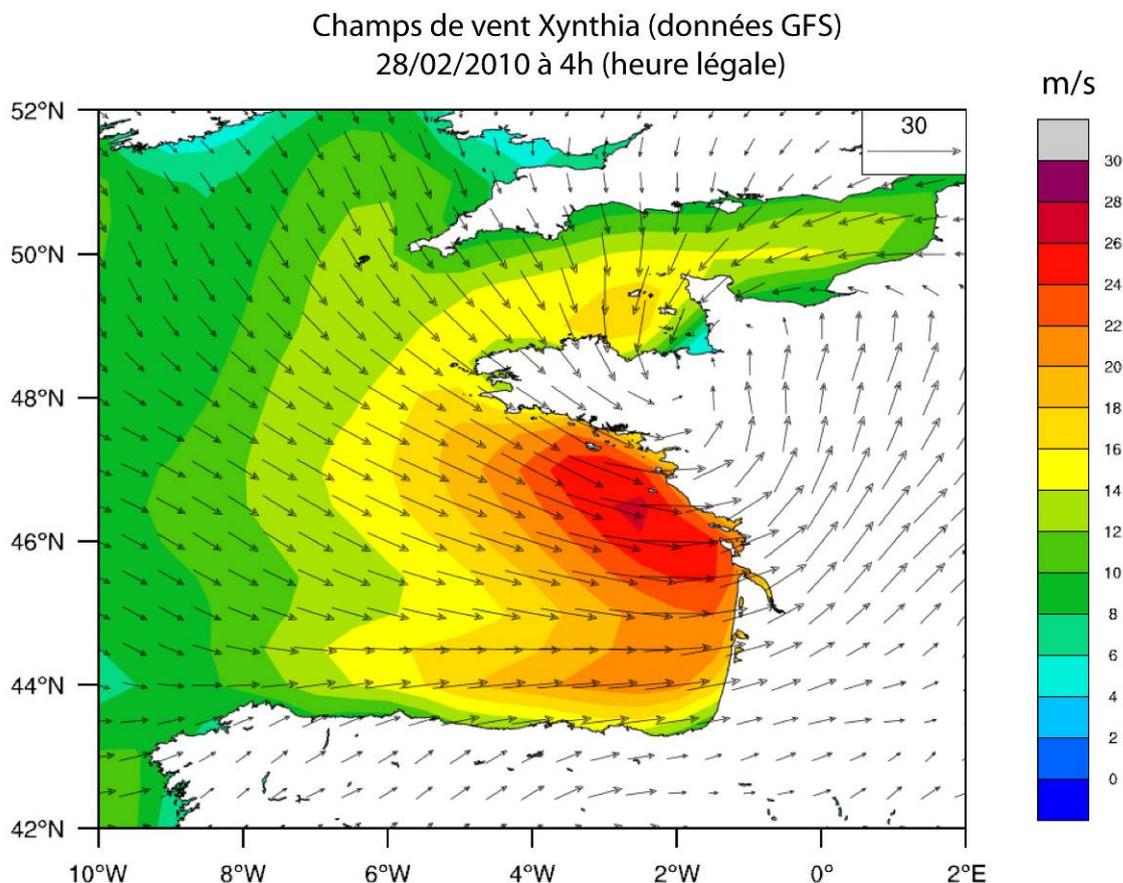


Figure 2 –Champs de vent (données GFS issues de la NOAA¹, les données des modèles Météo-France n'étant pas disponibles) à 4h heure locale

Si Xynthia n'atteint pas l'intensité des tempêtes de décembre 1999 en termes de vitesses maximales instantanées de vent, elle a pourtant engendré des phénomènes de submersion et d'érosion exceptionnels sur les côtes vendéennes et en Charente-Maritime notamment. Le passage de la tempête a, en effet, coïncidé avec une marée haute de coefficient 102.

D'après les observations marégraphiques du SHOM, le niveau extrême aurait atteint environ 4.5m NGF au marégraphe de La Rochelle, 4.1m aux Sables d'Olonne et 4.2m à Saint Nazaire. Ces valeurs sont très supérieures aux niveaux de période de retour centennale prédits par le SHOM (Figure 3). Ceci traduit évidemment le caractère exceptionnel de la tempête, mais remet aussi en question la validité des méthodes statistiques basées sur des séries temporelles de quelques dizaines d'années pour

¹ National Oceanic and Atmospheric Administration des Etats-Unis.

établir des périodes de retour centennales. En effet, si on extrapole le niveau de 4.5 m NGF atteint à la Rochelle, cela correspondrait à une période de retour proche de 10 000 ans.

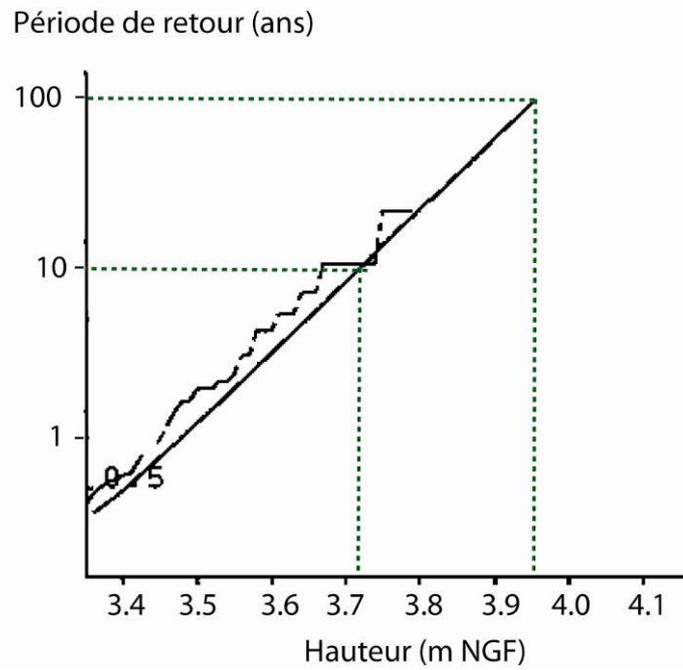


Figure 3 – Période de retour en fonction de la hauteur d'eau au marégraphe de la Rochelle, d'après le SHOM. En pointillés : observations ; en traits pleins : loi déterminée empiriquement (Simon 2008).

Concernant les vagues, nous disposons de peu de données de hauteurs de houle. Par exemple, il n'y a pas de bouée au large de la Rochelle tandis que la plus proche située au Cap Ferret n'enregistre pas pour cause de maintenance. La bouée de l'île d'Yeu donne une hauteur significative de 3.6m à 5h heure locale, mais elle est trop éloignée au nord pour pouvoir être réellement représentative des conditions de houle au large des côtes les plus atteintes.

Les mécanismes à l'origine de la submersion marine sont aujourd'hui bien connus. L'arrivée d'un important système dépressionnaire s'accompagne d'une élévation du niveau marin selon trois principaux processus :

- la chute de pression atmosphérique entraîne une surélévation du niveau du plan d'eau. C'est le phénomène de baromètre inverse. Une diminution d'1hPa équivaut approximativement à une élévation d'1cm du plan d'eau. Dans le cas de Xynthia, la pression a chuté d'environ 20hPa en l'espace de 24h ;

- le vent exerce une contrainte à la surface de l'eau générant une modification du plan d'eau (surcote ou décote) et des courants ;
- à l'approche des côtes, les vagues générées par la tempête déferlent. Elles transfèrent alors leur énergie sur la colonne d'eau, ce qui provoque une surélévation moyenne du niveau de la mer (le « *wave setup* » ou surcote liée aux vagues) pouvant s'élever à plusieurs dizaines de centimètres.

On appelle « surcote atmosphérique » l'élévation du niveau d'eau engendrée par les deux premiers mécanismes. Le niveau moyen de la mer lors d'une tempête résulte de l'ensemble de ces contributions avec celle de la marée. Pour obtenir le niveau maximal atteint par la mer, il faut aussi tenir compte du jet de rive (swash), c'est-à-dire le flux et le reflux des vagues (voir Figure 4). On appelle Run-up l'altitude maximale atteinte par le jet de rive.

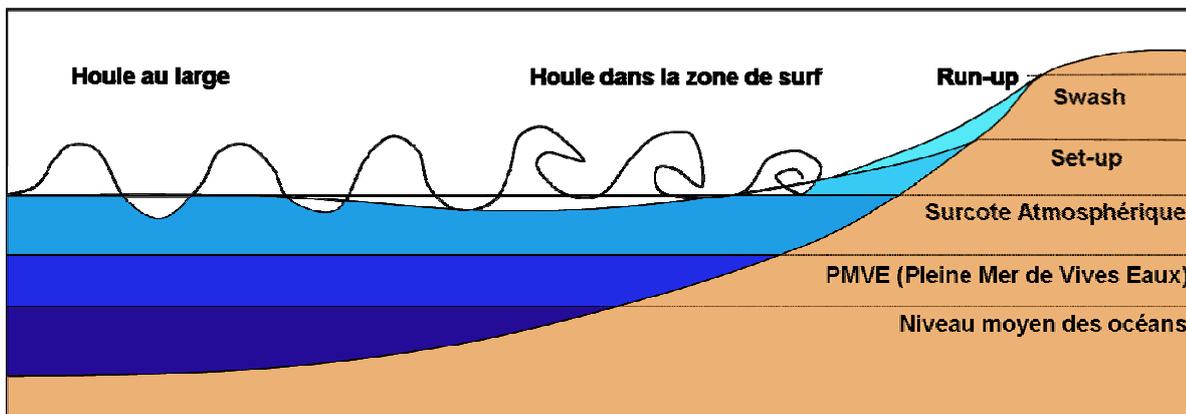


Figure 4 – Schéma illustrant les principaux mécanismes à l'origine de l'élévation du niveau marin dans le cas d'une tempête telle que Xynthia

Ces différents phénomènes provoquent des submersions marines. L'action de la houle contribue par ailleurs à l'érosion du trait de côte, par arrachement de matériel sableux aux plages et aux cordons dunaires par exemple.

