

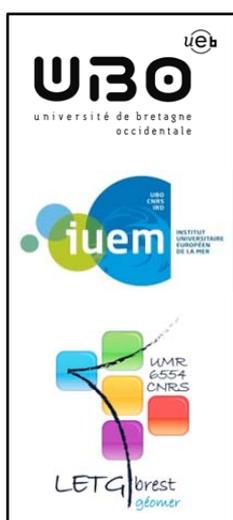
Document public



# Projet JOHANNA : Analyse des processus de dommages liés aux submersions marines et aux effets des vagues. Application aux tempêtes Johanna et Xynthia.

Rapport final du projet

BRGM/RP-62997-FR  
Février 2014





Document public

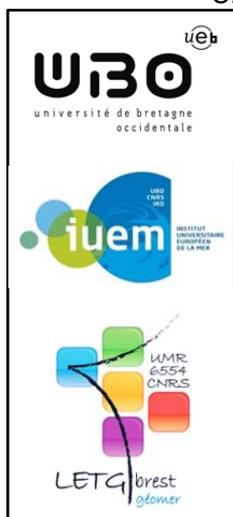
# Projet JOHANNA : Analyse des processus de dommages liés aux submersions marines et aux effets des vagues. Application aux tempêtes Johanna et Xynthia

## Rapport final du projet

BRGM/RP-62997-FR  
Février 2014

Étude réalisée dans le cadre des projets de Recherche du BRGM RIS24

C. Vinchon<sup>1</sup>, C. André<sup>1,2</sup>, C. Meur-Ferec<sup>2</sup>, S. Le Roy<sup>1</sup>, D. Monfort-Climent<sup>1</sup>, M. Bouzit<sup>1</sup> et R. Pedreros<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> BRGM, <sup>2</sup> GEOMER (UBO)



### Vérificateur :

Nom : D. Idier

Date : 17/02/14

Signature :

### Approbateur :

Nom : J.-L. Foucher

Directeur de DRP

17/02/14

Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.



## Avertissement

*Ce document est l'un des livrables finaux du contrat entre la Fondation MAIF, l'UBO et le BRGM (UBO2010-02, BRGM DEF/DJ2010-115MG) pour la réalisation du projet JOHANNA.. Il est associé à au rapport contractuel de valorisation du projet (RP63166).*

**Mots clés** : Tempêtes, Submersion marine, Dommages assurés, Modélisation aléa, Modélisation économique, Données assurantielles, Prévention, Prédiction.

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

**C. Vinchon, C. André, C. Meur-Ferec, S. Le Roy, D. Monfort-Climent, M. Bouzit et R. Pedreros (2014)** - Projet JOHANNA : Analyse des processus de dommages liés aux submersions marines et aux effets des vagues. Application aux tempêtes Johanna et Xynthia Rapport final du projet. Rapport BRGM/RP-62997-FR, 53 p., 19 fig., 4 tab.,

© BRGM, 2014, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

Le présent rapport est le rapport final du projet JOHANNA. Ce projet, réalisé entre 2010 et 2013 par le BRGM et l'UBO, avec l'appui de la thèse de doctorat (C.André, 2013) a été cofinancé par la Fondation Recherche de la MAIF et le BRGM. Il avait pour objectif d'analyser les processus de dommages liés aux submersions marines induites par les surcotes de tempêtes et à l'effet des vagues. Ce travail s'est fait à partir de l'étude des événements de tempête Johanna (10 mars 2008) et Xynthia (28 février 2010). Ces travaux ont été rendus possibles grâce à la mise à disposition de données d'assurance issues de la MAIF, d'AXA et de la MAAF.

L'analyse des processus de dommages a nécessité d'appréhender les processus de forçages liés à la tempête (vent, pression atmosphérique, vagues), combinés à une marée importante générant l'élévation du niveau de la mer ainsi que les processus de submersion et de chocs en façade induits par cette surcote et par les vagues. Cette analyse a permis de mettre en place des indicateurs de forçage et d'aléa, à l'échelle régionale. La modélisation dynamique de la submersion, à l'échelle locale, pour chacune des tempêtes, mets en avant un processus de franchissement par paquets de mer, sur la commune de Gâvres, lors de la tempête Johanna, et un processus de débordement sur le site des Bouchôleurs (communes de Châtelailon-Plage et d'Yves) lors de la tempête Xynthia. Ces processus sont fortement dépendants de la configuration locale du littoral (pente d'avant côte, protection, topographie d'arrière côte) mais aussi des conditions de forçage (hauteur et période des vagues, surimposition de la marée et de la surcote atmosphérique,...).

Les dommages, grâce à l'accessibilité de données d'assurance sur les sinistres induits par la submersion et le choc des vagues lors des événements Johanna et Xynthia, ont été analysés parallèlement, et complétées par les données de la modélisation et les informations publiques et administratives de type INSEE. Dans le cadre des travaux de thèse de C. André (2013), les dommages sont décrits en termes de processus et de coût, avec l'objectif de définir quels paramètres liés aux aléas et/ou aux enjeux exposés influencent le coût des dommages. À partir de cette analyse empirique *ex post*, différents tests statistiques et modèles ont été développés pour établir une fonction d'endommagement de l'enjeu habitat pour ce type d'événement.

Cette analyse économique des dommages permet de souligner que l'essentiel des coûts concerne le second œuvre des bâtiments, des habitations récentes, et sont liés à l'inondation par l'eau de mer ; les dommages liés aux chocs de façade par les vagues sont rares, mais plus onéreux, touchant éventuellement la structure de l'habitat. L'analyse des données d'expertise et d'indemnisation, complétées par les données de retour d'expérience, des données INSEE et IGN sur les enjeux exposés, puis croisées avec les indicateurs et les modélisations de l'aléa, a permis de comprendre les processus et d'identifier les paramètres de l'aléa et des enjeux qui expliquent le mieux les coûts des dommages : il s'agit de la hauteur d'eau, mais également de la surface au sol et du nombre de pièces en rez-de-chaussée.

À partir de ces résultats ont été testés des modèles empiriques de prédiction *ex ante* des coûts (modèles univariés et multivariés). Cette approche a permis d'évaluer l'apport des données d'assurance pour la réalisation de tels modèles et de formuler des recommandations pour les rendre opérationnels.

En conclusion du rapport, le bilan des travaux apporte des lignes directrices pour enrichir les données, tant par une standardisation de leur acquisition et par un travail complémentaire sur

des événements passés ou à venir. Une meilleure quantification des coûts des dommages, et leur modélisation, grâce à des données améliorées pourra également soutenir les analyses coûts bénéfiques des futurs projets d'aménagement en zone de risque de submersion, comme c'est déjà la règle dans les Programmes d'actions de prévention des inondations (au sens large) (PAPI) mis en place dans le cadre de la Directive Inondation (2007/60/CE). L'analyse des dommages permet aussi d'émettre des recommandations en terme de protection individuelle et d'urbanisation.

## Remerciements

L'édition de ce rapport est l'occasion de remercier tous ceux qui d'une manière ou d'une autre ont participé au projet Johanna. En premier lieu, il convient de remercier la Fondation MAIF (P. Guillot, H. Oliviero, puis M. Rigolot) qui a subventionné le projet et permis la réalisation de la thèse de Camille André, ainsi que la Direction de la Recherche du BRGM et l'université de Bretagne occidentale, qui ont également apporté leur contribution en permettant l'investissement en temps des chercheurs, au côté du doctorant ou pour réaliser les modèles de l'aléa.

Les assureurs de la MAIF, de la MAAF et d'AXA ont fourni les données assurantielles, essentielles à ce projet, et ont ainsi permis de réaliser l'analyse des dommages. D.Laidet (MAIF), B.Chalon-Mignot (MAAF) et E.Petitpas (AXA) ont consacré du temps à cette mise à disposition. Qu'ils en soient remerciés. Les entretiens avec les experts auprès des assurances (D. Bossard pour POLYEXPERT, T.Jean pour ELEX) ont également éclairé le dépouillement de ces données.

La modélisation de l'aléa submersion sur les sites locaux a été rendue possible par la mise à disposition des codes, par IFREMER pour MARS par l'université de Delft pour SWAN, et F. Marche (I3M/Montpellier) et P. Bonneton (EPOC/Bordeaux) pour SurfWB,

Les principaux acteurs du projet sont auteurs de ce rapport ; ils ont bénéficié, au cours du projet, de l'aide technique et scientifique de Y. Krien, S. Lecacheux, et F.Paris (BRGM). Qu'ils soient remerciés chacun de leur investissement. Merci à D. Idier de sa relecture attentive de ce rapport.

Que les membres du comité de suivi, s'ils ne sont pas déjà cités ci-dessus, reçoivent également des remerciements, plus particulièrement les représentants de l'état, C. Peinturier, puis N.Christin (MEDDE/CGDD) et F Richard (DREAL Bretagne), ainsi que les représentants du conseil scientifique de la Fondation MAIF, R. Nussbaum (ONRN), P. Delecluse (CNRM) et B. Massinon (CEA).

## Sommaire

<b>1. Introduction.....</b>	<b>11</b>
1.1. OBJECTIF DU PROJET .....	11
1.2. MÉTHODE ET ORGANISATION.....	12
<b>2. Analyse et modélisation des forçages et des aléas .....</b>	<b>15</b>
2.1. OBJECTIF .....	15
2.2. DÉFINITION DES INDICATEURS RÉGIONAUX DE FORÇAGE .....	15
2.3. MODÉLISATION DYNAMIQUE DE LA SUBMERSION .....	17
2.3.1. Gâvres (Morbihan).....	18
2.3.2. les Boucholeurs (Charentes-maritimes) .....	20
2.4. COMPARAISONS DES CARACTÉRISTIQUES DE FORÇAGES ET D'ALÉA DES DEUX TEMPÊTES .....	21
2.4.1. Forçages.....	21
2.4.2. Processus de submersion à l'échelle locale.....	22
<b>3. Analyse ex post des dommages .....</b>	<b>23</b>
3.1. CONTEXTE .....	23
3.1.1. État de l'art .....	23
3.1.2. Objectif de l'analyse des dommages.....	24
3.2. SYNTHÈSE DE L'ANALYSE EX POST .....	25
3.2.1. Collecte des données d'assurance.....	25
3.2.2. Recherche de sources d'information complémentaires.....	27
3.2.3. Analyse des données à l'échelle régionale .....	27
3.2.4. Analyse des données à l'échelle locale.....	29
<b>4. Quelle modélisation ex ante des dommages ? .....</b>	<b>35</b>
4.1. OBJECTIF .....	35
4.2. APPLICATION À LA MODÉLISATION DES DOMMAGES DE XYNTHIA.....	36
4.2.1. Fonctions d'endommagement univariées.....	36
4.2.2. Modèles d'endommagement multivariés .....	37
4.3. QUEL CHOIX, QUELLES LIMITES ? .....	39
<b>5. Synthèse et recommandations.....</b>	<b>41</b>
5.1. APPORTS DE LA DÉMARCHE ET DISCUSSIONS .....	41
5.1.1. Analyse des forçages et des aléas.....	41

5.1.2. Analyse des dommages.....	41
5.1.3. Vers une modélisation « ex ante ».....	42
5.2. PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS.....	42
5.2.1. Améliorer la donnée assurantielle initiale.....	42
5.2.2. Améliorer l'accès aux données statistiques sur les enjeux.....	43
5.2.3. Rendre systématique l'évaluation de l'aléa ?.....	43
5.2.4. Multiplier les analyses des événements passés ou à venir.....	44
5.2.5. Étendre la démarche à d'autres enjeux que le bâti assuré.....	44
5.2.6. Répondre aux objectifs de prévention.....	44
5.2.7. Pistes de recherche.....	45
<b>7. Conclusion.....</b>	<b>47</b>
<b>8. Bibliographie.....</b>	<b>49</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Organigramme du projet JOHANNA.....	13
Figure 2 : Indicateurs de forçage Johanna / Bretagne (André, 2013).....	16
Figure 3 : Indicateurs de forçage Xynthia / Vendée et Charente-Maritime (André, 2013).....	17
Figure 4 : Modélisation de la submersion liée à Johanna sur Gâvres.....	18
Figure 5 : Modélisation des courants maximaux dans la zone submergée lors de Johanna à Gâvres.....	19
Figure 6 : Séries temporelles des hauteurs d'eau, issues de la simulation, à diverses jauges.....	19
Figure 7 : Modélisation de la submersion liée à Xynthia sur Les Bouchôleurs.....	20
Figure 8 : Séries temporelles des hauteurs d'eau, issues de la simulation, à divers points de référence au cours de la propagation de la submersion sur le site des Bouchôleurs durant la tempête Xynthia.....	21
Figure 9 : Notion d'approches ex post et ex ante (André, 2013, modifiée d'après Hubert et Ledoux, 1999).....	23
Figure 10 : Formulaire de saisie des données des rapports d'expertise d'assurance pour la constitution de la base de données de niveau 2 (André, 2013).....	26
Figure 11 : Typologie des éléments endommagés (André, 2013).....	28
Figure 12 : Distribution des dommages selon les corps d'état endommagés (André, 2013).....	30
Figure 13 : Coûts des dommages (données d'assurance) en fonction de la hauteur d'eau issue des rapports d'expertise (André, 2013).....	30
Figure 14 : Coûts des dommages en fonction de la hauteur d'eau et du niveau de dommage (André, 2013).....	33
Figure 15 : Comparaison des données de coûts des dommages en fonction de la hauteur d'eau avec les modèles d'endommagement disponibles dans la littérature (André, 2013).....	35
Figure 16 : Modèle de régression simple du coût des dommages (C) en fonction de la hauteur d'eau (H) pour Xynthia : $C = 24\,385 + 18\,620 H$ . (André, 2013).....	36

Figure 17 : Modèle de coûts moyens des dommages par gamme de hauteur d'eau à partir des données de Xynthia. (André, 2013). .....	37
Figure 18 : Modèle de régression multiple du coût des dommages (André, 2013) .....	38
Figure 19 : Arbre de régression développé par la méthode CART pour les données de Xynthia (André, 2013). .....	39

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Échelle de dommages mise en place pour les différentes parties des bâtiments affectés par la submersion marine (André, 2013) .....	32
Tableau 2 : Importance des paramètres caractérisant l'aléa et les enjeux dans l'explication des coûts de dommages. Sources des données : cas dell'événement Xynthia (André, 2013) .....	34
Tableau 3 : Résultats du modèle de régression simple du coût des dommages par la hauteur d'eau (André, 2013). .....	36
Tableau 4 : Résultats du modèle de régression multiple du coût des dommages (André, 2013). .....	38



# 1. Introduction

Le présent rapport constitue le rapport final du projet JOHANNA, comme convenu dans la convention tripartite qui lie le BRGM, l'UBO et la Fondation MAIF (UBO 2010-02, BRGM DEF/DJ2010-115MG). Ce rapport reste volontairement succinct, et fait référence, autant que nécessaires, aux deux rapports d'avancement édités fin 2011 et fin 2012 (André et Vinchon, 2011 ; André et al., 2012), et surtout au manuscrit de thèse de Camille André, soutenue le 18 décembre 2013 à l'Université de Bretagne Occidentale, ainsi qu'aux articles publiés ou en cours de rédaction, associés à ces travaux de recherche.

## 1.1. OBJECTIF DU PROJET

Si le vent provoque des dommages importants lors des tempêtes, il est également par ailleurs le facteur déclenchant de forçages secondaires en générant au large des houles et une surcote atmosphérique. À cette élévation du niveau de la mer liée à la dépression atmosphérique et à l'effet du vent, se surimpose l'effet des vagues et de la configuration de la côte (*wave setup*, et jet de rive) ainsi qu'éventuellement des conditions de marées de pleine mer de vives eaux lors du passage de la tempête; cette surcote, crée alors des phénomènes de submersions marines sur le littoral, comme ce fut le cas le 10 mars 2008 en Bretagne (tempête Johanna) et le 28 février 2010 (tempête Xynthia).

Dans un objectif de prévention et de réduction des risques, il importait de discriminer les différentes composantes de l'aléa provoqué par les vagues et la surcote lors des submersions marines, et d'en reconnaître les dommages spécifiques.

Le choix initial de la tempête de référence Johanna (10 et 11 mars 2008) était lié au fait qu'elle constituait à l'époque du montage du projet un cas d'école par la conjonction du forçage atmosphérique (vent, dépression), d'une forte houle et d'une marée de vives eaux, élevant le plan d'eau et générant des vagues et des submersions qui ont provoqué des dommages sur le littoral. Peu de temps avant le début du projet, la tempête Xynthia, dans un contexte tidal analogue, a provoqué une submersion de grande ampleur, entraînant la mort d'une cinquantaine de personnes et provoquant de nombreux dommages. L'analyse de cet événement, d'une intensité beaucoup plus forte que Johanna, a donc été intégrée au projet.

À partir de ces tempêtes de référence, il s'agissait d'obtenir une meilleure compréhension :

- des aléas liés aux submersions marines, par la modélisation combinée des processus liés aux vagues, à la marée, à la surcote atmosphérique, au regard de la configuration du littoral impacté.
- des processus de dommages liés à ces aléas, en réalisant une typologie des dommages induits par les différents processus d'endommagement, et leur évaluation en termes économiques.

Le but du projet était de développer une méthodologie reproductible d'analyse des dommages générés par la submersion et/ou les vagues. Pour répondre à cet objectif, il s'est agi de :

- définir les forçages qui génèrent la submersion sur la base de la confrontation des observations et modèles existants, en partant des données accessibles sur les paramètres météorologiques et hydrodynamiques des tempêtes analysées (vitesse et

direction du vent, paramètres de la houle, marée, pression atmosphérique, etc.) qui ont généré ces aléas (André et Vinchon, 2011).

- analyser et calculer les paramètres des aléas générés par la tempête (hauteur, vitesse, durée et extension de l'inondation, chocs des vagues en façade).
- définir une typologie des dommages directs et les processus d'endommagement selon cette typologie (la démarche a ciblé les dommages au bâti résidentiel assuré, pour lesquels des données étaient disponibles).
- la quantification des dommages, et l'analyse *a posteriori* (*ex post*), des paramètres qui définissent leurs coûts, dans l'objectif de pouvoir proposer des outils de modélisation de ces coûts dans une démarche *a priori* (*ex ante*).

Entre la proposition initiale et la réalisation du projet, un certain nombre des objectifs initiaux ont été réajustés, avec la validation du comité de pilotage réuni annuellement. Il a été notamment convenu d'intégrer l'événement Xynthia, mais aussi qu'il était prématuré d'étudier, même qualitativement, les transports de débris, ce sujet constituant en lui-même un travail de recherche faisant appel à d'autres disciplines que celles réunies par l'équipe du projet. De la même façon, il était prématuré d'aborder la notion de probabilité de retour d'une conjonction d'une grande marée et d'une tempête génératrice de surcote et de vagues, alors que la notion de la fréquence d'atteinte d'un certain niveau d'eau liée aux tempêtes est un sujet de recherche à part entière. Grâce à l'appui de la MAIF et de la Fondation MAIF, d'autres assureurs (AXA et MAAF) ont ouvert l'accès à leurs archives, afin d'améliorer la qualité de l'étude par un plus grand nombre de données, notamment celles liées à l'événement Johanna, peu nombreuses (dossiers très souvent clos) et celles, beaucoup plus abondantes, concernant l'événement Xynthia. Cela a permis en outre de comparer ces deux événements, tant en termes de caractéristiques des forçages et des aléas que d'enjeux affectés et de dommages induits.

## 1.2. MÉTHODE ET ORGANISATION

La réalisation du projet s'est organisée autour de deux volets principaux (Figure 1) :

- Le premier volet a évalué les forçages associés à chacun des événements, à l'échelle régionale, puis la propagation de la submersion à l'échelle locale ; elle a été réalisée par l'équipe BRGM (R. Pedreros, F. Paris, S. Lecacheux, S. Le Roy) et pro-parte par le doctorant ;
- L'autre volet a analysé les processus de dommages, leur distribution et leur coûts, à partir de données d'assurance : c'est le travail de thèse de Camille André, appuyé à cette fin par un ingénieur « structure » en risque sismique (D. Monfort-Climent) et un ingénieur économiste (M. Bouzit) ; La thèse était co-encadrée par C. Meur-Férec (Professeur de géographie à l'UBO) et C. Vinchon (ingénieur docteur au BRGM et également chef du projet JOHANNA). Sont également intervenus en soutien à la thèse, deux stagiaires en Master 2, l'un en géographie (S. Aminot) et un autre en architecture (H. Daci).

Ces deux volets ont été réalisés en parallèle dans le temps, mais ont nécessité de nombreux échanges et interfaçages entre les deux équipes, pour définir les méthodes et les échelles pour établir les liens entre les types d'événements et les coûts induits.

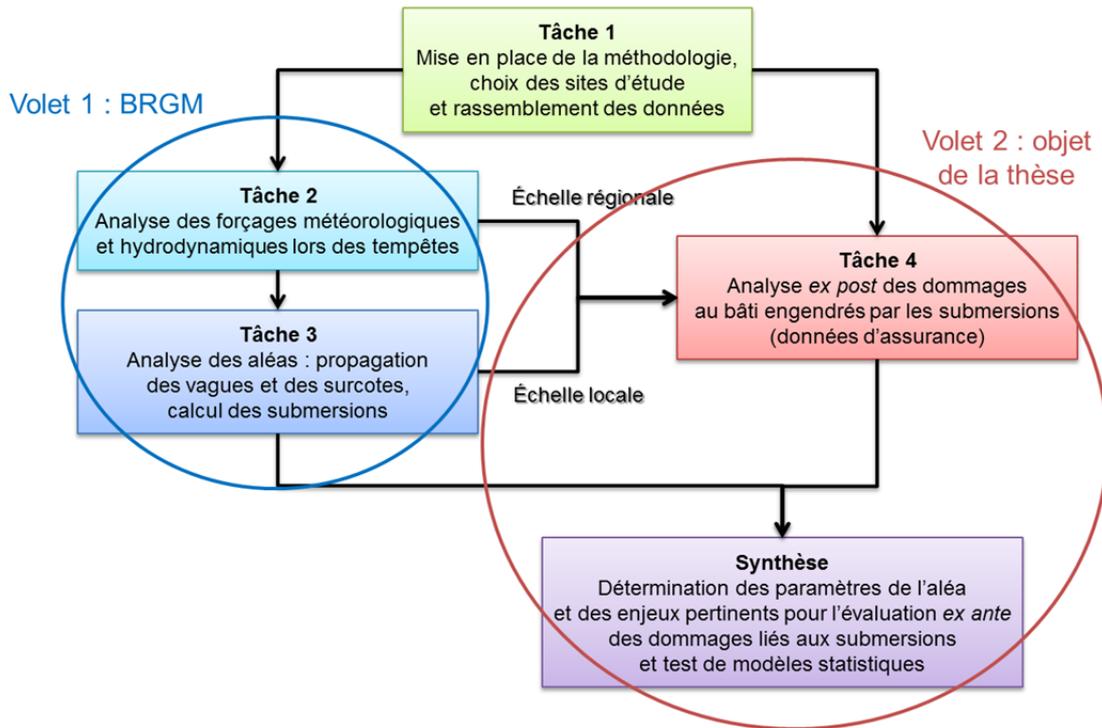


Figure 1 : Organigramme du projet JOHANNA



## 2. Analyse et modélisation des forçages et des aléas

### 2.1. OBJECTIF

Il s'agissait dans ce premier volet d'identifier les conditions régionales des deux événements qui ont provoqué les dommages et de modéliser, à l'échelle locale, les processus de propagation de la submersion pour chacun des événements, et de les valider par les observations, mesures de terrain et témoignages post événements mises à disposition par l'UBO, et collectées dans les travaux de Cariolet et al (2009) et Cariolet (2010, 2011)

### 2.2. DÉFINITION DES INDICATEURS RÉGIONAUX DE FORÇAGE

Les indicateurs des forçages de la submersion ont été évalués pour chacune des tempêtes étudiées pour chacun des événements étudiés. Les résultats sont évoqués dans le rapport d'avancement de la 1<sup>ère</sup> année (André et Vinchon, 2011) et présentés dans la thèse (André, 2013).

Il s'agissait de définir et représenter à l'échelle régionale les indicateurs des forçages météorologiques, à savoir, l'altitude du niveau d'eau à la côte, la surcote atmosphérique, la hauteur des vagues au pic de la tempête (aux isobathes 20 et 50 m pour Johanna, 10 et 20 m pour Xynthia).. Ces indicateurs ont été calculés à partir des modélisations issues de PREVIMER (<http://www.previmer.org>) et de travaux antérieurs du BRGM pour Xynthia (Pedreros *et al.*, 2007, Idier *et al.*, 2010). Un indicateur de l'altitude moyenne de la côte a également été réalisé pour les deux régions concernées Les cartes ci-après permettent de visualiser l'intensité de ces forçages sur les deux régions impactées par les tempêtes Johanna (Figure 2) et Xynthia (Figure 3).

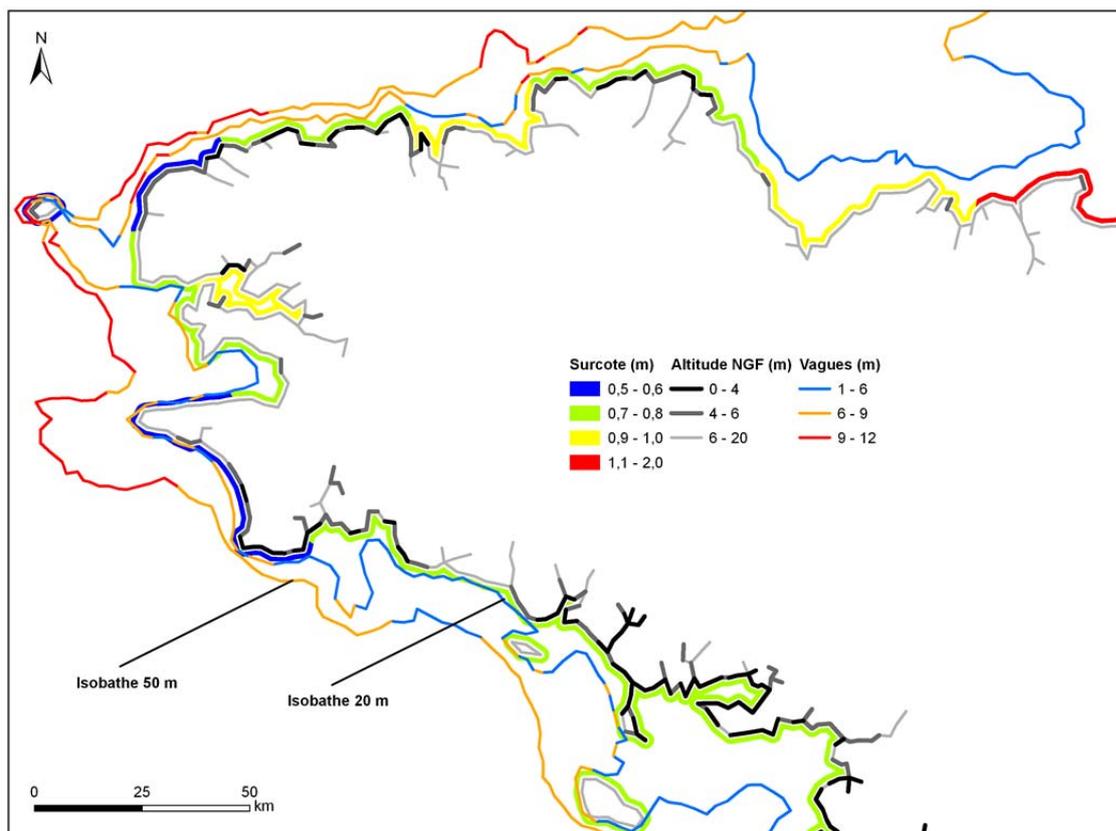


Figure 2 : Indicateurs de forçage lors de la tempête Jonanna sur la Bretagne(André, 2013),et indicateur de configuration du trait de côte

Les vagues sont reportées en hauteur significative maximum, la surcote correspond à la surcote atmosphérique(vagues-MaxHs max, surcote) ; ces indicateurs sont croisés avec un indicateur d'altitude du trait de côte moyenné par tronçon linéaire de 100m

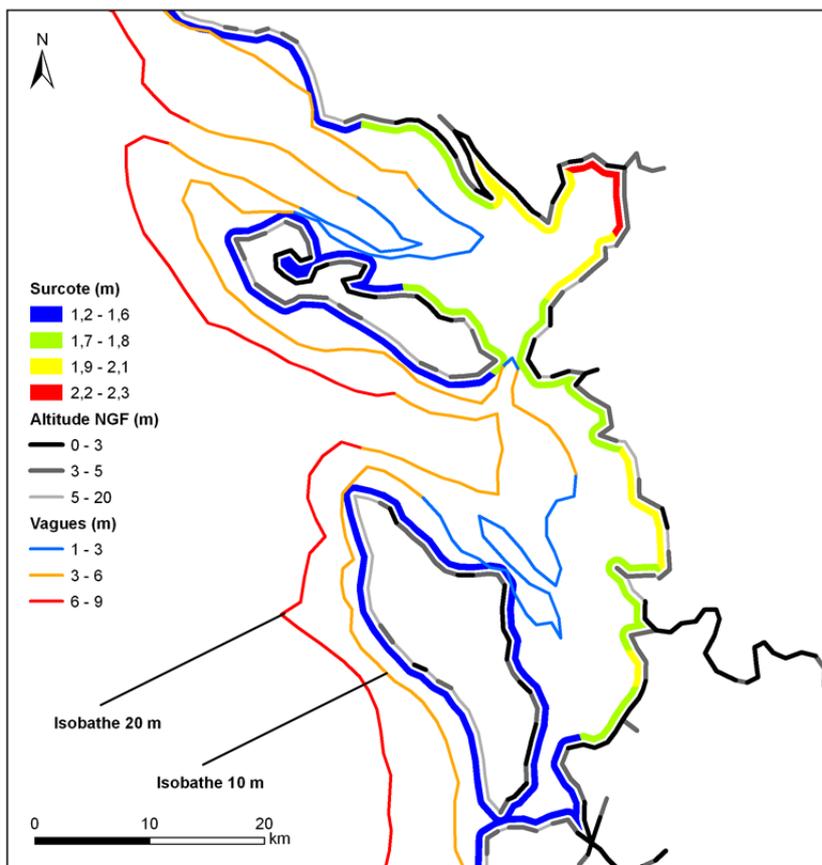


Figure 3 : Indicateurs de forçage lors de la tempête Xynthia sur la Vendée et la Charente (André, 2013), et indicateur de configuration du trait de côte

Les vagues sont reportées en hauteur significative maximum, la surcote correspond à la surcote atmosphérique et à celle liée au wave-set-up) ; ces indicateurs sont croisés avec un indicateur d'altitude du trait de côte moyenné par tronçon linéaire de 100m

### 2.3. MODÉLISATION DYNAMIQUE DE LA SUBMERSION

Pour chacune des tempêtes, la submersion a été modélisée sur un site local, pour lequel on disposait d'un nombre suffisamment conséquent de données d'assurance sur les dommages. Le site modélisé pour Johanna est la commune de Gâvres (Morbihan) ; le site modélisé pour la tempête Xynthia est le site des Bouchôleurs, à cheval sur les communes de Châtelailon-Plage et d'Yves (Charente-Maritime).

Chacune de ces modélisations a demandé préalablement une modélisation emboîtée de la marée et des surcotes (code MARS, Lazure et Dumas, 2007) ainsi que des vagues (code SWAN, Booj *et al.*, 1999), afin de fournir au modèle SurfWB (Marche, 2005 ; Marche *et al.*, 2007) les données d'entrée pour « propager » le niveau d'eau et les vagues à terre.

Il a été également nécessaire de préparer pour chacun des sites un modèle numérique d'élévation (MNE) qui reproduise le plus fidèlement possible la topographie de l'avant côte, du trait de côte et de l'arrière côte, ainsi que les obstacles que rencontre l'eau (digues, murets, bâti,...) au moment de l'évènement. Ces travaux de préparation des MNE sont détaillés dans la thèse de Camille André et l'article en préparation de S. Le Roy *et al.*

### 2.3.1. Gâvres (Morbihan)

Les travaux sur Gâvres, réalisés en 2012 et 2013, sont détaillés en partie dans le rapport d'avancement de la 2<sup>ème</sup> année (André et al., 2012), sont résumés dans la thèse, et font l'objet de la publication en préparation (Le Roy et al.), analysant, au regard des forçages lors de la tempête Johanna et de la configuration de la côte, le processus de submersion. La modélisation dynamique témoigne d'un très bon accord avec les témoignages recueillis quant à son déroulement dans le temps. Le modèle permet donc d'extrapoler les résultats de la modélisation pour compléter ou préciser les données de hauteur d'eau présentes dans les dossiers d'expertises d'assurance, et d'apporter également des informations sur les vitesses d'écoulement en milieu urbain.

Cette submersion (Figure 4) est caractérisée par un phénomène de franchissement de la digue par les vagues, au droit du village. À défaut d'information précise, il a été supposé que la destruction du muret qui surmonte la digue s'est produite dans les premières heures de la tempête, et a permis à l'eau de franchir plus significativement la digue, tandis que le franchissement se poursuivait ailleurs le long de la digue. Localement plus élevée (2 m/s) juste derrière la digue puis décroissante jusqu'à 0,6 à 0,8 m/s (Figure 5), la vitesse d'écoulement dans la zone urbanisée est globalement faible, inférieure à 0,5 m/s. Les différents modes de submersion se conjuguent jusqu'à ce que toutes les zones basses (ancienne lagune remblayée) soient submergées. Le niveau de l'eau atteint son maximum d'1,2 m à 6h30 TU dans la rue du Parc des Sports.