3. Description mission de terrain et méthodologie

3.1. MOYENS HUMAINS, TECHNIQUES

L'équipe BRGM a mobilisé des agents du service Risques Naturels et Sécurité du Stockage CO2 (Pedreros R., Krien Y., Monfort D., Garcin M., François B.) et du service

géologique régional d'Aquitaine (Mugica J.) réunissant ainsi des compétences en géomorphologie, modélisation, métrologie et dommages (bâti et structures).

Deux équipes ont travaillé en parallèle afin de couvrir le maximum de secteurs touchés par la tempête. Ces deux équipes étaient équipées d'ordinateurs avec système d'information géographique, de GPS standards et de GPS différentiels bifréquence Trimble.

Afin de préparer la mission et de cibler les zones les plus instructives, une revue de presse avec collecte de photographies, vidéos et écrits a été effectuée. L'ensemble de ces données ont ensuite été géo-localisées. Par ailleurs, une collecte de modèles numériques de terrain, de scans de fond topographique à 1/25 000 de l'IGN et d'images spatiales à très haute résolution (THR) a été réalisée. Les données du projet européen *Eurosion* ont par ailleurs fourni des indications sur la typologie du trait de côte.

En complément de ces informations, des simulations numériques de vagues, niveaux d'eau et de courants ont été réalisées sur la zone impactée à des résolutions de 200-300m afin de mieux caractériser l'aléa ainsi que les processus à l'origine des dégâts. Les résultats préliminaires de ces modélisations sont présentés chapitre 5.

3.2. ZONE COUVERTE

3.2.1. Description sommaire

La zone qui a fait l'objet d'observations durant cette mission correspond à un linéaire côtier de l'ordre de 240 km. Elle comprend la partie sud du département de la Loire Atlantique, la Vendée et la partie nord de la Charente maritime. La zone de recherche est comprise entre l'estuaire de la Loire au Nord et celui de la Gironde au Sud (Figure 5). Le nord de la zone correspond au sud du massif armoricain (formation de granites et de micaschistes) tandis que la partie sud correspond à l'extrémité ouest du seuil du Poitou (formations sédimentaires du Mésozoïque). La côte de la zone prospectée est à dominante sableuse avec des formations dunaires plus ou moins développées en arrière plage. Ces systèmes dunaires isolent très fréquemment des zones de marais dont l'extension peut être importante (marais Poitevin, Vendéen et Breton) et dont le remplissage sédimentaire est très récent (Quaternaire). Certaines zones du littoral sont constituées par des sédiments non cohésifs, argileux principalement dans la Baie de Bourgneuf au Nord, en fond de Pertuis Charentais et dans l'anse de l'Aiguillon. Certaines zones sont protégées de l'action de la mer (poldérisation) par de grandes digues telles que celle de l'Aiguillon. Quelques secteurs montrent de petites falaises ou des littoraux plus rocheux tel que ceux de la Corniche vendéenne, la côte nord de l'île d'Oléron et quelques segments de l'île de Ré. Enfin, notons la présence importante de littoraux plus ou moins artificialisés avec de nombreuses levées, digues et autres ouvrages portuaires ou ostréicoles.

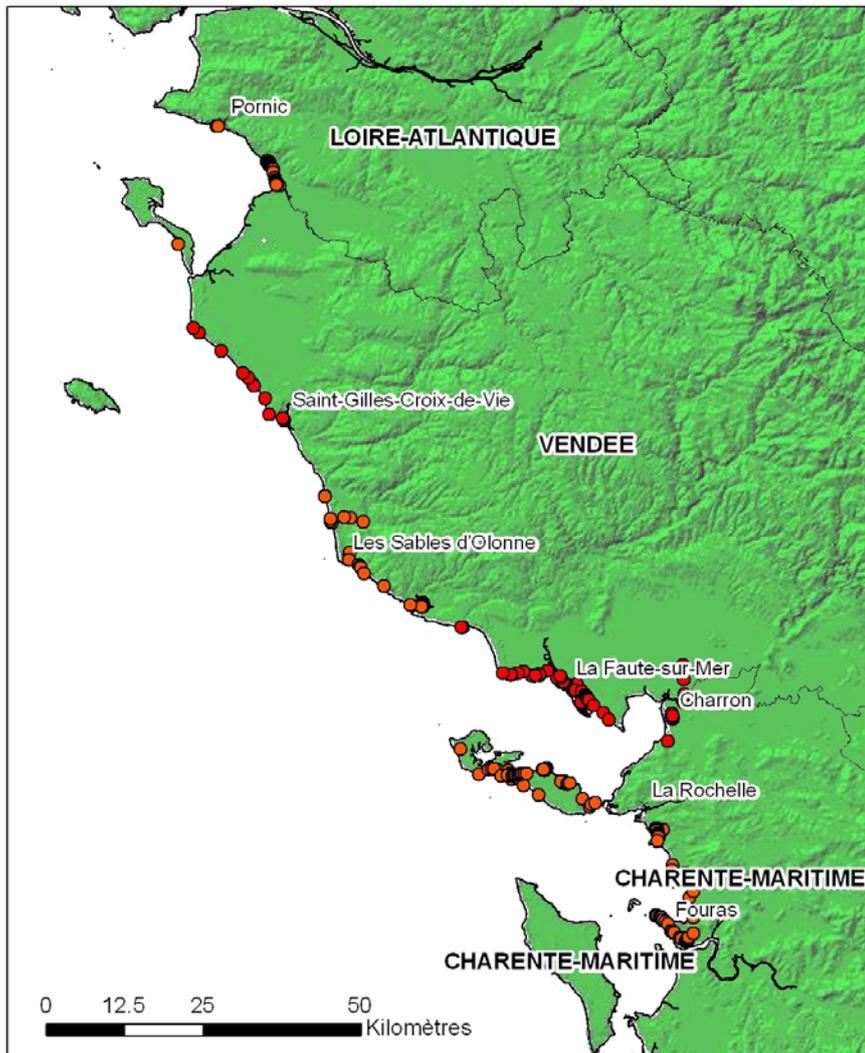


Figure 5: Localisation des 300 points d'observation réalisés lors de la mission post Xynthia

3.2.2. Liste des communes

Des observations géo-localisées ont été effectuées sur les 33 communes du littoral citées ci-dessous.

Loire Atlantique (44)

Pornic, Les-Moutiers-en-Retz

Vendée (85)

Barbatre, Saint-Jean-de-Monts, Saint-Hilaire-de-Riez, Saint-Gilles-Croix-de-Vie, Brétignolles-sur-Mer, Olonne-sur-Mer, Les Sables d'Olonne, Château-d'Olonne, Talmont-Saint-Hilaire, Jard-sur-Mer, Saint-Vincent-sur Jard, La Tranche-sur-Mer, La Faute-sur-Mer, L'Aiguillon-sur-Mer, Saint-Michel-en-l'Herm

Charente-Maritime (17)

Charron, Sainte-Radegonde-des-Noyers, Puyravault, Esnandes, Rivedoux-Plage, La Flotte, Saint-Martin-de-Ré, Le Bois-Plage-en-Ré, La Couarde-sur-Mer, Ars-en-Ré, Saint-Clément-des-Baleines, Aytré, Chatellaillon-Plage, Yves, Fouras, Saint-Laurent-de-la-Prée

3.2.3. Enjeux

La zone de Vendée Charente-Maritime qui a été fortement touchée par la tempête Xynthia présente des enjeux variés (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) avec notamment :

- des zones urbanisées importantes avec les villes de La Rochelle, Les Sables d'Olonne etc.,
- des zones à activité industrielle autour du port de la Rochelle et des Sables,
- l'agriculture et l'élevage sont présents dans les zones basses en arrière du littoral (Baie de l'Aiguillon par exemple),
- l'ostréiculture et la conchyliculture sont très développées notamment dans les Pertuis charentais,
- la sylviculture est présente en zone côtière avec de grands domaines forestiers notamment domaniaux et gérés par l'ONF,
- c'est un secteur très touristique avec de nombreuses infrastructures d'accueil des vacanciers (centre de vacances, locations saisonnières, camping et hôtels) et notamment des villes balnéaires (pays de Monts),
- enfin, cette région est très prisée comme villégiature pour les personnes en retraite expliquant l'âge moyen élevé de la population permanente.

L'ensemble des enjeux évoqués ci-dessus a été impacté le plus souvent directement par les effets côtiers générés par la tempête (submersion marine, érosion côtière). Ces impacts sont illustrés dans le chapitre 4.2.

4. Observations effectuées

Cette mission a permis de récolter 300 observations et 550 photographies géolocalisées, ainsi que 30 points topographiques de précision (niveaux d'eau extrêmes). Ci-après nous illustrons les différents types de mesures effectuées.

4.1. ALEAS

4.1.1. Mesure de niveaux extrêmes

Les mesures de niveaux extrêmes relevés sur le terrain (limites d'inondation Figure 8- et traces de niveau d'eau relevées sur les façades de bâtiments, etc.) à l'aide de GPS (Figure 6 et Figure 7) ou en s'aidant de l'altitude des points cotés donnés par l'IGN, devraient nous permettre de mieux caractériser le niveau extrême. Ceci permettra par ailleurs de valider les résultats fournis par les modélisations. Les premiers résultats obtenus montrent une bonne cohérence entre les mesures et les valeurs données par les modèles (cf. chapitre 5).



Figure 6 – Mesure d'un niveau d'eau extrême dans les environs de la Couarde-sur-mer (île de Ré).

Les résultats indiquent ici (Figure 6) une hauteur de 4.8m NGF (précision verticale de 0.16m). Les résultats des modélisations préliminaires sont cohérents avec les mesures effectuées (voir par exemple Figure 30, en tenant compte d'une surcote additionnelle due aux vagues de l'ordre de quelques dizaines de centimètres)



Figure 7 : Mesure d'un niveau d'eau extrême à Charron

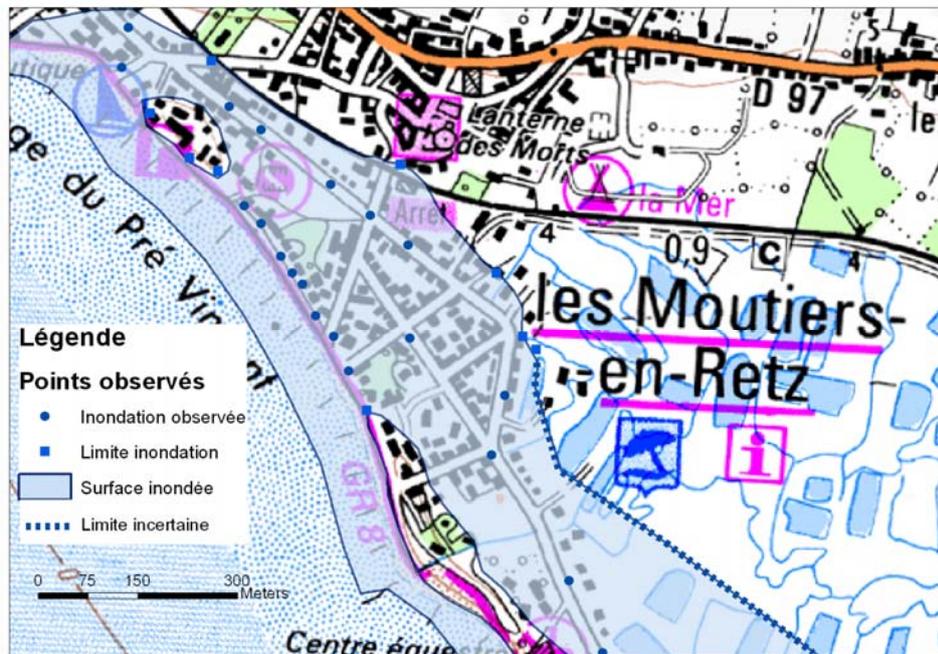


Figure 8 : Exemple de cartographie de la submersion à Moutiers-en-Retz (Loire-Atlantique) faite à partir des observations des niveaux extrêmes.

4.1.2. Mesure de l'érosion

L'ensemble des côtes sableuses, inspectées en compagnie des agents de l'ONF, ont subi une érosion importante conduisant à un recul du trait de côte moyen de 3 à 5m et un maximum de l'ordre de 22m au niveau des plages du moulin Brûlé (commune Couarde-sur-Mer, Île de Ré) et de Sauveterre (commune Olonne-sur-Mer). Ces érosions ont créé un « falaisage » des dunes plus ou moins haut (Figure 9, Figure 10).



Figure 9 : Recul important de la dune avec falaisage (ancien tuyau d'AEP pour l'île d'Yeu, recul de l'ordre de 8 m, Saint-Jean-de-Monts)



Figure 10 : Ancien chemin d'accès à la plage suspendu de 4m (Saint-Jean-de-Monts)

4.2. IMPACTS DE L'ALEA

4.2.1. Introduction

Il ne s'agit pas ici de faire la liste exhaustive des impacts des aléas qui ont été observés au cours de cette mission mais à partir de quelques exemples d'illustrer la diversité et la complexité des impacts du tempête sur le littoral (population, infrastructures...).

L'analyse de ces impacts permet d'améliorer la connaissance sur les vulnérabilités des différents enjeux exposés (humains, bâti, infrastructure et réseaux) aux deux principaux aléas côtiers générés par les tempêtes c'est-à-dire l'érosion côtière et la submersion marine.

Les observations réalisées lors de cette mission montrent clairement que ces deux aléas peuvent se combiner et que les dégâts générés par l'érosion peuvent générer la submersion qui elle-même engendre d'autres dégâts.

Dans les paragraphes suivants, nous allons illustrer quelques catégories d'impact qui ont été constatés. Ces illustrations sont assorties d'un commentaire succinct décrivant les processus ayant conduit à ces impacts.

4.2.2. Dégâts sur terre agricoles : érosion, sables, eau de mer



Figure 11 : Dépôt de sable sur les terres agricoles consécutifs à la submersion à la Faute-sur-Mer

A noter la formation de rides de courant (ripple marks) indiquant une vitesse de courant significative lors du dépôts des sables.



Figure 12 : Inondation des zones agricoles

Cultures et champs inondés une semaine après la tempête (Saint-Michel-en-L'Herm)

4.2.3. Endommagements de digues



Figure 13 : Endommagement (formation de renards hydrauliques) de la digue de l'Aiguillon-sur-Mer

La digue de l'Aiguillon-sur-Mer a été fortement endommagée de plusieurs manières : altération de la couche superficielle de la digue elle-même, attaque au pied, destruction de l'enrobé de la route et création de « renards » hydrauliques.



Figure 14 : Endommagement de la jetée et de l'écluse de la Gachère (au sud de Brétignolles-sur-Mer) dû à l'action des vagues

4.2.4. Endommagements d'ouvrages côtiers



Figure 15 : Dommage sur ouvrage de front de mer.

Illustration de l'effet de la poussée des vagues sur une structure horizontale, déplacement des plaques de béton (Promenade de Saint-Gilles-Croix-de-Vie)

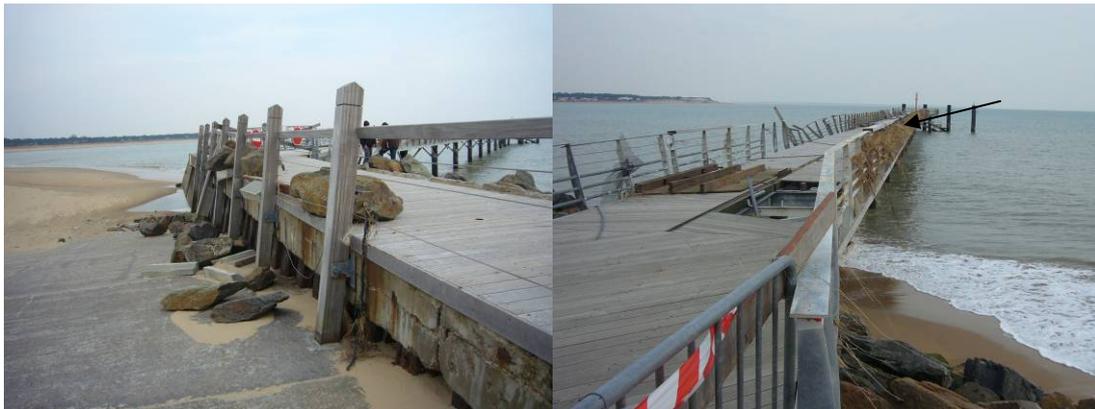


Figure 16 : Dommages sur un embarcadère

Projection de blocs d'enrochement de taille sub-métrique de part et d'autre de l'embarcadère par action directe des vagues (embarcadère de la Tranche-sur-Mer). A noter la hauteur de la laisse de mer sur les rambarde de l'embarcadère.



Figure 17: Dommages sur des structures portuaires (île de Ré, port de La Flotte).

On constate un débordement sur tous les ports de la zone provoquant la destruction de pontons et de bateaux ainsi que l'inondation des zones urbaines basses situées en arrière.

4.2.5. Brèches dans les dunes

Les rares brèches observées dans les dunes se sont produites majoritairement dans des zones où des chemins d'accès à la plage y avaient été créés pour y accéder. Seule la brèche de la Belle Henriette (La Faute-sur-Mer) s'est produite dans un contexte naturel. Cette brèche a permis une importante intrusion marine responsable de la dégradation de routes, d'inondation de lotissements et de campings ainsi que l'inondation et l'ensablement de terres agricoles.



Figure 18 : Brèche de la Belle Henriette (La Faute-sur-Mer)



Figure 19 : Photographie aérienne de la Brèche de la Belle Henriette à la Faute-sur-Mer (28/02/2010, Photo J.P. Bichon)



Figure 20 : Brèche dans la dune par élargissement durant Xynthia d'un sentier d'accès à la plage (La Faute-sur-Mer)

4.2.6. Dégâts sur les biens mobiliers



Intérieur d'une maison d'Aytré. A noter le niveau maximum de submersion atteint (2m environ)



Dans les zones submergées même à faible énergie, les dégâts concernent au minimum l'ensemble des biens mobiliers, les réseaux électriques, les isolants, les cloisons non porteuses...

Figure 21 : Dégradations du mobilier dans les maisons submergées à Charron

4.2.7. Endommagements de routes



Figure 22 : Endommagement de routes

Endommagement de la route lors de la submersion générée par la bréchification de la dune (Belle Henriette, la Faute-sur-Mer). Forte érosion et creusement en aval de la route avec mise à nue des réseaux.