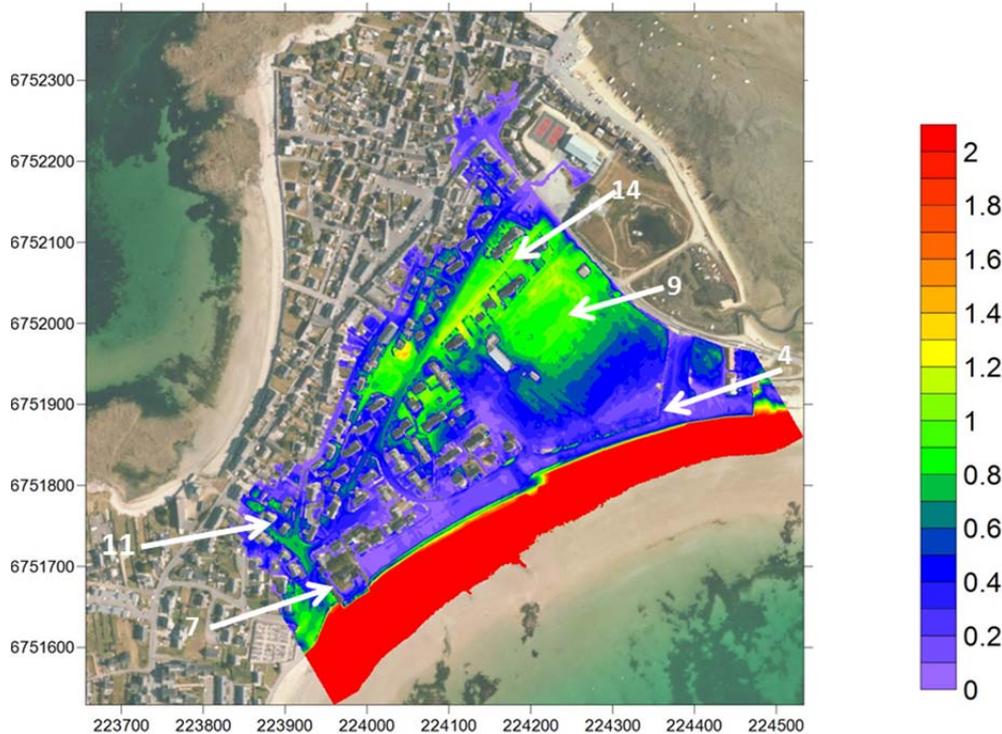


Figure 4 :  
Modélisation de la submersion liée à Johanna sur Gâvres (hauteurs d'eau en m au maximum d'extension ; position des points de jauge).

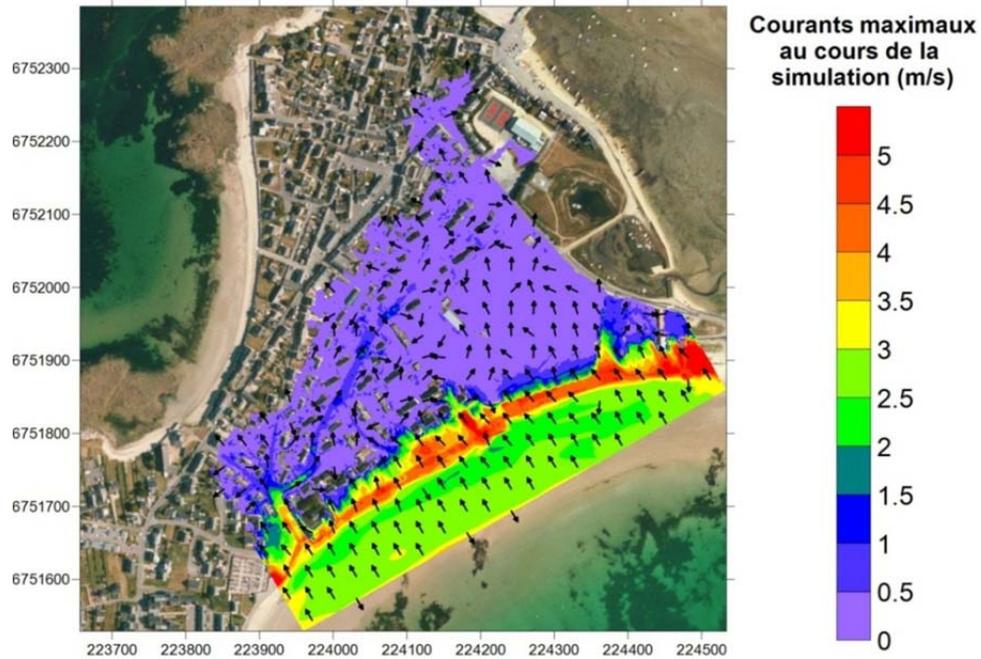


Figure 5 : Modélisation des courants maximaux dans la zone submergée lors de Johanna à Gâvres.

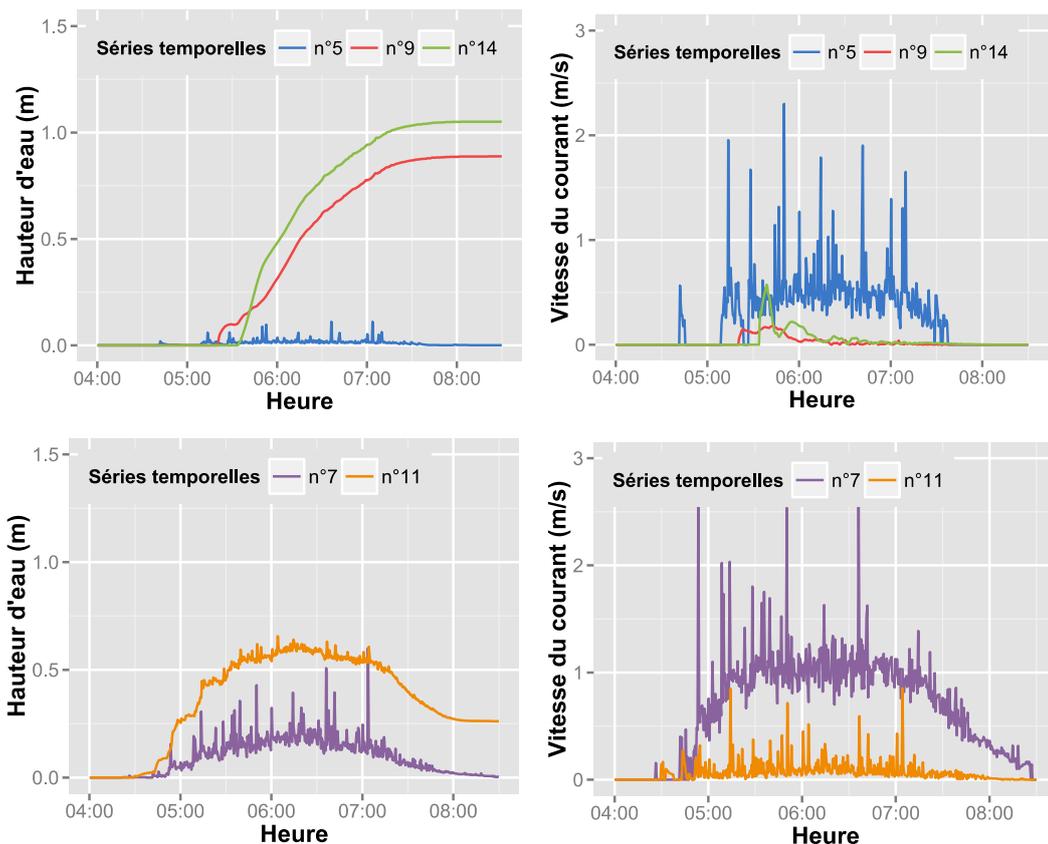


Figure 6 : Séries temporelles des hauteurs d'eau, issues de la simulation, à diverses jauges positionnés sur la figure 4 au cours de la propagation de la submersion sur le site de Gâvres lors de la tempête Johanna.

### 2.3.2. les Boucholeurs (Charentes-maritimes)

Les travaux de modélisation de l'aléa submersion sur les Bouchôleurs, lors de la tempête Xynthia ont été réalisés en 2013. Les résultats en sont résumés dans la thèse de C. André. La modélisation de la submersion à l'aide de SurfWB (Figure 7, Figure 8) montre la large étendue de l'inondation. Les hauteurs d'eau modélisées témoignent d'une sous-estimation (inférieure à 50 cm, plus souvent inférieure à 20 cm) par rapport aux mesures des hautes mers issues des retours d'expérience (Sogreah, 2011). Cette imprécision inclue pro-parte l'incertitude des données topographiques (10 cm) du LIDAR. Les hauteurs d'eau varient de 0,25 à 2 m dans les zones résidentielles à l'Ouest du site, et atteignent jusqu'à 3 m dans les zones basses conchylicoles et les marais. Les axes constitués par l'avenue André Dulin ou le Canal de Port-Punay ont favorisé des écoulements rapides (sup. à 1.5 m/s). En arrière de la digue du vieux port, la vitesse d'écoulement atteint localement les 2 m/s.

Le processus de la submersion se fait en façade, par débordement, facilité par une très forte surcote (surcote atmosphérique et surcote liée au vagues) modélisée à un maximum de 1,8 m aux Boucholeurs par MARS et SWAN. L'eau a également transité de l'Est vers l'Ouest par les zones basses (marais d'Yves) du fait de l'occurrence de brèches et d'un arasement du cordon dunaire de la Réserve Naturelle.

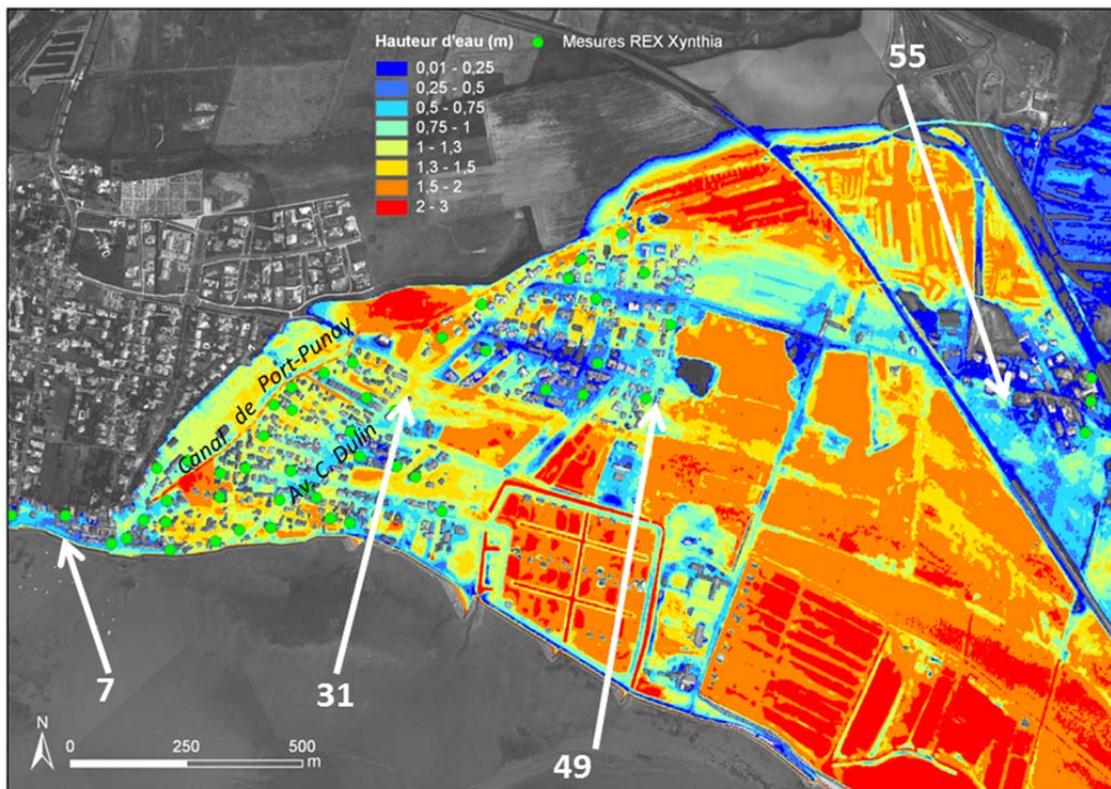


Figure 7 : Modélisation de la submersion liée à Xynthia sur Les Bouchôleurs (maximum d'extension ; position des points de jauge).

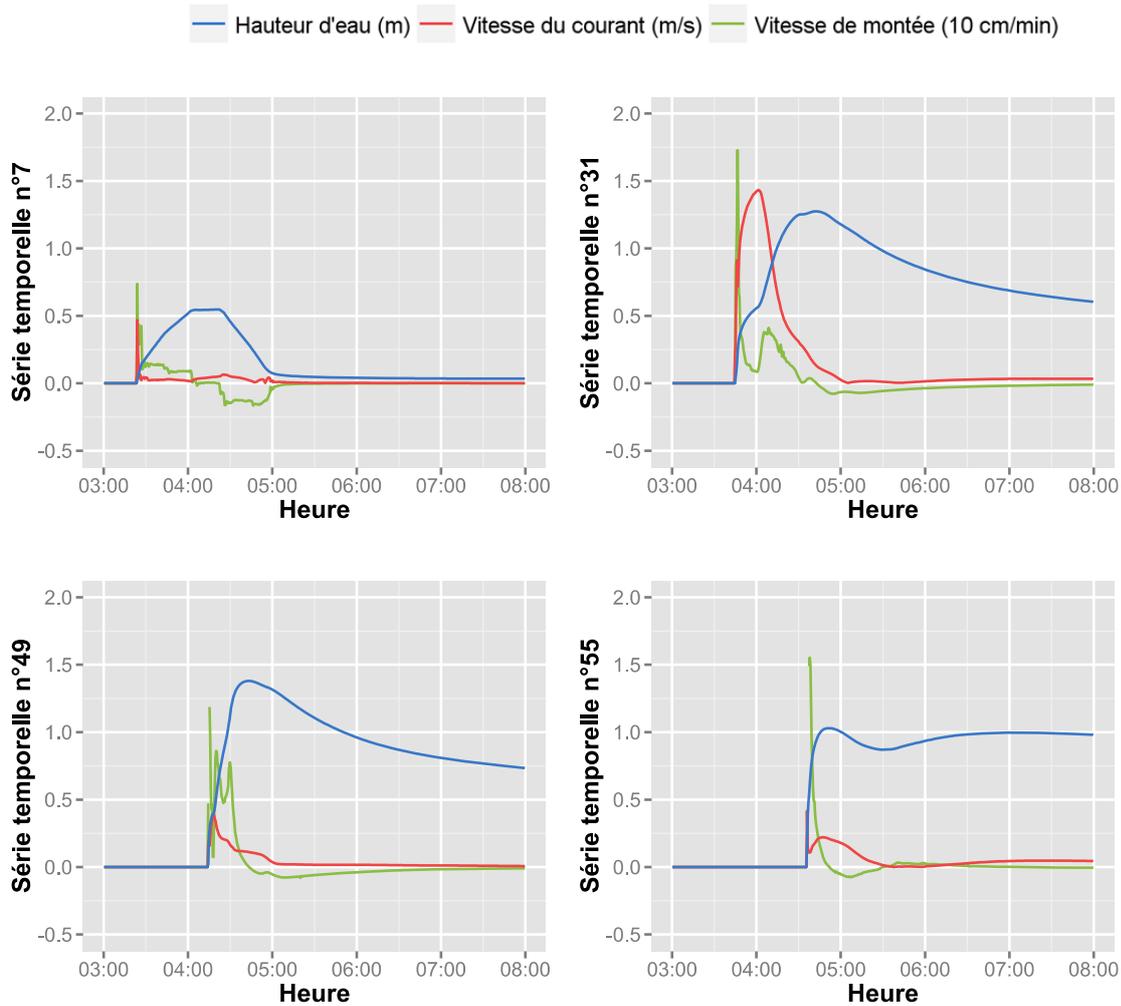


Figure 8 : Séries temporelles des hauteurs d'eau, issues de la simulation, à divers points de référence, positionnés sur la figure 7 au cours de la propagation de la submersion sur le site des Bouchôleurs durant la tempête Xynthia.

## 2.4. COMPARAISONS DES CARACTÉRISTIQUES DE FORCAGES ET D'ALÉA DES DEUX TEMPÊTES

### 2.4.1. Forçages

A l'échelle régionale, les forçages qui ont provoqué les submersions lors des tempêtes Johanna et Xynthia sont toutes deux liées à la conjonction d'une forte surcote atmosphérique (maximum de 80 cm pour Johanna et maximum supérieur à 2 m pour Xynthia) et d'une marée haute de vives eaux de coefficients respectifs de 106 et 102.

Ce qui différencie ces forçages est la hauteur des vagues induisant le *wave setup*, c'est-à-dire la surcote liée aux vagues, dont l'importance est liée au vent, mais également à la configuration bathymétrique de l'avant côte ; le *wave setup* était plus important pour Xynthia que pour Johanna, en raison d'une faible profondeur au large des îles de Ré et d'Oléron, et de l'effet d'entonnoir des Pertuis.

On verra dans le chapitre suivant que les dommages engendrés par ces deux processus sont relativement différents à l'échelle régionale, avec une proportion plus importante de dommages en façade, liés aux chocs des vagues, pour l'événement Johanna que pour celui de Xynthia, où la majorité des dommages sont associés à la hauteur de submersion (si tant est que l'on peut comparer ces sinistres dont le nombre total de dossiers disponibles pour cette étude est très différent).

#### **2.4.2. Processus de submersion à l'échelle locale**

Les modèles de propagation ont montré que le processus dominant à Gâvres, lors de Johanna, était le franchissement, lié à la hauteur des vagues : les vagues déferlent sur la digue, et la franchissent, processus favorisé par un amaigrissement préalable de la plage au pied de la digue. À ce processus de franchissement s'ajoute la pénétration de l'eau dans les zones basses.