Figure 23 : Destruction de route

Destruction de la route derrière la digue de l'Aiguillon lors de la phase de submersion (accélération du courant en arrière de la digue lors de la surverse)

4.2.8. Destruction du bâti

Différents niveaux d'endommagement sur le bâti ont été observés durant cette mission. Une typologie sommaire des dégâts est présentée ci-dessous :

- 1) Dégradation de l'aménagement intérieur des maisons (isolants, réseaux électrique) par imbibition et corrosion suite à des inondations prolongées,
- 2) Rupture des parties les plus fragiles tel que vitres, volets, vérandas, portes de garage... due soit à l'impact des vagues, à des objets flottant ou à la pression hydrostatique dans les zones soumises à une forte submersion,
- 3) Effondrement ou couchage des murets, clôture et portails limitant les parcelles et les propriétés par la pression et la vitesse du courant,
- 4) Arrachement ou desquamation de la couverture de surface d'un ouvrage ou d'un revêtement,

- 5) Déstabilisation des fondations par affouillement et sapes du terrain sous-jacent, création de mouvements différentiels. Endommagement pour l'ensemble de la construction.
- 6) Destruction complète de bâtiment de qualité de construction médiocre, en général par exposition directe aux vagues.



Figure 24 : Effondrement partiel d'une maison

Effondrement d'une extension de maison suite à un affouillement sous la fondation (L'Aiguillon-sur-Mer, hauteur d'inondation de 1,2 m environ)

Endommagements du bâti par érosion et affouillement



Endommagements sur les maisons en première ligne dus à l'érosion liée à l'action des vagues. Affouillement du terrain naturel sableux et déstabilisation des maçonneries, affouillement sous les fondations (La Tranche-sur-Mer).

Figure 25 : Impact de l'érosion et de l'affouillement sur le bâti

Endommagements du bâti par attaque des vagues



Figure 26 : Effet de l'attaque des vagues

Effondrement total d'une construction légère due à l'attaque directe des vagues (l'Aiguillon-sur-Mer en haut), destruction d'un mur en parpaing et de l'annexe d'un bâtiment par attaque frontale de vague (Boucholeurs au sud de Châtelailon-Plage)

Dégât sur exploitation ostréicoles et myticoles



Figure 27: Exemple de dégâts sur des exploitations ostréicoles (Boucholeurs au sud de Châtelailon-Plage)

5. Apport possible de la modélisation pour la prévision de la submersion marine

Les modèles numériques existants donnent de bons ordres de grandeur des niveaux extrêmes du plan d'eau et des vagues atteints pendant la tempête. Le système de prévision pré-opérationnel PREVIMER (www.previmer.org), développé par l'IFREMER avec le soutien d'autres organismes comme le BRGM, prévoyait ainsi dès la soirée du 26 février :

- des niveaux d'eau extrêmes supérieurs à 4m NGF en Vendée et en Charente-Maritime (Figure 28)
- et des vagues de 6 m de hauteur au large de ces mêmes côtes (Figure 29)

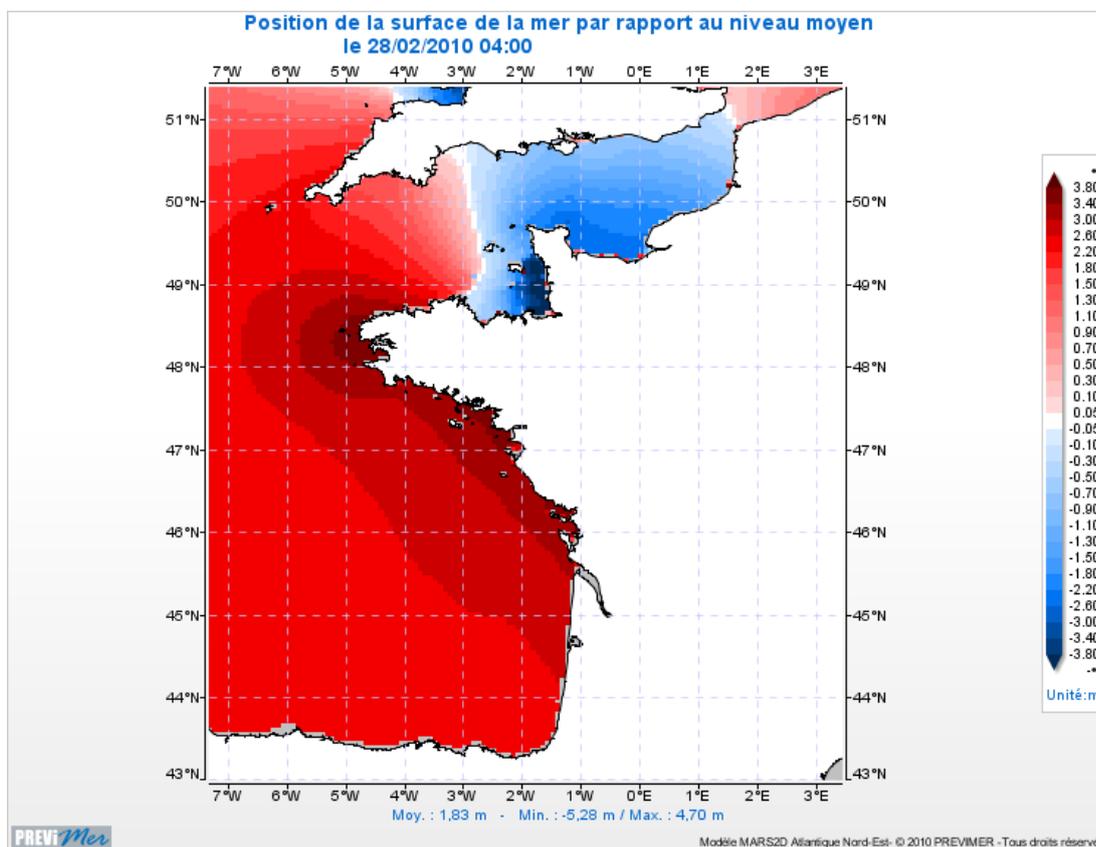


Figure 28 : Position de la surface de la mer par rapport au niveau moyen donné par PREVIMER le 28/02/2010 à 4H heure légale aux environs du pic de la tempête, (résolution spatiale de 5km).

Dans les environs de la Rochelle, il faut ajouter 40 cm pour avoir l'élévation maximale par rapport au repère IGN 69. Ces valeurs ne tiennent pas compte de la surcote générée par les vagues qui est à ajouter

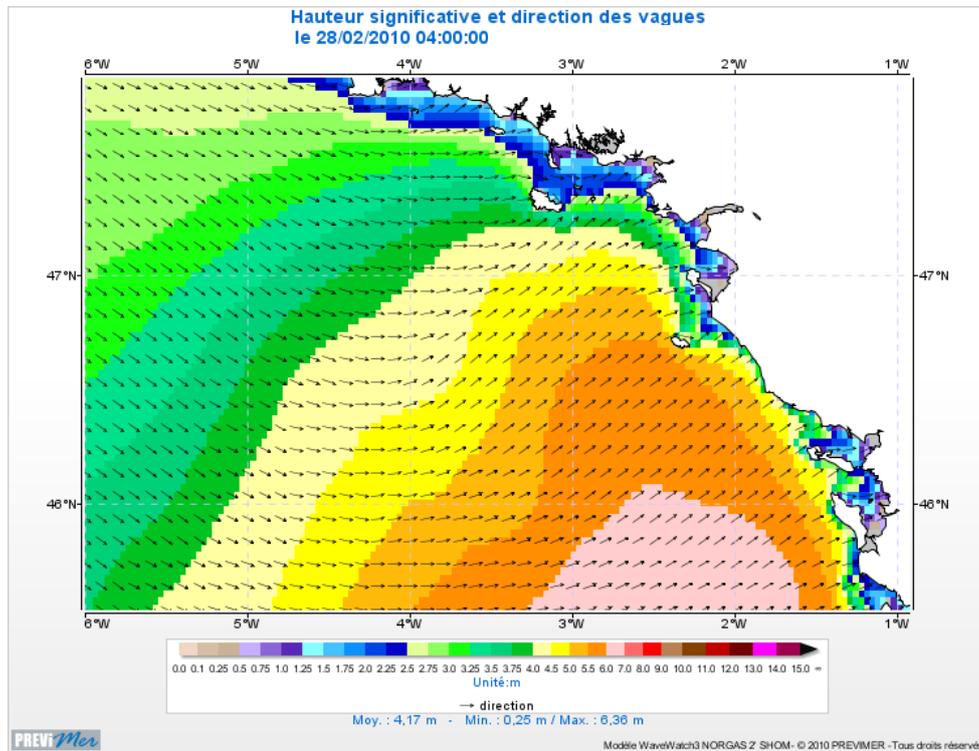


Figure 29 : Hauteur significative des vagues aux environs du pic de la tempête (résolution spatiale du modèle de 3 km environ) donnée par PREVIMER.

Ces modélisations PREVIMER souffrent, néanmoins, d'une faible résolution spatiale² (respectivement 5 et 3 km pour les niveaux d'eau et les vagues) rendant difficile la localisation des zones les plus exposées.

C'est pourquoi le BRGM a simulé l'événement Xynthia grâce à des modèles de plus haute résolution spatiale (200-300m) implantés sur le Pertuis Charentais dès 2006 dans le cadre de projets de recherche (Pedreros et al. 2007 ; Idier et al. 2010). Ces simulations ont été réalisées en parallèle de la mission de terrain avec les codes MARS (niveaux d'eau, développée par IFREMER, Lazure et Dumas 2007) et SWAN (propagation des vagues, développé par TU Delft, Booij et al. 2004).

- Les premiers résultats sont encourageants tant sur les niveaux d'eaux (Figure 30) que les vagues (Figure 31). Ils sont cohérents avec les mesures in-situ de niveaux d'eau (4.2 m et 4.5 m NGF calculés et observés respectivement à la Rochelle) et de vagues (4m et 3.6m de hauteur significative calculés et observés à l'houlgraphe de l'île d'Yeu). Ces résultats donnent accès à une vision bien plus détaillée des secteurs affectés

² Il existe des modèles PREVIMER de plus haute résolution (200-300m) sur d'autres secteurs des côtes françaises. Actuellement les côtes de Vendée et de Charente-Maritime en sont dépourvues.

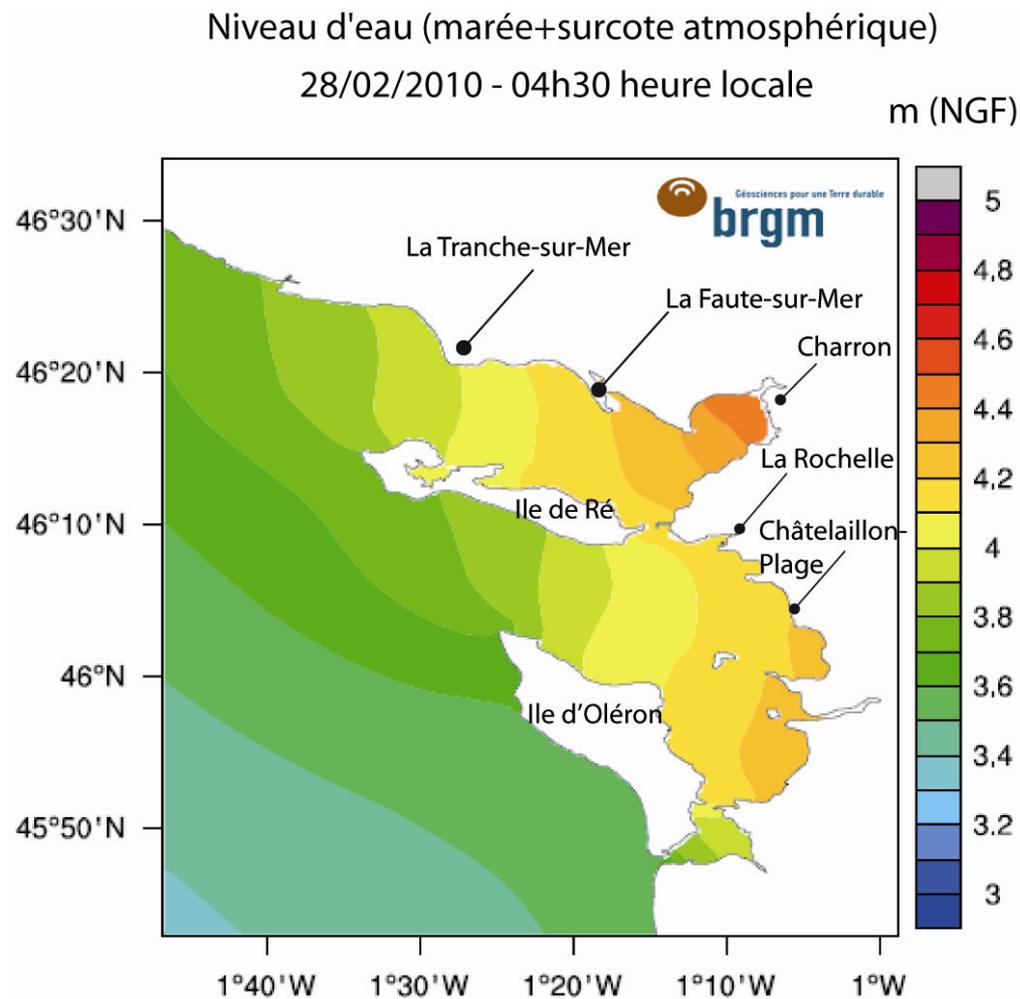


Figure 30 : Niveau d'eau (marée+surcote atmosphérique) le 28/02/2010 à 04h30 heure légale calculé à l'aide du code MARS forcé par les champs de vent GFS.

Pour comparaison, le niveau d'eau calculé au marégraphe de la Rochelle était de 4.2m NGF (contre 4.5m NGF observé). Ces résultats n'incluent pas de setup (surcote due aux vagues), qui peut s'élever à plusieurs dizaines de centimètres en eaux peu profondes. Les grilles bathymétriques ont été fournies par l'IFREMER.

Les simulations de champs de vagues réalisées avec le code SWAN indiquent par ailleurs que les vagues ont pu atteindre les 7m au large de l'île d'Oléron (Figure 31). La façade sud de l'île de Ré, la côte ouest de l'île d'Oléron et dans une moindre mesure la région de la Tranche-sur-Mer et le linéaire compris entre Châtelailon-Plage et La Rochelle semblent avoir été particulièrement exposés aux vagues.

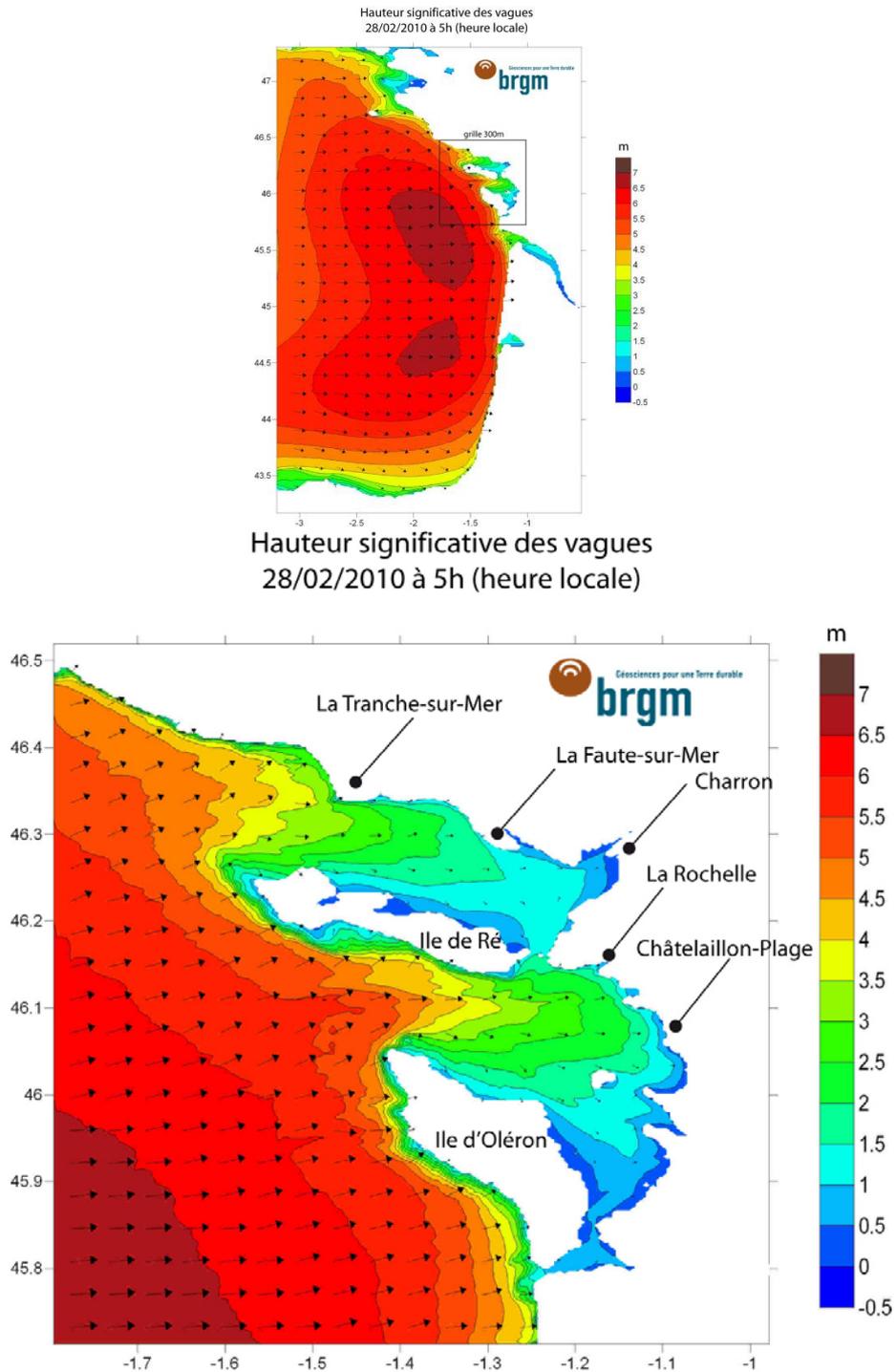


Figure 31 : Hauteurs significatives de vagues le 28/02/2010 à 5h (heure locale)

Les hauteurs significatives ont été obtenues avec le code SWAN forcé par les champs de vent GFS et les conditions de houle au large de la NOAA). En haut : grille bathymétrique de 1.5km de résolution. En bas : grille emboîtée de résolution 300m.

6. Conclusions et perspectives

Dans le cadre de ses activités de recherche (projet RISCOTE – RISR18, Littoral Aléas Côtiers), le BRGM a effectué une mission de terrain en collaboration avec l'ONF du 8 au 12 mars suite au passage de Xynthia (28 Février 2010). L'objectif étant de recueillir, avant que les traces ne soient effacées, des informations sur les évolutions morphologiques du littoral (érosion), les niveaux d'inondation maximum, les dégâts induits et les processus s'étant produits durant cette tempête.

La zone observée correspond à un linéaire côtier de l'ordre de **240 km** compris entre l'estuaire de la Loire au Nord et celui de la Gironde au Sud. **300 observations** géo-localisées ont été réalisées. Elles mettent en évidence des dégâts au sud du département de la **Loire Atlantique** (2 communes affectées), la **Vendée** (15 communes affectées) et la partie nord de la **Charente maritime** (16 communes affectées).