Aux Bouchôleurs, lors de Xynthia, c'est un processus de débordement qui domine, liée à une très forte surcote : la morphologie sous-marine peu profonde au large de Ré joue sur l'augmentation de la surcote liée aux vagues (Bertin et al., 2012). La configuration des pertuis en forme d' « entonnoir » entre les îles de Ré et d'Oléron, provoque l'accumulation d'eau sous l'effet du vent et la propagation de l'inondation en arrière côte est conditionnée par les couloirs de propagation créés par l'aménagement urbain, l'eau s'accumulant in fine dans les cuvettes que forment les zones basses (zones conchylicoles et marais, puis zone urbanisée).

### 3. Analyse ex post des dommages

Ce chapitre et le suivant reprennent les travaux qui font le corps de la démarche de C. André et dont on trouvera le détail dans son manuscrit de thèse (André, 2013).

#### 3.1. CONTEXTE

##### 3.1.1. État de l’art

L’état de l’art est largement détaillé par André (2013) ; on ne reprend ici que quelques points qui ont guidé la démarche d’analyse des dommages.

La prise de conscience, dans ces dernières années, de l’impact vraisemblable du changement climatique sur la zone littorale et surtout la survenue de la tempête Xynthia, ont favorisé, en retour d’expérience un certain nombre d’études sur les risques côtiers dont la submersion marine, en particulier concernant les processus physiques (Pedreros et al., 2010 ; Sogreah, 2011 et Devaux et al., 2012), la vulnérabilité intrinsèque ou systémique des enjeux à ce risque (Meur-Ferec, 2006 ; Vinchon *et al.*, in prep), l’impact du changement climatique sur cette vulnérabilité (Vinchon *et al.*, 2009 ; Romieu *et al.*, 2009 ; 2010). La Directive Cadre Inondation de 2007 demande par ailleurs aux états membres européens de répertorier les événements connus d’inondation, y compris de submersion marine ; des territoires à risque d’inondation marine ont ainsi été identifiés et doivent faire l’objet de plans de gestion des risques inondation à l’horizon 2021. Ces plans doivent inclure une programmation d’actions, justifiées par leurs coûts et bénéfices potentiels. Dans une analyse coûts-bénéfices, ces derniers sont approchés par l’évaluation des dommages potentiels évités par la mise en œuvre de ces actions.

Hubert et Ledoux (1999) définissent le cadre d’analyse des dommages, qui peut être *ex post* ou *ex ante* aux événements naturels (Figure 9).

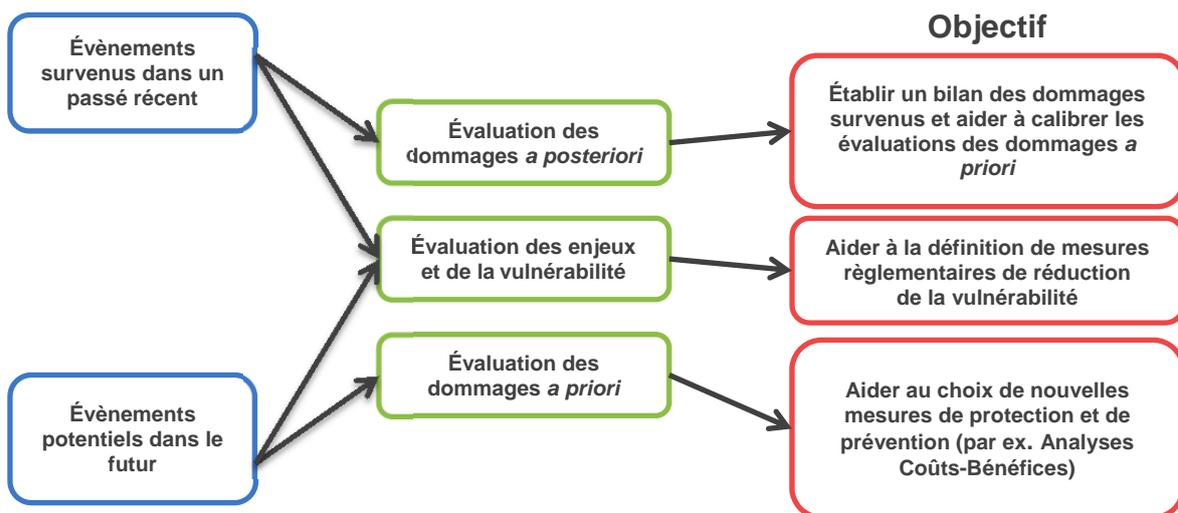


Figure 9 : Notion d’approches ex post et ex ante (André, 2013, modifiée d’après Hubert et Ledoux, 1999)

L’évaluation des dommages liés aux risques naturels se fait en appréciant l’importance des dommages physiques ou économiques. Les dommages physiques sont appréhendés par des

échelles de dommages et des courbes de fragilités. On cite les échelles de dommages de Grünthal (1998) pour les séismes, de Fujita, (1971) pour le vent, de Kelman (2002) ou Schwarz et Maiwald (2008) pour les inondations continentales, et enfin de Garcin et al. (2008) ou Leone et al. (2011) pour les tsunamis ; L'échelle de Friedland (2009) propose une échelle mixte vent-submersion pour les ouragans. Les courbes de fragilité évaluent ensuite la probabilité d'atteindre un niveau de dommage méthode principalement appliquée au risque sismique). Un certain nombre de programmes calculent, à partir de cette évaluation physique, les pertes économiques directes (FEMA, 2003 ; Sedan et al., 2008.). Il n'existe pas à ce jour de courbe de fragilité ou d'échelles de dommages pour le risque de submersion marine.

Par ailleurs, l'évaluation économique des dommages a davantage été développée pour le risque inondation continentale (au sens large), qui, de par sa forte récurrence, est celui qui cause les pertes économiques les plus élevées. Cette évaluation est utilisée par les assureurs dans le but d'anticiper le coût probable des catastrophes, soit par une approche déterministe, pour un scénario défini, ou probabiliste, en simulant de nombreux événements fictifs (Grossi et Kunreuther, 2005). Il est par ailleurs utile aux politiques publiques de pouvoir comparer les coûts de dommages qui pourraient être évités par des mesures de prévention (bénéfices). Quelques soient ces approches, elles nécessitent de définir la valeur des dommages au regard des paramètres de l'aléa et des enjeux. L'outil de cette évaluation est la fonction d'endommagement, qui croise la valeur économique des dommages (en valeur absolue ou relative, par rapport à une valeur totale), et un (ou plusieurs) paramètre(s) de l'aléa ou des enjeux considérés (Merz et al., 2010). Des fonctions d'endommagement ont ainsi été construites pour le risque inondation, dont par exemple celles de Penning-Rowell et al. (2005) et de l'USACE (1988). En France, les travaux de référence pour les dommages aux inondations fluviales sont ceux de Torterotot (1993) et plus récemment les travaux du CEPRI (2010 et 2013).

D'une manière générale, les fonctions d'endommagement peuvent être construites, soit analytiquement sur la base de « jugement d'expert », par exemple à partir de l'expérience des praticiens du domaine de la construction pour les enjeux bâtis, soit empiriquement sur la base des données d'observations et des retours d'expérience d'évènements passés. C'est cette seconde méthode qui est mise en œuvre dans ce projet. Elle s'appuie sur les données d'assurance sur les sinistres, complétées par les données de la modélisation et les données publiques et administratives.

### **3.1.2. Objectif de l'analyse des dommages**

La connaissance des risques implique une approche pluridimensionnelle qui considère à la fois le phénomène et ses conséquences. Il s'agit à la fois de connaître le processus aléatoire et la vulnérabilité des enjeux qui y sont exposés, afin de pouvoir évaluer le coût des dommages potentiels et d'avoir une démarche préventive pour réduire le risque ou s'y adapter, mais également gérer la crise provoquée par l'occurrence de l'aléa puis enfin gérer le retour à la normale.

Connaitre les caractéristiques et les coûts des dommages liés aux submersions provoquées par les tempêtes Johanna et Xynthia a permis de faire le lien entre les caractéristiques des événements (forçage et aléa) et les processus d'endommagement. Il a été rapidement choisi (André et Vinchon, 2011) de se focaliser sur les dommages au bâti assuré.

A partir des données du coût des sinistres liés à ces deux évènements (hors ceux provoqués par le vent directement), les paramètres influençant ces coûts et leur grande dispersion, qu'ils soient relatifs à l'aléa et/ou aux enjeux, ont été recherchés (analyse *ex post*). A partir de cette

analyse, différents modèles (fonctions) d'endommagement ont été testés, afin de rechercher comment, dans une démarche de prévention et prévision, anticiper les coûts d'évènements futurs (analyse *ex ante*).

### **3.2. SYNTHÈSE DE L'ANALYSE EX POST**

Les résultats de cette analyse ont déjà été présentés préliminairement dans les rapports d'avancement des deux premières années du projet (André et Vinchon, 2011 ; André et al., 2012), dans un article scientifique (André et al., 2013), et font l'objet des parties 2 à 4 du mémoire de thèse.

#### **3.2.1. Collecte des données d'assurance**

Ce projet a bénéficié d'un accès aux données des assureurs pour les deux événements Xynthia et Johanna, d'abord à la MAIF, puis, grâce à son aide, à celles d'AXA et de la MAAF. Ces assureurs couvraient, à eux trois, 20 à 25 % des indemnisations des dommages des submersions de la tempête Xynthia sur le bâti résidentiel (le nombre total de dossiers MRH est de 19 000 pour la tempête Xynthia d'après le rapport FFSA et GEMA, 2011).

Deux niveaux d'information ont été exploités à partir des données rendues disponibles par les assureurs :

- À une échelle dite régionale ou macro, couvrant l'ensemble des territoires touchés par chacune des tempêtes et les sinistres indemnisés sous le régime « CatNat ». Pour mémoire, les dommages liés au vent sont indemnisés sous le régime « Tempête-Grêle-Neige ». En raison des différences d'ampleur des deux évènements, un grand nombre de sinistres est disponible pour Xynthia (4000 dossiers) et un nombre plus restreint pour Johanna (200 dossiers). Ce niveau d'information (listings) fournit des données sur l'adresse, le type de bien endommagé et le montant indemnisé, ainsi que diverses informations sur l'habitat, plus ou moins renseignées. Les sinistres ont été géolocalisés par l'adresse, pour pouvoir les traiter sous SIG (Aminot, 2011).
- À une échelle dite locale ou micro, les données détaillées d'expertise des sinistres ont été analysées. Pour Xynthia, il a été procédé à une sélection de communes fortement touchées par l'évènement (274 dossiers détaillés retenus), tandis que le faible nombre de dossiers pour Johanna a permis une analyse de tous les dossiers disponibles (André et Vinchon, 2011, André et al., 2013).

Une structure de base de données a été développée pour rassembler les informations collectées. La base de données est accompagnée d'un formulaire de saisie, afin d'optimiser l'efficacité de la collecte (Figure 10). Le formulaire reprend tous les champs qui peuvent exister dans les rapports d'expertise et qui seraient utiles, tant à la compréhension des processus de dommage, qu'à leur évaluation quantitative.

**Références Dossier** N° XM0001 Opérateur CA

Tempête Xynthia Date du Sinistre 28/02/2010 Régime Indemn. CATNAT Catégorie générale du Dossier MRH

Assureur [ ] Heure du Sinistre 02:30 Franchise 380 Commentaire Général Zone Noire

Entité de Gestion [ ] Commune du Sinistre Aytré Expert [ ] Maison individuelle inondée.

Code Dossier [ ] Code Postal 17440 Date de l'Expertise 05/03/2010

Type de Contrat RAQVAM Adresse du Sinistre [ ] Ref Cadastrale [ ]

**Dommmages Immobilier**

Structure / Fondations			Plâtrerie / Menuiseries Intérieures			Menuiseries Extérieures / Vérandas			Electricité / Plomberie / Chauffage		
Val. à neuf	Vétusté	Val. vét. déduite	Val. à neuf	Vétusté	Val. vét. déduite	Val. à neuf	Vétusté	Val. vét. déduite	Val. à neuf	Vétusté	Val. vét. déduite
[ ]	[ ]	[ ]	13 594	10	12 235	6 570	20	5 256	10 228	5	9 717

Embellissements Sols / Murs			Nettoyage / Assèchement			Démolition / Evacuation Déblais			Autre		
Val. à neuf	Vétusté	Val. vét. déduite	Val. à neuf	Vétusté	Val. vét. déduite	Val. à neuf	Vétusté	Val. vét. déduite	Val. à neuf	Vétusté	Val. vét. déduite
18 493	25	13 870	2 598	0	2 598	1 580	0	1 580	[ ]	[ ]	[ ]

Bâti Annexe			Terrain / Terrasses / Piscines			Murs / Clôtures			Eléments impactés		
Val. à neuf	Vétusté	Val. vét. déduite	Val. à neuf	Vétusté	Val. vét. déduite	Val. à neuf	Vétusté	Val. vét. déduite	Bâti Principal	Garage / Sous-sol	Annexes
4 563	30	3 198	11 063	40	6 638	5 394	20	4 795	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Catégorie du Dossier Bati princ

**Dommmages Mobilier**  **Récapitulatif Indemnités**

Meuble(s) Intérieur  Meuble(s) Extérieur  Indem Immo Totale 67 694 Indem Mobilier Totale 22 313

Voiture(s)  Bateau(x)  Autre  Commentaire Dommages Franchise déduite sur : Immobilier  Mobilier

Valeur à neuf 34 537 Valeur vétusté déduite 22 693 Indemnisation de la valeur à neuf pour le bâtiment principal, mais seulement de la valeur dépréciée pour les annexes et éléments extérieurs.

Plafond Mobilier 54 000 Atteint  **Classes de Dommages**

Commentaire Dommages Mobilier

Classe Bâti 3  
Classe Annexes 2  
Classe Mur 4

**Caractéristiques Bâti**

Type de Bâtiment Individuel Nb de Bâtiments 1 Nb de Logements 1 Nb d'Etages 0 Sous-sol  Garage  Quartier LOT

Nb de Pièces 4 Nb de Pièces RDC 4 SHAB 90 SHAB RDC 90 Type de Résident Prop res sec Age 1960

Matériaux de Construction Type de Fondations Commentaire Bâti Modèle Bâti JAR

maçonnerie agglomérés semelles filantes

**Indications sur l'Aléa**

Submersion Oui Durée de Submersion (h) 24 Chocs / Impacts Non Erosion / Affouillement Non

Eléments Submergés Indication de Vitesse Lente Par les Vagues  Recul du TDC

Bâti Principal  Garage / Sous-sol  Par Impact de Débris  Déstabilisation Fondations

Annexes  Terrain / Mur  Commentaire Aléa Catégorie Aléa Submersion seule

Hauteur Max. (m) 1,15 Inondation RDC et garage en sous-sol complètement inondé.

Référence plancher RDC

Figure 10 : Formulaire de saisie des données des rapports d'expertise d'assurance pour la constitution de la base de données de niveau 2 (André, 2013).

Une première analyse statistique a été réalisée sur les données assurantielles collectées. Cette analyse a fait l'objet d'un article publié début 2013, dans le journal « Natural Hazard and Earth System Sciences » (André *et al.*, 2013). Elle a permis de tirer des enseignements importants quant à la répartition du coût des dommages. Cependant, les données assurantielles disponibles ne répondaient pas à toutes les questions liées à la nature et à la valeur initiale des biens endommagés, ce qui a suscité la recherche de données complémentaires, à l'échelle locale, pour pouvoir établir des fonctions d'endommagement.

### 3.2.2. Recherche de sources d'information complémentaires

Pour compléter ces données, voire pour les préciser, d'autres sources d'informations ont été recherchées : ont été consultés les demandes de reconnaissance « CatNat », les divers compte-rendu institutionnels (abondants pour Xynthia, rares pour Johanna), les analyses des réassureurs (bilans et modélisations) et les informations recueillies par la presse, les rapports de retours d'expérience de terrain des scientifiques (Cariolet, 2011) et de l'État (Sogreah, 2011, Devaux et al., 2012).

L'ensemble de ces sources contiennent principalement des informations sur l'aléa et les dommages, à l'échelle locale, mais peu de détails sur les caractéristiques des enjeux :

- Des bases de données autres ont donc été mobilisées (INSEE, IGN) et il a été effectué une collecte d'informations sur le terrain. Après avoir délimité des secteurs d'urbanisme homogènes en âge, par l'analyse diachronique d'imageries aériennes, il a été effectué une campagne de terrain pour compléter l'information sur les caractéristiques extérieures des constructions. Suite à cette campagne, une analyse urbanistique et architecturale a permis de définir une typologie de l'habitat, et d'évaluer le coût de construction des différents modèles types de maisons (Daci, 2012). Sans information sur les matériaux utilisés à l'intérieur des différentes habitations, elle fournit un prix surfacique moyen mais n'a cependant pas permis de différencier ce prix en fonction des types d'habitations de différents niveaux de standing (André et al., 2012)
- Comme dit précédemment, les données d'expertises d'assurance ont été croisées avec les résultats des modèles hydrauliques locaux, afin de préciser en tant que nécessaire, sur l'emplacement des sinistres, les données de hauteur d'eau et les vitesses d'écoulement et de montée de l'eau.