Les premières constatations montrent :

- **l'érosion de l'ensemble du cordon dunaire.** Le recul est en moyenne de 3 à 5 m avec des valeurs atteignant 22 m pour les secteurs les plus exposés aux vagues comme les plages du moulin Brûlé (commune Couarde-sur-Mer, Île de Ré) et de Sauveterre (commune Olonne-sur-Mer). D'une façon générale la dune a bien joué son rôle de « protection » (pas de sur-verse ni de brèche) à l'exception du secteur de la Belle Henriette (à proximité de la Faute-sur-Mer)
- **une submersion marine très importante :** la cote absolue dépasse par exemple 4.5 m NGF à Moutiers-en-Retz, Charron, la Faute-sur-Mer, L'Aiguillon-sur-Mer alors que le niveau extrême (période de retour centennale) estimé par le SHOM-Cetmef est inférieur à 4 m NGF. Cela est à l'origine de hauteurs de submersion pouvant atteindre près de 2,70 m (la Faute-sur-Mer)
- **en ce qui concerne le bâti :**
 - o les constructions subissant l'action directe des vagues (exemple au sud de Châtelailon-Plage) et/ou l'érosion (affouillement des fondations, exemple la Tranche-sur-Mer) ont subi d'importants dégâts. En général, ce sont les constructions avec des fondations sommaires et en maçonnerie qui sont les plus touchées.
 - o les installations ostréicoles et conchylicoles ont été particulièrement touchées du fait de leur proximité au rivage et de leur mode de construction légère
- **en ce qui concerne les infrastructures :**
 - o on constate un débordement sur tous les ports de la zone provoquant la destruction de pontons et de bateaux ainsi que l'inondation des zones urbaines basses situées en arrière
 - o les digues et les enrochements sont sous-dimensionnés par rapport à cet événement extrême, caractérisé par la conjonction d'un niveau d'eau élevé (marée à fort coefficient et surcote atmosphérique importante) avec de fortes houles (près de 7m de hauteur significative au large). Habituellement les vagues déferlent sur la partie basale large

- des digues et des ouvrages. Lors de cet événement, elles ont directement déferlé sur la partie haute et étroite entraînant leur « décapitation », des sur-verses et parfois leur bréçhification (exemple île de Ré) ou la formation de renards hydrauliques (digue de l'Aiguillon)
- **en ce qui concerne les réseaux routiers** : ils ont subi d'importants dégâts en front de mer mais aussi à l'intérieur des terres dans les zones submergées

Quant à l'apport de la modélisation numérique, on constate que le système de prévision pré-opérationnel PREVIMER (www.previmer.org), piloté par l'IFREMER, prévoyait dès la soirée du 26 février les bons ordres de grandeur des niveaux extrêmes du plan d'eau atteints pendant la tempête : plus de 4m NGF en Vendée et en Charente-Maritime. Néanmoins, ce système souffre pour ces côtes d'une faible résolution spatiale (respectivement 5 et 3 km pour les niveaux d'eau et les vagues) rendant difficile la localisation des zones les plus exposées.

C'est pourquoi le BRGM a simulé l'événement Xynthia grâce à des modèles de plus haute résolution spatiale (200-300m) implantés sur le Pertuis Charentais dès 2006 dans le cadre de projets de recherche. Les premières simulations, réalisées en parallèle de la mission de terrain avec les codes MARS et SWAN, sont encourageantes car elles sont cohérentes avec les mesures in-situ de niveaux d'eau et de vagues. Elles donnent de surcroît une vision bien plus détaillée des secteurs affectés.

Perspectives

Suite aux observations réalisées lors de cette mission, les améliorations suivantes pourraient être réalisées pour mieux évaluer l'aléa et la vulnérabilité.

1) Aléas

Les pistes pour mieux caractériser l'aléa sont variées et complémentaires :

Prévision

L'ensemble des modèles actuels de prévision des surcotes ont tendance à sous-estimer les niveaux d'eau. Ils ne tiennent pas compte en particulier de la surcote associée aux vagues. Des modèles plus fins tenant compte des interactions entre houle, marées et surcotes devraient rendre ces outils plus adaptés pour la prévention des risques à l'échelle régionale. Des améliorations en ce sens devraient être apportées prochainement au modèle PREVIMER, sous l'impulsion de l'IFREMER et du BRGM notamment.

Modélisation fine de la submersion

Les approches développées en France pour caractériser l'aléa submersion marine sont souvent relativement simplistes. Elles consistent en général à croiser un niveau

extrême de référence avec des données topographiques. Des modèles plus élaborés existants capables de simuler l'ensemble des processus dynamiques associés à la submersion (propagation des vagues près des côtes, franchissement des systèmes de défenses, naturels ou artificiels, simulation de l'inondation en tenant compte de la présence de brèches, etc.) devraient permettre d'évaluer l'aléa de manière plus réaliste à l'échelle locale. De tels modèles permettraient en outre de cartographier les vitesses de courant atteintes au cours de l'inondation lors du passage de Xynthia. Ceci serait une aide précieuse pour la construction de fonctions d'endommagement aux infrastructures et au bâti intégrant le paramètre vitesse.

Modèle numérique de terrain

L'existence de MNT plus précis que celui de l'IGN (résolution spatiale de 50 m et précision en z plurimétrique) tel que le MNT InterMap NextMap5 (résolution spatiale de 5m et précision en z métrique) sur l'ensemble de la côte permettrait de caractériser plus finement les zones soumises à un aléa submersion marine. La démarche d'acquisition de MNT à très haute résolution, déjà engagée par le programme LITTO3D, s'avère primordiale pour la prévention du risque submersion marine. Ces MNT à très haute résolution (résolution spatiale de 1 à 2m, précision en Z décimétrique) permettront de réaliser des évaluations beaucoup plus précises de l'aléa submersion marine.

Base de données sur les ouvrages de défense

Afin de mieux évaluer la résistance des protections contre la submersion à des événements tempétueux, la création d'une base de données sur les ouvrages de défense contre la submersion serait à réaliser à l'échelle nationale. Cette base de données devra fournir une typologie de la construction de chaque ouvrage ou segment d'ouvrage (notamment mode de construction, nature et spécificité du substrat naturel sur lequel elle est construite, modifications et réparations effectuée dans le passé) ainsi qu'une description actualisée de son état.

Les protections naturelles contre l'aléa submersion marine

Il serait utile d'améliorer les connaissances sur le rôle et la résilience des protections naturelles (cordons dunaires, plages, etc.) à la submersion marine. Une rétro-analyse des événements sur plusieurs cas permettrait de mieux discerner les processus ayant conduit soit à la résilience soit à la rupture de ces systèmes (analyse événementielle). Ensuite, une analyse fine et géo-référencée des protections naturelles (tel que les dunes) sur l'ensemble du littoral serait à réaliser. Elle permettrait d'identifier leurs points faibles :

- naturels (faible élévation et largeur de dune, tracé d'anciennes embouchures de rivières, etc.)
- du à l'intervention humaine (tel que la création de chemins et d'accès à travers les dunes susceptibles de favoriser leur bréchification lors d'événements extrêmes).

2) Vulnérabilité

Lors de la tempête Xynthia, deux aléas conjoints ont été responsables de dommages :

- la submersion marine.
- l'érosion

Les données récoltées dans le cadre de cette mission pourront aider à la construction de fonctions d'endommagement du bâti spécifique à la submersion marine. Ces fonctions servent à estimer un niveau de dégât pour un niveau d'aléa donné. Dans le cas de la submersion marine l'aléa est souvent caractérisé par l'hauteur d'eau maximale sans prendre en compte la vitesse des écoulements ni la durée d'inondation. Nous avons pu observer de nombreux exemples de bâtiments soumis à une très grande hauteur d'eau sans présenter des dégâts structuraux significatifs. Par contre, d'autres bâtiments ont subi un fort endommagement dû à leur sapement dans des zones avec des hauteurs d'eau plus limitées mais avec des vitesses d'écoulement plus élevées. Ceci met en évidence le rôle majeur de la vitesse d'écoulement sur les dommages subit par le bâti. Malheureusement après l'événement, seules les hauteurs d'eau maximales sont mesurables. Par contre, les simulations numériques à haute résolution de l'inondation (mailles de l'ordre de 2 à 5 m) permettent d'estimer les vitesses de courant. Elles permettront d'aider à construire ces fonctions d'endommagement en intégrant le paramètre vitesse.

L'érosion, dans les zones bâties sur substrat sableux, aboutit très fréquemment au creusement du terrain sous les fondations. Dans la plupart des cas observés, les fondations sont trop sommaires et pas du tout conçues pour résister à ce genre d'agression ce qui occasionne une déstabilisation de l'ensemble de l'édifice. L'érosion et le recul du trait de côte en milieu urbanisé, qui dans certains cas n'a impacté que les propriétés sans atteindre vraiment les habitations, rend ces bâtiments plus vulnérables face à un futur événement tempétueux. En effet, le rôle tampon joué par les sables dunaires ne sera plus présent, la durée de vie de l'édifice s'en trouve fortement réduite. De surcroit, les sables ont pris, suite à cet épisode érosif, un profil très pentu (« falaisage ») qui est instable. La récupération de la pente naturelle de ces sables pourrait provoquer des déplacements différentiels en arrière du front d'érosion au niveau des fondations et par conséquent des dommages sur l'ensemble de la structure.

7. Références bibliographiques

Booij, N., Haagsma IJ.G.; Holthuijsen L.H.; Kieftenburg, A.T.M.M.; Ris, R.C.; Van der Westhuysen A.J. and Zijlema M., 2004. *Swan Cycle III version 40.41. User's Manual*, 115p.