Ces données complémentaires ont permis de compléter l'analyse régionale par des données ramenées à la commune, sur divers éléments caractérisant les enjeux endommagés (données INSEE) ; à l'échelle locale, elle a permis de compléter les données d'expertises, en :

- Précisant la hauteur d'eau et le cas échéant les vitesses d'écoulement et de montée de l'eau dans la mesure du possible la donnée de hauteur d'eau, (données de retour d'expérience, données issues des modélisations).
- Recherchant des données sur d'autres paramètres, tels que les données sur l'habitat, sur sa valeur initiale et ses caractéristiques de construction (nombres de pièces, présence d'un étage, surface au sol, etc.).

Le bilan de cette collecte, tant des données d'assurance que des autres données, souligne la limite des données disponibles, et la nécessité de standardiser la collecte et la bancarisation de cette donnée pour en optimiser l'analyse (André et al., 2013).

Il s'agit ensuite par l'analyse des données rassemblées d'identifier les paramètres de l'aléa et des enjeux qui conditionnent le coût des dommages. L'analyse a été faite pour les deux niveaux d'information, régional et local.

### 3.2.3. Analyse des données à l'échelle régionale

Une première analyse des listings du premier niveau dit régional ou macro, permet d'identifier, par le type de police d'assurance, que les dommages aux habitations constituent l'essentiel des dommages pour l'événement Xynthia (86 %) et une grande partie des dommages de Johanna (59 %), pour des indemnités moyennes de 26 600 € pour Xynthia et 7 100 € pour Johanna (en

gardant en mémoire que les statistiques sont plus fiables pour Xynthia, avec un plus grand nombre de sinistres que pour Johanna). Par ailleurs, les données complémentaires issues de l'INSEE, disponibles par communes ont permis pour le cas de Xynthia d'affiner cette analyse régionale.

La géolocalisation permet de visualiser la répartition des sinistres pour les deux événements, et montre notamment une forte concentration de sinistres liés à Xynthia pour les départements de Vendée et Charente-Maritime, tandis que les sinistres liés à Johanna sont dispersées tout autour de la Bretagne.

Une première analyse des coûts d'indemnisations des habitations montre pour les deux tempêtes une distribution très asymétrique, avec une majorité de sinistres ayant un faible coût de dommages ; pour Xynthia notamment, 10 % des dossiers portent la moitié du montant total des indemnisations. Globalement, les indemnisations aux habitations varient de quelques centaines à plusieurs centaines de milliers d'euros pour les deux tempêtes. Les données recueillies auprès des 3 assureurs sont assez homogènes pour les deux tempêtes.

Pour les sinistres liés à Johanna, l'analyse régionale montre un lien entre les types de sinistres (bâti principal, éléments extérieurs, voir Figure 11), le type d'aléa (submersion, chocs/érosion, ou les deux) et les types de côtes (altitude) et d'avant côte (pente plus ou moins forte,) : les côtes plus basses, dont l'avant côte est en pente douce, atténuant l'énergie des vagues ont plutôt été affectées par des submersions, tandis que les côtes rocheuses et de forte pente en avant côte, (Nord Bretagne), conservant l'énergie des vagues, ont plus souvent été affectées par des chocs en façade et de l'érosion, sur des éléments extérieurs au bâti. Ces types de sinistre constituent une part importante des dommages provoqués par Johanna et sont en moyenne plus onéreux que les dommages aux habitations par une submersion.



Figure 11 : Typologie des éléments endommagés (André, 2013)

La tempête Xynthia a provoqué une forte surcote (surcote atmosphérique + surcote liée aux vagues) atteignant plus de 2 m dans la Baie de l'Aiguillon, et se superposant à une marée haute de vives eaux. La configuration basse de l'arrière côte a favorisé une submersion très étendue, provoquant des dommages au-delà de 2 km à l'intérieur des terres, plus particulièrement dans les secteurs fortement urbanisés, mettant notamment en péril des vies humaines. Plusieurs des communes touchées ont un fort pourcentage de résidences secondaires (notamment les îles). Assez peu de sinistres sont rattachés à des chocs de vagues en façade.

Cette première approche régionale montre les points communs entre les deux tempêtes, mais également les différences liés aux forçages, aux processus aléatoires, mais aussi au nombre et à la qualité des données disponibles entre Johanna et Xynthia, reflétant la différence d'intensité de ces deux événements en termes de dommages.

L'analyse à l'échelle régionale montre d'ores et déjà que le coût des sinistres est conditionné par de nombreux paramètres, tant de l'aléa que des enjeux exposés, mais elle reste insuffisante pour établir des fonctions d'endommagement (par exemple, en reliant le coût des sinistres aux hauteurs d'eau).

#### **3.2.4. Analyse des données à l'échelle locale**

L'analyse des dommages à l'échelle locale est réalisée sur un plus petit échantillon de sinistres, pour lesquels les dossiers d'expertise sont suffisamment renseignés. Ce deuxième niveau d'analyse a pour objectif d'identifier les paramètres d'aléas et/ou d'enjeux qui peuvent expliquer les coûts des dommages. Les dossiers retenus fournissent en effet des données parfois très précises sur le déroulement du sinistre, détaillant notamment les éléments endommagés, pour lesquels on peut alors évaluer la valeur du remplacement à neuf. On rappellera que pour Johanna les dossiers retenus étaient ceux qui restaient disponibles et se répartissent sur le pourtour de la Bretagne, tandis que pour Xynthia l'abondance des dossiers d'expertise a nécessité une sélection, sur les communes considérées comme plus impactées (André et Vinchon, 2011).

Cette analyse locale a permis de confirmer puis préciser l'analyse régionale, notamment : (i) la distribution des coûts entre les types d'éléments endommagés (liés au bâti principal ou externes) est très différente entre Xynthia et Johanna (ii) un ratio d'environ 50 % des coûts mobiliers par rapport aux coûts immobiliers (rapport qui sera supposé constant dans la suite de la démarche).

Il apparaît par ailleurs (Figure 12) que peu de sinistres reflètent des dommages aux structures (2 %) des bâtiments ; en revanche, ce sont les différents corps d'état du second œuvre du bâtiment, liés à l'embellissement et l'aménagement intérieur des habitations, qui sont majoritairement endommagés.

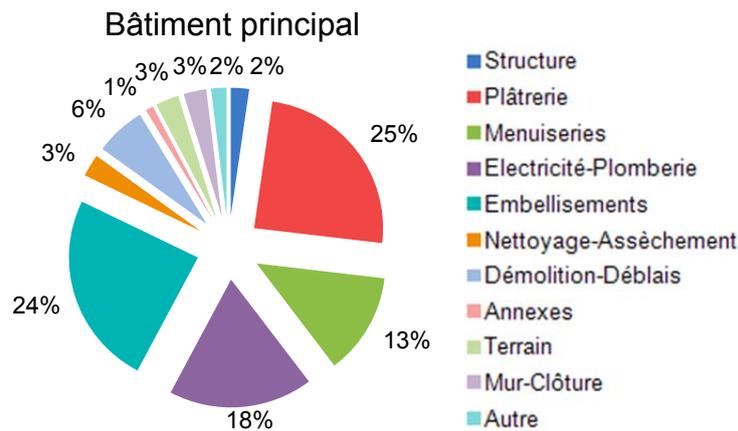


Figure 12 : Distribution des dommages selon les corps d'état endommagés par la submersion liée à Xynthia (André, 2013)

La confrontation de la donnée hauteur d'eau donnée dans les dossiers d'expertise et des coûts d'indemnisation montre une corrélation positive, mais une très forte dispersion des points (Figure 13). L'alignement de certains points sur des valeurs « arrondies » de hauteurs d'eau (1 m ou 1,5 m) s'explique par l'imprécision des relevés des hauteurs d'eau dans certains dossiers. Les graphiques ci-dessous montrent également la différence des coûts indemnisés entre Xynthia et Johanna pour des hauteurs d'eau équivalentes.

Les dommages liés aux structures ou aux éléments extérieurs sont, pour les deux tempêtes, imputables au choc des vagues en façade ou à des conditions de fragilité exceptionnelle du bâti.

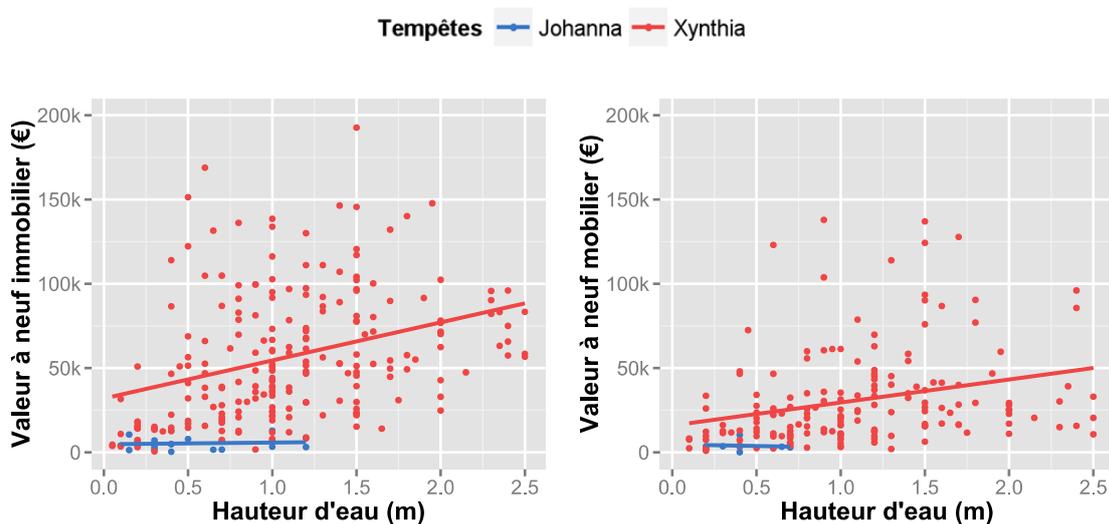


Figure 13 : Coûts des dommages (données d'assurance) en fonction de la hauteur d'eau issue des rapports d'expertise (André, 2013)

Les données de retour d'expérience pour Xynthia ont permis d'attribuer une durée de submersion à chacun des sinistres. L'analyse locale montre que ce paramètre ne n'influence pas directement la dispersion des coûts et serait corrélée avec la hauteur d'eau : les valeurs fortes et les durées importantes correspondent aux valeurs basses des dommages.

Les différentes sources de données sur les hauteurs d'eau (Retours d'expérience Pedreros et al, 2010, SOGREAH, 2011, Devaux et al, 2012-ou dossiers d'expertise) montrent une dispersion à peu près similaire. Les données de hauteur d'eau issues des modèles de propagation de la submersion montrent (pour Xynthia qui dispose d'un nombre suffisant de données) une bonne corrélation avec celle des données d'expertise, mais avec toujours une forte dispersion au regard des coûts. Cette corrélation souligne toutefois la possibilité d'utiliser des données de hauteur d'eau modélisées dans des simulations *ex ante*. Les modèles hydrodynamiques fournissent également les paramètres de vitesse du courant, vitesse de montée de l'eau et permettent d'en dériver le paramètre « intensité de l'inondation » (Clausen, 1989 ; Pistrika et Jonkman, 2010) exprimé par :

$$\text{Intensité de l'inondation} = \text{vitesse du courant} \times \text{hauteur d'eau}$$

Néanmoins, ces différents paramètres ne démontrent pas une meilleure corrélation avec les coûts, expliquée par des vitesses du courant globalement trop faibles pour engendrer des dommages structurels.

Après avoir identifier quels paramètres liés aux aléas pouvaient influencer les coûts des dommages, il s'agit par la suite d'identifier ceux qui sont liés aux enjeux endommagés. Les données liées aux enjeux endommagés, plus ou moins bien renseignés dans les dossiers d'expertise, sont le type de matériaux de construction, la valeur du capital assuré, la surface habitable, le nombre de pièces, la présence d'étage ou de sous-sol. Elles ont été complétées (pour les sinistres Xynthia) par le calcul de la surface au sol (hors d'œuvre brute) à partir des bases de données IGN (BD TOPO et BD PARCELLAIRE) corrigée. Ces différents paramètres sont susceptibles d'influencer le coût des dommages. Si la surface habitable renseigne notamment sur le corps d'état « revêtement de sol ». Il peut être complété par le paramètre « nombre de pièces », qui est, lui, corréléable aux surfaces de cloisons, part importante des éléments à remplacer lors d'une submersion marine.

Un autre paramètre d'enjeu est la valeur initiale de construction du bien immobilier. Pour l'estimer, une démarche d'évaluation du prix des habitations a été entreprise dans le cadre du projet (Daci, 2012). La démarche d'évaluation du coût initial des habitations devait permettre notamment de remplacer la notion de coûts des indemnités par celle du « taux d'endommagement » par rapport à la valeur totale des biens. Si cette analyse n'a pas vraiment permis de différencier des coûts initiaux (au m<sup>2</sup>) selon les types d'habitation, elle apporte toutefois un certain nombre d'informations sur la distribution des coûts de dommages. La définition des « quartiers » est essentiellement liée à l'époque de construction, et ce sont les bâtiments récents qui sont le plus endommagés. Sur les communes analysées à partir des données d'expertises post Xynthia, 60 % des habitations n'ont pas d'étages, près de 40 % appartiennent au type « pavillon moderne » d'une emprise au sol de 135 m<sup>2</sup> en moyenne ; le coût des dommages reste dispersé ; les coûts des dommages aux maisons de vacances (moins équipées) et des maisons sur garages (avec étage) sont plus faibles.

Le dernier paramètre d'enjeu exploré pour expliquer la dispersion des coûts de dommages était le « standing » des habitations. Le type d'occupation (principale ou secondaire) montre une nette différence dans la dispersion des coûts, les résidences principales ayant été plus fortement indemnisées, vraisemblablement en relation avec leur surface habitable et la qualité de leur confort (isolation, chauffage). Cet indicateur est cependant qualitatif et binaire. Par ailleurs, les données sur le revenu moyen communal des habitants ne constituent pas un indicateur fiable, les variations infra-communales pouvant être importantes et ces données n'intègrent pas notamment les revenus des propriétaires de résidence secondaires.

La dernière démarche pour analyser ces données a été de définir des niveaux de dommage (qualitatifs), selon une démarche analogue à celles qui existent pour d'autres risques. L'échelle proposée se base sur les échelles construites pour les inondations fluviales, adaptée pour décrire les dommages au bâti principal, aux bâtiments annexes et aux éléments extérieurs, en détaillant les dommages non structurels dans les 4 premières classes. Le lien entre le niveau de dommage, la hauteur d'eau et le coût des dommages montre une assez bonne relation et pourrait donner un ordre de coût des dommages en fonction de la hauteur d'eau (Tableau 1, Figure 14)

Type de sinistre	bâtiment principal	bâtiment annexe	éléments extérieurs
D0	pas de dommages	pas de dommages	pas de dommages
D1	seulement sous-sol ou vide-sanitaire inondés	dégâts légers bâti fragile (bois)	dégâts légers clôtures et portails
D2	sous-sol inondé, RDC inondé par infiltration : dommages menuiseries extérieures et sols	dégâts importants bâti fragile, légers bâti dur (maçonnerie)	dégâts importants clôtures, légers murs, piscines et terrasses
D3	sous-sol complètement inondé, RDC inondé sous fenêtres : dommages importants au second œuvre	destruction bâti fragile, dégâts importants bâti dur et mobil-homes	destruction clôtures, dégâts importants murs, piscines et terrasses
D4	RDC complètement inondé : dommages très importants sur tout le second œuvre	dégâts structurels bâti dur, destruction mobil-homes	destruction clôtures, murs, piscines et terrasses, cas d'affouillements
D5	RDC complètement inondé : dommages importants sur tout le second œuvre et dégâts structurels : fondations, murs porteurs et/ou toiture	destruction bâti dur	destruction clôtures, murs, piscines et terrasses, cas de déstabilisation importante du terrain par recul du trait de côte

Tableau 1 : Échelle de dommages mise en place pour les différentes parties des bâtiments affectés par la submersion marine (André, 2013)

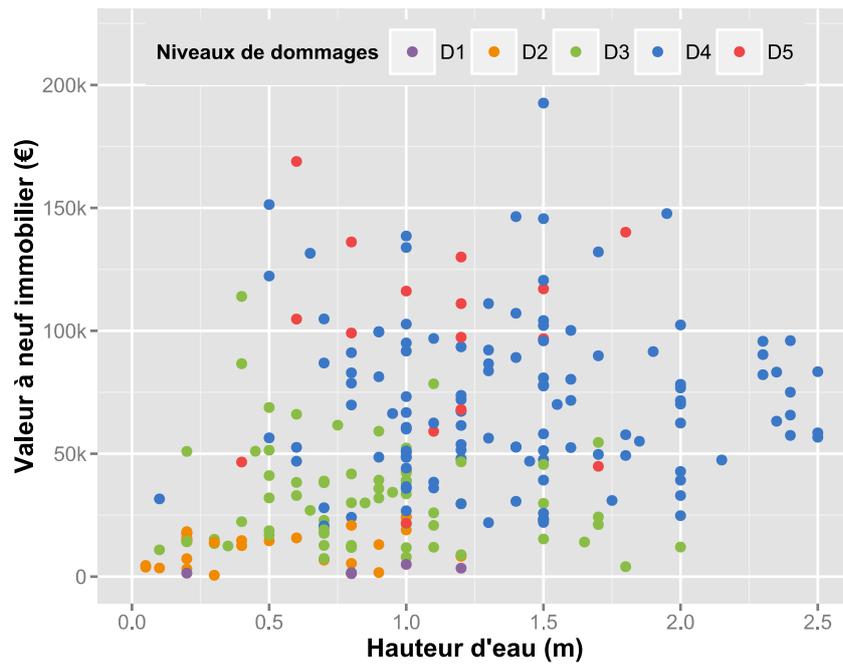


Figure 14 : Coûts des dommages en fonction de la hauteur d'eau et du niveau de dommage (André, 2013)

Le Tableau 2 résume, pour Xynthia, l'ensemble des paramètres identifiés comme ayant un rôle dans l'explication des coûts, et leur importance relative, ainsi que la source des données utilisées pour l'analyse *ex post* des dommages. La dernière colonne indique comment obtenir ces mêmes données et de façon plus exhaustive dans le cadre d'une analyse ou modélisation *ex ante*.