Idier D., E. Romieu, R. Pedreros and C. Oliveros, A simple method to analyse non-cohesive sediment mobility in a coastal environment (2010). *Continental Shelf Research*(2010),doi:10.1016/j.csr.2009.12.006

Lazure, P., et F. Dumas, An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical Model for Applications at Regional Scale (MARS3D) 2007. *Advances in water Ressources*, 2007, Volume 31, 233-250.

Pedreros R., Bruneau N., Bonneton P. Dumas F. Simulation of nearshore dynamics by coupling of the models SWAN and MARS (2007). *WOO2007 and GLOBWAVE workshop*, September, Brest. Septembre 2007.

Simon, B. (2008). Statistiques des niveaux marins extrêmes de pleine mer Manche et Atlantique. CD-ROM. ISBN: 978-2-11-098357-2, référence CETMEF: C 08-05.

8. Annexe

Références BRGM sur le thème des risques naturels côtiers

Détermination des surcotes engendrées par les houles cycloniques en Polynésie française (ARAI 1)

Année : 2006

Client : Service de l'Aménagement et de l'Urbanisme du territoire de la Polynésie Française

Description : Cette action s'inscrit dans le projet de "cartographie de l'aléa cyclonique" du programme d'études et de prévention des risques naturels "ARAI". Pour cette étude, différentes méthodes employées pour calculer les surcotes induites par les houles (lois empiriques, modèles numériques) sont comparées. Le modèle SWAN est choisi au profit d'un couplage REFDIF-SHORECIRC, car il apparaît robuste pour être appliqué en Polynésie française.

Plusieurs sites sont choisis pour la mise en place du modèle SWAN (propagation houles à la côte) afin d'évaluer les surcotes engendrées par les houles cycloniques en Polynésie. Afin d'estimer la consistance des résultats, des tests de sensibilité ont été effectués en tenant en compte de la résolution spatiale du maillage, de l'étalement directionnel, du frottement au fond et de l'angle d'incidence de la houle.

Caractérisation de la submersion marine liée aux houles cycloniques en Polynésie française (ARAI 2)

Année : 2009-2010

Client : Service de l'Aménagement et de l'Urbanisme du territoire de la Polynésie Française

Partenaires : Université de Montpellier

Description : sur 10 sites des Tuamotu la submersion marine occasionnée par la houle cyclonique est étudiée afin de mieux définir les zones inconstructibles et constructibles. Une modélisation numérique détaillée (processus de déferlement, jet de rive et inondation) est mise en place, sur un profil pour 9 des sites et en 3D sur le dernier. Les différents résultats seront communiqués sous forme de couche SIG compatible avec le système utilisé au service de l'Urbanisme.

BOSCO : Base nationale d'Observation pour le Suivi du trait de Côte

Année : depuis 1999

Client : Ministère de l'équipement

Partenaires : CETMEF (Centre d'Etudes Maritimes et Fluviales – Ministère de l'Équipement)

Description : en partenariat avec le CETMEF, le BRGM a développé la base nationale d'informations BOSCO sur l'évolution du trait de côte et la lutte contre l'érosion littorale, à

destination des Administrations de l'Etat, des Collectivités Territoriales, des Etablissements Publics, des Instances de Recherche Scientifique et Technique et des Bureaux d'Etudes. Cette base de données et métadonnées sur le trait de côte en France (Métropole et DOM-TOM) est consultable sur internet.

Site internet : <http://www.bosco.tm.fr>

Caractérisation de la faible mobilité des sables dans les pertuis Charentais (gestion sédimentaire)

Année : 2002-2006

Client : Programme interne

Partenaires : DGO (Université de Bordeaux 1), CLDG (Université de La rochelle) ; IGAL (Cergy-Pontoise), SHOM, Université d'Angers

Description : Ce projet de recherche mené par le BRGM s'effectue dans le Pertuis Charentais par une approche multi-critères : mesures hydrodynamiques (houle, courant, marée), sismique haute-résolution, modélisation, étude de la micro et macro-faune. Le BRGM réalise des travaux de modélisation de la houle, des courants de marée, et des courants de houle (logiciels utilisés : MARS, SWAN, REFLUX).

Caractérisation des impacts de la houle sur le littoral de la Guadeloupe au passage de l'ouragan Dean

Année : 2007 - 2008

Client : DIREN de Guadeloupe

Description : L'objectif est de caractériser, après implantation du modèle SWAN sur l'archipel de la Guadeloupe, les vagues (hauteur et direction) et l'élévation du niveau de la mer le long des côtes de l'archipel lors du passage de l'ouragan Dean. Une campagne de terrain, effectuée quelques semaines après l'évènement, a permis de relever les impacts sur les zones littorales les plus affectées et de confronter les résultats du modèle aux observations.

Détermination de l'évolution hydrodynamique des zones littorales grâce au couplage de modules existants de houle et de courants

Année : 2006, Stage de fin d'étude au BRGM

Description : L'objectif de cette étude est de développer une interface couplant un module de houle (SWAN) et un module de courants (SHORECIRC) afin de simuler l'évolution hydrodynamique des zones sédimentaires à l'échelle de la plage et sur une échelle temporelle de quelques semaines.

Dynamique sédimentaire en milieu corallien à l'île de la Réunion

Année : 2002-2003

Client : DIREN, Conseil Régional de la Réunion

Partenaires : université de la Réunion (LSTUR), université de Perpignan (GDARGO)

Description : Cette étude méthodologique, coordonnée par le BRGM, a pour objet d'aboutir à une meilleure connaissance de la dynamique sédimentaire des plages coralliennes. La connaissance de la morpho-sédimentologie des lagons (mission bathymétrique et sismique, profils de plages) a permis de faire une typologie des plages ainsi qu'un diagnostic des causes d'érosion des plages et une estimation de leur degré de fragilité.

Erosion hazard of sandy coasts in a changing climate

Année : 2008-2011

Client : thèse financée par AXA Research Fund

Partenaires : co-encadrement BRGM - CNRM

Description : L'objectif est d'améliorer la connaissance des tendances d'érosion/accrétion des plages sableuses d'ici à 2100, dans le contexte du changement climatique et en prenant en compte les événements climatiques extrêmes. Le travail de recherche fera le lien entre les modèles climatiques globaux (Arpège-Climat) et les modèles morphodynamiques côtiers (XBeach, etc.) et se focalisera sur la côte Aquitaine et sur un site plus localisé, la plage du Truc Vert. Grâce à une technique de régionalisation dynamique (par l'emboîtement des modèles de vagues WaveWatch3 et SWAN de l'Atlantique Nord à la côte Aquitaine). Ce forçage permettra de modéliser les vagues, les courants, et le transport sédimentaire sur la côte, et de déduire les évolutions possibles de la côte Aquitaine et de la plage du Truc Vert.

EUROSION

Année : 2002 – 2004

Client : Union Européenne (DG Environnement)

Partenaires : RIKZ, EUCC, IGN France International, Université de Barcelone, EADS, IFEN.

Description : L'objectif est l'analyse de l'érosion du trait de côte à l'échelle européenne.

Ce projet comprend (1) un SIG à l'échelle du 1/100000 sur la capitalisation de la connaissance sur l'érosion côtière pour toute l'Union Européenne, (2) une revue des pratiques existantes et d'expériences concernant la gestion de l'érosion côtière au niveau local et régional, (3) une liste de recommandations pour mieux incorporer les questions liées à l'érosion côtière dans les

procédures d'études environnementales et d'aménagement du territoire, (4) une liste des recommandations d'ordre politique pour améliorer la gestion de l'érosion côtière dans le futur, au niveau local, régional, national et européen. Le BRGM, membre du consortium, est impliqué dans les différents aspects du projet et élabore les couches d'information SIG concernant la morphologie, la géologie des côtes, les tendances d'évolution (érosion, accrétion, stabilité) et la présence d'ouvrages de défense côtière. Il met également au point et calcule différents indicateurs à partir de ces données.

Site internet : <http://www.euroSION.org/>

Evolution du trait de côte de l'île de la Réunion de 1950 à 1997

Année : 2002-2003

Client : Conseil Régional de la Réunion

Description : le géoréférencement et l'analyse des clichés aériens multi-dates a permis de quantifier l'évolution du trait de côte de 1950 à 1997 dans les secteurs de la baie de La Possession à l'embouchure de l'étang de Saint-Paul et des plaines des rivières Saint-Etienne – Pierrefonds et du Mât.

Etude morphodynamique des littoraux de Mayotte – Phase 1

Année : 2003-2004

Client : Collectivité Départementale de Mayotte

Description : Synthèse des connaissances sur les littoraux mahorais. Proposition d'une typologie et une cartographie des différentes formes littorales. Etude des tendances d'évolution (érosion, stabilité, accrétion).

Etude morphodynamique des littoraux de Mayotte – Phase 2

Année : 2005-2006

Client : Collectivité Départementale de Mayotte

Description : Estimation quantitative de l'érosion côtière historique et actuelle sur un réseau atelier de 14 sites sensibles du littoral mahorais.

Houle cyclonique Mayotte

Année : 2007

Client : Direction de l'Équipement de Mayotte

Description : Modélisation de l'élévation du niveau de la mer liée à la houle (hauteur de vague et surcote) arrivant sur le récif-barrière et dans le lagon de Mayotte, pour différents cas de cyclones (de faible et forte intensité). Utilisation du modèle SWAN.