Variables	Source	Explication du coût des dommages au bâti	Disponibilité <i>ex ante via</i>
<b>Caractérisant l'aléa</b>			
Hauteur d'eau	Rapports d'expertise, terrain et modélisation	Forte	Modélisation hydraulique
Processus de l'aléa	Rapports d'expertise	Faible car intensité limitée sur le bâti	Jugement d'expert et terrain
Durée de submersion	Témoignages terrain	Présumée faible en submersion marine	Jugement d'expert et terrain
Vitesse du courant	Modélisation hydraulique	Faible car intensité limitée sur le bâti	Modélisation hydraulique
<b>Caractérisant les enjeux</b>			
Matériaux de construction	Rapports d'expertise	Présumée forte si concerne le second œuvre	Fichiers fonciers
Valeur assurée du mobilier	Données d'assurance	Faible car limitée au mobilier	Données d'assurance
Valeur assurée de l'immobilier	Données d'assurance	Présumée forte, mais non disponible	Données d'assurance
Surface du rez-de-chaussée	Rapports d'expertise et BD PARCELLAIRE®	Forte	BD PARCELLAIRE® ou fichiers fonciers
Nombre de pièces du rez-de-chaussée	Rapports d'expertise	Forte	INSEE ou fichiers fonciers
Présence d'étage	Rapports d'expertise et terrain	Forte	INSEE, BD TOPO® ou fichiers fonciers
Présence de sous-sol	Rapports d'expertise et terrain	Forte	INSEE ou fichiers fonciers
Typologie de quartier	Photo-interprétation SIG	Faible car sinistres aux lotissements dominants	Photo-interprétation SIG
Typologie de bâti (âge)	Terrain	Faible car sinistres aux pavillons modernes dominants	Fichiers fonciers
Coût de construction	Modélisation du bâti	Faible car évalué sans variations de standing	Fichiers fonciers
Type d'occupation	Rapports d'expertise	Forte	INSEE ou fichiers fonciers
Revenu des habitants	INSEE ou fichiers fonciers	Présumée forte si disponible individuellement	Fichiers fonciers

Tableau 2 : Importance des paramètres caractérisant l'aléa et les enjeux dans l'explication des coûts de dommages. Sources des données : cas dell'événement Xynthia (André, 2013)

## 4. Quelle modélisation *ex ante* des dommages ?

### 4.1. OBJECTIF

Sur la base de l'analyse *ex post* des dommages, l'objectif final de la thèse de C. André a été de mettre en place et de comparer différents modèles de prédiction *ex ante* du coût des dommages des submersions marines aux habitations. Ces modèles ont donc été construits de manière empirique, c'est-à-dire en se basant sur les coûts observés lors de Xynthia.

Au préalable, les données analysées à l'échelle locale ont été comparées (Figure 15) à des modèles existants dans la littérature sur les inondations fluviales : Torteretot, 1993, FHRC (Penning-Rowse *et al.*, 2010) et CEPRI 2013. Il s'agissait de déterminer s'il existe une différence significative entre les dommages observés lors d'une submersion marine et ceux prédits par des fonctions d'endommagement utilisées couramment par des gestionnaires des risques pour évaluer la rentabilité de projets d'aménagements via une analyse coût-bénéfice.

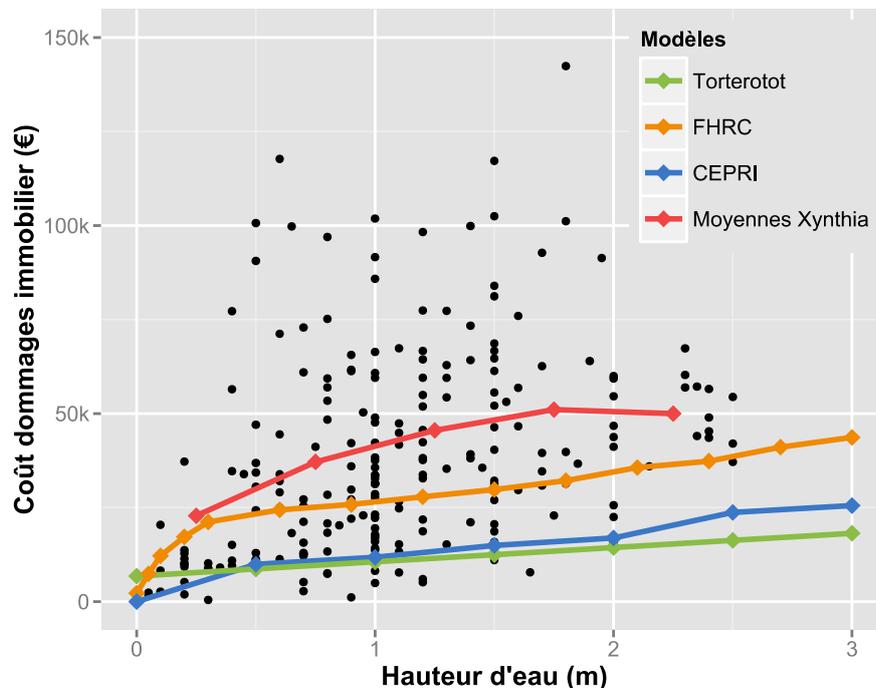


Figure 15 : Comparaison des données de coûts des dommages en fonction de la hauteur d'eau avec les modèles d'endommagement disponibles dans la littérature (André, 2013).

La Figure 15 montre que les coûts des dommages aux habitations observés lors de Xynthia sont nettement plus élevés que ceux qui seraient prédits par les trois modèles existants. Cette différence peut s'expliquer par plusieurs raisons, qui sont liées aux spécificités de l'aléa submersion marine, à celles des enjeux impactés et également au contexte médiatique et politique spécifique dans lequel ont été indemnisés les dommages de cet événement. Si ce dernier point n'est valable que pour des événements d'ampleur particulièrement importante, et si les caractéristiques de vulnérabilité des enjeux (absence d'étage, âge récent des habitations, vulnérabilité des matériaux particulière à la submersion) diffèrent d'une région à l'autre, le caractère salin de la submersion marine est le principal paramètre qui explique les coûts élevés.

de l'évènement Xynthia. Ce constat est confirmé par les experts d'assurance et justifie l'utilisation des données de Xynthia pour la construction de modèles prédictifs des coûts liés à la submersion marine.

## 4.2. APPLICATION À LA MODÉLISATION DES DOMMAGES DE XYNTHIA

En s'inspirant des modèles développés dans les autres pays pour la prédiction des dommages, différentes méthodes statistiques ont été testées. Dans un premier temps, sont mise en œuvre des modèles univariés, c'est-à-dire ne prenant en compte qu'un paramètre pour expliquer les coûts, le plus souvent la hauteur d'eau (fonctions d'endommagement par régression linéaire et par classes de hauteur d'eau). Dans un second temps, des modèles multivariés, utilisant plusieurs paramètres concernant l'aléa et les enjeux pour expliquer les coûts (régression multiple et arbres de régression). Les modèles développés sont décrits dans la partie V de la thèse (André, 2013). Les principaux résultats de la modélisation sont résumés ci-dessous. 2013

### 4.2.1. Fonctions d'endommagement univariées

D'après le modèle le plus répandu pour l'évaluation des dommages, la première méthode statistique employée a été la régression simple (Tableau 3, Figure 16).

Modèle	R <sup>2</sup>	Écart type $\sigma$ résiduel	F de Fisher	Valeur p
	0.1187	28 940	28.54	2.357e-07 ***
Paramètres	Coefficient $\beta$	Écart type $\sigma$	t de Student	Valeur p
Constante ( $\beta_0$ )	24 385	4 376	5.573	7.58e-08 ***
Hauteur ( $\beta_1$ )	18 620	3 485	5.343	2.36e-07 ***

Tableau 3 : Résultats du modèle de régression simple du coût des dommages par la hauteur d'eau (André, 2013).

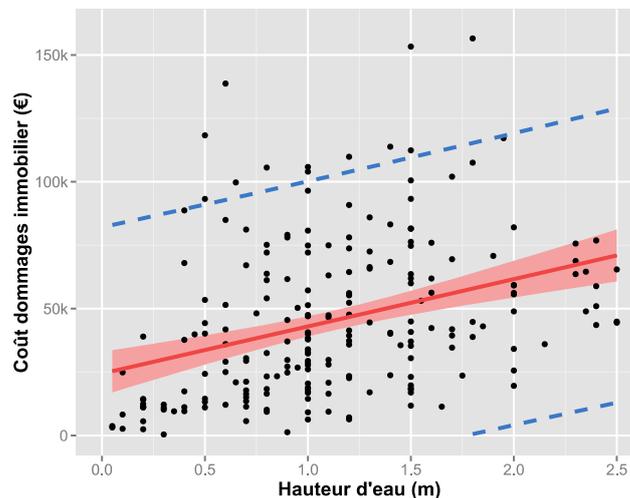


Figure 16 : Modèle de régression simple du coût des dommages (C) en fonction de la hauteur d'eau (H) pour Xynthia :  $C = 24\,385 + 18\,620 H$  (André, 2013)..

Intervalle de confiance du modèle en rose, intervalle de prédiction du modèle en tiretés bleus

La dispersion mentionnée à l'étape de l'analyse des données rend les intervalles de prédiction (incertitude) très importants, à l'aide de ce type de fonction. Des transformations de la variable

coût, telles que le logarithme ou le coût rapporté à la valeur des biens (taux d'endommagement), ne suffisent pas à réduire cette incertitude.

Une autre option consiste à prédire le coût des dommages pour une habitation en se basant sur la moyenne des coûts observés pour toutes les habitations qui ont été inondées par la même gamme de hauteur d'eau lors de Xynthia (Figure 17).

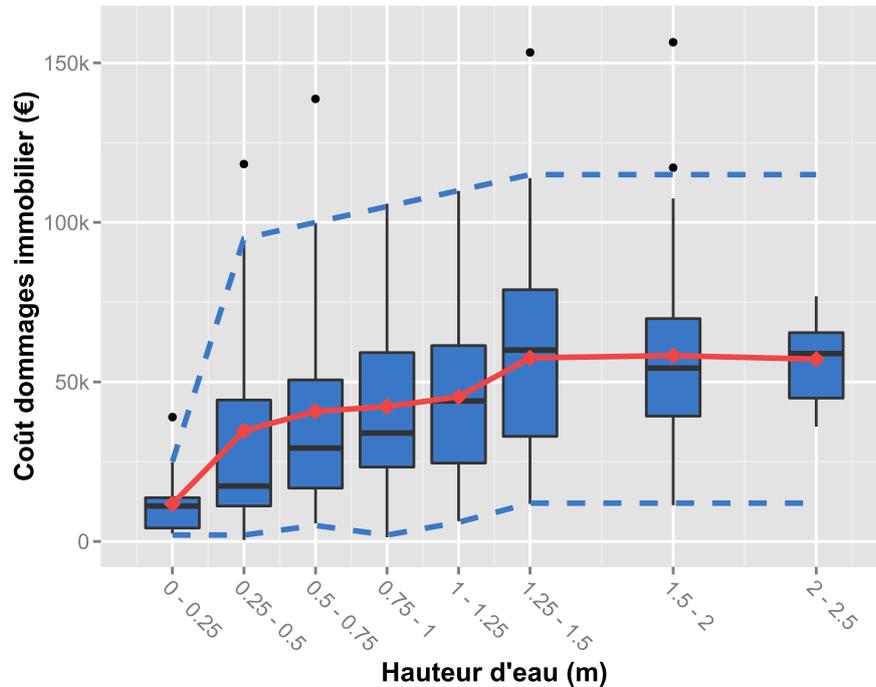


Figure 17 : Modèle de coûts moyens des dommages par gamme de hauteur d'eau à partir des données de Xynthia. (André, 2013).

Les points noirs représentent les valeurs extrêmes en dehors de l'intervalle de prédiction

Ce type de modèle a toujours une fourchette d'incertitude importante, mais a l'avantage de montrer des seuils pour lesquels les coûts augmentent de manière importante : au-delà de 25 cm et dans une moindre mesure vers 1,5 m. La structure de ce type de modèle est la plus proche des fonctions d'endommagement construites à dire d'expert. Elle est également la plus simple à utiliser pour des questionnaires des risques et peut être exploitée comme première approximation de fonction d'endommagement dans le cas de Xynthia.

#### 4.2.2. Modèles d'endommagement multivariés

Les modèles d'endommagement multivariés reposent sur des techniques statistiques permettant de prendre en compte plusieurs variables explicatives pour prédire le coût des dommages. D'après l'analyse des dommages *ex post* décrite dans les chapitres précédents, différentes variables quantitatives ont été identifiées comme pouvant jouer un rôle dans l'explication des coûts des dommages (Tableau 2). La régression multiple permet de déterminer si ces paramètres sont statistiquement significatifs et quelle est leur influence relative sur la variable coût des dommages. Ce type de modèle a déjà été exploré pour prédire les coûts des inondations dans la littérature internationale (Zhai et al., 2005 ; Prettenthaler et al., 2010 ; Kim et al., 2013).

Les variables retenues pour le modèle multivarié sont une seule variable pour l'aléa (la hauteur d'eau) et quatre variables pour les enjeux endommagés (Tableau 4) : la surface et le nombre de

pièces des habitations, la présence de sous-sol et si l'habitation est une résidence principale ou secondaire, les deux dernières variables étant des variables qualitatives. Les autres paramètres de l'aléa (durée de l'inondation, vitesse du courant) ne sont pas retenus ici, mais pourraient cependant avoir une influence dans des submersions plus violentes que ne l'ont été celles de Xynthia, notamment dans des cas où des ruptures de digues importantes se produiraient.

Les résultats de la modélisation multivariée sont donnés dans le tableau ci-dessous. Ramené à l'échantillon de données Xynthia, un  $R^2$  ajusté de 48 % indique que les variables retenues expliquent près de la moitié des coûts des dommages. Le test de Fisher (29.76) indique que le modèle est globalement significatif.

Modèle	$R^2$ ajusté	Écart type $\sigma$ résiduel	F de Fisher	Valeur p	
	0.4861	22 960	29.76	< 2.2e-16 ***	
Paramètres	Coefficient $\beta$	Écart type $\sigma$	t de Student	Valeur p	VIF
Constante	-41 313	10 337	-3.996	0.000101 ***	-
$\sqrt{\text{Hauteur}}$	35 705	7 286	4.901	2.49e-06 ***	1.148
Surface RDC	123	35	3.556	0.000506 ***	1.290
Nb Pièces RDC	11 009	1 943	5.666	7.48e-08 ***	1.308
Sous-sol	18 685	5 985	3.122	0.002162 **	1.027
Occupation	-12 962	4 233	-3.062	0.002614 **	1.287

Tableau 4 : Résultats du modèle de régression multiple du coût des dommages (André, 2013).

Par ailleurs, l'incertitude des prédictions des coûts diminue avec les modèles multivariés, mais reste malgré tout importante (Figure 18). Cela est imputable notamment au paramètre de standing des habitations, très variable, et qui empêche l'explication détaillée des coûts de nombreux sinistres ; des indicateurs de ces paramètres, autres que les revenus des habitants, devront donc être recherchés dans l'avenir.