Hydrodynamique et Risques falaises de la Côte Basque

Année : 2002-2006

Client : Région Aquitaine - Observatoire de la côte aquitaine (Contrat Plan Etat-Région)

Partenaires : DGO (Université de Bordeaux 1), LASAGEC (Université de Pau et des

Pays de l'Adour)

Description : Observations in-situ et modélisation de l'hydrodynamique de la Côte Basque. Le BRGM réalise la modélisation de la houle (logiciel SWAN) et des courants de marée (logiciel MARS), pour des conditions moyennes annuelles et des scénarii typiques de tempêtes et évaluation des surcotes. Sur les falaises : établissement d'une typologie des instabilités ; étude historique des travaux de confortement des falaises et de protection contre l'érosion du trait de côte ; cartographie de l'aléa instabilités (glissements, effondrements...) et catalogue des parades techniques pour stabiliser les falaises ou ralentir leur évolution. Des instrumentations de sites sont également mises en œuvre (auscultation géophysique).

MICORE

Année : 2008 – 2011

Client : Commission Européenne (projet FP7 DG Recherche)

Partenaires : Consorzio Ferrara Ricerche-University of Ferrara Italy (coordinateur) et 13 partenaires Européens.

Description : Le projet contribue au développement d'une cartographie probabiliste sur l'impact morphologique des tempêtes marines. Un examen des tempêtes historiques qui ont eu un impact significatif est entrepris sur les neuf emplacements choisis selon l'exposition aux vagues, le régime de marée et les pressions socio-économiques. Deux modèles morphodynamiques (XBeach et MARSOUIN) sont mis en place et comparés suite à des mesures sur la plage de Sète en période hivernale. L'objectif est de développer un démonstrateur à Sète pour prévoir les risques de tempête, de submersion et d'érosion marine.

MISEEVA

Année : 2008 - 2011

Client : Agence Nationale de la Recherche (ANR)

Partenaires : EPOC, SOGREAH, Institut Mers du Nord, UMR Ville Mobilité Transport, LAMETA

Description : Le but de ce projet est d'étudier, à court et moyen terme (2030, 2100) la vulnérabilité côtière à l'aléa submersion marine et celle de la vulnérabilité sociale, économique et environnementale à 2 échelles spatiales (régionale et locale).

Cet aléa sera défini au travers d'une plate forme de modélisation, en intégrant ses différentes composantes (élévation du niveau de la mer, surcote atmosphérique, vagues, set-up, run-up,...), pour définir les seuils d'inondation et l'étendue spatiale et temporelle de celle-ci. Plusieurs modèles (Marsouin, XBeach) sont mis en place, aux échelles régionales et locales, afin de répondre aux objectifs de gestion intégrée du trait de côte en Languedoc Roussillon.

Modélisation courantologique du lagon de Mayotte

Année : 2007 - 2008

Client : Direction de l'Agriculture et de la Forêt et Collectivité Départementale de Mayotte

Description : Modélisation numérique 2DH de la courantologie de l'ensemble du lagon de Mayotte, basée sur des paramètres de marée et de vent. La modélisation s'est fondée sur l'utilisation du modèle MARS_2DH, la validation étant faite à partir des données existantes et d'une importante campagne de mesure réalisée en novembre et décembre 2007.

Le modèle permet de représenter l'hydrodynamique générale du lagon, avec une prédiction des cotes de surface libre (niveau d'eau) et une estimation qualitative fiable des circulations dans le lagon. Six scénarios typiques ont été simulés afin de représenter le rôle de la marée (en mortes et vives eaux) et du vent de mousson (Nord-ouest) et d'alizé (Sud) sur la circulation des eaux lagunaires.

Modélisation morphodynamique des plages sableuses

Année : 2005-2008

Client : thèse financée par BRGM dans le cadre de ses activités de R&D

Partenaires : en cotutelle avec l'UMR 5805 EPOC (univ. Bordeaux 1) et en collaboration avec l'IFREMER

Description : Création d'une plateforme de modélisation morphodynamique capable de déterminer le transport sédimentaire et l'évolution 3D des plages sableuses à l'échelle annuelle. Cette plateforme de modélisation numérique repose sur le couplage des modules hydrodynamiques SWAN (Université de Delft, Pays-Bas) pour la houle, et de MARS (Ifremer) pour les courants, et l'utilisation de la méthode de couplage morphodynamique mise en œuvre à l'UMR EPOC.

Cette plateforme de modélisation a été validée grâce aux données de la plage du Truc Vert-Gironde (campagnes PNEC – ART7, ECORS 2008) ainsi qu'à campagne de mesures (hydrodynamique et transport sédimentaire) qui a été effectuée sur la plage de Biscarosse dans le cadre de la thèse.

Modélisation morphodynamique du domaine côtier (MODLIT)

Année : 2007 - 2010

Client : SHOM

Partenaires : Delft Hydraulics (Pays-Bas), ECM, Ifremer, LEGEM, LEGI, EPOC, Géosciences Montpellier, PUC (Chili)

Description : La présente étude vise à développer les approches de modélisation physique et numérique. Un effort particulier est mis en œuvre pour mieux comprendre le comportement des barres sableuses, en particulier à partir d'expériences de laboratoire novatrices. Le développement de la modélisation numérique s'appuie sur les résultats de ces expériences de laboratoire, mais aussi sur 4 séries de mesures conduites par l'équipe projet dans le cadre d'autres programmes. L'objectif final, suite au développement et aux inter-comparaisons de 4 modèles morphodynamiques (XBeach, Marsouin, Morphodyn, Delft3D), est d'aboutir à un modèle capable de simuler à la fois la formation et la destruction des structures tridimensionnelles sableuses et leur migration à la fois perpendiculairement et parallèlement à la côte.

Opérationnalisation de modèles hydrodynamiques régionaux (projet PREVIMER)

Année : 2006

Client : Ifremer

Description Dans le cadre du projet PREVIMER (Océanographie Côtière Opérationnelle), l'Ifremer souhaite mettre en conditions opérationnelles trois modèles hydrodynamiques régionaux 2D : littoral Normand, Bretagne Nord et Bassin d'Arcachon. Afin de garantir une utilisation ultérieure possible pour des calculs de trajectoires ou de dispersion, les modèles en fonctionnement opérationnel devront sauvegarder les résultats à très haute fréquence. Ces modèles sont basés sur le logiciel MARS, développé par l'Ifremer.

Site internet <http://www.previmer.org/>

PNEC chantier Façade Atlantique

Année : 2004-2008

Client : EC2CO

Partenaires : IFREMER et 20 laboratoires de recherche côtiers

Description : ce projet traite des modes de fonctionnement des systèmes fermés du littoral atlantique : Marennes Oléron et Bassin d'Arcachon. Le BRGM intervient dans le Thème 1 « Forçages hydrodynamiques et dynamique sédimentaire » et plus particulièrement dans la caractérisation des agitations (à l'aide de SWAN) et la prise en compte de ces agitations dans la circulation hydrodynamique de ces environnements (à l'aide de MARS).

Système d'information géographique sur les risques côtiers à Sri Lanka (SIIRM)

Année : 2005-2007

Client : Ministère des Affaires Etrangères

Partenaires : Geological Survey & Mines Bureau (LK), Survey Department (LK), National Aquatic Resource Administration (LK)

Description : Dans le cadre de l'aide française post-tsunami (DIPT) un SIG multi-aléas côtiers sur un site pilote du Sri Lanka (district de Galle, 80 km de côte) a été mis en place. Sa mise en œuvre a été réalisée par une modélisation des aléas (SWAN et GEOWAVE pour le tsunami), des mesure et des levés de terrain, et l'établissement de scénario de risque tsunami. Le produit final rend compte de la cartographie des aléas actuels (tsunami, érosion côtière, submersion marine) et futurs en tenant compte du changement climatique (submersion marine en 2100).

Approche multi-aléas risques côtiers et inondation des provinces Sud et Est de Sri Lanka

Année : 2008-2009

Client : Groupe-FIT MEMORIS- SIIRM project (Spatial Information Infrastructure for Reconstruction Monitoring)

Partenaires : CREOCEAN

Description : L'objectif de cette étude est d'analyser, d'évaluer et d'intégrer des aléas naturels (submersion marine actuelle et en 2060, érosion côtière, submersion marine et inondation) dans le SIG du projet SIIRM (couvrant les provinces Sud et Est de Sri Lanka (550 km, 15 000 km²). Une modélisation multi-aléa est entreprise, à l'aide de modèles numériques (SWAN et MARS) et empiriques (CYCLO, un modèle paramétrique de génération des champs de vent et de pression cycloniques) pour définir les risques liés aux tsunamis, aux submersions marines (actuelles et en 2060) et à l'érosion côtière.

L'intégration de ces risques dans le SIG SIIRM permet une analyse croisée des aléas, des enjeux et des territoires exposés.

VULSACO

Année : 2007 – 2010

Client : Agence Nationale de la Recherche (ANR)

Partenaires : Universités Bordeaux, Côte d'opale, Perpignan, Grenoble, Nantes, BRL Ingénierie, Institut Symolg de France

Description : L'objectif du projet est : (1) identifier et estimer, sur les côtes sableuses basses, les indicateurs de la vulnérabilité physique (érosion et submersion marine) à court terme (tempête) et moyen terme (2030) ; (2) identifier l'influence de l'occupation humaine du littoral sur cette vulnérabilité. Quatre sites sont étudiés, constitués de plages sableuses linéaires et basses, avec des environnements hydrodynamiques et des contextes socio-économiques variés (Sète, Nord Cap Ferret, Noirmoutiers et Dunkerque). Plusieurs modèles sont utilisés pour évaluer les tendances d'érosion à court terme (XBeach, Marsouin, Morphodyn, Telemac, morpho60, morpho55) et à long terme (Genesis, 1Dmorpho). En s'appuyant sur des données de terrain et des résultats de modélisations numériques, il s'agit d'établir une caractérisation physique et socio-économique, de rassembler, compléter et analyser les données sur les tendances actuelles et futures d'évolution du site.



**Centre scientifique et technique
Service RNSC/RIC**

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34