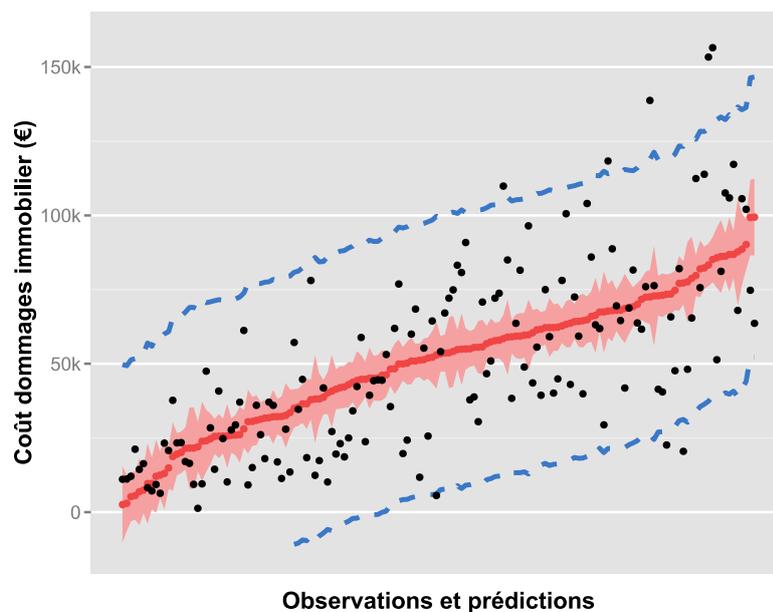


Figure 18 : Modèle de régression multiple du coût des dommages (André, 2013)

Une autre piste méthodologique explorée est celle des arbres de régression. Cette méthode de classification, proposée très récemment dans la littérature sur les inondations fluviales (Merz et al., 2013), est une autre perspective pour des analyses multivariées. La Figure 19 présente un test de mise en place d'un arbre de régression sur l'échantillon de données de Xynthia, grâce à l'algorithme CART (Classification And Regression Trees) avec les mêmes variables qu'en régression multiple. Cette méthode cherche à diviser la variable dépendante (le coût des dommages que l'on cherche à expliquer) en plusieurs sous-ensembles en maximisant l'homogénéité de ces derniers. Elle permet notamment de faire apparaître des seuils dans les valeurs des variables explicatives, de part et d'autre desquels le coût des dommages est relativement différent, contrairement aux méthodes de régression qui recherchent des évolutions linéaires du coût en fonction des variables explicatives.

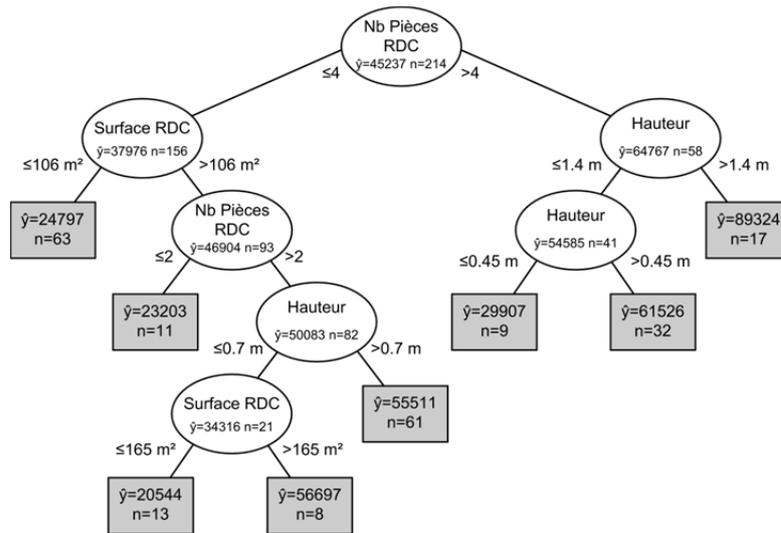


Figure 19 : Arbre de régression développé par la méthode CART pour les données de Xynthia (André, 2013).

Cette méthode est une alternative aux modèles de régression multivariés, cependant elle nécessite pour une construction rigoureuse, des jeux de données sur les dommages plus nombreux que celui rassemblé dans le cadre de cette thèse.

### 4.3. QUEL CHOIX, QUELLES LIMITES ?

Les nombreuses incertitudes sur les données initiales, relevées dans ce travail de recherche mettent en exergue la difficulté d'arriver à des évaluations fines des coûts des dommages *a posteriori* (*ex ante*) y compris avec les modèles existants (fonctions d'endommagement). Ces modèles n'ont en effet pas été développés sur la base de méthodes empiriques mais sur la base de « dire d'expert ». Le choix entre modèles univariés ou multivariés, entre méthodes statistiques d'économétrie (régression) ou de classification (gammes de hauteur d'eau ou arbres de régression) dépendra de l'objectif et de l'utilisation des modèles développés, différents pour les assureurs et les gestionnaires des risques.

La méthode empirique, à partir de données *ex post* est la seule qui permet le développement de modèles multivariés, permettant d'intégrer les relations complexes entre les paramètres de l'aléa et les enjeux, et de comprendre davantage les causes des coûts liés aux différents types de dommages, et ainsi de choisir dans chaque cas, les aménagements ou mesures de réduction de la vulnérabilité les plus appropriées et les plus efficaces, en fonction de l'objectif attendu.

Les différents modèles testés statistiquement soulignent tous la nécessité d'un échantillon plus représentatif de données et de données plus rigoureuses. Le cas échéant, celles-ci devront couvrir davantage d'évènements et de paramètres tant de l'aléa que des enjeux, au niveau de détail le plus important, c'est-à-dire celui des rapports d'expertise.

## 5. Synthèse et recommandations

### 5.1. APPORTS DE LA DÉMARCHE ET DISCUSSIONS

#### 5.1.1. Analyse des forçages et des aléas

Les travaux de définition d'indicateurs régionaux des forçages et aléas (hors l'effet direct du vent) et les modélisations locales de la submersion ont permis de distinguer pour chacune de ces deux tempêtes les processus aléatoires (franchissement, débordement, canalisation par des zones basses) et l'importance de la configuration du trait de côte et de la topographie dans ces processus. Les modèles locaux de propagation de la submersion montrent pour ces deux événements, une bonne cohérence avec les observations de terrain et les données rassemblées sur les dommages, permettant d'approcher, au moins à l'échelle locale, le lien de cause à effet entre processus aléatoire et dommages et coûts.

Si cette interaction s'explique à l'échelle locale, l'échelle régionale est moins adaptée, en lien avec une forte variabilité spatiale tant des forçages lors d'une tempête que de la configuration morphologique du littoral (pente de l'avant côte, trait de côte, orientation de celui-ci par rapport aux vagues, etc.).

Cette approche basée sur l'exemple des conséquences de deux tempêtes mériterait d'être confortée par l'analyse d'autres événements, soit historiques, soit à venir ; les données historiques, si on peut reconstituer une partie des conditions de forçage à partir des données et modèles météorologiques, seront néanmoins vraisemblablement insuffisantes pour caler les processus de l'aléa avec les dommages et *a fortiori* avec leur coûts. Pour travailler sur les événements à venir, il sera donc nécessaire de veiller à recueillir un maximum de données *ex post* sur l'aléa (hauteur d'eau, durée de submersion, vitesses d'écoulement) en retour d'expériences sur les événements, et de promouvoir l'utilisation de ces approches dynamiques à l'échelle locale,.

#### 5.1.2. Analyse des dommages

Les travaux réalisés sur les données d'assurance et les données complémentaires aux échelles régionale et locale dans une première approche *ex post* ont permis d'identifier une typologie des dommages, essentiellement aux habitations, et affectant principalement le second œuvre. L'analyse du coût des dommages indemnisé permet d'identifier les facteurs (paramètres) des aléas et des enjeux qui expliquent le mieux ces coûts dans le cas des deux tempêtes analysées ; hauteur d'eau pour l'aléa, surface au sol, nombres de pièces, existence d'un sous-sol, usage en résidence principale ou secondaire pour les enjeux. L'incertitude restante suggère également la part de paramètres plus difficilement quantifiables (tels que le « standing »).

Cette analyse présente cependant en des limites, en raison de la qualité variable et la non-complétude des données initiales, et également, pour l'évènement Johanna, de la faible taille de l'échantillon de données.

### 5.1.3. Vers une modélisation « ex ante »

L'analyse *ex post* ayant identifié les paramètres influençant le coût des dommages, la démarche a été poursuivie pour évaluer, grâce à cette information les modèles prédictifs disponibles. Dans le cas de Xynthia, le modèle multivarié s'est révélé plus adapté. Cette approche empirique ne préconise pas une méthode plus qu'une autre, considérant que selon la qualité et la quantité des données, ainsi que les différentes utilisations des modèles produits et le niveau de précision requis, il sera plus ou moins justifié de choisir un modèle univarié ou multivarié.

## 5.2. PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

Les perspectives et recommandations présentées ci-après vont autant dans le sens de poursuivre la recherche entreprise dans le cadre du projet, que de pouvoir à terme arriver, en routine, à incrémenter les bases de données et leur traitement.

Les travaux issus du projet JOHANNA permettent de formuler un certain nombre de recommandations (André, 2013), notamment pour améliorer la qualité et l'accès aux données assurantielles et mais aussi pour poursuivre la démarche entreprise et conforter la modélisation *ex ante* en augmentant le nombre de données *ex post* disponibles. Ces diverses recommandations ont fait l'objet en fin de projet d'une table ronde lors de l'atelier de restitution du projet aux professionnels de l'assurance, aux gestionnaires du risques et aux scientifiques. L'apport de cette discussion est intégrée dans ce paragraphe.

Si l'accès à ces données et leur plus grande précision doit améliorer l'approche statistique et la qualité des modèles l'attente de la fondation MAIF, co-financeur du projet et des professionnels de l'assurance est forte en ce qui concerne les recommandations et outils identifiés, pour orienter la prévention et disposer de moyens de prédiction des coûts (fonctions d'endommagement). Les gestionnaires du risque attendent également l'opérationnalité de ces outils, dans l'objectif d'améliorer la prévention collective et/ou individuelle. Cette attente des diverses communautés de la gestion des risque a été confirmée lors de l'atelier de restitution du projet le 30 janvier 2014. Il ressort également des discussions lors de l'atelier un fort besoin d'outils de communication et de compréhension, auprès des collectivités notamment.

### 5.2.1. Améliorer la donnée assurantielle initiale

Comme souligné ci-dessus, il est important d'améliorer et de systématiser le recueil des données, tant sur les dommages, que sur l'aléa et les enjeux exposés, au niveau des fichiers de sinistre et dans les dossiers d'expertise. Un complément d'information dans les fichiers de sinistres (listings-niveau 1), notamment sur les caractéristiques des habitations et de leur contrat d'assurance permettrait de renforcer l'analyse à l'échelle régionale.

Une saisie informatisée et systématique pour chaque dossier d'expertise, standardisée et commune à tous les assureurs et experts assurantiels faciliterait cette acquisition, et permettrait de garantir la qualité des informations et leur comparaison. Notamment, en recueillant systématiquement la hauteur d'eau, en précisant si elle est mesurée par rapport au sol ou au plancher, ainsi que des informations typologiques sur le second œuvre des habitations.

La faisabilité de cette amélioration a été un sujet de discussions lors de l'atelier ; Assureurs, réassureurs et experts partagent ce besoin d'amélioration et de standardisation qui nécessiterait une démarche proactive et concertée de leur part ; ils restent réservés cependant quant à la multiplication des données et le coût induit, mais aussi quant à l'accessibilité de

certaines données, telles que les caractéristiques des habitations en termes de matériaux utilisés pour le second œuvre.

### **5.2.2. Améliorer l'accès aux données statistiques sur les enjeux**

Ce travail témoigne de la mise à disposition exceptionnelle de données brutes assurantielles pour un travail de recherche. Il a cependant été nécessaire de compléter ces données par d'autres sources de données, notamment de l'INSEE ; celles-ci étaient cependant plus ou moins exhaustives ou à des niveaux d'agrégation différents des données assurantielles. L'accès à certaines données (sur les garanties des contrats), qui auraient pu permettre d'affiner le critère de « standing » de l'habitat n'a pas été possible, notamment en raison de la confidentialité de ces données. Par ailleurs, le fichier FILOCOM (Fichier des Logements à la COMune) géré par la DGFIP(Direction générale des finances publiques) contient des informations quantitatives et localisées sur les logements (type, année de construction, surface,...). Cependant ce fichier est à accès réservé aux services de l'Etat et dans des finalités de politique publiques.

Il conviendrait de faciliter l'accès à ces différentes données pour améliorer l'analyse des dommages après un événement et améliorer la modélisation prédictive, tout en garantissant le respect de la confidentialité dans le traitement qui pourrait en être fait.

### **5.2.3. Rendre systématique l'évaluation de l'aléa ?**

La définition des indicateurs de forçages à l'échelle régionale est un exercice reproductible sur d'autres événements, dans la mesure où l'on dispose des éléments de forçage (vent, pression, vagues, et premier niveau (listing des sinistres) des données d'assurance). Ces indicateurs ne permettent cependant pas d'aller beaucoup plus loin que de comparer les types de dommages aux forçages.

La modélisation locale et dynamique de la submersion a été faite ici en approche *ex post* ; elle a permis de préciser les processus physiques de l'aléa (débordement/franchissement, étendue, hauteur d'eau, vitesse) et complété le cas échéant l'information apportée par les dossiers d'expertises sur la hauteur d'eau.

La présentation de la modélisation dynamique de la submersion, lors de l'atelier de restitution, a suscité une demande des acteurs du risque présents pour développer cet outil en routine. Cette demande est liée au besoin de communication, mais aussi parce que l'application de cette modélisation dans une approche « *ex ante* » sera le support nécessaire d'une modélisation *ex ante* du coût des dommages, comme celles qui sont réalisées pour les analyses coûts-bénéfices.

Cependant, ce type de modélisation relève encore à ce jour de la recherche, impliquant la mise en place d'une chaîne de modèles à partir des données de forçage, et la nécessité de disposer d'un modèle numérique d'élévation (incluant le bâti) le plus précis possible. Ces outils ne sont pas, à ce jour, utilisables en « routine », et appellent à des développements plus poussés.

Par ailleurs, comme souligné dans cette étude le processus de submersion est fortement dépendant des forçages, mais également de la configuration de la côte. Les travaux de Garcin et al (2013) propose une typologie du littoral français, et des outils d'évaluation de la submersion à adapter à chacune de ces typologies

#### **5.2.4. Multiplier les analyses des événements passés ou à venir**

Il importera également de reproduire les démarches de modélisation de l'aléa et d'analyse économiques proposées ici sur d'autres événements passés ou à venir, de contextes de forçage et de configurations géomorphologiques différentes afin qu'une plus grande quantité de données, permettent d'améliorer l'approche statistique, et de conforter l'identification des paramètres de l'aléa ou des enjeux qui expliquent l'endommagement. À moyen terme, multiplier l'analyse des événements permettra également d'améliorer encore la définition des liens entre processus de l'aléa, présence des enjeux et dommages et d'enrichir les typologies proposées dans André (2013) en termes d'aléas et de dommages, et viendra appuyer les outils de prédiction (modélisation *ex ante*).

#### **5.2.5. Étendre la démarche à d'autres enjeux que le bâti assuré**

Dans le projet JOHANNA, on s'est focalisé sur les dommages aux habitations, qui constituaient l'essentiel des sinistres assurés des deux événements étudiés. Pour obtenir une évaluation exhaustive du coût de l'endommagement, une évaluation de l'ensemble des dommages tangibles et intangibles, directs et indirects devrait être faite. Les méthodes d'évaluation du coût des dommages feront appel à d'autres méthodologies développées notamment par les approches d'économie environnementale.

#### **5.2.6. Répondre aux objectifs de prévention**

Le travail présenté ici donne des éléments pour l'évaluation du coût des dommages et identifie, pour les habitations, les éléments les plus exposés aux dommages liés à une submersion marine. Il ne répond pas directement à la question d'améliorer la prévention et ne préjuge pas de mesures réglementaires qui pourraient être prises pour diminuer l'exposition à la submersion marine. Il donne cependant quelques clés pour aider aux stratégies de préventions.

Un apport majeur de cette étude à la mise en place d'une politique de prévention est d'apporter des éléments de coûts des dommages pour pouvoir les comparer à celui des mesures de protection ou de prévention pour réaliser les analyses coûts-bénéfices qui doivent permettre d'évaluer et choisir des stratégies de prévention/protection.

Par ailleurs, en première analyse, la typologie des habitats endommagés confirme la nécessité tant de limiter l'urbanisation en zone exposées que d'adapter l'architecture des habitats aux risques (par exemple en limitant l'aménagement des sous-sols et du rez-de-chaussée).

L'analyse des dommages identifie la forte sensibilité du second œuvre à l'inondation ; la particularité de la submersion marine est l'impact de la salinité qui a amené les experts à proposer le remplacement systématique des cloisons, des parquets et carrelages et des réseaux d'électricité. La réduction de la vulnérabilité du bâti serait une première étape, pour les bâtiments neufs, à l'échelle de l'individu (par exemple : réseaux électriques descendants, cloisons sans éléments métalliques). Cependant le système actuel, n'indemnisant pas les mesures de préventions individuelles n'incite pas l'individu à prendre des mesures préventives sur son bâti..

La recommandation vers une prévention individuelle et en termes d'urbanisme a été reprise et discutée lors de l'atelier de restitution : Est évoqué notamment l'existence des règles parasismiques, applicable à l'échelle d'une commune, et imposées au niveau national par la loi.

Dans le domaine des inondations (au sens large), l'échelle d'application est différente. Les « bonnes pratiques » conseillées par le guide national pour l'établissement des PPRI (1999) et plus récemment celui des PPRL(2013) ne peuvent être rendues réglementaires que par l'application des PPR elles sont donc dépendantes des prescriptions de chaque PPR, et applicables localement.

Des guides de construction existent pour une prévention individuelle des inondations (s.l.) (Salagnac 2006). Des documents ont été construits récemment par le CEPRI (2009, 2010,2013) sur les bonnes pratiques en matière de construction et prévention. Ces documents servent notamment de référentiels pour la mise à jour des guides pour l'établissement des plans de prévention du risque Inondation (PPRI), notamment dans le contexte de l'application de la Directive Inondation (2007/60/CE) et la mise en place de programmes d'action pour la prévention des inondations (PAPI). Ces divers ouvrages nécessiteront d'être complétés au regard des spécificités du risque de submersion.

### **5.2.7. Pistes de recherche**

Il ressort des travaux menés dans le cadre des travaux et de l'analyse ci-dessus que les développements à venir portent d'une part sur l'amélioration des données et la standardisation de leur acquisition, pour permettre l'incrémentation des approches proposées dans la thèse et leur développement pour améliorer la possibilité d'une modélisation *ex ante* des dommages. Plus de données plus précises devraient notamment permettre de mieux développer l'outil prometteur des arbres de régression.

Certains aspects restent à compléter comme signalé par André (2013), pour affiner la définition des paramètres influençant ce coût, notamment en évaluant le paramètre « standing » dans ce coût, ainsi que en évaluant le poids de la culture du risque dans une réduction possible de ce risque.

Ces travaux fournissent des éléments pour permettre dans une optique stratégique de prévention de réaliser des analyses coûts/bénéfices. Ils ne répondent que partiellement à l'amélioration d'une politique de prévention, mais apportent un éclairage sur la nécessité d'une adaptation de l'habitat individuel pour en augmenter sa résilience, ces deux notions nécessitant encore à ce jour une démarche de recherche.

L'apport de la modélisation dynamique de l'aléa dans l'interprétation des données assurantielles de dommages a été montré dans les deux contextes étudiés ;les limites de sa reproductibilité dans d'autres situations (événement et/ou sites) sont cependant soulignées : plutôt qu'une application en routine, il s'agira de sélectionner les outils pour qualifier l'aléa en fonction des forçages liés aux événements de tempête et de la configuration de la côte (Garcin et al, 2012).

Par ailleurs, une modélisation *ex ante* des coûts des dommages provoqués par une submersion, nécessitera, pour caractériser les paramètres de l'aléa la qualification de la submersion avec ces outils



## 6. Conclusion

Le projet JOHANNA, grâce à l'exploitation scientifique des données d'assurance, a permis une approche innovante sur l'analyse des dommages liés à la submersion marine occasionnée par des tempêtes.

Dans la dimension de ce projet, l'analyse a ciblé les dommages aux habitations lors des submersions provoquées par les tempêtes Johanna et Xynthia ; il n'était pas possible de couvrir l'ensemble des typologies de dommages, qui comprennent les vies humaines, les dommages directs et indirects aux activités économiques, les dommages aux biens et services environnementaux. Le focus a été fait, à l'échelle locale sur Gâvres, (Morbihan) pour la tempête Johanna, aux Bouchôleurs (Charente Maritime) pour la tempête Xynthia. Il cibla le bâti assuré endommagé, et sa relation avec d'une part les processus de propagation de l'aléa, et d'autre part la nature des enjeux exposés. Cela a permis néanmoins de montrer la complexité des processus d'endommagement par l'aléa et leurs influences respectives sur le coût des dommages. Cette connaissance empirique a permis de rassembler les éléments pour analyser la fiabilité des différents modèles économiques de prévision des dommages et leur adaptation aux événements étudiés.

Ce travail de recherche apporte donc une brique importante à la connaissance des risques côtiers et de la vulnérabilité des enjeux exposés, en y apportant des éléments qui permettent d'évaluer le coût des dommages au bâti lors d'un événement *ex post*, le lien de ces coûts avec l'aléa et les enjeux et l'analyse des outils qui permettront de prédire les dommages *ex ante*. Il prendra toute son importance, en termes de prévention et de prédiction, s'il est conforté par les développements proposés ci-dessus.



## 7. Bibliographie

Aminot, S., 2011. Analyse économique de données d'assurance de dommages à l'habitat liés aux submersions marines sur le littoral breton et atlantique, mémoire de Master 2 de l'Université Paris-Est Marne-la-Vallée, 39p.

André, C. et Vinchon, C., 2011. Projet JOHANNA : Analyse des processus de dommages liés aux submersions marines et à l'effet des vagues. Application aux tempêtes Johanna et Xynthia. Rapport d'avancement de l'année 1. Rapport BRGM/RC-60466-FR, 27 p., 13 fig.

André, C., Vinchon, C., Monfort, D., Le Roy, S. et Pedreros, R., 2012. Projet JOHANNA : Analyse des processus de dommages liés aux submersions marines et à l'effet des vagues. Application aux tempêtes Johanna et Xynthia. Rapport d'avancement de l'année 2. Rapport BRGM/RC-61707-FR, 25 p., 16 fig.

André, C., Monfort, D., Bouzit, M. et Vinchon, C., 2013. Contribution of insurance data to cost assessment of coastal flood damage to residential buildings: insights gained from Johanna (2008) and Xynthia (2010) storm events, Natural Hazards and Earth System Sciences, 13, 2003-2012, <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-13-2003-2013>.

André C., 2013. Analyse des dommages liés aux submersions marines et évaluation des coûts induits aux habitations à partir de données d'assurance - perspectives apportées par les tempêtes Johanna (2008) et Xynthia (2010), thèse de doctorat de l'université de Bretagne Occidentale, 299p.

Bertin, X., Bruneau, N., Breilh, J.-F., Fortunato, A. B. et Karpytchev, M., 2012. Importance of wave age and resonance in storm surges: the case Xynthia, Bay of Biscay, Ocean Modelling, 42, 16-30, <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceomod.2011.11.001>.

Booij, N., Ris, R. C. et 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

Cariolet, J.-M. et Suanez, S., 2009. Approche méthodologique pour une cartographie du risque de submersion des côtes basses, La Houille Blanche, 2, 52-58, <http://dx.doi.org/10.1051/lhb/2009014>.

Cariolet, J.-M., 2010. Use of high water marks and eyewitness accounts to delineate flooded coastal areas: the case of storm Johanna (10 March 2008) in Brittany, France, Ocean & Coastal Management, 53, 11, 679-690, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2010.09.002>.

Cariolet, J.-M., 2011. Inondation des côtes basses et risques associés en Bretagne, vers une redéfinition des processus hydrodynamiques liés aux conditions météo-océaniques et des paramètres morfo-sédimentaires, Thèse de doctorat de l'Université de Bretagne Occidentale, 348p, <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00596426>.

CEPRI, 2009, Un logement "zéro dommage" face au risque d'inondation est-il possible [http://www.cepri.net/tl\\_files/pdf/ceprilogementzerodommage.pdf](http://www.cepri.net/tl_files/pdf/ceprilogementzerodommage.pdf)

CEPRI (2010), Le bâtiment face à l'inondation. Diagnostiquer et réduire sa vulnérabilité. Guide méthodologique. [http://www.cepri.net/tl\\_files/pdf/guidevulnerabilite.pdf](http://www.cepri.net/tl_files/pdf/guidevulnerabilite.pdf)

CEPRI, 2013. Évaluation des dommages liés aux inondations sur les logements, 80p, à paraître, <http://www.cepri.net/publications-et-documents.html>.

Clausen, L. K., 1989. Potential dam failure: estimation of consequences, and implications for planning. Unpublished Master of Philosophy thesis at the School of Geography and Planning, Middlesex Polytechnic collaborating with Binnie and Partners, Redhill.

Daci, H., 2012. Définition d'une méthode d'évaluation de la valeur du bâti exposé aux submersions marines et aux chocs de vagues lors des tempêtes côtières, mémoire de Master 2 de l'Université de Valenciennes, 48p.

Devaux, E., Désiré, G., Boura, C., Lowenbruck, J., Berenger, N., Rouxel, N. et Romain, N., 2012. La tempête Xynthia du 28 février 2010, retour d'expérience en Loire-Atlantique et Vendée, volet hydraulique et ouvrages de protection, 78 p, <http://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/le-retour-d-experience-de-la-a1792.html>.

DGUHC, 2002, Inondation : Guide de remise en état des bâtiments, collection « les outils ». [http://www2.logement.gouv.fr/publi/accesbat/doc\\_pdf/inondations\\_sept2002.pdf](http://www2.logement.gouv.fr/publi/accesbat/doc_pdf/inondations_sept2002.pdf)

FEMA .- « Flood-Resistant Materials Requirements for Buildings Located in Special Flood Hazard Areas in accordance with the National Flood Insurance Program », technical Bulletin 2-93 (<http://www.fema.gov/pdf/fimal/job4.pdf>)

FEMA, 2003. Multi-hazard loss estimation methodology, HAZUS-MH, user and technical manuals, Washington DC, <http://www.fema.gov/hazus>.

FFSA et GEMA, 2011. La tempête Xynthia du 28 février 2010 - bilan chiffré au 31 décembre 2010, 19p, <http://www.ffsa.fr/sites/upload/docs/application/pdf/2011-06/bilanxynthia28022011.pdf>.

Friedland, C. J., 2009. Residential building damage from hurricane storm surge: proposed methodologies to describe, assess and model building damage, Thèse de doctorat de l'Université de l'État de Louisiane, États-Unis, 198p, <http://etd.lsu.edu/docs/available/etd-04152009-092337>.

Fujita, T., 1971. Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity, Satellite and mesometeorology research project, Report 91, Université de Chicago, 42p.

Garcin, M., Desprats, J.-F., Fontaine, M., Pedreros, R., Attanayake, N., Fernando, S., Siriwardana, C. H. E. R., De Silva, U. et Poisson, B., 2008. Integrated approach for coastal hazards and risks in Sri Lanka, Natural Hazards and Earth System Sciences, 8, 577-586, <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-8-577-2008>.

Garcin M., Nicolae Lerma A., Pedreros R. avec la collaboration de F. Paris. (2012) – Evaluation de la submersion marine maximale à l'échelle régionale. Rapport final. BRGM/RP-62259-FR, p.97, fig.40, tabl.9, ann4.

Géos-AEL et DHI, 2008. Simulation de la tempête du 10 mars 2008 sur le site de la grande plage de Gâvres, rapport produit dans le cadre de la réalisation du PPRL de la commune, 13p + annexes.

Grossi, P. et Kunreuther, H., 2005. Catastrophe modeling, a new approach to managing risk, Springer, Huebner international series on risk, Insurance and economic security, 25, 252p.

Grünthal, G., 1998. European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98), Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, 15, Luxembourg, 99p.

Hubert, G. et Ledoux, B., 1999. Le coût du risque : l'évaluation des impacts socio-économiques des inondations, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 231p.

Kelman, I., 2002. Physical flood vulnerability of residential properties in coastal, eastern England, Thèse de doctorat de l'Université de Cambridge, Royaume-Uni, 311p, <http://www.ilankelman.org/phd.html>.

Lazure, P. et Dumas, F., 2008. An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS), Advances in Water Resources, 31, 2, 233-250, <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.06.010>.

Le Roy, S., André, C., Pedreros, R., Paris, F., Lecacheux, S. et Vinchon, C., in prep. Coastal flooding of urban areas by overtopping: dynamic modeling application to the Johanna storm (2008) in Gâvres (France).

Leone, F., Lavigne, F., Paris, R., Denain, J.-C. et Vinet, F., 2011. A spatial analysis of the December 26th, 2004 tsunami-induced damages: lessons learned for a better risk assessment integrating buildings vulnerability, Applied Geography, 31, 363-375, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.07.009>.

Marche, F., 2005. Theoretical and numerical study of shallow water models, Applications to nearshore hydrodynamics, Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux, 279p, <http://www.math.u-bordeaux.fr/~marche>.

Marche, F., Bonneton, P., Fabrie, P. et Seguin, N., 2007. Evaluation of well-balanced bore-capturing schemes for 2D wetting and drying processes, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 53, 5, 867-894, <http://dx.doi.org/10.1002/flid.1311>.

Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R. et Thielen, A., 2010. Review article « assessment of economic flood damage », Natural Hazards and Earth System Sciences, 10, 1697-1724, <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-10-1697-2010>.

MEDDE, 2012. Référentiel de travaux de prévention du risque inondation dans l'habitat existant, 91p, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Referentiel-de-travaux-de.html>

MEDDE/DGPR, 2013, Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux, 168p, [http://catalogue.prim.net/238\\_guide-methodologique-plan-de-prevention-des-risques-littoraux.html](http://catalogue.prim.net/238_guide-methodologique-plan-de-prevention-des-risques-littoraux.html)

Merz, B., Kreibich, H. et Lall, U., 2013. Multi-variate flood damage assessment: a tree-based data-mining approach, Natural Hazards and Earth System Sciences, 13, 53-64, <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-13-53-2013>.

METL, MATE, 1999, Plans de prévention des risques naturels (PPR). Risques d'inondation. Guide méthodologique ; La documentation Française, [http://catalogue.prim.net/238\\_guide-methodologique-plan-de-prevention-des-risques-littoraux.html](http://catalogue.prim.net/238_guide-methodologique-plan-de-prevention-des-risques-littoraux.html)

Meur-Férec, C., 2006. De la dynamique naturelle à la gestion intégrée de l'espace littoral : un itinéraire de géographe, Habilitation à diriger des recherches, Université de Nantes, 247p, <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00167784>.

Pedreras, R., Garcin, M., Krien, Y., Monfort, D., Mugica, J. et François, B., 2010. Tempête Xynthia : compte-rendu de mission préliminaire, rapport BRGM/RP-58261-FR, 43 p., <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-58261-FR.pdf>.

Penning-Rowsell, E., Chatterton, J., 1977. The benefits of flood alleviation: a manual of assessment techniques (The Blue Manual), Gower Technical Press, Saxon House, Aldershot, 297p.

Penning-Rowsell, E., Johnson, C., Tunstall, S., Tapsell, S., Morris, J., Chatterton, J., et Green, C., 2005. The benefits of flood and coastal risk management: a manual of assessment techniques (The Multi-Coloured Manual), Middlesex University Press, Londres, 238p.

Penning-Rowsell, E., Viavattene, C., Pardoe, J., Chatterton, J., Parker, D. et Morris, J., 2010. The benefits of flood and coastal risk management: a handbook of assessment techniques (The Multi-Coloured Handbook), Flood Hazard Research Centre, Londres, 90p.

Pistrika, A. K. et Jonkman, S. N., 2010. Damage to residential buildings due to flooding of New Orleans after hurricane Katrina, Natural Hazards, 54, 2, 413-434, <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-009-9476-y>.

Romieu, E. et Vinchon, C., 2009. Évaluation de la vulnérabilité de la zone côtière : état de l'art et analyse critique, rapport BRGM/RP-57389-FR, 199p, <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-57389-FR.pdf>.

Romieu, E., Welle, T., Schneiderbauer, S., Pelling, M. et Vinchon C., 2010. Vulnerability assessment within climate change and natural hazard contexts: revealing gaps and synergies through coastal applications, Sustainability Science, 5, 2, 159-170, <http://dx.doi.org/10.1007/s11625-010-0112-2>.

Salagnac J.L, 2006, Vulnérabilité des bâtiments à l'inondation, Qualification du comportement des matériaux –CSTB, <http://www.cstb.fr>

Schwarz, J. et Maiwald, H., 2008. Damage and loss prediction model based on the vulnerability of building types, 4th international symposium on flood defence: managing flood risk, reliability and vulnerability, 6-8 mai 2008, Toronto, Ontario, Canada.

Sedan, O., Terrier, M., Negulescu, C., Winter, T., Roullé, A., Douglas, J., Rohmer, J., Bes De Berc, S., De Martin, F., Arnal, C., Dewez, T. et Fontaine, M., 2008. Scénario départemental de risque sismique - méthodologie et processus de réalisation, rapport BRGM/RP-55415-FR, 456 p., <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-55415-FR.pdf>.

Sogreah, 2011. Éléments de mémoire sur la tempête Xynthia du 27 et 28 février 2010 en Charente-Maritime, <http://www.charente-maritime.pref.gouv.fr/Politiques-publiques/Environnement-risques-naturels-et-technologiques/Risques-naturels-et-technologiques/Generalites-sur-la-prevention-des-risques-naturels/Elements-de-memoire-Xynthia/Elements-de-memoire-sur-la-tempete-Xynthia-du-27-et-28-fevrier-2010>.

Torterotot, J.-P., 1993. Le coût des dommages dus aux inondations : estimation et analyse des incertitudes, Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 284p, <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00421862>.

Vinchon, C., Aubie, S., Balouin, Y., Closset, L., Garcin, M., Idier, D. et Mallet, C., 2009. Anticipate response of climate change on coastal risks at regional scale in Aquitaine and Languedoc Roussillon (France), *Ocean & Coastal Management*, 52, 47-56.

Vinchon, C., Hérivaux, C., Maton, L., Meur-Férec, C., Rey-Valette, H., Rulleau, B., Serrand, M., Grisel, M., Balouin, Y., Baron-Yelles, N., Flanquart, H., Garcin, M., Hellequin, A.-P., Lecacheux S. et Pedreros, R., in prep. Benefits of a trans-disciplinary approach to assess vulnerability of a territory to marine inundation, in a global change context. Case study on the coastal zone of Languedoc Roussillon (Southern France).



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**

**Direction Risque et Prévention**

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34